



## **ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΙΩΑΝΝΙΝΩΝ**

### **ΤΜΗΜΑ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ ΚΑΙ ΤΗΛΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΩΝ**

Πτυχιακή Εργασία

## **Συγκριτική μελέτη 5G και WiFi 6 για εφαρμογή στο Βιομηχανικό Διαδίκτυο των Πραγμάτων (IIoT)**

Ρίζος Θεόδωρος

A.M.: 15999 / 1742

Επιβλέπουσα Καθηγήτρια: Σπυριδούλα Μαργαρίτη

Άρτα, Σεπτέμβριος, 2022

# **Comparative study of 5G and Wi-Fi 6 for Industrial Internet of Things (IIoT) application**

**Εγκρίθηκε από τριμελή εξεταστική επιτροπή**

Άρτα, 28/09/2022

## **ΕΠΙΤΡΟΠΗ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗΣ**

1. Επιβλέπουσα καθηγήτρια

Μαργαρίτη Σπυριδούλα,

2. Μέλος επιτροπής

Στεργίου Ελευθέριος,

3. Μέλος επιτροπής

Λιαροκάπης Δημήτριος,

© Ρίζος, Θεόδωρος, 2022.

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

## **Δήλωση μη λογοκλοπής**

Δηλώνω υπεύθυνα και γνωρίζοντας τις κυρώσεις του Ν. 2121/1993 περί Πνευματικής Ιδιοκτησίας, ότι η παρούσα μεταπτυχιακή εργασία είναι εξ ολοκλήρου αποτέλεσμα δικής μου ερευνητικής εργασίας, δεν αποτελεί προϊόν αντιγραφής ούτε προέρχεται από ανάθεση σε τρίτους. Όλες οι πηγές που χρησιμοποιήθηκαν (κάθε είδους, μορφής και προέλευσης) για τη συγγραφή της περιλαμβάνονται στη βιβλιογραφία.

Ρίζος, Θεόδωρος

Υπογραφή

## **ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ**

Θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά την επιβλέπουσα καθηγήτριά μου, κα. Μαργαρίτη Σπυριδούλα για την πολύτιμη βοήθειά της κατά την εκπόνηση της πτυχιακής μου εργασίας, αλλά και για τις ευκαιρίες που μου δόθηκαν μέσα από τα μαθήματά της κατά την διάρκεια των προπτυχιακών μου σπουδών. Ακόμη, θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένειά μου, την κοπέλα μου και τους φίλους μου, που ήταν εκεί για εμένα και με στήριξαν στο ταξίδι των σπουδών μου.

## ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Τα τελευταία χρόνια, σπουδαία τεχνολογικά επιτεύγματα έχουν καταφέρει να οδηγήσουν σε αυτό που ονομάζεται 4<sup>η</sup> βιομηχανική επανάσταση. Ένα από αυτά είναι και το διαδίκτυο, που πολύ γρήγορα κατάφερε να διεισδύσει στις ζωές των ανθρώπων και να αλλάξει ριζικά την καθημερινότητα τους. Οι αμέτρητες δυνατότητες που προσφέρει, ευνοούν την επικοινωνία μεταξύ δυο άκρων και εκμηδενίζει τις αποστάσεις. Ο τεράστιος αριθμός των συσκευών, αλλά και η ανάγκη για πιο αυτοματοποιημένες εργασίες ήταν κάποιοι από τους λόγους εμφάνισης του IoT. Το διαδίκτυο των πραγμάτων εισάγει ένα πρωτοποριακό τρόπο επικοινωνίας και αποτελεσματικής αποστολής δεδομένων μεταξύ των συσκευών ενός δικτύου.

Η εκρηκτική δημοφιλία του IoT, σε συνδυασμό με το υψηλό οικονομικό αντίκτυπο που είχε στην παγκόσμια αγορά, αποτέλεσαν τα κίνητρα για την υιοθέτηση του, από βιομηχανικά περιβάλλοντα. Στα πλαίσια της παρούσας εργασίας μελετώνται οι απαιτήσεις, τα χαρακτηριστικά και οι ευκαιρίες που παρουσιάζονται στο βιομηχανικό διαδίκτυο των πραγμάτων. Ακόμη γίνεται λόγος για τις ασύρματες τεχνολογίες που χρησιμοποιούνται για την υλοποίηση IIoT συστημάτων. Δυο από τις πιο διαδεδομένες τεχνολογίες είναι το ασύρματο τοπικό δίκτυο Wi-Fi 6 και το κυψελωτό δίκτυο 5<sup>ης</sup> γενιάς, 5G. Τα δυο αυτά δίκτυα παρουσιάζονται και συγκρίνονται μεταξύ τους, ως προς τα τεχνικά χαρακτηριστικά, την αρχιτεκτονική, το κόστος υλοποίησης και την επεκτασιμότητα.

**Λέξεις-κλειδιά:** Βιομηχανικών Διαδίκτυο των Πραγμάτων (IIoT), 5G, Wi-Fi 6.

## **ABSTRACT**

In recent years, great technological achievements have managed to lead to what is called the 4<sup>th</sup> industrial revolution. One of those is the internet, which pretty quickly became a big part in people's lives and drastically change their daily routines. It offers unlimited potential, which helps the communication between two ends and basically eliminates the distance. The huge number of devices, combined with the need for automated routines were some of the reasons of the internet of things rollout. IoT brings an innovate way of communicating and sufficiently sending data in between devices of a network.

The explosive popularity of IoT, combined with the high economic value that it brings to the global market, became the motives for its adoption from industrial environments. With this thesis we will study the demands, the characteristics and the opportunities that appear in the industrial Internet of Things. Also, we will focus on wireless technologies that are used for applying IIoT systems. Two of the most recognized technologies are the wireless local network Wi-Fi 6 and the cellular 5G network. These two networks will be shown and be compared with each other, when it comes to specification, to the architectures, the development, cost and the scalability.

**Keywords:** Industrial Internet of Things (IIoT), 5G, Wi-Fi 6.



## ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩ

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ .....	6
ΠΕΡΙΛΗΨΗ .....	7
ABSTRACT .....	8
ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ .....	9
ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΩΝ/ΕΙΚΟΝΩΝ .....	11
1 Εισαγωγή .....	12
1.1 Κίνητρο και στόχος .....	12
1.2 Δομή εργασίας .....	13
2 Βιομηχανικό διαδίκτυο των πραγμάτων (Industrial Internet of Things, IIoT) .....	14
2.1 Ορισμοί.....	14
2.2 Consumer IoT ή Industrial IoT. ....	14
2.3 Βιομηχανικό διαδίκτυο των πραγμάτων (IIoT). ....	16
2.4 Τι είναι και πως λειτουργεί το IIoT.....	17
2.5 Αρχιτεκτονική και θεμελιώδη χαρακτηριστικά του IIoT. ....	21
2.6 Ζητήματα και προκλήσεις IIoT .....	23
2.6.1 Θέματα ασφάλειας IIoT.....	23
2.6.2 Στόχοι και προκλήσεις.....	26
2.7 Εφαρμογές του βιομηχανικού διαδικτύου των πραγμάτων. ....	29
2.7.1 Υγεία .....	30
2.7.2 Γεωργία.....	31
2.7.3 Αλυσίδα εφοδιασμού και μεταφορές (Supply-Chain and Logistics).....	32
2.7.4 2.6.4 Εξόρυξη (Mining). ....	33
2.8 Τεχνολογίες επικοινωνίας .....	34
2.8.1 Ασύρματη τεχνολογία (Wireless Technology).....	34
3 Ασύρματο δίκτυο Wi-Fi 6 (802.11ax) .....	36
3.1 Εισαγωγή στο πρότυπο 802.11 (Wi-Fi). ....	36
3.2 Αρχιτεκτονική Wi-Fi.....	38
3.3 Τεχνικά χαρακτηριστικά Wi-Fi 6.....	39
3.3.1 Πολλαπλή πρόσβαση με ορθογώνια διαίρεση συχνοτήτων (OFDMA). ....	40
3.3.2 Multiple-User, Multiple Input, Multiple Output (MU-MIMO).....	41

3.3.3	Διαμόρφωση δέσμης (Beamforming).....	42
3.3.4	Target Wake Time (TWT).....	43
3.3.5	Διαμόρφωση 1024-QAM.....	44
3.3.6	Wi-Fi Protected Access 3 (WPA3).....	46
3.3.7	Basic Service Sets (BSS) Coloring.....	47
3.3.8	Φάσμα 2.4GHz και 5GHz.....	47
3.4	Πλεονεκτήματα και Μειονεκτήματα Wi-Fi 6.....	49
3.5	Εμπειρία χρηστών IIoT στο Wi-Fi 6.....	50
3.6	Wi-Fi 6E.....	51
4	Κυψελωτό δίκτυο 5G.....	53
4.1	Εισαγωγή στο κυψελωτό δίκτυο 5G.....	53
4.2	Αρχιτεκτονική 5G.....	57
4.3	Τεχνικά χαρακτηριστικά 5G.....	59
4.3.1	Εύρος Ζώνης Συχνοτήτων, Ταχύτητα, Καθυστέρηση.....	59
4.3.2	Μικρό-κυψέλες (Small Cells).....	61
4.3.3	Massive MIMO, Beamforming.....	62
4.3.4	Ορθογώνια πολυπλεξία διαίρεση συχνότητας (OFDM).....	63
4.4	Θέματα ασφαλείας 5G.....	64
4.5	Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα 5G.....	65
4.6	Παραδείγματα 5G στο IIoT.....	66
5	Συγκριτική μελέτη των τεχνολογιών Wi-Fi 6 και 5G.....	68
5.1	Ανάλυση χαρακτηριστικών μεταξύ των τεχνολογιών Wi-Fi 6 και 5G.....	68
5.1.1	Τεχνικά χαρακτηριστικά Wi-Fi 6 και 5G.....	68
5.1.2	Επεκτασιμότητα δικτύων Wi-Fi 6 και 5G.....	72
5.1.3	Κόστος δικτύων και συσκευές Wi-Fi 6 και 5G.....	73
5.1.4	Αρχιτεκτονική δικτύων Wi-Fi 6 και 5G.....	74
5.1.5	Επιλογή καταλληλότερης τεχνολογίας ανάμεσα στο Wi-Fi 6 και το 5G.....	76
5.2	Βασικοί δείκτες απόδοσης (KPI).....	76
6	Σύνοψη.....	79
	ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	81

## ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΩΝ/ΕΙΚΟΝΩΝ

Εικόνα 1: Υποκατηγορίες του IoT .....	17
Εικόνα 2: Μερικές από τις τεχνολογίες της 4 <sup>ης</sup> βιομηχανικής επανάστασης. ....	18
Εικόνα 3: Βιομηχανικό διαδίκτυο των πραγμάτων.....	20
Εικόνα 4: Επίπεδα αρχιτεκτονικής IoT .....	22
Εικόνα 5: Πιθανές επιθέσεις στο IoT.....	24
Εικόνα 6: Προβλήματα-Αιτίες-Λύσεις .....	28
Εικόνα 7: Εφαρμογή IIoT στον τομέα της υγείας.....	30
Εικόνα 8: Εφαρμογή IIoT σε γεωργικό περιβάλλον .....	31
Εικόνα 9: Εφαρμογή IIoT σε αλυσίδες εφοδιασμού .....	32
Εικόνα 10: Εφαρμογή IIoT σε εργασίες βαρέων οχημάτων.....	33
Εικόνα 11: Εξέλιξη ασύρματων δικτύων .....	35
Εικόνα 12: Εξέλιξη των τεχνικών Wi-Fi σε κάθε γενιά .....	38
Εικόνα 13 Σύγκριση τεχνικών OFDM και OFDMA .....	40
Εικόνα 14: Σύγκριση τεχνικών SU-MIMO και MU-MIMO .....	42
Εικόνα 15: Σύγκριση τεχνικών με διαμόρφωση δέσμης και χωρίς.....	43
Εικόνα 16: Τεχνική TWT .....	44
Εικόνα 17: Διάγραμμα 16QAM .....	45
Εικόνα 18: Διαμορφώσεις 256QAM & 1024QAM.....	45
Εικόνα 19: Σύγκριση απόδοσης με και χωρίς τη χρήση BSS Coloring.....	47
Εικόνα 20: Ημιτονοειδές συχνοτήτων 2.4GHz και 5GHz.....	48
Εικόνα 21: Αποστάσεις κάλυψης των δυο συχνοτήτων .....	49
Εικόνα 22: Διαθέσιμα κανάλια.....	52
Εικόνα 23: Κυψελωτό δίκτυο. ....	53
Εικόνα 24: Εξέλιξη κυψελωτών δικτύων.....	56
Εικόνα 25: Radio Access Network .....	58
Εικόνα 26: Φάσμα 5G.....	60
Εικόνα 27 Κυψέλες και εύρος συχνοτήτων.....	62
Εικόνα 28: Εκπομπή με απλή κεραία και κεραία με Massive MIMO .....	63
Εικόνα 29: Γραφική αναπαράσταση απόδοσης των δυο τεχνολογιών .....	77
Εικόνα 30: Αποτελέσματα έρευνας.....	78
Εικόνα 31: Ποσοστά υιοθέτησης των δικτύων από διάφορες χώρες .....	78

# 1 Εισαγωγή

Η ταχύτατη εξέλιξη της τεχνολογίας έχει αλλάξει τα δεδομένα στον επιστημονικό κόσμο και έχει επιφέρει τεράστιες αλλαγές στην καθημερινότητα των ανθρώπων. Οι αυξημένες απαιτήσεις των χρηστών για απρόσκοπτη σύνδεση των αντικειμένων τους με το δίκτυο, από οπουδήποτε, οποιαδήποτε στιγμή και με ικανοποιητική ποιότητα υπηρεσιών, οδήγησαν στην γρήγορη ανάπτυξη του καταναλωτικού Internet of Things (IoT). Τα θετικά χαρακτηριστικά που διαθέτει το καταναλωτικό IoT δεν πέρασαν απαρατήρητα από τον τομέα των επιχειρήσεων. Γρήγορα κέντρισε το ενδιαφέρον του βιομηχανικού κλάδου και χρησιμοποιήθηκε με σκοπό να βοηθήσει την αύξηση της παραγωγικής διαδικασίας, ανεβάζοντας παράλληλα τα κέρδη των επιχειρήσεων με όσο το δυνατό μικρότερο κόστος. Το Βιομηχανικό Διαδίκτυο των Πραγμάτων (Industrial Internet of Things - IIoT) αποτελεί αναπόσπαστο κομμάτι της σημερινής βιομηχανίας. Σε αντίθεση με το καταναλωτικό IoT, που στοχεύει στην δημιουργία ενός φιλικού προς τον χρήστη περιβάλλον, το IIoT προσπαθεί να βελτιστοποιήσει την επικοινωνία των συσκευών με τα υπάρχοντα μηχανήματα. Με αυτόν τον τρόπο, προσφέρει μια πιο αποδοτική παραγωγή. Το οικονομικό αντίκτυπο είναι σίγουρα πολύ μεγαλύτερο από το καταναλωτικό, για αυτό και άλλωστε θεωρείται το “next big thing” στις βιομηχανίες.

Οι δυνατότητες που προσφέρει το βιομηχανικό διαδίκτυο των πραγμάτων ανήκουν σε αυτό που ονομάζουμε 4<sup>η</sup> βιομηχανική επανάσταση. Προκειμένου να καταφέρει να υλοποιηθεί σωστά και να προσεγγίσει τις προσδοκίες, το IIoT χρειάζεται την υποστήριξη από κατάλληλα δίκτυα. Δεδομένου ότι τα ασύρματα δίκτυα Wireless Local Area Networks (WLAN), Wireless Metropolitan Area Networks (WMAN) και Wireless Wide Area Networks (WWAN) είναι συνήθως πιο εύκολα και πιο γρήγορα στην υλοποίηση από τα αντίστοιχα ενσύρματα, καθίστανται ιδανικά για IIoT εφαρμογές. Διο από τις νεότερες ασύρματες τεχνολογίες δικτύων με εκρηκτική δημοτικότητα θεωρούνται το ασύρματο τοπικό δίκτυο Wi-Fi 6 και το κυψελωτό δίκτυο 5G. Και οι δυο ενεργοποιούν νέες δυνατότητες, όπως: οι υψηλότερες ταχύτητες, η υποστήριξη μεγάλου όγκου συσκευών στα δίκτυα τους και η ικανοποιητική ποιότητα υπηρεσιών. Σε κάθε περίπτωση, όμως, δίνουν και ιδιαίτερη προσοχή στην ασφάλεια, η οποία αποτελεί και βασικό μέλημα για τις IIoT συσκευές.

## 1.1 Κίνητρο και στόχος

Οι βιομηχανίες αποτελούν μια από τις σημαντικότερες πηγές εσόδων όλων των κρατών. Καθημερινά δαπανούνται τεράστια ποσά, με στόχο να βρεθούν αυτοματοποιημένες λύσεις που θα βελτιώσουν την παραγωγική διαδικασία και θα ελαχιστοποιήσουν τις απώλειες, μεγιστοποιώντας ταυτόχρονα τα συνολικά κέρδη. Στην προσπάθεια αυτή, πολλά βιομηχανικά περιβάλλοντα έχουν αντικαταστήσει τις παραδοσιακές μηχανές με διασυνδεδεμένες συσκευές, ευνοώντας έτσι την ανάπτυξη IIoT συστημάτων. Η στροφή των βιομηχανιών προς αυτή την κατεύθυνση, ανοίγει τον

δρόμο σε νέες τεχνολογίες να αναπτυχθούν σε πολύπλοκα περιβάλλοντα, όπως τα βιομηχανικά και να δοκιμαστούν κάτω από δύσκολες συνθήκες. Έτσι, ο στόχος αυτής της εργασίας είναι να εξεταστούν όλα τα χαρακτηριστικά αλλά και οι αρχιτεκτονικές των ασύρματων δικτύων 5G και Wi-Fi 6 και μέσα από την μεταξύ τους σύγκριση να επιλεγεί η καταλληλότερη τεχνολογία για την ανάπτυξη IIoT συστημάτων.

## 1.2 Δομή εργασίας

Με βάση, λοιπόν, τα παραπάνω, η πτυχιακή αυτή μελετά στο δεύτερο κεφάλαιο το βιομηχανικό διαδίκτυο των πραγμάτων. Συγκεκριμένα, γίνεται μια μικρή εισαγωγή για το τί είναι, πώς λειτουργεί και με ποιον τρόπο φτάσαμε στο IIoT, την αρχιτεκτονική και τα θεμελιώδη χαρακτηριστικά που το προσδιορίζουν και τη σύγκρισή του με το καταναλωτικό IoT. Ακόμη, παρουσιάζονται τα προβλήματα ασφαλείας αλλά και οι εφαρμογές του σε διάφορους τομείς όπως η υγεία και η γεωργία. Τέλος, εξηγείται σε μια σύντομη αναφορά η ασύρματη τεχνολογία.

Στο τρίτο κεφάλαιο παρουσιάζεται το ασύρματο τοπικό δίκτυο Wi-Fi 6. Στην αρχή γίνεται μια ιστορική αναδρομή για την προέλευσή του, την αρχιτεκτονική που βασίζεται το δίκτυο και τα διάφορα τεχνικά χαρακτηριστικά που διαθέτει. Στη συνέχεια, παρατίθεται η νεότερη έκδοση του προτύπου 802.11ax, τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματά του, όπως και οι λόγοι χρήσης του στα βιομηχανικά περιβάλλοντα.

Στο τέταρτο κεφάλαιο, όπως ακριβώς και στο προηγούμενο αναλύονται τα δίκτυα 5<sup>ης</sup> γενιάς. Αναλυτικά, το κεφάλαιο αρχίζει με την εξιστόρηση της εξέλιξης από το 1G μέχρι και το σημερινό 5G και προχωρά με την εμβάθυνση στην αρχιτεκτονική και τα τεχνικά χαρακτηριστικά. Παρουσιάζονται, ακόμη, τα διάφορα θέματα ασφαλείας του 5G, τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα, όπως επίσης και μερικά παραδείγματα εφαρμογής του σε πραγματικές συνθήκες.

Στο πέμπτο κεφάλαιο οι δυο τεχνολογίες συγκρίνονται μεταξύ τους σε επίπεδο τεχνικών χαρακτηριστικών, κόστους και αρχιτεκτονικής. Ακόμη, παρουσιάζονται σε γραφήματα οι βασικοί δείκτες απόδοσης των δυο δικτύων και επιλέγεται η καλύτερη τεχνολογία. Στο έκτο και τελευταίο κεφάλαιο αναφέρονται τα συμπεράσματα της πτυχιακής εργασίας.

## 2 Βιομηχανικό διαδίκτυο των πραγμάτων (Industrial Internet of Things, IIoT)

### 2.1 Ορισμοί

Παρόλου που το διαδίκτυο των πραγμάτων βρίσκεται στο επίκεντρο πάρα πολλά χρόνια, οι επιστημονική κοινότητα δεν έχει καταλήξει σε ένα ενιαίο ορισμό. Αντ' αυτού υπάρχουν πολυάριθμοι ορισμοί που περιγράφουν ή προωθούν μια συγκεκριμένη άποψη για το τι είναι πραγματικά το IoT. Ένας από αυτούς ορίζει το διαδίκτυο των πραγμάτων ως μια ομάδα υποδομών που συνδέει διασυνδεδεμένους κόμβους και επιτρέπει την διαχείριση τους, την εξαγωγή δεδομένων και την πρόσβαση σε αυτά. Οι διασυνδεδεμένοι κόμβοι αποτελούν τα «αντικείμενα» του δικτύου όπως αισθητήρες ή άλλες συσκευές που εκτελούν μια συγκεκριμένη λειτουργία. Έτσι με βάση τα παραπάνω, ένας ορισμός για το βιομηχανικό διαδίκτυο των πραγμάτων θα μπορούσε να είναι, η χρήση ορισμένων τεχνολογιών IoT για συγκεκριμένες έξυπνες συσκευές, εντός των φυσικών συστημάτων στον κυβερνοχώρο, σε βιομηχανικό περιβάλλον [57].

### 2.2 Consumer IoT ή Industrial IoT.

Δεν υπάρχει αμφιβολία για την εκρηκτική δημοτικότητα και τον τρόπο λειτουργίας του Internet of Things σε όλους τους τομείς. Από μικρές συσκευές, μέχρι πολύπλοκες βιομηχανικές εφαρμογές το διαδίκτυο των πραγμάτων αλλάζει τον τρόπο λειτουργίας όλου του κόσμου. Το σύστημα του IoT μπορεί να αναλυθεί σε διάφορα υποσύνολα. Δυο από τα μεγαλύτερα είναι το καταναλωτικό IoT που για πολλούς έχει άμεσα ταυτιστεί σαν το ίδιο το Internet of Things και το βιομηχανικό IoT [14]. Ενώ και τα δύο μοιράζονται βασικές ομοιότητες εξ ορισμού, υπάρχουν σημαντικές διαφορές ως προς τον τρόπο λειτουργίας με τον οποίο εφαρμόζεται ένα δίκτυο καταναλωτή έναντι του βιομηχανικού IoT δικτύου στον πραγματικό κόσμο. Πολλές από αυτές τις διαφορές έχουν να κάνουν με τα απαιτητικά και πολύπλοκα περιβάλλοντα που δύσκολα συναντούν οι καταναλωτικές συσκευές, τα πρωτόκολλα επικοινωνίας που χρησιμοποιούν, καθώς και άλλα λειτουργικά θέματα όπως, παραδείγματος χάριν, η ασφάλεια [15].

Καταναλωτής θεωρείται κάποιος που αγοράζει αγαθά ή υπηρεσίες για προσωπική του χρήση. Επομένως, το καταναλωτικό διαδίκτυο των πραγμάτων επικεντρώνεται σε μεμονωμένους χρήστες ή μια ομάδα χρηστών με στόχο να βελτιώσει και να αυτοματοποιήσει την ποιότητα ζωής τους, μέσα από τη διασύνδεση των συσκευών σε ένα φιλικό προς τον χρήστη περιβάλλον. Το καταναλωτικό δίκτυο IoT θεωρείται επανάσταση και αυτό διότι έχει καταφέρει να αλλάξει ριζικά την ζωή των ανθρώπων. Εστιάζει σε ένα ευρύ φάσμα τομέων και χρηστών και για τον λόγο αυτόν τείνει να έχει πιο γενικές εφαρμογές. Επειδή στοχεύει στην αύξηση της αποδοτικότητας, τη βελτίωση της υγείας και τη δημιουργία νέων εμπειριών για τους χρήστες του, θεωρείται ανθρωποκεντρικού χαρακτήρα δίκτυο. Συνήθως, απαρτίζεται από ένα μικρό αριθμό

συσκευών, με την καθεμία από αυτές να έχει περιορισμένη διάρκεια ζωής ορισμένων ετών. Τέτοιες συσκευές μπορεί να είναι από έξυπνα ρολόγια μέχρι και έξυπνοι αισθητήρες [15].

Καθώς ο κίνδυνος αστοχίας, αν και χαμηλός, είναι υπαρκτός, οι καταναλωτικές συσκευές IoT χρησιμοποιούνται σε εφαρμογές μικρής κλίμακας, όπου υπάρχει ανεκτικό περιθώριο λάθους. Δεδομένου ότι οι καταναλωτικές έξυπνες συσκευές συχνά λειτουργούν ανεξάρτητα, δεν χρειάζεται να είναι συμβατές με παλαιού τύπου συστήματα. Αυτό εξάλλου φαίνεται και στις σχετικά φθηνές τιμές τους. Τέλος, οι συσκευές του καταναλωτικού IoT χρησιμοποιούν πρωτόκολλα μικρής εμβέλειας, όπως το Wi-Fi και το ZigBee για να διευκολύνουν την συνδεσιμότητα τους με το διαδίκτυο και να παρέχουν τις λειτουργίες τους στους χρήστες [1],**Σφάλμα! Το αρχείο προέλευσης της αναφοράς δεν βρέθηκε.**,[14],[16].

Από την άλλη πλευρά, το βιομηχανικό διαδίκτυο των πραγμάτων θεωρείται περισσότερο εξέλιξη παρά επανάσταση και αυτό διότι έχει ως στόχο την ενίσχυση των υφιστάμενων βιομηχανικών συστημάτων, καθιστώντας τα, με αυτόν τον τρόπο, πιο παραγωγικά και αποδοτικά. Η αγορά στην οποία εστιάζει το IIoT είναι σαφώς μικρότερη από το καταναλωτικό διαδίκτυο των πραγμάτων και αφορά κυρίως βιομηχανικούς τομείς. Σε αντίθεση με το καταναλωτικό IoT, το IIoT στοχεύει στην παραγωγικότητα, την υψηλή απόδοση και την αυτοματοποίηση των υπάρχοντων βιομηχανικών συστημάτων. Επίσης, περιλαμβάνει συνδέσεις από εκατοντάδες (ή και χιλιάδες) σημεία δεδομένων, όπως συσκευές και αισθητήρες για την υποστήριξη λειτουργιών του ακριβούς βιομηχανικού εξοπλισμού με διάρκεια ζωής αρκετές δεκαετίες [15]. Επειδή τα βιομηχανικά περιβάλλοντα είναι περίπλοκα και αρκετά απαιτητικά το IIoT χρησιμοποιεί συσκευές και αισθητήρες που μπορούν να αντέξουν σε ακραίες περιβαλλοντικές συνθήκες, όπως για παράδειγμα η έκθεση τους σε υψηλές θερμοκρασίες, υγρασία και μεγάλη πίεση. Ακόμη, χρησιμοποιεί πολύπλοκα συστήματα για την παρακολούθηση συσκευών που είναι τοποθετημένες σε μια μεγάλη ακτίνα μεταξύ τους, καθώς και αισθητήρες για να αντικαταστήσει την ανθρώπινη παρέμβαση σε δύσκολες εφαρμογές.

Μεγάλο στοίχημα για τα IIoT συστήματα αποτελεί η αστοχία υλικού. Η λειτουργικότητα των συστημάτων αυτών είναι κρίσιμη και χρειάζεται να μηδενιστεί κάθε πιθανότητα λάθους, γεγονός το οποίο είναι ζωτικής σημασίας για τις βιομηχανίες. Καθώς το IIoT έχει εστιάσει στην M2M επικοινωνία, μπορεί να χαρακτηριστεί ως μηχανοκεντρικό σύστημα, διότι προσπαθεί να εξαλείψει τον ανθρώπινο παράγοντα από κάθε δυνατή εφαρμογή, επιτυγχάνοντας τη βέλτιστη λειτουργία, χωρίς λάθη, και τη συλλογή δεδομένων σε πραγματικό χρόνο. Σημαντικό χαρακτηριστικό είναι, ακόμη, το ότι οι συσκευές στο βιομηχανικό διαδίκτυο των πραγμάτων είναι συμβατές και με συσκευές παλαιού τύπου που βρίσκονται ήδη εγκατεστημένες σε βιομηχανικά περιβάλλοντα. Τέλος, διαθέτουν υψηλότερα πρότυπα σε θέματα κυβερνοασφάλειας, διότι οι επιπτώσεις μιας επίθεσης σε ένα βιομηχανικό περιβάλλον είναι αρκετά σοβαρές

και έχουν οικονομικό αντίκτυπο για τη βιομηχανία. Όσον αφορά τις ασύρματες συνδέσεις τους, τα IIoT δίκτυα χρησιμοποιούν Low Power WAN, WiMAX Industrial WLAN και Industrial Mesh Networks [1],**Σφάλμα! Το αρχείο προέλευσης της αναφοράς δεν βρέθηκε.**,[14],[16].

Πίνακας 1: Διαφορές καταναλωτικού και βιομηχανικού IoT

Καταναλωτικό IoT	Βιομηχανικό IoT
Επανάσταση	Εξέλιξη
Ανθρωποκεντρικό μοντέλο	Μηχανοκεντρικό μοντέλο
Διασύνδεση συσκευών	Αυτοματοποίηση των υφιστάμενων μηχανημάτων
Μεγάλη γκάμα πελατών	Μικρότερο αγοραστικό κοινό
Μικρό αριθμός συσκευών ανά δίκτυο με διάρκεια ζωής κάποια χρόνια	Τεράστιος αριθμός συσκευών με διάρκεια ζωής κάποιες δεκαετίες
Δεν απαιτείται συμβατότητα με παλιές συσκευές	Συμβατότητα με παλιές συσκευές
Ανεκτικότητα σε λάθη	Μηδενικό περιθώριο λάθους
Συσκευές άμεσα συνδεδεμένες στο διαδίκτυο	Εσωτερική διασύνδεση και επικοινωνία των συσκευών πριν βγουν στο cloud

### 2.3 Βιομηχανικό διαδίκτυο των πραγμάτων (IIoT).

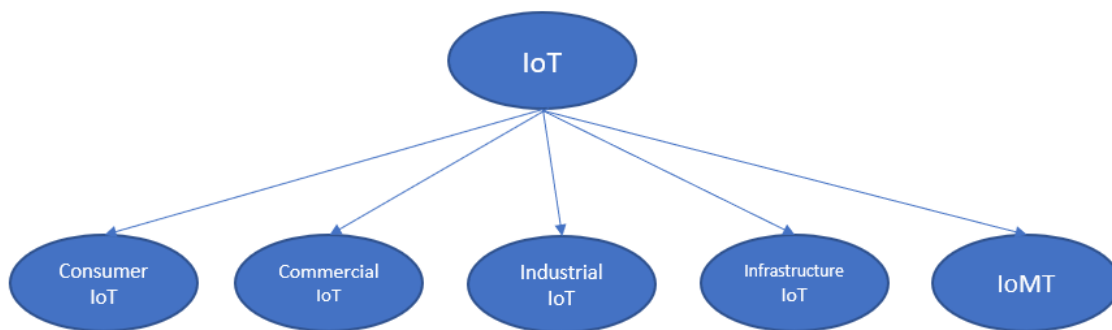
Στη σύγχρονη εποχή που διανύουμε, η τεχνολογία αναπτύσσεται με ραγδαίους ρυθμούς και όπως είναι λογικό, αυτό έχει επιφέρει την εξέλιξη πολλών τεχνολογικών επιτευγμάτων. Μια τέτοια σπουδαία τεχνολογική πρόοδος θεωρείται και το γνωστό σε όλους διαδίκτυο ή αλλιώς Internet. Το διαδίκτυο αποτελεί αναπόσπαστο κομμάτι της καθημερινότητας του σύγχρονου ανθρώπου και αυτό διότι ικανοποιεί τις περισσότερες από τις καθημερινές του ανάγκες. Έτσι, από την άνεση του σπιτιού του κάποιος μπορεί να ψυχαγωγηθεί, να εργαστεί, ακόμη και να κάνει online αγορές με το πάτημα ενός κουμπιού. Ωστόσο, αυτό δεν αποτέλεσε σημείο εφησυχασμού για τους ανθρώπους που αναζητούν συνεχώς τρόπους να δημιουργήσουν πιο αυτοματοποιημένες λύσεις ώστε να βελτιώσουν τις συνθήκες διαβίωσής τους. Με την πάροδο του χρόνου, λοιπόν, έκανε την εμφάνισή του στο χώρο, το διαδίκτυο των πραγμάτων (Internet of Things - IoT).

Το IoT είναι ένα πρωτοποριακό σύστημα επικοινωνίας μεταξύ διασυνδεδεμένων έξυπνων συσκευών. Είναι έννοια της πληροφορικής που περιγράφει ένα μέλλον όπου όλα τα αντικείμενα της καθημερινότητας ενός ανθρώπου θα είναι συνδεδεμένα στο



διαδίκτυο. Οι συσκευές έχουν τη δυνατότητα ασύρματης ή ενσύρματης σύνδεσης, με τη κάθε μια να προσδιορίζεται από μια μοναδική IP διεύθυνση. Συγκεκριμένα χρησιμοποιούνται συσκευές με ενσωματωμένους αισθητήρες για την συλλογή δεδομένων και την άμεση λήψη αποφάσεων σε πραγματικό χρόνο. Η αυξανόμενη ζήτηση του IoT, έχει οδηγήσει στο πολλαπλασιασμό των έξυπνων συσκευών που χρησιμοποιούνται ανά δίκτυο. Οι συσκευές αποτελούν απαραίτητα δομικά στοιχεία για την υλοποίηση του δικτύου καθώς έχουν τη δυνατότητα να επικοινωνούν μεταξύ τους προκειμένου να ανταλλάσσουν δεδομένα αυτόνομα, χωρίς την ενέργεια από ανθρώπινο παράγοντα. Συνήθως κυμαίνονται από μικρούς αισθητήρες μέχρι πολύπλοκους ελεγκτές και έξυπνες συσκευές. Όσον αφορά το κόστος και τα χαρακτηριστικά τους, ποικίλουν ανάλογα τη χρήση [1].

Το IoT μπορεί να χωριστεί σε διάφορες κατηγορίες, δυο εξ αυτών είναι το διαδίκτυο των πραγμάτων του καταναλωτή (Consumer IoT) και το βιομηχανικό διαδίκτυο των πραγμάτων (Industrial IoT) όπως φαίνεται και στην Εικόνα 1 παρακάτω **Σφάλμα! Το αρχείο προέλευσης της αναφοράς δεν βρέθηκε..** Στη περίπτωση του Consumer IoT περιλαμβάνονται συσκευές που χρησιμοποιούν πρωτόκολλα μικρής εμβέλειας ώστε να διευκολύνουν τη συνδεσιμότητα σε μικρούς χώρους. Τέτοιες συσκευές μπορεί να είναι ένα smartwatch ή μια έξυπνη οικιακή βοηθός. Αντίθετα, το Industrial IoT έχει ως στόχο την ενίσχυση υφιστάμενων βιομηχανικών συστημάτων, καθιστώντας τα, έτσι, πιο παραγωγικά και αποδοτικά. Το IIoT έχει εφαρμογή συνήθως σε κρίσιμους τομείς της βιομηχανίας και χρησιμοποιεί συσκευές μεγαλύτερης κλίμακας **Σφάλμα! Το αρχείο προέλευσης της αναφοράς δεν βρέθηκε..**[9].

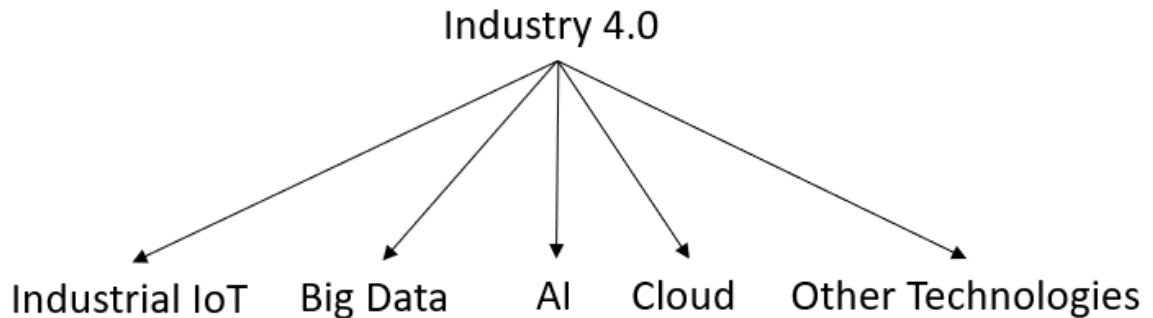


Εικόνα 1: Υποκατηγορίες του IoT

## 2.4 Τι είναι και πως λειτουργεί το IIoT.

Η μετάβαση από τα παραδοσιακά μηχανήματα στις διασυνδεδεμένες συσκευές ονομάζεται τέταρτη βιομηχανική επανάσταση ή Industry 4.0. Το Industry 4.0 αναφέρεται στη τρέχουσα τάση όπου οι εταιρίες κατασκευάζουν, βελτιώνουν και διανέμουν τα προϊόντα τους μέσω αυτοματοποιημένων διαδικασιών. Στη τέταρτη βιομηχανική επανάσταση όπως φαίνεται και στην Εικόνα 2, ενσωματώνονται νέες τεχνολογίες,

συμπεριλαμβανομένου του υπολογιστικού νέφους (Cloud Computing), του Internet of Things και της μηχανικής μάθησης (Machine learning) με τη βοήθεια της τεχνητής νοημοσύνης (Artificial Intelligence - AI). Το Industry 4.0 θεωρείται περισσότερο τεχνολογική λύση παρά επανάσταση και αυτό διότι αποτελείται από πολλές τεχνολογίες με σημαντικό αντίκτυπο στις βιομηχανίες, καθώς και στο κόσμο ως σύνολο. Μια από αυτές τις τεχνολογίες είναι και το βιομηχανικό διαδίκτυο των πραγμάτων (όπως είναι η ελληνική ονομασία του Industrial Internet of Things, IIoT) [6]. Το IIoT αποτελεί απαραίτητο τεχνικό θεμέλιο για την εξέλιξη της βιομηχανικής νοημοσύνης και στόχοι του είναι τόσο η αύξηση της παραγωγικής διαδικασίας και η ελαχιστοποίηση του περιθωρίου λάθους από ανθρώπινο παράγοντα όσο και η πρόβλεψη μελλοντικών αστοχιών στα μηχανήματα παραγωγής. Οι παραπάνω στόχοι επιτυγχάνονται με αποτελεσματικό τρόπο, χάρις την ευφυή διασύνδεση του εξοπλισμού με το βιομηχανικό περιβάλλον, την επεξεργασία δεδομένων και τις δυνατότητες μετάδοσης αυτών σε πραγματικό χρόνο **Σφάλμα! Το αρχείο προέλευσης της αναφοράς δεν βρέθηκε..**



Εικόνα 2: Μερικές από τις τεχνολογίες της 4<sup>ης</sup> βιομηχανικής επανάστασης.

Αυτό που κάνει ξεχωριστό το IIoT είναι ο συνδυασμός της τεχνολογίας πληροφοριών (Information Technology - IT) και της επιχειρησιακής τεχνολογίας (Operational Technology - OT). Η επιχειρησιακή τεχνολογία, αναφέρεται στη δικτύωση των λειτουργικών διαδικασιών και βιομηχανικών συστημάτων ελέγχου (Industrial Control Systems - ICSs), όπως το σύστημα εποπτικού ελέγχου και συλλογής δεδομένων (Supervisory Control and Data Acquisition - SCADA) και ο προγραμματιζόμενος λογικός ελεγκτής (Programmable Logic Controllers - PLC). Το SCADA είναι ένα σύστημα ελέγχου που επιτρέπει την εξ αποστάσεως παρακολούθηση και την πραγματοποίηση αλλαγών στις ρυθμίσεις απομακρυσμένων ελεγκτών [22]. Ακόμη, οι συσκευές που χρησιμοποιούνται σε ένα βιομηχανικό IoT πρέπει να πληρούν κάποια πρότυπα συνδεσιμότητας. Κάποια από αυτά τα πρότυπα είναι η συχνότητα λειτουργίας, η διάρκεια ζωής της μπαταρίας, η μέγιστη κάλυψη του δικτύου, η ασφάλεια η καθυστέρηση και ο μέγιστος ρυθμός μετάδοσης των δεδομένων [12].

Το IIoT αποτελεί επέκταση του Internet of Things στο βιομηχανικό τομέα και αυτό διότι χρησιμοποιεί ένα σύνολο από διασυνδεδεμένες έξυπνες συσκευές και μια

πλατφόρμα διαχείρισης των δεδομένων που απαιτεί σχεδόν μηδενική ανθρώπινη παρέμβαση για τις λειτουργίες. Οι συσκευές μπορούν να είναι ενσύρματες ή ασύρματες και δομούνται από αισθητήρες ή ενεργοποιητές για τη βελτίωση της παραγωγής και των βιομηχανικών διαδικασιών. Οι συσκευές αυτές καλούνται έξυπνες, καθώς μπορούν να συλλέγουν, να ανταλλάσσουν και να αναλύουν δεδομένα σε πραγματικό χρόνο χωρίς να μεσολαβεί ο ανθρώπινος παράγοντας. Η γενικότερη φιλοσοφία πίσω από το IIoT υποστηρίζει πως οι έξυπνες συσκευές, όχι μόνο είναι καλύτερες από τους ανθρώπους στη συλλογή και ανάλυση δεδομένων σε πραγματικό χρόνο, αλλά επίσης είναι καλύτερες στην ανταλλαγή σημαντικών πληροφοριών που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την λήψη επιχειρηματικών αποφάσεων, ταχύτερα και με μεγαλύτερη ακρίβεια [8]. Έτσι, το IIoT αξιοποιεί την δύναμη των αισθητήρων και των ενεργοποιητών, σε συνδυασμό με τη συλλογή και την ανάλυση δεδομένων σε πραγματικό χρόνο και μπορεί να εκμεταλλευτεί τα δεδομένα που παράγουν οι μηχανές, ώστε να ληφθούν γρήγορες και ορθές αποφάσεις μειώνοντας την πιθανότητα οικονομικής επιβάρυνσης ή παραγωγικής απώλειας στον βιομηχανικό κλάδο.

Αν και το βιομηχανικό διαδίκτυο των πραγμάτων αναπτύσσεται πιο αργά σε σχέση με το καταναλωτικό IoT, έχει τελικά πολύ μεγαλύτερο αντίκτυπο στην οικονομία. Φέρει εξ ολοκλήρου νέες υποδομές για κρίσιμα συστήματα και δίνει την ευκαιρία να κατασκευαστούν έξυπνες κατανεμημένες μηχανές, που βελτιώνουν σημαντικά τη λειτουργία και την αποτελεσματικότητα σχεδόν σε όλους τους κλάδους. Το IIoT αποτελεί στρατηγικό μέλλον για τις περισσότερες σύγχρονες μεγάλες εταιρίες, αλλά και για τις παραδοσιακές βιομηχανίες **Σφάλμα! Το αρχείο προέλευσης της αναφοράς δεν βρέθηκε..** Είναι το κλειδί για σημαντικές λειτουργίες όπως η πρόγνωση και συντήρηση των μηχανημάτων, η ενεργειακή διαχείριση του χώρου, καθώς και η παρακολούθηση των κατασκευών. Παρέχει τεράστιες δυνατότητες όσον αφορά τον ποιοτικό έλεγχο, τις βιώσιμες και πράσινες ενέργειες, την ιχνηλασιμότητα της αλυσίδας εφοδιασμού και την συνολική της αποτελεσματικότητα [8]. Επιπλέον, βρίσκει εφαρμογή σε πολλούς τομείς, όπως η ενέργεια, τα εργοστάσια, η γεωργία, η ασφάλεια, η υγεία, οι έξυπνες πόλεις κ.ά. Όλες αυτές οι εφαρμογές ακολουθούν ένα βασικό μοντέλο το οποίο είναι ένας μεγάλος αριθμός έξυπνων συσκευών διασυνδεδεμένες μεταξύ τους που συνεργάζονται για έναν κοινό σκοπό, τη δημιουργία ενός στρατηγικού περιβάλλοντος στη βιομηχανία του μέλλοντος, με στόχο την ευελιξία, την αύξηση της παραγωγικότητας, και τη μείωση του κόστους της.

Η ανάπτυξη εκατομμυρίων έξυπνων συσκευών ικανών να αντιλαμβάνονται το περιβάλλον, να επεξεργάζονται και να μεταδίδουν τα δεδομένα που έχουν συλλέξει ανατροφοδοτώντας τα πίσω στο περιβάλλον, αλλά και η βελτιωμένη συμβατότητα των συσκευών αυτών με τα παλιά μηχανήματα καθώς και η ασφάλεια στις σύγχρονες βιομηχανίες, ευνοούν την αλληλεπίδραση μεταξύ φυσικού και ψηφιακού κόσμου. Το IIoT καλύπτει τους τομείς της σύγχρονης επικοινωνίας μηχανής με μηχανή (machine-to-machine - M2M) και τις βιομηχανικές εφαρμογές που οδηγούν προς τον αυτοματισμό.

Τα IIoT συστήματα παρέχουν μεγάλη ευελιξία και επεκτασιμότητα μέσω των ασύρματων συνδέσεων. Συνήθως, οι εφαρμογές IIoT απαιτούν σχετικά μικρή ρυθμοαπόδοση ανά κόμβο και η χωρητικότητά τους δεν αποτελεί κύριο μέλημα. Από την άλλη, όμως, υπάρχει ανάγκη για σύνδεση μεγάλου αριθμού συσκευών στο διαδίκτυο, έχοντας χαμηλό κόστος, μικρές καθυστερήσεις, ελάχιστες ενεργειακές απαιτήσεις και υψηλή αξιοπιστία ως επιθυμητά χαρακτηριστικά για κάθε δίκτυο **Σφάλμα! Το αρχείο προέλευσης της αναφοράς δεν βρέθηκε..**

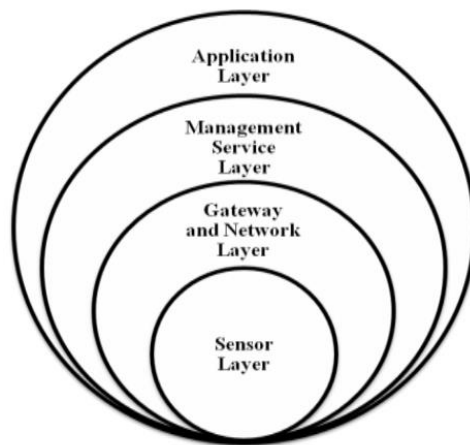
Η επικοινωνία των συσκευών στο IIoT είναι προσανατολισμένη στη μηχανή και μπορεί να καλύπτει ένα ευρύ φάσμα σε διαφορετικούς τομείς και δραστηριότητες στην αγορά. Τα IIoT σενάρια περιλαμβάνουν εφαρμογές παλαιού τύπου, όπως η παρακολούθηση εργασιών αλλά και καινοτόμες προσεγγίσεις για αυτόνομα συστήματα, όπως οι βιομηχανικές εγκαταστάσεις που απαιτούν σχεδόν μηδενική ανθρώπινη παρέμβαση. Σε σχέση με το καταναλωτικό IoT που εστιάζει κυρίως στη διασύνδεση των συσκευών μέσα σε ένα οικιακό δίκτυο, με φιλικό προς τον χρήστη περιβάλλον, το IIoT δίνει περισσότερη έμφαση στο τρόπο επικοινωνίας των έξυπνων συσκευών με τα μηχανήματα, προσφέροντας, με αυτόν τον τρόπο, μια πιο αποδοτική παραγωγή και νέες υπηρεσίες στον τομέα της αγοράς. Για το λόγο αυτό, το IIoT θεωρείται περισσότερο εξέλιξη του IoT παρά επανάσταση.

Επειδή στο βιομηχανικό διαδίκτυο των πραγμάτων η επικοινωνία είναι M2M, δηλαδή οι συσκευές επικοινωνούν μεταξύ τους μέσω κάποιου ασύρματου ή ενσύρματου καναλιού επικοινωνίας χωρίς την παρέμβαση ανθρώπου για ανταλλαγή πληροφοριών και ανάληψη ενεργειών, χρειάζεται να ικανοποιούνται αυστηρά οι απαιτήσεις για αξιοπιστία και συγχρονισμό. Σε σχέση, επίσης, με το καταναλωτικό διαδίκτυο των πραγμάτων, το IIoT έχει να διαχειριστεί, να αποθηκεύσει και να εξετάσει έναν τεράστιο όγκο δεδομένων, διότι η κρισιμότητα για την λήψη σωστών αποφάσεων σε πραγματικό χρόνο, αποτελεί κύριο μέλημά του **Σφάλμα! Το αρχείο προέλευσης της αναφοράς δεν βρέθηκε..**



συγκεντρωθούν και διαχωριστούν τα χρήσιμα δεδομένα από τις γενικές πληροφορίες, στέλνονται στο cloud. Με αυτό τον τρόπο μειώνεται ο όγκος των δεδομένων που βγαίνει στο Internet, αλλά δημιουργείται και μια αυτόματη γραμμή αντιμετώπισης παρόμοιων προβλημάτων που μπορεί να δημιουργηθούν στο μέλλον.

Το τελευταίο επίπεδο στην αρχιτεκτονική του IIoT είναι το επίπεδο εφαρμογής (Application Layer). Το επίπεδο εφαρμογής αποτελεί τη διεπαφή του χρήστη για πρόσβαση στις εφαρμογές σε διάφορους τομείς όπως η μεταφορά, η υγειονομική περίθαλψη, η γεωργία, η εφοδιαστική αλυσίδα κ.α. **Σφάλμα! Το αρχείο προέλευσης της αναφοράς δεν βρέθηκε..**,[10],**Σφάλμα! Το αρχείο προέλευσης της αναφοράς δεν βρέθηκε..**



Εικόνα 4: Επίπεδα αρχιτεκτονικής IIoT (πηγή:**Σφάλμα! Το αρχείο προέλευσης της αναφοράς δεν βρέθηκε.**)

Τα θεμελιώδη χαρακτηριστικά του IIoT είναι τα εξής [12],**Σφάλμα! Το αρχείο προέλευσης της αναφοράς δεν βρέθηκε.:**

**Συνδεσιμότητα:** Πρακτικά κάθε συσκευή μπορεί να συνδεθεί με την παγκόσμια υποδομή πληροφοριών και επικοινωνιών (διαδίκτυο).

**Εικονικοποίηση συσκευής:** Είναι το πρώτο βήμα της συνδεσιμότητας. Παρέχει συνοχή μεταξύ φυσικών και εικονικών συσκευών (πραγμάτων) και βοηθάει στη διαχείριση των δεδομένων.

**Ετερογένεια:** Οι συσκευές στο διαδίκτυο είναι ετερογενείς καθώς βασίζονται σε διαφορετικές πλατφόρμες και δίκτυα, ωστόσο μπορούν να αλληλοεπιδρούν με όλες τις άλλες συσκευές που βρίσκονται σε διαφορετικά δίκτυα.

**Δυναμικές αλλαγές:** Η κατάσταση των συσκευών μπορεί να αλλάζει δυναμικά, δηλαδή κάποιες μπορεί να είναι ενεργές και κάποιες άλλες να αποσυνδέονται.

**Ασφάλεια:** Ασφάλεια τόσο για τους χρήστες των δικτύων όσο και σεβασμός προς την ιδιωτική τους ζωή.

**Επεκτασιμότητα:** Το IIoT έχει την ικανότητα να δημιουργεί νέες καταστάσεις όποτε απαιτεί τη χρήση πόρων που συλλέγονται από το cloud.

**Ανάλυση δεδομένων:** Το IIoT πρέπει να επιτρέπει τη μακροπρόθεσμη αποθήκευση των δεδομένων, καθώς με τη βοήθεια της μηχανικής μάθησης και αυτό που ονομάζουμε Big data, μπορεί να προβλέπει αποτελέσματα.

**Τυποποίηση:** Το IIoT στοχεύει στη τυποποίηση δικτύων αισθητήρων, τη συγκέντρωση δεδομένων και επιτρέπει την επικοινωνία σε πραγματικό χρόνο.

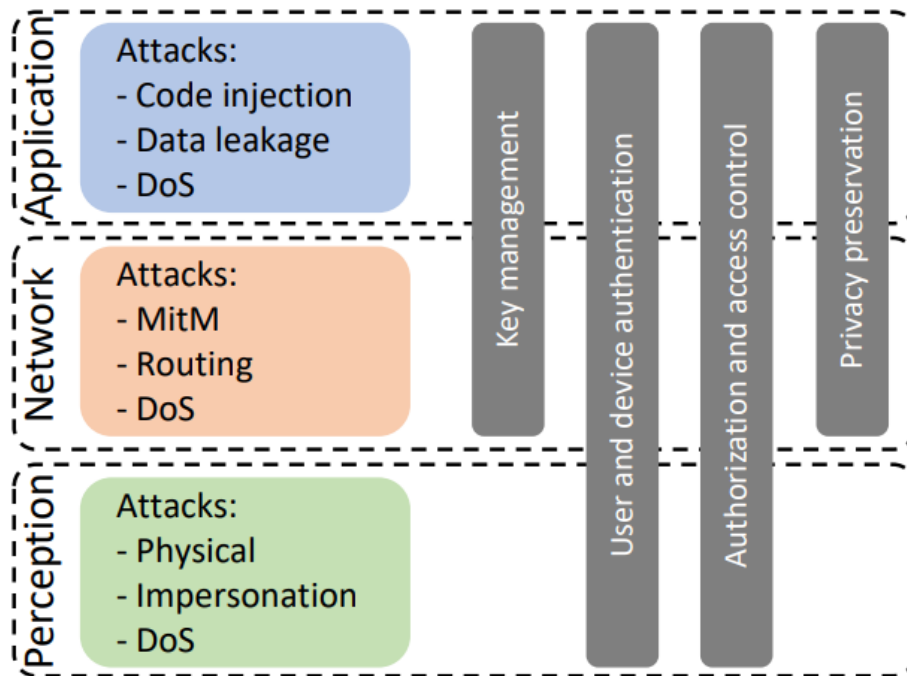
**Διαλειτουργικότητα:** Χρησιμοποιεί πρωτόκολλα όπως το MQTT που ενεργοποιεί πλατφόρμες για να μπορούν να επικοινωνούν και να προγραμματίζονται σε όλες τις πλευρές ανεξαρτήτως προμηθευτών.

## 2.6 Ζητήματα και προκλήσεις IIoT

### 2.6.1 Θέματα ασφάλειας IIoT

Η διάδοση του βιομηχανικού διαδικτύου των πραγμάτων έχει οδηγήσει σε μια τεράστια ποσότητα διασυνδεδεμένων συσκευών μεταξύ τους. Από μικρούς αισθητήρες μέχρι πολύπλοκους ελεγκτές και άλλες συσκευές που προσφέρουν παρακολούθηση και κάθε είδους υπηρεσία ελέγχου για τη βελτίωση και την αυτοματοποίηση των καθημερινών βιομηχανικών εφαρμογών. Τα πλεονεκτήματα τα οποία προσφέρουν είναι πολλά. Όπως η αύξηση και η βελτίωση της παραγωγικής διαδικασίας και η μείωση του κόστους της συντήρησης του εξοπλισμού. Στον αντίποδα, το βιομηχανικό διαδίκτυο των πραγμάτων όπως ακριβώς και το IoT φέρει αρκετά ζητήματα ασφαλείας, που ενέχουν σοβαρούς κινδύνους τόσο για την ακεραιότητα της λειτουργίας της παραγωγικής διαδικασίας, όσο και για την ιδιωτικότητα και την προστασία δεδομένων. Κάποιοι από τους λόγους που οι συσκευές IIoT παρουσιάζουν ευπάθειες μπορεί να είναι η συστηματική παράληψη ενημερώσεων του λογισμικού των συσκευών, ελαττώματα στην ασφάλεια δικτύωσης και πολλά άλλα όπως θα δούμε στη συνέχεια.

Η αρχιτεκτονική του βιομηχανικού IIoT παίζει πολύ μεγάλο ρόλο στις επιθέσεις και αυτό διότι σε κάθε επίπεδο έχουμε διαφορετικές κατηγορίες επιθέσεων. Κατά κύριο λόγο οι επιθέσεις μοιάζουν με αυτές στο IoT με την διαφορά πως στο βιομηχανικό τομέα οι επιθέσεις γίνονται για να προκαλέσουν απώλεια χρημάτων ή δυσφήμιση της βιομηχανίας και σπάνια με απειλές για την ασφάλεια. Για τις επιθέσεις IIoT χρησιμοποιείται ένα μοντέλο τριών επιπέδων ως γενική ταξινόμηση. Τα τρία επίπεδα, επίπεδο αντίληψης (perception layer), επίπεδο δικτύου (network layer) και επίπεδο εφαρμογής (application layer) φαίνονται στην παρακάτω Εικόνα 5, όπως και οι επιθέσεις σε καθένα από αυτά.



Εικόνα 5: Πιθανές επιθέσεις στο IoT (πηγή:81 )

Το πρώτο επίπεδο (επίπεδο της αντίληψης) περιγράφει τη διεπαφή μεταξύ του φυσικού κόσμου και των συσκευών IIoT. Περιλαμβάνει πολλές δραστηριότητες όπως η συλλογή δεδομένων από τους ανιχνευτές που αλληλοεπιδρούν με το περιβάλλον. Οι πιθανές επιθέσεις σε αυτό το επίπεδο είναι:

**Φυσική επίθεση (Physical):** περιλαμβάνει επιθέσεις που δέχονται οι συσκευές και γενικά ο εξοπλισμός (Hardware) του δικτύου. Για αυτού του είδους την επίθεση πρέπει ο «εισβολέας» να έχει πρόσβαση στον εξοπλισμό και είτε καταστρέφει, είτε αντικαθιστά εξαρτήματα για να αποκτήσει ευαίσθητες πληροφορίες, όπως κωδικό πρόσβασης, ενεργοποίηση ή απενεργοποίηση λειτουργιών.

**Επίθεση πλαστοπροσωπίας (Spoofing):** Σε αυτή την επίθεση ο εισβολέας ενεργεί για λογαριασμό κάποιου άλλου. Χρησιμοποιώντας τεχνικές IP spoofing ο εισβολέας μπορεί να αλλάξει τον αποστολέα των IP διευθύνσεων στα πακέτα. Αυτό βέβαια μπορεί να γίνει μόνο στην αρχή κάθε συνόδου, με τον εισβολέα να δημιουργεί πακέτα με επαληθευμένη IP διεύθυνση για να στείλει κακόβουλο λογισμικό.

Στο επίπεδο δικτύου στόχος είναι να επιτευχθεί η διασύνδεση των συσκευών με το διαδίκτυο, για την μεταφορά των δεδομένων που συλλέγονται από το πρώτο στρώμα, στο επίπεδο εφαρμογής και αντίστροφα. Επομένως στο επίπεδο αυτό ανήκουν τα βασικά πρωτόκολλα επικοινωνίας, καθώς και πύλες που συνδέουν τα μικρότερα δίκτυα με το internet. Οι επιθέσεις που συγκαταλέγονται σε αυτό το επίπεδο θεωρούνται



middlebox, αφού το ίδιο το επίπεδο δικτύου θα μπορούσε να θεωρηθεί ως μεσολαβητής των άλλων δυο. Αυτές είναι:

**Man-in-the-middle-attack:** Σε αυτή την επίθεση μια οντότητα προσπαθεί να μπει στην επικοινωνία μεταξύ δυο άκρων με σκοπό να παρακολουθεί και να υποκλέπτει ευαίσθητες πληροφορίες.

**Sybil attack:** Σε αυτή την επίθεση ένας κακόβουλος κόμβος διεκδικεί πολλές ταυτότητες και εντοπίζεται σε διάφορα σημεία στο δίκτυο. Αυτό οδηγεί στην άδικη σπατάλη πόρων.

**Replay attack:** Ο εισβολέας στέλνει πολλά επαναλαμβανόμενα πακέτα σε έναν προορισμό με αποτέλεσμα το δίκτυο να καθυστερεί υπερβολικά ή να καταρρέει.

**Denial of Service:** Η επίθεση αυτή έχει ως στόχο να τερματίσει ή να πλημμυρίσει ένα δίκτυο, καθιστώντας το απροσπέλαστο σε άλλους χρήστες.

Τέλος το επίπεδο εφαρμογής παρέχει τις διάφορες υπηρεσίες που αποτελούν τις εφαρμογές IoT. Στηρίζεται στα δεδομένα που έχει λάβει από τα προηγούμενα 2 επίπεδα και για τον λόγο αυτό η προστασία του επιπέδου αυτό είναι ιδιαίτερα δύσκολη αλλά σημαντική. Κάποιες από τις επιθέσεις που συναντάμε σε αυτό το επίπεδο είναι:

**Διαρροή δεδομένων (data leakage):** Οι εισβολείς προσπαθούν να υποκλέψουν δεδομένα και πληροφορίες που ενδεχομένως δεν είναι κρυπτογραφημένα ή υπάρχει κάποιο κενό στην ασφάλεια τους.

**Εισαγωγή κακόβουλου κώδικα (Malicious code injection):** Με την εισαγωγή ενός κακόβουλου λογισμικού ένας εισβολέας μπορεί να αποκτήσει τον έλεγχο μιας μολυσμένης συσκευής. Με το που λάβει τον έλεγχο της συσκευής ο κακόβουλος χρήστης μπορεί να κάνει άλλες ενέργειες, όπως να κρυπτογραφήσει τα δεδομένα σε μια βάση με ransomware και να ζητήσει χρηματικό αντίτιμο για την ανοίξει, μπορεί να κάνει άσκοπη χρήση των πόρων ενός δικτύου και πολλά άλλα.

Μια από τις πρώτες επιτυχημένες επιθέσεις εναντίον συστημάτων βιομηχανικού ελέγχου ήταν το worm Slammer, το οποίο μόλυνε δυο συστήματα παρακολούθησης ενός πυρηνικού σταθμού στις Η.Π.Α. το 2003. Ακόμη μια επίθεση αποτελεί η κυβερνοεπίθεση σε μονάδα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας στην Ουκρανία το 2015. Συγκεκριμένα στο πρώτο μέρος της επίθεσης χρησιμοποιήθηκε ένα κακόβουλο λογισμικό, το οποίο στάλθηκε μέσω μηνυμάτων ηλεκτρονικού ταχυδρομείου σε συγκεκριμένα άτομα στοχεύοντας διάφορες εταιρίες ενέργειας, προκειμένου να αποκτήσουν τα credential για να έχουν πρόσβαση στα δίκτυα των υποσταθμών. Σε επόμενο βήμα χρησιμοποίησαν το malware killDisk για να καταστρέψει μέρος των σκληρών δίσκων των υπολογιστών και να αποτρέψει την επανεκκίνηση των συστημάτων, οδηγώντας τα τελικά σε διακοπή ρεύματος τριών ωρών. Τέλος για να μην μπορέσουν οι πελάτες να αναφέρουν την διακοπή στα τηλεφωνικά κέντρα εξυπηρέτησης πελατών των υποσταθμών, εξαπέλυσαν

επίθεση TDoS [1],[17],**Σφάλμα! Το αρχείο προέλευσης της αναφοράς δεν βρέθηκε.**,**Σφάλμα! Το αρχείο προέλευσης της αναφοράς δεν βρέθηκε.**

## 2.6.2 Στόχοι και προκλήσεις

Το βιομηχανικό διαδίκτυο των πραγμάτων χρησιμοποιεί συσκευές με πολύ μεγαλύτερη διάρκεια ζωής σε σχέση με το καταναλωτικό IoT. Αυτό αυξάνει την ανάγκη να εξετασθεί η ασφάλεια σε θέματα εφαρμογής και επικοινωνίας των συσκευών αυτών κατά την ανάπτυξη και την ενημέρωση του λογισμικού. Η ενημέρωση του λειτουργικού αποτελεί πρόκληση για τις περισσότερες συσκευές, όχι μόνο τις καινούργιες αλλά και αυτές που είναι ήδη εγκατεστημένες στα βιομηχανικά περιβάλλοντα. Επίσης θέματα ασφάλειας σε ένα δίκτυο δημιουργείται όταν αρκετές συσκευές είναι παλαιού τύπου.

**Μεγάλος αριθμός συσκευών.** Το IIoT αποτελείται από έναν αυξανόμενο αριθμό συσκευών. Αυτές οι συσκευές πρέπει να ρυθμίζονται με τέτοιο τρόπο ώστε να εκτελούν αυτοματοποιημένες λειτουργίες. Ο μεγάλος αριθμός συσκευών επιβάλλει την ανάγκη για επεκτάσιμες και αυτόματες προσεγγίσεις, όχι μόνο όσον αφορά τη λειτουργία αλλά και για την υλοποίηση και διαμόρφωση των μέτρων ασφαλείας.

**Υψηλή συνδεσιμότητα.** Τα κύρια οφέλη του IIoT βασίζονται σε ισχυρή συνδεσιμότητα μεταξύ IT και OT, ακόμη και με το διαδίκτυο, επιτρέποντας πιο αποτελεσματικές και ευέλικτες βιομηχανικές παραγωγές. Δεδομένου αυτού είναι όλο και πιο δύσκολος ο διαχωρισμός και η απομόνωση των συσκευών ανάλογα με τη λειτουργικότητά τους, ώστε να αποτραπεί η μη εξουσιοδοτημένη πρόσβαση. Ωστόσο σύμφωνα με το NIST η τμηματοποίηση δικτύου είναι μια πρακτική προσέγγιση και προστατεύει τα συστήματα βιομηχανικού ελέγχου (ICS) και συνεπώς χρειάζεται να συνεχιστεί περαιτέρω για το IIoT.

**Εμπιστευτικότητα των δεδομένων.** Επειδή το IIoT συλλέγει πολλά δεδομένα και μετα-πληροφορίες για έλεγχο και βελτιστοποίηση, τα δεδομένα αυτά μπορεί να περιέχουν μυστικά και πρέπει να παραμείνουν μακριά από μη εξουσιοδοτημένη πρόσβαση. Η βασική πρόκληση είναι να διασφαλίζεται η εμπιστευτικότητα των πληροφοριών και να παρέχεται πρόσβαση σε αυτές μόνο σε εξουσιοδοτημένους χρήστες για ανάλυση και επεξεργασία.

**Ανθρώπινο λάθος και δολιοφθορά.** Εκτός από τους κακόβουλους χρήστες υπάρχει και ο κίνδυνος για αστοχία του συστήματος, αυτό αποτελεί σοβαρή απειλή για συστήματα που παρουσιάζουν αλληλεξάρτηση. Ακόμη επειδή συνήθως στις συσκευές IIoT έχει πρόσβαση ένας μεγάλος αριθμός ανθρώπων σε σχέση με το καταναλωτικό IoT, μπορεί να προκληθεί αστοχία από δολιοφθορά από έναν δυσαρεστημένου εργάτη.

Οι προκλήσεις που παρουσιάζονται δείχνουν πως στο IIoT απαιτούνται νέα μέτρα και προσαρμοσμένα στις εκάστοτε ανάγκες για να εξασφαλίσουν την ακεραιότητα της βιομηχανικής λειτουργίας [1].

Η ετερογενής και πολύπλοκη φύση των συστημάτων IIoT έχει συγκεντρώσει πολλές τεχνικές προκλήσεις, όπως η διαλειτουργικότητα, η ασφάλεια, το απόρρητο, η επεκτασιμότητα και η ετερογένεια, η αξιοπιστία και η διαχείριση πόρων. Ωστόσο υπάρχουν ακόμα ορισμένες προκλήσεις που πρέπει να επιλυθούν.

**Αποτελεσματική διαχείριση των δεδομένων.** Επειδή το IIoT έχει προσαρμόσει την λειτουργία του σε αρκετές συσκευές που χρησιμοποιούν αυξημένη ροή δεδομένων, δίνεται η δυνατότητα αποθήκευσης αυτών στις συσκευές, σε πύλες (gateways) αλλά και στο cloud, για μελλοντική λήψη αποφάσεων, επεξεργασία, μετάδοση και αποθήκευση των δεδομένων σε πραγματικό χρόνο για την ανίχνευση προκλήσεων που απαιτούν μεγάλη προσπάθεια για να αντιμετωπιστούν. Τα μοντέλα διαχείρισης των δεδομένων θα πρέπει να είναι σε θέση να χειρίζονται αποτελεσματικά τον τεράστιο όγκο δεδομένων που παράγονται από ετερογενείς συσκευές IIoT με αποτελεσματικό τρόπο. Τα μοντέλα αυτά θα πρέπει επίσης να παρέχουν τις υπηρεσίες διαχείρισης των δεδομένων με υψηλή ταχύτητα επεξεργασίας των δεδομένων, αξιόπιστη και ασφαλή αποθήκευση των δεδομένων και γρήγορη ανάκτηση τους.

**Συνεργασία μεταξύ των ετερογενών συστημάτων IIoT.** Επειδή ένα σύστημα IIoT είναι μια συλλογή διαφορετικών ετερογενών τεχνολογιών και πολλών προμηθευτών, όπως βιομηχανικές μηχανές, συσκευές IIoT, αισθητήρες, ενεργοποιητές πύλες και άλλα, η ένταξη και η συνεργασία μεταξύ αυτών των συσκευών μπορεί να αποτελέσει δύσκολο ζήτημα. Παράγοντες όπως ο συγχρονισμός, η κοινή χρήση πόρων, η διαλειτουργικότητα και το απόρρητο των δεδομένων καθιστούν την ενοποίηση και την συνεργασία πιο προκλητική **Σφάλμα!**  
**Το αρχείο προέλευσης της αναφοράς δεν βρέθηκε..**

Type	Issues	Causes	Solutions
Cybersecurity	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Internal attacks</li> <li>- External attacks</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Security vulnerabilities</li> <li>- Openness of systems</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Intelligent monitoring tools needed</li> <li>- Deployment of end-to-end security models is essential</li> <li>- System-wide forensic analysis should be performed periodically</li> </ul>
Privacy	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Identity breaches</li> <li>- Personal data theft</li> <li>- Business data leakage</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Bad security models</li> <li>- Absence of standard operating procedures</li> <li>- Weak data and information sharing policies</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Using data anonymisation protocols</li> <li>- Privacy preserving interaction models for users, devices, and systems</li> </ul>
Big data processing	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Bad data integration</li> <li>- Missing data streams</li> <li>- High latency</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Heterogeneous data sources</li> <li>- Mobility and connectivity issues</li> <li>- Data overloading and bandwidth limitations</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Intelligent real time data fusion</li> <li>- Device-centric big data processing architectures</li> <li>- Concentric computing models</li> </ul>
Standardisation	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Difficulty in interoperability and system integration</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Absence of global standardisation body</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Developing Local, Regional, Industry-specific, and Global standards</li> </ul>
Connectivity and communication	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Bad and inaccurate data transfer</li> <li>- Data loss</li> <li>- High latency</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- High mobility</li> <li>- Large data streams</li> <li>- Congestion</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Need to create always-on, ultra-high available and reliable communication protocols</li> </ul>
Scalability	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Resource discovery</li> <li>- Data offloading</li> <li>- Data management</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Low processing power at device-end</li> <li>- Massive data production</li> <li>- Realtime actuation</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Near-device data processing, In-memory data processing, Edge computing</li> </ul>
System management	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Difficult to deploy, configure, monitor, and control large scale IIoT networks</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Cloud-centric</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Device-centric</li> </ul>
Efficiency	<ul style="list-style-type: none"> <li>- High energy utilisation</li> <li>- Resources-constraints</li> <li>- Device-overloading</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Always-on IIoT devices and systems</li> <li>- Massive and continuous data generation and device operations</li> <li>- On-device data management and analytics</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Enabling energy, memory, and computation-efficient algorithms and processes for big data processing, management and analytics in IIoTs</li> </ul>

Εικόνα 6: Προβλήματα-Αιτίες-Λύσεις

**Προσαρμοσμένη κρυπτογραφία και έλεγχος ταυτότητας.** Η κρυπτογράφηση αποτελεί έναν πολύ βασικό μηχανισμό για την διασφάλιση του απορρήτου και την επίτευξη ελέγχου ταυτότητας. Ωστόσο ένας μεγάλος αριθμός συσκευών στο IIoT θα απαιτεί τη χρήση συμμετρικού κλειδιού απλής κρυπτογραφίας αντί για προσεγγίσεις με λεπτομερέστερη κρυπτογραφία, δημοσίου κλειδιού. Η κρυπτογραφία είτε με την χρήση δημόσιου ή συμμετρικού κλειδιού αποδίδει μεγάλες καθυστερήσεις, που συνήθως αποτελεί τον λόγο που κάποιοι στις βιομηχανίες αποφεύγουν να χρησιμοποιήσουν κρυπτογράφηση. Η βασική ιδέα είναι πως τα δεδομένα κρυπτογραφούνται πριν τη μεταφόρτωση τους σε μια υπηρεσία cloud και τα κρυπτογραφημένα δεδομένα μπορούν να αναζητηθούν και να ανακτηθούν μόνο από το cloud

**Ενημερώσεις λογισμικού (κώδικα).** Είναι κάτι που αποφεύγουν να κάνουν οι χρήστες στα μηχανήματα τους, αλλά επίσης δεν δίνουν και αρκετή προσοχή όπως τους αρμόζει από τις εταιρίες παραγωγής των συσκευών.

**Παρακολούθηση δικτύου και ανίχνευση εισβολέα.** Οι μηχανισμοί ανίχνευσης εισβολής είναι απαραίτητοι για την ανίχνευση από κακόβουλες δραστηριότητες

Οι συσκευές με μεγάλη διάρκεια ζωής απαιτούν αυτόματη ενημέρωση του κώδικα διαχείρισης και ανίχνευση τρωτών σημείων. Θα πρέπει να γίνεται παρακολούθηση δικτύου γιατί ενδέχεται οι συσκευές παλαιού τύπου να μην

λαμβάνουν αυτόματα τις ενημερώσεις κώδικα. Επιπλέον το IIoT χρησιμοποιεί ένα μεγάλο αριθμό συσκευών, κάνοντας το δίκτυο αρκετά επεκτάσιμο χρησιμοποιώντας κρυπτογράφηση χωρίς πιστοποιητικό. Η υψηλή συνδεσιμότητα των IIoT συσκευών θα μπορούσε να αντιμετωπιστεί με μεμονωμένες πολιτικές ελέγχου και περιορισμό των συσκευών σύμφωνα με την προσέγγιση ελάχιστων προνομίων. Για κρίσιμες διαδικασίες είναι υψίστης σημασίας να χρησιμοποιείται κρυπτογράφηση για την τηρήσει των μέτρων και των απαιτήσεων λανθάνοντα χρόνου. Η κρυπτογράφηση είναι απαραίτητη για την εμπιστευτικότητα ειδικά από την στιγμή που τα δεδομένα αποθηκεύονται σε εξωτερικούς διακομιστές cloud, έτσι επιτυγχάνεται η προστασία απορρήτου. Τέλος το λάθος από ανθρώπινο παράγοντα μπορεί να αντιμετωπιστεί με την σωστή εκπαίδευση έναντι σε εξωτερικούς ή εσωτερικούς επιτιθέμενους [1].

## 2.7 Εφαρμογές του βιομηχανικού διαδικτύου των πραγμάτων.

Η χρήση του IIoT έχει ταρακουνήσει τα νερά σε πολλούς βιομηχανικούς τομείς. Με την εφαρμογή του IIoT σε κλάδους όπως η γεωργία, η υγεία, τα εργοστάσια καθώς και άλλα βιομηχανικά περιβάλλοντα όπως θα δούμε στη συνέχεια, το βιομηχανικό διαδίκτυο των πραγμάτων προσπαθεί να επιτύχει αποτελεσματική αύξηση στις λειτουργίες ενός τέτοιου περιβάλλοντος, γεγονός που μπορεί να οδηγήσει στην ανάδειξη και τη δημιουργία νέων επιχειρηματικών μοντέλων. Παρακάτω θα γίνει αναφορά σε ορισμένες εφαρμογές του IIoT και θα δοθούν παραδείγματα εφαρμογής του στον πραγματικό κόσμο.

Μια από τις σημαντικότερες και πιο κοινές εφαρμογές αποτελεί ο βιομηχανικός αυτοματισμός (Industrial automation). Η αυτοματοποίηση των μηχανών και άλλων συσκευών επιτρέπει στις βιομηχανίες να λειτουργούν με αποτελεσματικό τρόπο, χρησιμοποιώντας εξελιγμένα εργαλεία για την παρακολούθηση και την βελτιστοποίηση ορισμένων διεργασιών. Συγκεκριμένα ο ελεγκτής PLC είναι ένα είδος μικροϋπολογιστή που λαμβάνει δεδομένα από έξυπνους αισθητήρες και στέλνει πίσω οδηγίες λειτουργίας με βάση την είσοδο που δέχεται. Ο στόχος του βιομηχανικού αυτοματισμού είναι να αυξήσει την ακρίβεια και την αποτελεσματικότητα των εργασιών, να μειώσει τον χρόνο που χρειάζεται για να πραγματοποιηθούν, αλλά και να εξαλείψει κάθε πιθανό σφάλμα που μπορεί να γίνει από ανθρώπινο παράγοντα, αφού μειώνει τις απαιτήσεις για ανθρώπινο δυναμικό.

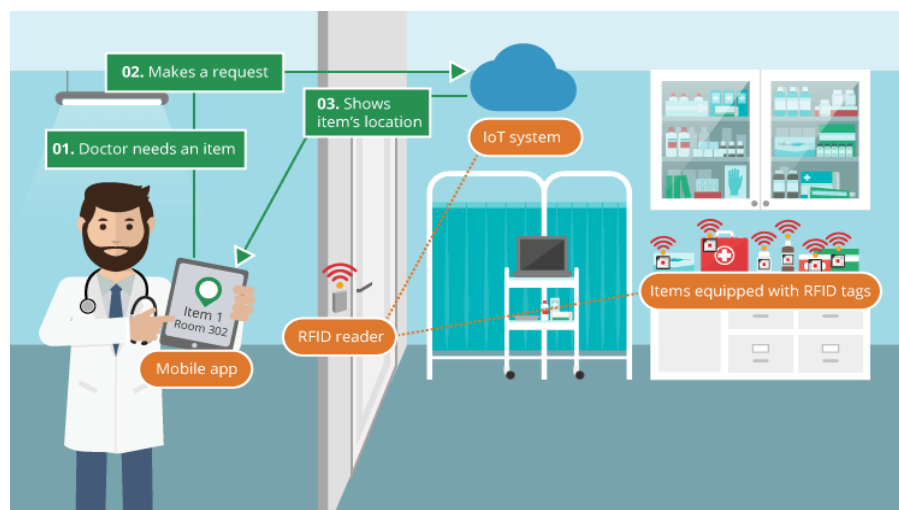
Πολλές είναι πλέον οι εταιρίες που κατασκευάζουν έξυπνα ρομπότ για βιομηχανικές εφαρμογές και οι λόγοι είναι απλοί. Τα ρομποτικά αυτά συστήματα εξασφαλίζουν ομαλό χειρισμό των μηχανών και διαθέτουν συγκεκριμένες προδιαγραφές, όπως υψηλή απόδοση και ακρίβεια στις κινήσεις τους, μειωμένους χρόνους εκτέλεσης των εργασιών και μεγάλη κλιμάκωση του δικτύου. Με τη χρήση των ρομπότ ο άνθρωπος απαλλάσσεται από την πολυπλοκότητα χειρισμού των

μηχανημάτων και βελτιώνει την παραγωγικότητα. Τα έξυπνα ρομποτικά συστήματα μπορούν να προγραμματιστούν έτσι ώστε να λειτουργούν σε πραγματικό χρόνο, έχοντας τη δυνατότητα ακόμα και απομακρυσμένης πρόσβασης από τους χειριστές για τις ανάγκες διαχείρισης.

Όλα τα σύγχρονα βιομηχανικά συστήματα που είναι εξοπλισμένα με αισθητήρες εφαρμόζουν προγνωστική συντήρηση (Predictive Maintenance) για να παρακολουθούν συνεχώς την κατάσταση κάθε μηχανής. Με τον τρόπο αυτόν μπορεί να ανιχνευθεί κάθε αστοχία συσκευής, πριν αυτή ακόμα συμβεί με αποτέλεσμα το σύστημα να καταρρεύσει και κλείσει. Σε περίπτωση που ανιχνευθεί από τους αισθητήρες κάποιο τέτοιο φαινόμενο, τότε αμέσως στέλνεται προειδοποιητικό μήνυμα στα αρμόδια άτομα για να αντιμετωπιστεί εγκαίρως και χωρίς προβλήματα για την παραγωγική διαδικασία. Η άμεση πρόγνωση και αντιμετώπιση του προβλήματος μπορεί να εξοικονομήσει χρόνο και χρήμα στη βιομηχανία και να λειτουργήσει σαν ένα επιπλέον στρώμα ασφαλείας [20].

Πολύ σημαντικό ρόλο σε ένα βιομηχανικό περιβάλλον παίζει και η σωστή διαχείριση της ενέργειας (Power Management). Γενικά οι βιομηχανικές εργασίες απαιτούν σημαντικές ποσότητες ενέργειας, ακόμη και μια μικρή βελτίωση στη διαχείριση της ισχύς μπορούν να βοηθήσουν τις εταιρίες να εξοικονομήσουν χρήματα, αλλά και να βελτιώσουν τις περιβαλλοντικές τους επιδόσεις. Χρησιμοποιώντας έξυπνους αισθητήρες οι εταιρίες μπορούν να βελτιστοποιήσουν τη χρήση της ενέργειας τους και να εντοπίσουν αναποτελεσματικά μηχανήματα με μεγάλη κατανάλωση ισχύς. Η τεχνολογία αυτή μπορεί ακόμη να βοηθήσει και με την προσθήκη ανανεώσιμων πηγών ενέργειας [16].

### 2.7.1 Υγεία



Εικόνα 7: Εφαρμογή IIoT στον τομέα της υγείας (πηγή:

<https://www.google.com/url?sa=i&url=https%3A%2F%2Fwww.linkedin.com%2Fpulse%2Finternet-things-healthcare->

*overview-its-future-r-kumar&psig=A0vVaw3R3b7tHn3QyI0VgX9Im-HN&ust=1664202092645000&source=images&cd=vfe&ved=0CAwQjRxaFwoTCODmmYeSsPoCFQAAAAAdAAAAABAD)*

Όλες οι παραπάνω εφαρμογές αποτελούν απαραίτητα στοιχεία για την υποστήριξη IIoT δικτύων σε διάφορους βιομηχανικούς τομείς όπως η υγεία. Για αρκετά χρόνια ασθενείς που ήταν σε απομακρυσμένες περιοχές μακριά από τα αστικά κέντρα, αντιμετώπιζαν δυσκολίες στις μετακινήσεις τους για να λάβουν ιατροφαρμακευτική περίθαλψη. Πλέον αυτό έχει αλλάξει με τον υγειονομικό κλάδο να έχει αγκαλιάσει την ιδέα της χρήσης έξυπνων συσκευών. Συγκεκριμένα οι ασθενείς μπορούν να φορούν συσκευές που να ενημερώνουν αυτόματα τους ιατρούς τους σε περίπτωση που χρειαστούν κάποια βοήθεια. Με την ανάπτυξη της τεχνητής νοημοσύνης το υγειονομικό προσωπικό έχει τη δυνατότητα να παρακολουθεί ακόμη και να επέμβει με την βοήθεια μηχανημάτων εξ αποστάσεως για να αντιμετωπίσουν τα προβλήματα των ασθενών τους ταχύτερα και με μεγαλύτερη ακρίβεια **Σφάλμα! Το αρχείο προέλευσης της αναφοράς δεν βρέθηκε..**

## 2.7.2 Γεωργία



Εικόνα 8: Εφαρμογή IIoT σε γεωργικό περιβάλλον (πηγή:

[https://www.google.com/url?sa=i&url=https%3A%2F%2Fwww.agrismart.co.uk%2Fsmart-farming-overview%2F&psig=A0vVaw3TrxxgwxworaacSnoHrluI9&ust=1664201580354000&source=images&cd=vfe&ved=0CAwQjRxaFwoTCJD77JeQsPoCFQAAAAAdAAAAABAE\)](https://www.google.com/url?sa=i&url=https%3A%2F%2Fwww.agrismart.co.uk%2Fsmart-farming-overview%2F&psig=A0vVaw3TrxxgwxworaacSnoHrluI9&ust=1664201580354000&source=images&cd=vfe&ved=0CAwQjRxaFwoTCJD77JeQsPoCFQAAAAAdAAAAABAE)

Τα έξυπνα συστήματα μπορούν να προσφέρουν αρκετές δυνατότητες στον τομέα της γεωργίας και να βελτιώσουν σημαντικά την ζωή των αγροτών αλλά και την παραγωγή σοδιάς. Με τη βοήθεια αισθητήρων συλλέγονται δεδομένα όπως η θερμοκρασία του αέρα, τόσο μέσα στα θερμοκήπια όσο και έξω από αυτά, η υγρασία του εδάφους, η ταχύτητα του ανέμου, το ποσοστό βροχόπτωσης, μέχρι και η προσβολή από παράσιτα ή κατάλοιπα από φυτοφάρμακα προηγούμενων σοδιών. Όλοι οι παραπάνω παράμετροι είναι σημαντικοί για μια καλλιέργεια, αφού ενημερώνουν τον αγρότη για την κατάσταση της καλλιέργειας του, βελτιώνουν την ποιότητα και την ποσότητα της σοδιάς και



ελαχιστοποιούν την εμφάνιση κινδύνων και οικονομικών απωλειών στη παραγωγική διαδικασία **Σφάλμα! Το αρχείο προέλευσης της αναφοράς δεν βρέθηκε..**

### 2.7.3 Αλυσίδα εφοδιασμού και μεταφορές (Supply-Chain and Logistics).

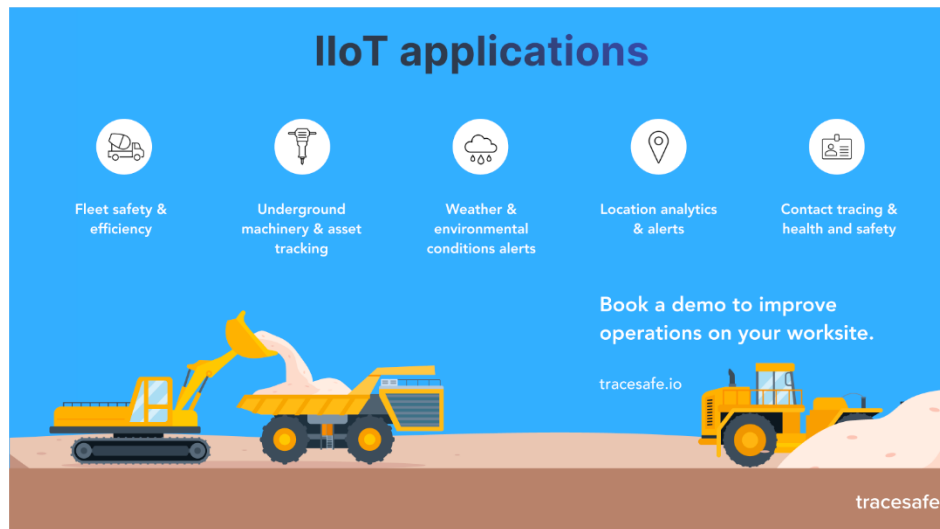


Εικόνα 9: Εφαρμογή IIoT σε αλυσίδες εφοδιασμού (πηγή: <https://www.google.com/url?sa=i&url=https%3A%2F%2Fvsoftdigital.com%2Fblog%2Ftop-industrial-iiot-uses-cases-in-2022%2F&psig=AOvVawOP1PTLdHvqh7BEi-cGhozS&ust=1664201750894000&source=images&cd=vfe&ved=0CAwQjRxqFwoTCKjMj-SQsPoCFQAAAAAdAAAAABAD>)

Μέσω της εφαρμογής του IIoT σε μια αλυσίδα εφοδιασμού γίνεται εύκολα η παρακολούθηση των προϊόντων της επιχείρησης και η διαχείριση των αποθεμάτων στις αποθήκες αλλά και των οχημάτων διανομής των προϊόντων. Από την αγορά πρώτων υλών από τον προμηθευτή, μέχρι και τις πωλήσεις των προϊόντων, το IIoT διασφαλίζει πως οι παραγγελίες μπορούν να αναπληρώνονται αυτόματα και όπου χρειάζεται επισκευή ή συντήρηση, με έγκυρη διάγνωση στα μηχανήματα, μπορεί να ενημερώνει το αρμόδιο προσωπικό. Ακόμη ένα πλεονέκτημα είναι πως η παρακολούθηση των προϊόντων γίνεται μέσω RFID, ενώ κατά την αποστολή πακέτων με οχήματα πραγματοποιείται ιχνηλάτηση των πακέτων με συστήματα GPS. Αυτό εξασφαλίζει υψηλή ασφάλεια και ακεραιότητα των φορτίων που αποτελεί μέγιστη προτεραιότητα για κάθε εταιρία **Σφάλμα! Το αρχείο προέλευσης της αναφοράς δεν βρέθηκε..**



## 2.7.4 2.6.4 Εξόρυξη (Mining).



Εικόνα 10: Εφαρμογή IIoT σε εργασίες βαρέων οχημάτων (πηγή: tracesafe)

Η συνεισφορά του βιομηχανικού διαδικτύου των πραγμάτων στην εξόρυξη έχει τεράστιο αντίκτυπο τόσο σε οικονομικό επίπεδο, όσο και στην ποιότητα εκτέλεσης των εργασιών. Συγκεκριμένα χρησιμοποιούνται αισθητήρες που συλλέγουν δεδομένα σε πραγματικό χρόνο για τις συνθήκες που επικρατούν στην περιοχή των εργασιών. Ακόμη αυτοί οι αισθητήρες μπορούν να χρησιμοποιηθούν για προγνωστική συντήρηση των βαρέων μηχανημάτων που συμμετέχουν σε αυτά τα έργα. Επιπλέον υπάρχει δυνατότητα χρήσης των μηχανημάτων με απομακρυσμένη πρόσβαση σε περιοχές όπου είναι δύσκολο ή και επικίνδυνο να εργαστεί άνθρωπος.

Ορισμένα παραδείγματα με εφαρμογή του IIoT στον πραγματικό κόσμο αποτελούν η εταιρεία ενέργειας και ρομποτικής ABB, που χρησιμοποιεί συνδεδεμένους αισθητήρες για την παρακολούθηση των ρομποτικών συστημάτων της, με τη βοήθεια της προγνωστικής συντήρησης μπορεί να προλάβει να διορθώσει το πρόβλημα πριν αυτό σταματήσει την παραγωγή της. Ακόμη, η αυστριακή αυτοκινητοβιομηχανία Magna Steyr εκμεταλλεύεται το IIoT για να παρακολουθεί να περιουσιακά της στοιχεία, συμπεριλαμβανομένου των μηχανημάτων και των ανταλλακτικών των οχημάτων, καθώς ακόμη δοκιμάζει να παραγγέλνει πρώτες ύλες αυτόματα με βάση τα διαθέσιμα αποθέματα στις αποθήκες της. Επειδή η δημιουργία ενός αεροσκάφους είναι περίπλοκη και ακριβή διαδικασία, με μειωμένα περιθώρια λάθους και αρκετές ώρες δουλειάς, η εταιρεία Airbus ενσωμάτωσε στη διαδικασία παραγωγής αισθητήρες για να ελέγχει μηχανές και εξόπλισε το προσωπικό της με αξεσουάρ όπως τα έξυπνα γυαλιά, για να ενισχύσει την ασφάλεια στο χώρο εργασίας [8].

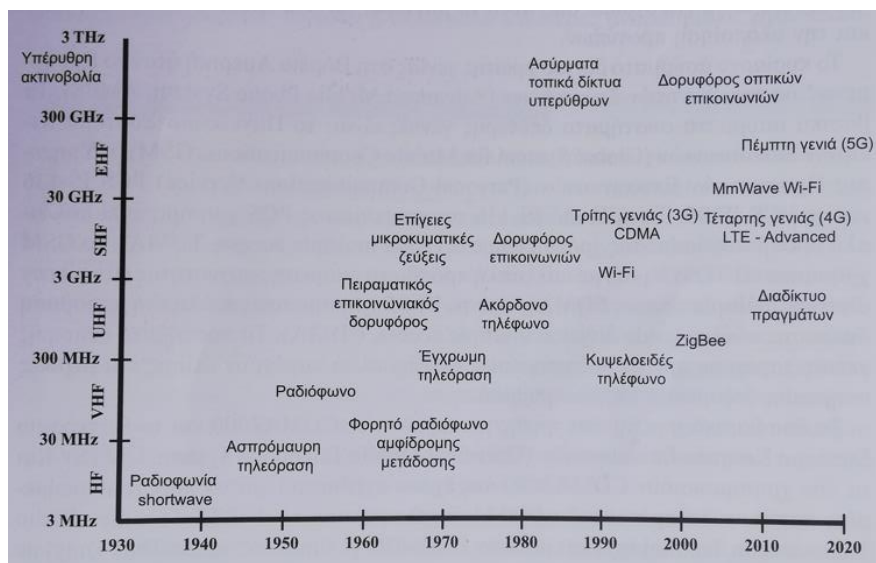
## 2.8 Τεχνολογίες επικοινωνίας

Η επίδραση των ασύρματων επικοινωνιών ήταν και θα συνεχίσει να είναι πολύ έντονη, διότι αποτελεί μια από τις ελάχιστες εφευρέσεις που κατάφεραν να αλλάξουν τον τρόπο με τον οποίο μεταδίδονται τα δεδομένα. Οι ασύρματες συνδέσεις επιτρέπουν στις συσκευές να επικοινωνούν μεταξύ τους και να ανταλλάσσουν πληροφορίες μέσα από το διαδίκτυο. Υπάρχει ένας τεράστιος αριθμός ασύρματων τεχνολογιών που χρησιμοποιούνται σήμερα και διακρίνονται μεταξύ τους ανάλογα με την λειτουργικότητα, την ταχύτητα μετάδοσης των δεδομένων και την δυνατότητα επέκτασης αυτών. Ορισμένες από αυτές είναι το Zigbee, το NFC, το Bluetooth, το NB-IoT, τα κυψελωτά δίκτυα 5G και το Wi-Fi 6. Στις ακόλουθες ενότητες εστιάζουμε στις λεπτομέρειες των δυο τελευταίων ασύρματων δικτύων και αναλύουμε τα χαρακτηριστικά τους με σκοπό να αποδείξουμε την καταλληλότητά τους για βιομηχανικά περιβάλλοντα.

### 2.8.1 Ασύρματη τεχνολογία (Wireless Technology).

Από την αρχαιότητα οι άνθρωποι έβρισκαν τρόπους για να μπορούν να επικοινωνούν μεταξύ τους σε μεγάλες αποστάσεις. Χρησιμοποιώντας σφυρίγματα ή διαβάζοντας τα σήματα καπνού (όπως έκαναν οι ινδιάνοι), μπορούσαν να ανταλλάσσουν πληροφορίες γρηγορότερα και σε αποστάσεις αρκετών χιλιομέτρων. Με την πάροδο του χρόνου και το μορφωτικό επίπεδο των ανθρώπων να βελτιώνεται αναζητήθηκαν νέοι μέθοδοι επικοινωνίας που θα ευνοούσαν την ασύρματη μετάδοση. Έτσι, περισσότερα από 100 χρόνια πριν, το 1896, ο Guglielmo Marconi ανακάλυψε τον ασύρματο τηλεγράφο και έστειλε για πρώτη φορά σήματα που διέσχισαν τον Ατλαντικό Ωκεανό σε μια απόσταση μεγαλύτερη από 3200 χιλιόμετρα.

Κατά τον τελευταίο αιώνα, η αλματώδης πρόοδος της ασύρματης τεχνολογίας έχει οδηγήσει σε νέες μεθόδους μετάδοσης, όπως η ραδιοφωνία, η κινητή τηλεφωνία και οι επικοινωνιακοί δορυφόροι. Η ασύρματη επικοινωνία επιτρέπει την μεταφορά δεδομένων μεταξύ δυο ή περισσότερων άκρων μέσω ραδιοδιαύλων, χωρίς τη χρήση κάποιου ενσύρματου μέσου μετάδοσης δεδομένων, όπως τα χάλκινα καλώδια ή οι οπτικές ίνες. Για την μετάδοση των δεδομένων χρησιμοποιούνται διάφορες ζώνες συχνοτήτων που ονομάζονται ραδιοσυχνότητες. Κάθε ζώνη έχει διαφορετικές απαιτήσεις ως προς την κατανάλωση ισχύος και τα εμπόδια που συναντά καθώς επίσης προσφέρει διαφορετικούς ρυθμούς μετάδοσης δεδομένων και ενεργό εμβέλεια. Πλέον, η προσοχή έχει στραφεί στη κυψελοειδή τεχνολογία, τις εφαρμογές ασύρματων τοπικών δικτύων (WLAN) και το διαδίκτυο των πραγμάτων (IoT).



Εικόνα 11: Εξέλιξη ασύρματων δικτύων (πηγή: [45])

Ένα θετικό χαρακτηριστικό της ασύρματης δικτύωσης είναι πως επιτρέπει την ανάπτυξη WAN, MAN και LAN δικτύων πιο γρήγορα και με μικρότερο κόστος συγκριτικά με τα ενσύρματα δίκτυα. Αυτό συμβαίνει αφού τα ασύρματα δίκτυα χρησιμοποιούν σταθμούς βάσης για να εκπέμψουν το σήμα και δεν υπάρχει η ανάγκη καλωδίωσης των συσκευών ακόμα και σε δύσβατες περιοχές. Οι διάφορες τεχνικές καινοτομίες σε συνδυασμό με τις δυνατότητες των κινητών συσκευών συνέβαλλαν στην επιτυχία των ασύρματων δικτύων (π.χ. 4G LTE, 5G, Wi-Fi). Η υποστήριξη νέων εφαρμογών από τις συσκευές όπως βίντεο υψηλής ποιότητας και πρόσβαση πολλών megabits στο διαδίκτυο, αλλάζουν συνεχώς τις απαιτήσεις για ικανοποιητικούς ρυθμούς δεδομένων, εύκολη πρόσβαση, σταθερές συνδέσεις, μικρές καθυστερήσεις και υψηλή ποιότητα υπηρεσιών. Στην αρχή ο στόχος των ασύρματων δικτύων ήταν οι επικοινωνίες φωνής. Πλέον αυτό έχει αλλάξει με την προσοχή να εστιάζεται κυρίως στα δεδομένα. Έτσι, ανοίγει ο δρόμος για αναξιοποίητες, μέχρι τώρα, δυνατότητες και υποστήριξη νέων εφαρμογών, όπως οι επικοινωνίες μηχανής-με-μηχανή (M2M), το IoT κ.α. [45].

## 3 Ασύρματο δίκτυο Wi-Fi 6 (802.11ax)

### 3.1 Εισαγωγή στο πρότυπο 802.11 (Wi-Fi).

Η αρχή έγινε το 1985 όταν για πρώτη φορά η Ομοσπονδιακή Επιτροπή Επικοινωνιών (FCC) των ΗΠΑ αποφάσισε να ανοίξει τις ζώνες ασύρματου φάσματος στα 900MHz, 2.4GHz και 5GHz για χρήση χωρίς κρατική άδεια. Για να μην υπάρξουν προβλήματα με παρεμβολές από άλλες συσκευές που χρησιμοποιούσαν ήδη αυτές τις ζώνες συχνοτήτων, δόθηκε η λύση της εξάπλωσης του φάσματος, δηλαδή ένα ραδιοσήμα, μπορούσε να μεταδίδεται σε ένα ευρύ φάσμα συχνοτήτων, αντί για μια καθορισμένη συχνότητα, έτσι ήταν πιο δύσκολο να συμβούν παρεμβολές μεταξύ των σημάτων [27].

Σχεδόν 12 χρόνια μετά πρωτοεμφανίστηκε το Wireless Fidelity, γνωστό και ως Wi-Fi. Το δημοφιλέστερο πρότυπο ασύρματης δικτύωσης φέρει 6 διαφορετικές εκδόσεις με την αρχική του ονομασία να δίνεται από το ινστιτούτο ηλεκτρολόγων και ηλεκτρονικών μηχανικών (Institute of Electrical and Electronics Engineers - IEEE) ως 802.11. Κάθε επόμενη έκδοση του είχε ως πρόθεμα το 802.11 ακολουθούμενο από γράμματα, όπως 802.11a, 802.11g κ.ά. Για λόγους ευκολίας η Wi-Fi Alliance που είναι ένας οργανισμός υπεύθυνος για την πιστοποίηση της ασύρματης τεχνολογίας Wi-Fi, αποφάσισε να απλοποιήσει την ονοματοδοσία. Έτσι πλέον επισημαίνονται ως Wi-Fi 5, Wi-Fi 6 και είναι γνωστό, πως όσο μεγαλύτερο είναι το νούμερο στο τέλος, τόσο νεότερη είναι και η έκδοση του Wi-Fi. Το πρότυπο 802.11 αποτελείται από ένα σύνολο προδιαγραφών του υποεπιπέδου ελέγχου πρόσβασης μέσω (Media Access Control - MAC) και του φυσικού επιπέδου (Physical Layer) του μοντέλου OSI για την εφαρμογή σε WLAN δίκτυα. Το Wi-Fi είναι ένα είδος ασύρματου τοπικού δικτύου (WLAN) που χρησιμοποιεί σήματα ραδιοσυχνοτήτων αντί για καλώδια για να επιτύχει τις συνδέσεις συσκευών με το διαδίκτυο. Για να λειτουργήσει ένα WLAN δίκτυο χρειάζονται τρία βασικά στοιχεία: μια κεραία εκπομπής, ένας ραδιοδίαυλος επικοινωνίας και μια κεραία λήψης.

Η πρώτη γενιά του Wi-Fi παρουσιάστηκε το 1997 με την ονομασία 802.11 από το IEEE. Το πρότυπο 802.11 όριζε τον τρόπο επικοινωνίας και διασύνδεσης των συσκευών στο ασύρματο δίκτυο (WLAN) και τη χρήση του πρωτοκόλλου πολλαπλής πρόσβασης με αίσθηση φέροντος και αποφυγή σύγκρουσης (CSMA/CA). Ακόμη, η έκδοση αυτή συμπεριλάμβανε τις τεχνολογίες DSSS και FHSS του φυσικού επιπέδου που επέτρεπαν την ασύρματη μεταφορά 1-2MB δεδομένων μεταξύ των συσκευών κάθε δευτερόλεπτο. Λίγο αργότερα το 1999 συστήθηκε εμπορικά η δεύτερη γενιά Wi-Fi ως ένα χαρακτηριστικό ωραίο για να έχεις με τις ονομασίες 802.11a (Wi-Fi 2) και 802.11b (Wi-Fi 1). Με ταχύτητες που έφταναν τα 11MB το δευτερόλεπτο το Wi-Fi 1, ήταν αρκετά πιο αργό από τα ενσύρματα δίκτυα ethernet της εποχής, ωστόσο παρέμενε αρκετά ικανοποιητικό δεδομένου ότι δεν υπήρχαν πολλές συσκευές με ενσωματωμένο Wi-Fi. Διατηρώντας το ίδιο πρωτόκολλο CSMA/CA με το αρχικό πρότυπο στο επίπεδο MAC και παράλληλα

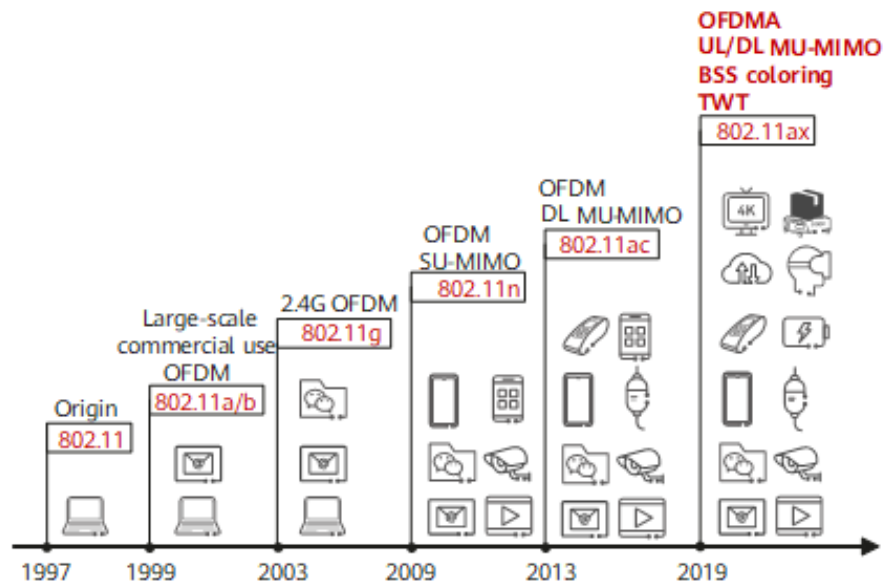
βελτιώνοντας την τεχνική DSSS με κωδικοποίηση CCK χρησιμοποιώντας ζώνη συχνοτήτων στα 2.5GHz και κανάλι μετάδοσης 22MHz ήταν και το μόνο από τα δύο πρότυπα που κατάφερε να εδραιωθεί. Η δημοφιλία του Wi-Fi άρχισε να απογειώνεται όταν την ίδια χρονιά η Apple παρουσίασε τους νέους της, τότε, υπολογιστές iBook, με την επιλογή ασύρματης σύνδεσης που έφερε την επωνυμία AirPort. Γρήγορα ακολούθησαν το παράδειγμα της και άλλοι μεγάλοι κατασκευαστές με τα προϊόντα τους να γίνονται ανάρπαστα [25][56].

Αρχές της δεκαετίας του 2000 οι φορητές συσκευές άρχισαν να εισέρχονται όλο και περισσότερο στις ζωές των ανθρώπων, είτε για επαγγελματική, είτε για προσωπική χρήση. Έτσι το 2003 το Wi-Fi 3 (802.11g) ενσωματώθηκε στις καινούργιες συσκευές, χρησιμοποιώντας τεχνική ορθογωνικής πολυπλεξίας διαίρεσης συχνότητας (OFDM) και ταχύτητες έως 54MB το δευτερόλεπτο με ζώνη συχνοτήτων στα 2.4GHz. Η Τρίτη γενιά Wi-Fi άρχισε να πιάνει και να ανταγωνίζεται τις επιδόσεις των ενσύρματων συνδέσεων, συνδυάζοντας υψηλότερες ταχύτητες και μεγαλύτερη κάλυψη δικτύου. Το πρότυπο 802.11n ακολούθησε το 2009 και μαζί του έφερε σημαντικές αλλαγές. Αρχικά το Wi-Fi 4 σε σχέση με τους προκατόχους του είχε μεγαλύτερη αξιοπιστία παρέχοντας μεγαλύτερες ταχύτητες με θεωρητικούς ρυθμούς δεδομένων στα 600MB το δευτερόλεπτο. Στην πράξη έτρεχε στις τάξεις των 100 με 150Mbps και λειτουργούσε σε κανάλια των 20 και 40MHz με εύρος συχνοτήτων τα 2.4GHz και 5GHz. Η σημαντικότερη αλλαγή όμως ήταν η μετατροπή από μονής εισόδου μονής εξόδου (Single Input Single Output - SISO) σε πολλαπλής εισόδου πολλαπλής εξόδου (Multiple Input Multiple Output - MIMO) συστήματα που χρησιμοποιούν πολλαπλές κεραίες τόσο εκπομπής όσο και λήψης για να βελτιώσουν την επικοινωνία πομπού-δέκτη, μέσω της χρήσης πολλών ραδιοδιαύλων [25].

Το 2013 γίνεται γνωστό το μέχρι πρότινος χρησιμοποιούμενο Wi-Fi 5 (802.11ac). Κύριος στόχος του Wi-Fi 5 είναι να χρησιμοποιήσει το εύρος των 5GHz πιο αποτελεσματικά. Με ταχύτητα αρκετά υψηλότερη από τον προκατόχο του και τις τιμές της να φτάνουν τα 3.5Gbps, αλλά και με μεγαλύτερο εύρος ζώνης που άγγιζε τα 160MHz, τα δεδομένα μπορούσαν να αποστέλλονται πιο γρήγορα μέσω περισσότερων κεραιών. Η διαμόρφωση 256-QAM αλλά και το μοντέλο MU-MIMO που χρησιμοποιήθηκε για πρώτη φορά στη δεύτερη έκδοση του Wi-Fi 5, επέτρεπε σε πολλούς χρήστες να έχουν πρόσβαση στο ασύρματο δίκτυο ταυτόχρονα, χωρίς διακοπές. Ωστόσο αυτό ήταν μονάχα διαθέσιμο για downlink συνδέσεις και μπορούσε να υποστηρίξει μέχρι 4 συσκευές κάθε φορά.

Η έκτη και πιο πρόσφατη έκδοση Wi-Fi είναι το πρότυπο 802.11ax. Με βασικό στόχο να βελτιώσει τις αποδόσεις του δικτύου όταν σε αυτό είναι συνδεδεμένες περισσότερες συσκευές σε σχέση με την προηγούμενη έκδοση. Το Wi-Fi 6 προσφέρει 4 φορές μεγαλύτερη χωρητικότητα, 75 τοις εκατό χαμηλότερη καθυστέρηση και σχεδόν τριπλάσια ταχύτητα από το Wi-Fi 5 που ανέρχεται στα 9.6Gbps. Ακόμη λειτουργεί στις

ζώνες συχνοτήτων 2.4GHz και 5GHz και είναι πλήρως συμβατό και με παλαιότερα πρότυπα Wi-Fi, χωρίς να χρειάζεται επιπλέον ρυθμίσεις. Για να επιτύχει τις παραπάνω λειτουργίες το Wi-Fi 6 χρησιμοποιεί βελτιωμένη έκδοση MU-MIMO για UL και DL συνδέσεις, πολλαπλή πρόσβαση ορθογώνιας διαίρεσης συχνοτήτων OFDMA, διαμόρφωση 1024-QAM, πρόληψη συγκρούσεων που βασίζεται στο BSS Coloring, κρυπτογράφηση δεδομένων με WPA3, διαμόρφωση δέσμης Beamforming με κατευθυντική μετάδοση ή λήψη σήματος και ενεργειακή απόδοση TWT. Όλες οι προαναφερθείσες έννοιες αναλύονται παρακάτω στα χαρακτηριστικά του δικτύου Wi-Fi [24][25][26][27].



Εικόνα 12: Εξέλιξη των τεχνικών Wi-Fi σε κάθε γενιά (πηγή:

<https://www.google.com/imgres?imgurl=https%3A%2F%2Fdownload.huawei.com%2Fmdl%2Fimage%2Fdownload%3Fuuid%3Daf301767aab642f4a0f41013bfc6ea75&imgrefurl=https%3A%2F%2Finfo.support.huawei.com%2Finfo-finder%2Fencyclopedia%2Fen%2FWiFi.html&tbnid=2Mpt1YdvsD6DTM&vet=12ahUKEwjE1crjw7D6AhWI5KQKHaxLBNcQMygPegUIARDRAQ...i&docid=j3bhBrn3N7ThMM&w=423&h=286&q=evolution%20of%20wifi&ved=2ahUKEwjE1crjw7D6AhWI5KQKHaxLBNcQMygPegUIARDRAQ>)

### 3.2 Αρχιτεκτονική Wi-Fi.

Το Wi-Fi, όπως και όλες οι υπόλοιπες κατηγορίες WLAN, λειτουργεί στα πρώτα δυο επίπεδα (φυσικό επίπεδο και επίπεδο ζεύξης δεδομένων) του μοντέλου OSI. Το φυσικό επίπεδο περιλαμβάνει [28][29]:

- **Κόμβους:** Οποιαδήποτε συσκευή είναι συνδεδεμένη στο WLAN δίκτυο. Για παράδειγμα Access Point (AP), router, κινητές συσκευές όπως κινητά και tablet.
- **Βασικό σύνολο υπηρεσιών (BSS):** Δείχνει την ομαδοποίηση των συσκευών του δικτύου ως προς τον τρόπο επικοινωνίας μεταξύ τους. Περιλαμβάνει δυο κατηγορίες συσκευών, τις συσκευές που επικοινωνούν μεταξύ τους μέσω access

point (Infrastructure BSS) και τις συσκευές που επικοινωνούν με απευθείας σύνδεση μεταξύ τους (Independent BSS).

- **Εκτεταμένο σύνολο υπηρεσιών (ESS):** Ένα ή περισσότερα σύνολα συνδεδεμένων BSS
- **Κατανεμημένα Συστήματα (DS):** Σύστημα που παρέχει σύνδεση πολλαπλών access point στο ESS.

Το επίπεδο ζεύξης δεδομένων αποτελείται από τα υποεπίπεδα Logical Link Control (LLC) και Media Access Control (MAC). Το υποεπίπεδο LLC παρέχει έλεγχο ροής, έλεγχο λαθών, πολυπλεξία και συγχρονισμό των δεδομένων. Από την άλλη το υποεπίπεδο MAC είναι υπεύθυνο για την μετάδοση πακέτων από και προς την κάρτα δικτύου. Χρησιμοποιεί το πρωτόκολλο πολλαπλής πρόσβασης με αίσθηση φέροντος και αποφυγή σύγκρουσης (CSMA/CA). Επιπλέον γίνονται και κάποιες λειτουργίες συντονισμού όπως [30]:

#### **Κατανεμημένη λειτουργία συντονισμού (DFC):**

- Υποχρεωτική λειτουργία στο επίπεδο MAC
- Αναπτύσσεται είτε στο Infrastructure BSS και στο Independent BSS
- Χρησιμοποιεί κατανεμημένη πρόσβαση καναλιού που βασίζεται σε διαμάχη

#### **Λειτουργία συντονισμού σημείου (PCF) :**

- Προαιρετική λειτουργία που χρησιμοποιεί το υποεπίπεδο MAC
- Αναπτύσσεται μόνο στο Infrastructure BSS
- Χρησιμοποιεί κεντρική πρόσβαση καναλιού χωρίς διαμάχη.

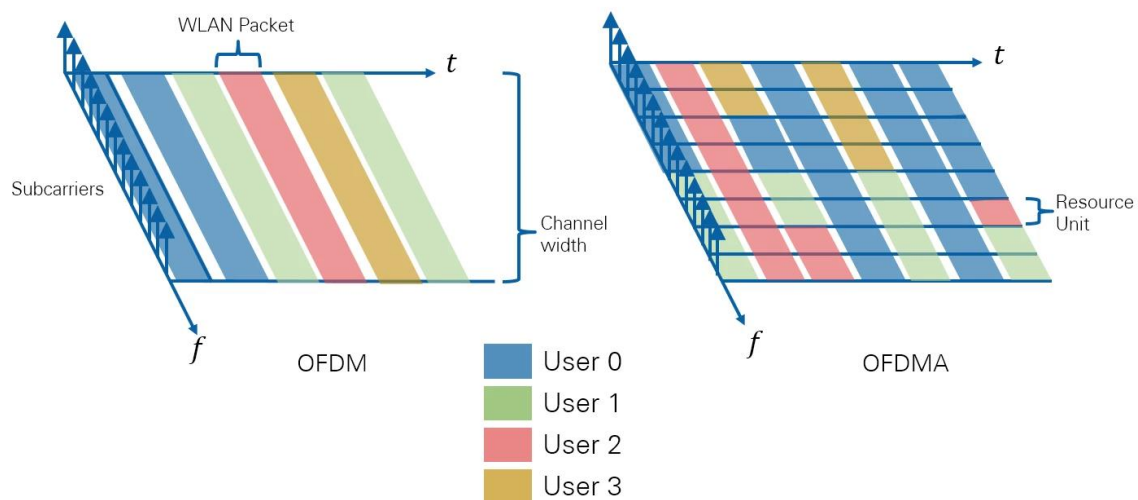
### **3.3 Τεχνικά χαρακτηριστικά Wi-Fi 6.**

Ξεκινώντας από το αρχικό πρότυπο 802.11 και όλες οι επόμενες εκδόσεις του μέχρι και το Wi-Fi 5 έφεραν σημαντικές αναβαθμίσεις εστιάζοντας κυρίως στην ενίσχυση της ταχύτητας του δικτύου, αλλά κανένα δεν αφορούσε την απόδοση του. Καθημερινά ο αριθμός των συσκευών που είναι συνδεδεμένος σε ένα δίκτυο αυξάνεται με αποτέλεσμα ο συνολικός φόρτος του δικτύου να μεγαλώνει και να δημιουργούνται παρεμβολές μεταξύ των σημάτων, έχοντας αρνητικό αντίκτυπο στην απόδοση του δικτύου. Αυτό

αλλάζει με το Wi-Fi 6, αφού πέραν της σαφώς βελτιωμένης ταχύτητας, το πρότυπο 802.11ax προσφέρει καλύτερη απόδοση, υψηλή αξιοπιστία με μικρότερες καθυστερήσεις και μεγαλύτερη κάλυψη δικτύου, προσπαθώντας να ανταποκριθεί στις αυξημένες απαιτήσεις που υπάρχουν. Αυτό επιτυγχάνεται μέσα από τις νέες αλλά και βελτιωμένες τεχνολογίες που φέρει σαν ασύρματο δίκτυο υψηλής ποιότητας (High Efficiency WLAN, HEW [33]) όπως αλλιώς είναι γνωστό το Wi-Fi 6 και παρουσιάζονται παρακάτω.

### 3.3.1 Πολλαπλή πρόσβαση με ορθογώνια διαίρεση συχνοτήτων (OFDMA).

Το OFDMA αποτελεί ίσως το σημαντικότερο χαρακτηριστικό που υιοθέτησε το Wi-Fi 6. Μέχρι τώρα τα προηγούμενα πρότυπα χρησιμοποιούσαν πολυπλεξία ορθογώνιας διαίρεσης συχνότητας OFDM. Αυτό πρακτικά σήμαινε πως μόνο ένας πελάτης (Client) σε ολόκληρο το κανάλι μπορούσε να επικοινωνήσει με ένα σημείο πρόσβασης (AP) μια δεδομένη χρονική στιγμή. Φυσικά αυτό είχε σημαντικές επιπτώσεις στην απόδοση του δικτύου εξαιτίας των μεγάλων καθυστερήσεων από των ουρών προτεραιότητας που δημιουργούνταν. Το OFDMA σαν εξέλιξη της ψηφιακής διαμόρφωσης OFDM, υποστηρίζει συνδέσεις UL και DL για πολλούς χρήστες και θεωρείται ιδανικό για εφαρμογές χαμηλού εύρους ζώνης συχνοτήτων αφού μπορεί να εξυπηρετεί σχεδόν ταυτόχρονα πολλούς χρήστες, διασφαλίζοντας έτσι υψηλή ποιότητα υπηρεσιών (QoS). Με σκοπό να καταφέρει να βελτιώσει τη συνολική απόδοση του δικτύου και να μειώσει σημαντικά τις καθυστερήσεις, το OFDMA διαίρεσε το ασύρματο κανάλι σε μικρότερα τμήματα που ονομάζονται μονάδες πόρων (Resource Units - RU) όπως φαίνεται και στην Εικόνα 13.



Εικόνα 13 Σύγκριση τεχνικών OFDM και OFDMA (πηγή:

<https://www.google.com/imgres?imgurl=https%3A%2F%2Fwww.rfwireless-world.com%2Fimages%2FOFDM-vs-OFDMA.jpg&imgrefurl=https%3A%2F%2Fwww.rfwireless-world.com%2FTerminology%2FDifference-between-MU-MIMO-and-OFDMA.html&tbnid=Y3XbQopoHvotpm&vet=10CBMQMyhwahcKEwiwgNzJw7D6AhUAAAAAHQAAAAAQAg..i&docid=>



Επειδή σε προηγούμενες εκδόσεις Wi-Fi το OFDM χρησιμοποιούσε ολόκληρο το εύρος των καναλιών ακόμη και όταν αυτό δεν ήταν απαραίτητο, το Wi-Fi 6 με την τεχνική OFDMA απέφυγε την σπατάλη του καναλιού μετάδοσης διαιρώντας το σε μονάδες πόρων (RU). Τα RU χωρίζονται σε μικρά και σταθερά μεγέθη και περιέχουν τα δεδομένα προς μετάδοση. Για την αποτελεσματικότερη διαχείριση των πόρων του δικτύου κάθε υπομονάδα αντιστοιχεί στις διάφορες απαιτήσεις των χρηστών στο δίκτυο. Υπάρχουν 7 τύποι RU όπως φαίνεται και στον παρακάτω Πίνακας και ανάλογα με το εύρος ζώνης του καναλιού που χρησιμοποιείται, φαίνεται ο αριθμός των χρηστών που μπορούν να μεταδίδουν ή να λαμβάνουν δεδομένα ταυτόχρονα στο κανάλι [34][35].

Πίνακας 2: Πλήθος μονάδων πόρων ανάλογα το εύρος καναλιού

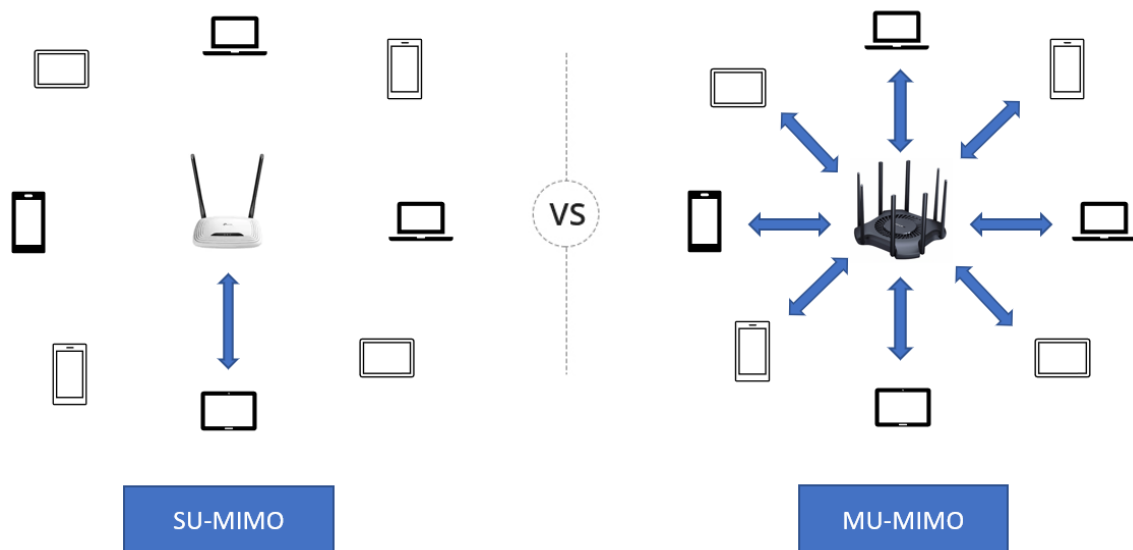
Resource Units (RU)	20MHz Channel	40MHz Channel	80MHz Channel	160MHz Channel
26	9 Clients	18 Clients	37 Clients	74 Clients
52	4 Clients	8 Clients	16 Clients	32 Clients
106	2 Clients	4 Clients	8 Clients	16 Clients
242	1 Client	2 Clients	4 Clients	8 Clients
484	-	1 Client	2 Clients	4 Clients
996	-	-	1 Client	2 Clients
2x996	-	-	-	1 Client

### 3.3.2 Multiple-User, Multiple Input, Multiple Output (MU-MIMO).

Η τεχνολογία πολλαπλής εισόδου, πολλαπλής εξόδου, πολλών χρηστών (MU-MIMO) δεν αποτελεί νέο χαρακτηριστικό για τα ασύρματα δίκτυα WLAN. Την εμφάνιση της έκανε στη δεύτερη έκδοση του Wi-Fi 5 ερχόμενη να αντικαταστήσει το απλό MIMO. Στο πρότυπο 802.11ac (Wi-Fi 5) το MU-MIMO επέτρεπε σε ένα router ή AP να επικοινωνεί ταυτόχρονα με πολλές συσκευές χωρίς να χρειάζεται να τις εξυπηρετήσει με σειρά προτεραιότητας. Αυτό είχε σαν αποτέλεσμα να αυξηθεί η ταχύτητα μετάδοσης των δεδομένων και να μειωθεί η συνολική καθυστέρηση του δικτύου. Ωστόσο, σημαντικοί περιορισμοί όπως η διαθεσιμότητα του MU-MIMO μόνο για Downlink συνδέσεις, η περιορισμένη λειτουργία του γύρω από τη ζώνη συχνοτήτων 5GHz και η υποστήριξη μέχρι τεσσάρων ροών οποιαδήποτε χρονική στιγμή, οδήγησαν στη νέα βελτιωμένη έκδοση του MU-MIMO που φέρει το πρότυπο 802.11ax Εικόνα 14.

Το Wi-Fi 6 χρησιμοποιεί MU-MIMO για Uplink και Downlink συνδέσεις με τις ίδιες συχνότητες, πράγμα που σημαίνει πως ένα router μπορεί ταυτόχρονα να εκπέμπει σε πολλούς δέκτες και να λαμβάνει από πολλές συσκευές δεδομένα. Ακόμη μπορεί να υποστηρίξει μέχρι 8 ροές επικοινωνίας στο εύρος των 20MHz, γεγονός που το καθιστά περιζήτητο σε IoT εφαρμογές για συσκευές που απαιτούν χαμηλή κατανάλωση ενέργειας. Επειδή οι ροές που χρησιμοποιεί είναι χωρικές, σημαίνει πως σε περίπτωση που 2 συσκευές είναι σε κοντινή απόσταση μεταξύ τους θα μοιραστούν την ίδια ροή.

Μπορεί το MU-MIMO και το OFDMA να επιτρέπουν την ταυτόχρονη μετάδοση δεδομένων σε ένα σύστημα, ωστόσο και τα 2 έχουν διαφορετικό τρόπο προσέγγισης. Το MU-MIMO εκμεταλλεύεται τις κεραιές του συστήματος και επιτρέπει σε πολλούς χρήστες να χρησιμοποιούν διαφορετικές ροές, ενώ το OFDMA χωρίζει το κανάλι σε υπομονάδες (RU) μέσα από τις οποίες μεταδίδεται η πληροφορία στους χρήστες. Το MU-MIMO είναι πιο αποτελεσματικό σε μικρές και μεσαίες αποστάσεις σε αντίθεση με το OFDMA που είναι αποτελεσματικό και σε μεγαλύτερες [25].

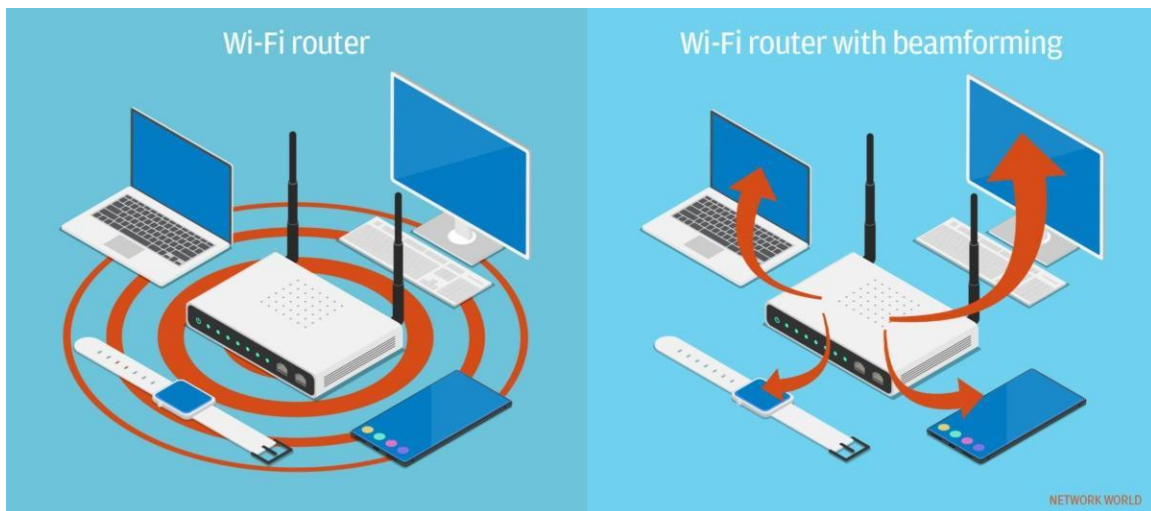


Εικόνα 14: Σύγκριση τεχνικών SU-MIMO και MU-MIMO

### 3.3.3 Διαμόρφωση δέσμης (Beamforming).

Τα σήματα που μεταδίδουν οι κεραιές σε ένα ασύρματο δίκτυο (WLAN) είναι ηλεκτρομαγνητικά κύματα, τα οποία από την φύση τους μπορούν να μεταδίδονται προς διάφορες κατευθύνσεις. Η μετάδοση των κυμάτων αυτών γίνεται μέσω ραδιοδιαύλων επικοινωνίας που αρκετές φορές περιέχουν εμπόδια. Τα εμπόδια επηρεάζουν σημαντικά την επικοινωνία μέσα στο δίαυλο καθώς είναι υπεύθυνα για παρεμβολές μεταξύ των σημάτων. Μια παρεμβολή μπορεί να επηρεάσει θετικά το μεταδιδόμενο σήμα, ενισχύοντάς το, ή μπορεί να το εξασθενίσει, δημιουργώντας προβλήματα στην επικοινωνία των 2 άκρων.

Για την αντιμετώπιση του παραπάνω προβλήματος ενσωματώθηκε στα ασύρματα δίκτυα η τεχνολογία Beamforming. Η διαμόρφωση δέσμης (Beamforming) είναι μια τεχνική που χρησιμοποιείται για την αποστολή ισχυρών σημάτων, εστιασμένων σε μια κεραία λήψης μέσω του ασύρματου καναλιού μετάδοσης δεδομένων και όχι την αναμετάδοση του σήματος προς όλες τις κατευθύνσεις. Πρώτη φορά έκανε την εμφάνισή της στο πρότυπο 802.11n (Wi-Fi 4), καθώς για τη διαμόρφωση δέσμης ήταν απαραίτητη η χρήση της τεχνολογίας MIMO. Ωστόσο με το Wi-Fi 6 η διαμόρφωση δέσμης επέτρεπε σε πολλούς χρήστες να επικοινωνούν ταυτόχρονα με πολλές κεραιές κάνοντας χρήση της λειτουργίας MU-MIMO. Η μετάδοση του σήματος απευθείας στους ενδιαφερόμενους δέκτες και όχι στο ευρύ φάσμα του δικτύου, μείωσε σημαντικά τις παρεμβολές, κάνοντας ταχύτερη και πιο αξιόπιστη την κάλυψη του δικτύου Εικόνα 15 [36].

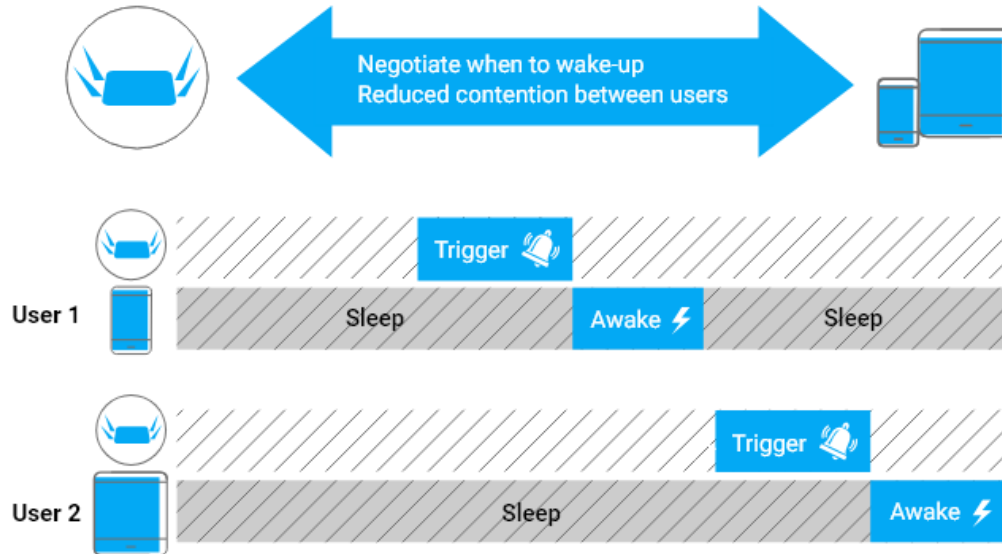


Εικόνα 15: Σύγκριση τεχνικών με διαμόρφωση δέσμης και χωρίς (πηγή: <https://www.google.com/url?sa=i&url=https%3A%2F%2Fwww.clubdelapresseduvaldemarne.com%2Fbeamforming-router-stort-hus&psig=AOvVaw2XZlz7qa7iXHDWXqHyw-e&ust=1664216038805000&source=images&cd=vfe&ved=0CAwQjRxqFwoTCLnIYDGsPoCFQAAAAAdAAAAABAF>)

### 3.3.4 Target Wake Time (TWT).

Το Target Wake Time Εικόνα 16 είναι ένας μηχανισμός που χρησιμοποιείται στο Wi-Fi 6 με σκοπό την κατανάλωση λιγότερης ενέργειας και ως εκ τούτου την αύξηση της διάρκειας ζωής της μπαταρίας. Ο μηχανισμός αυτός επιτρέπει σε ένα Access Point να διαχειριστεί με αποτελεσματικότερο τρόπο τη δραστηριότητα του δικτύου Wi-Fi, έτσι ώστε να ελαχιστοποιηθεί ο ανταγωνισμός μεταξύ των συσκευών του δικτύου. Αυτό επιτυγχάνεται μέσα από την λειτουργία του TWT να επιτρέπει σε ένα σημείο πρόσβασης να προγραμματίζει τις συνδέσεις των συσκευών στο δίκτυο, δηλαδή ορίζει την ενεργοποίηση των συσκευών για αποστολή και λήψη δεδομένων και την απενεργοποίησή τους σε κατάσταση αναμονής (standby) για εξοικονόμηση ενέργειας. Στην κατάσταση αναμονής οι συσκευές δεν χάνουν την σύνδεση τους από το δίκτυο, απλώς η κεραία απενεργοποιείται με σκοπό να μην καταλαμβάνουν θέση στο κανάλι

μετάδοσης και δημιουργείται συμφόρηση σε αυτό. Ακόμη, οι διάφοροι κόμβοι του δικτύου επικοινωνούν και ενημερώνουν τα AP σχετικά με την χρονική διάρκεια που θα παραμείνουν ενεργοί. Με αυτό τον τρόπο τα AP εκτελούν καλύτερο χρονοπρογραμματισμό για την αποτελεσματικότερη οργάνωση του δικτύου [37].

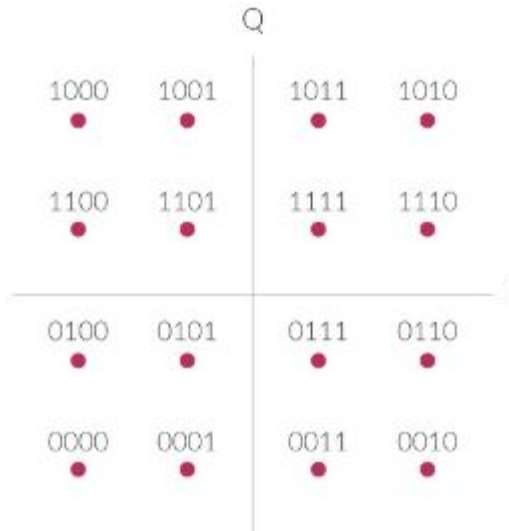


Εικόνα 16: Τεχνική TWT (πηγή:

<https://www.google.com/url?sa=i&url=https%3A%2F%2Fwww.techritual.com%2F2020%2F10%2F07%2F236506%2F&psig=AOvVaw3q4r5v0T0p5QwjI7S92O09&ust=1664216201896000&source=images&cd=vfe&ved=0CAwQjRxaFwoTCLCeqM7GsPoCFQAAAAAAdAAAAABAN>)

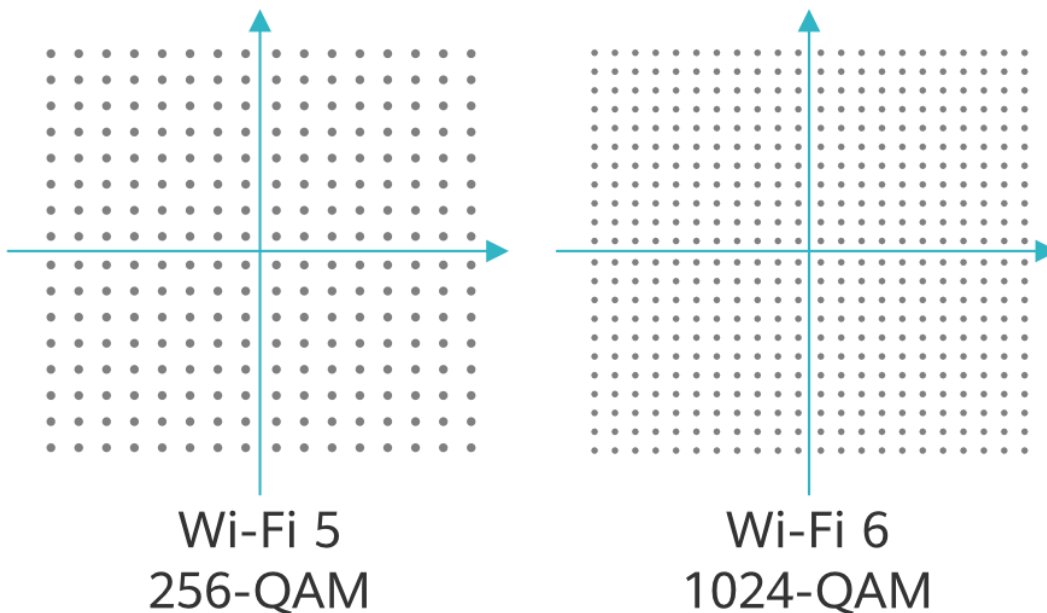
### 3.3.5 Διαμόρφωση 1024-QAM.

Η διαμόρφωση τετραγωνικού πλάτους (Quadrature Amplitude Modulation - QAM) είναι μια μέθοδος που χρησιμοποιείται συνήθως στα σύγχρονα συστήματα ραδιοσυχνοτήτων για τη μετατροπή (δυαδικών) ψηφίων σε αναλογικό σήμα. Όταν μια συσκευή μεταδίδει δεδομένα, πρέπει αυτά να έχουν αναλογική μορφή, αφού δεν υπάρχει κάποιος τρόπος μετάδοσης δυαδικών ψηφίων. Το αναλογικό σήμα αποτελείται από δυο μέρη, που είναι το πλάτος του σήματος και το τετράγωνο του. Σχηματικά, οι διαμορφώσεις QAM μπορούν να αναπαρασταθούν με διαγράμματα αστερισμού, όπου ο οριζόντιος άξονας αναπαριστά το πλάτος και ο κατακόρυφος άξονας τον τετραγωνισμό του σήματος. Το διάγραμμα αστερισμού είναι μια μέθοδος οπτικοποίησης και αναπαράστασης των ακολουθιών bit που ονομάζονται σύμβολα. Κάθε σύμβολο μεταδίδεται για συγκεκριμένη περίοδο που ονομάζεται χρόνος συμβόλου. Η θέση κάθε συμβόλου στο διάγραμμα προσδιορίζεται από το πλάτος του, την απόσταση δηλαδή από το κέντρο των αξόνων και από την φάση του, που μετριέται σε μοίρες από την οριζόντιο άξονα. Ο συνολικός αριθμός των συμβόλων που υπάρχει στο διάγραμμα προσδιορίζεται από την διαμόρφωση. Για παράδειγμα, η διαμόρφωση 16-QAM, έχει 16 πιθανά σύμβολα με 4 bit το καθένα όπως προκύπτει από την πράξη  $\log_2(16) = 4$ . Παρακάτω φαίνεται το διάγραμμα για της διαμόρφωσης 16-QAM Εικόνα 17.



Εικόνα 17: Διάγραμμα 16QAM (πηγή: <https://www.minim.com/blog/what-is-qam>)

Η διαμόρφωση 256-QAM, που εφαρμόστηκε στο Wi-Fi 5, χρησιμοποιούσε 8 bit ανά σύμβολο και επέτρεπε μεγαλύτερους ρυθμούς μετάδοσης δεδομένων. Με την εισαγωγή του νέου πρότυπου 802.11ax γίνεται αναβάθμιση σε νέο σύστημα διαμόρφωσης το 1024-QAM. Η συγκεκριμένη διαμόρφωση τετραπλασίασε τα σύμβολα και βελτίωσε την ταχύτητα κατά 25 τοις εκατό συγκριτικά με το προηγούμενο μοντέλο, χρησιμοποιώντας 10 bit/symbol αντί για 8 (Εικόνα 18). Όμως η συσσώρευση των συμβόλων τόσο κοντά μεταξύ τους επέφερε προβλήματα ευαισθησίας, καθώς σε περίπτωση σύγκρουσης κινδυνεύουν να χαθούν περισσότερα δεδομένα συγκριτικά με τη διαμόρφωση 256-QAM [38].



Εικόνα 18: Διαμορφώσεις 256QAM & 1024QAM

### 3.3.6 Wi-Fi Protected Access 3 (WPA3).

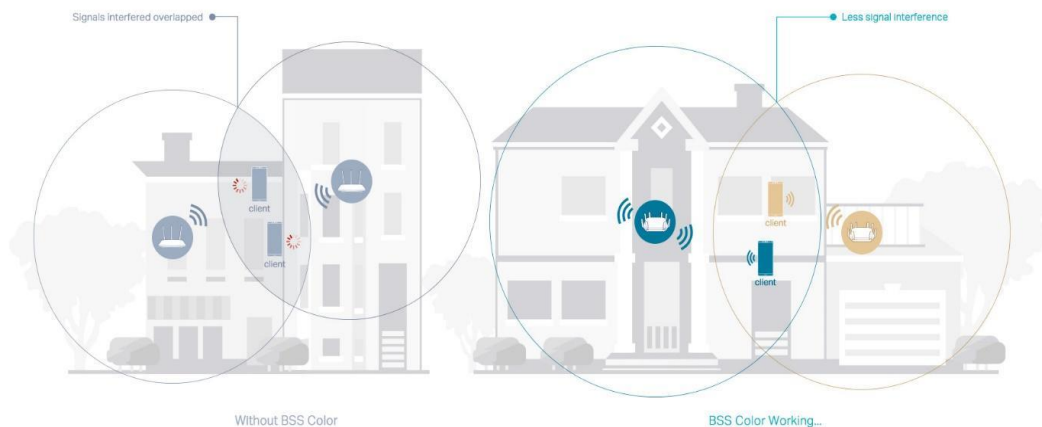
Το Wi-Fi αποτελεί απαραίτητο μέσο στην καθημερινότητα των ανθρώπων. Εκατομμύρια σπίτια και επιχειρήσεις βασίζουν την λειτουργία τους στο ασύρματο δίκτυο Wi-Fi για την υλοποίηση των καθημερινών τους αναγκών. Πέρα από τις ανάγκες για ψυχαγωγία το Wi-Fi εξυπηρετεί και ένα μεγάλο μέρος των οικονομικών συναλλαγών στην παγκόσμια αγορά, μεταφέροντας προσωπικά δεδομένα των χρηστών του. Αυτό απαιτεί ιδιαίτερη προσοχή και σαφώς αυξημένη ασφάλεια για την προστασία απόρρητων στοιχείων. Στη προσπάθειά της να εξασφαλίσει διαφάνεια στο τομέα της ασφάλειας η Wi-Fi Alliance εισήγαγε το πρωτόκολλο ασφαλείας WPA.

Το Wi-Fi Protected Access (WPA) έχει σχεδιαστεί για ασύρματα δίκτυα προστατεύοντας τα από μη εξουσιοδοτημένη πρόσβαση. Το 2004 εμφανίστηκε η δεύτερη έκδοση WPA2 που έφερε σημαντικές αναβαθμίσεις κόντρα στις προηγούμενες εκδόσεις. Στόχος της ήταν να βελτιώσει την ασφάλεια των δικτύων, χωρίς όμως να αντικαταστήσει τον υπάρχον εξοπλισμό. Η αναβάθμιση αυτή ήρθε αντικαθιστώντας το TKIP κλειδί που χρησιμοποιούσε η προηγούμενη έκδοση με τον αλγόριθμο κρυπτογράφησης κλειδιού AES. Ωστόσο, όπως και σε κάθε άλλη τεχνολογία έτσι και σε αυτή, με το πέρασμα των χρόνων επιτήδειοι hackers κατάφεραν να εντοπίσουν τρωτά σημεία στην ασφάλεια του αναγκάζοντας την εμφάνιση του πρωτοκόλλου WPA3 να γίνει το 2018.

Το WPA3 είναι το ενσωματωμένο πρωτόκολλο ασφαλείας που έρχεται μαζί με το ασύρματο δίκτυο WI-Fi 6 και ανάλογα την χρήση χωρίζεται σε προσωπικό και επιχειρησιακό. Δίνει περισσότερη βάση στην ασφάλεια, παρέχοντας ισχυρότερη κρυπτογράφηση των δεδομένων με χρήση κλειδιού 192bit AES GCMP. Μια συσκευή μπορεί να αποκτήσει πρόσβαση στο δίκτυο μόνο αν εγκατασταθεί σύνδεση με 4-way handshake, μεταξύ αυτής και του δρομολογητή. Επιπλέον χρησιμοποιεί το μηχανισμό SAE που παρέχει μεγαλύτερη ασφάλεια, ακόμα και αν οι κωδικοί δεν πληρούν τις απαραίτητες προϋποθέσεις, με αποτέλεσμα η αποκρυπτογράφηση των κωδικών και οι επιθέσεις ωμής βίας να γίνονται πολύ πιο δύσκολη υπόθεση. Για να πετύχει την επιθυμητή ασφάλεια το WPA3 χρησιμοποιεί τις πιο πρόσφατες μεθόδους ασφαλείας, δεν επιτρέπει την χρήση παλαιού τύπου πρωτοκόλλων και απαιτεί την ύπαρξη προστατευμένων πλαισίων διαχείρισης (PMF), αποτρέποντας την παράνομη πρόσβαση από μη εξουσιοδοτημένους χρήστες πχ επίθεση man-in-the-middle. Σε σχέση με το WPA2 που χρησιμοποιούσε την τεχνολογία WPS για την γρηγορότερη σύνδεση των συσκευών με τον δρομολογητή, το WPA3 χρησιμοποιεί ένα πιο βελτιωμένο σύστημα, easy to connect, που ονομάζεται πρωτόκολλο παροχής συσκευών (DPP). Αυτό επιτρέπει στους χρήστες να συνδέουν τις συσκευές στο δίκτυο σκανάροντας τα QR codes των συσκευών. Τέλος χρησιμοποιεί την ευκαιριακή ασύρματη κρυπτογράφηση (OWE) για την κρυπτογράφηση όλης της ασύρματης κίνησης στο κανάλι [40]**Σφάλμα! Το αρχείο προέλευσης της αναφοράς δεν βρέθηκε..**

### 3.3.7 Basic Service Sets (BSS) Coloring.

Σε πυκνοκατοικημένα περιβάλλοντα, όπως για παράδειγμα μια πόλη όπου κάθε σπίτι έχει τον δικό του δρομολογητή, πολύ συχνά παρατηρείται μείωση στην απόδοση των δικτύων εξαιτίας της συμφόρησης στα ασύρματα κανάλια από παρεμβολές γειτονικών δρομολογητών. Το Wi-Fi 6 θέλοντας να ενισχύσει την ποιότητα υπηρεσιών του βασίστηκε στην τεχνική BSS Coloring για να αποφύγει με αυτό τον τρόπο τις συγκρούσεις με γειτονικά δίκτυα. Το BSS Coloring επιτρέπει σε ένα σημείο πρόσβασης να χρησιμοποιεί ένα χρώμα, προκειμένου να ξεχωρίζει μοναδικά το δίκτυο. Σε αυτή την περίπτωση εάν κάποιο άλλο σήμα υπάρχει στο ίδιο κανάλι αλλά δεν έχει αυτό το χρώμα, τότε οι συσκευές το αγνοούν χωρίς να τις επηρεάζει. Το χρώμα είναι ουσιαστικά μια 6-bit τιμή που φαίνεται στην φυσική επικεφαλίδα και βοηθάει τις συσκευές να προσδιορίσουν αν τα δεδομένα αυτά είναι Inter-BSS ή Intra-BSS. Αν η τιμή της επικεφαλίδας αντιστοιχεί σε δεδομένα εξωτερικού BSS (Inter-BSS), τότε οι συσκευές αδιαφορούν για αυτά. Σε ένα Basic Service Set ανήκουν όλες οι συσκευές και το AP του δικτύου.



Εικόνα 19: Σύγκριση απόδοσης με και χωρίς τη χρήση BSS Coloring

Όπως φαίνεται και στην παραπάνω Εικόνα 19 σε περίπτωση που δεν χρησιμοποιείται η τεχνική BSS Coloring δυο γειτονικά δίκτυα που λειτουργούν στο ίδιο RF κανάλι θα προκαλέσουν συμφόρηση στο δίκτυο. Αντίθετα με την βοήθεια του BSS Coloring τα επικαλυπτόμενα BSS δεν επηρεάζουν αρνητικά την απόδοση του δικτύου καθώς κάθε ένα χρησιμοποιεί διαφορετική 6-bit επικεφαλίδα και έτσι αποφεύγονται οι παρεμβολές μεταξύ των δυο [37][42].

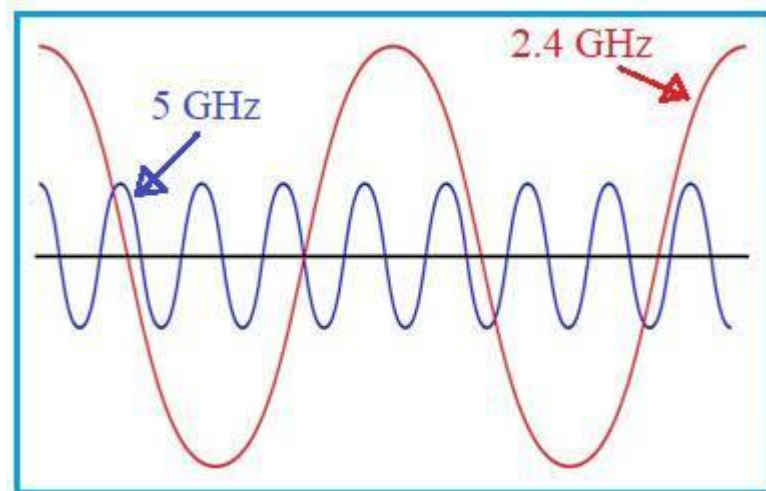
### 3.3.8 Φάσμα 2.4GHz και 5GHz.

Τα ασύρματα δίκτυα λειτουργούν σε μη αδειοδοτημένες ζώνες συχνοτήτων για την μετάδοση δεδομένων μεταξύ των συσκευών. Οι ζώνες που χρησιμοποιούν τα δίκτυα Wi-



Fi είναι τα 2.4GHz και 5GHz. Οι παλαιότεροι δρομολογητές ονομάζονταν single band routers, διότι η εκπομπή τους περιοριζόταν μόνο σε μια ζώνη συχνοτήτων, αυτή στα 2.4GHz. Πλέον με το Wi-Fi 6 αυτό άλλαξε και οι καινούργιοι δρομολογητές (Dual band routers) μπορούν να εκπέμψουν ταυτόχρονα και στις δυο ζώνες (2.4GHz και 5GHz) χωρίς κανένα πρόβλημα. Η κύρια διαφορά στις δυο συχνότητες αφορά την ταχύτητα που μπορούν να στέλνουν δεδομένα, αλλά και την περιοχή κάλυψης των δικτύων.

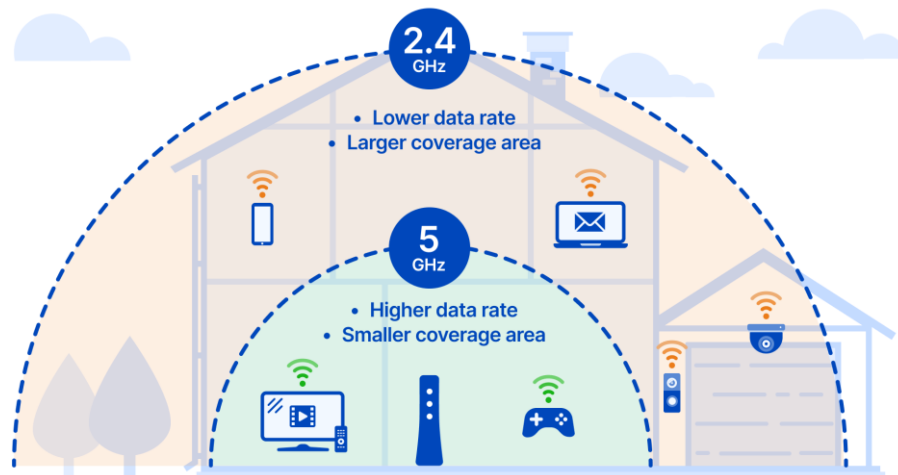
Η ζώνης των 2.4GHz μπορεί να έχει μικρότερη ταχύτητα από τα 5GHz, αλλά παρέχει μεγαλύτερη περιοχή κάλυψης, αφού δεν συναντά ιδιαίτερη δυσκολία στο να διαπεράσει τυχόν εμπόδια όπως για παράδειγμα οι τοίχοι ενός κτηρίου. Έχει να διαλέξει ανάμεσα σε 11 κανάλια (στην Αμερική) και 14 (στην Ευρώπη) από τα οποία μόνο 3 (κανάλια 1,6,11) δεν είναι επικαλυπτόμενα. Επειδή η ζώνη συχνοτήτων 2.4GHz χρησιμοποιείται πέρα από το Wi-Fi και από πολλές άλλες καθημερινές συσκευές όπως για παράδειγμα οι φούρνοι μικροκυμάτων, τα ασύρματα τηλέφωνα και οι συσκευές Bluetooth, αυτό προκαλεί προβλήματα παρεμβολών στο δίκτυο, ακόμη και διακοπή επικοινωνίας με ορισμένες συσκευές.



Εικόνα 20: Ημιτονοειδές συχνοτήτων 2.4GHz και 5GHz (πηγή: <https://www.google.com/url?sa=i&url=https%3A%2F%2Fseyir360.com%2F5-ghz-k.html&psig=AOvVaw0vFesjqKWKHUYhN6moeXt&ust=1664216925600000&source=images&cd=vfe&ved=0CAwQjRxqFwoTCOCBranJsPoCFQAAAAAdAAAAABAK>)

Από την άλλη η ζώνη συχνοτήτων 5GHz παρέχει αρκετά μεγαλύτερη ταχύτητα συγκριτικά με το 2.4GHz, όμως δεν έχει την δυνατότητα κάλυψης σε μεγάλες αποστάσεις από τον δρομολογητή. Για την ακρίβεια παρέχει ικανοποιητικά αποτελέσματα μόνο στην περίπτωση που υπάρχει οπτική επαφή μεταξύ του router και της κεραίας του δέκτη, καθώς το μικρό μήκος κύματος της συχνότητας (Εικόνα 21), δεν επιτρέπει να διαπερνά συμπαγή εμπόδια, αφού το σήμα εξασθενεί. Εξαιτίας της μικρής του εμβέλειας δεν χρησιμοποιείται από πολλές συσκευές με αποτέλεσμα να μην υπάρχει συμφόρηση σε κανένα από τα 23 διαθέσιμα κανάλια του και να είναι περισσότερο αξιόπιστο και ασφαλές [31][39].





Εικόνα 21: Αποστάσεις κάλυψης των δυο συχνοτήτων (πηγή: [Should I use 2.4 GHz or 5 GHz WiFi? | CenturyLink](#))

### 3.4 Πλεονεκτήματα και Μειονεκτήματα Wi-Fi 6.

Η αναβάθμιση των ασύρματων δικτύων Wi-Fi σε αυτά της 6<sup>ης</sup> γενιάς με καλύτερα τεχνικά χαρακτηριστικά σίγουρα επιφέρει σημαντικά πλεονεκτήματα στη λειτουργία τους. Για παράδειγμα το Wi-Fi 6:

- Διαθέτει υψηλότερους ρυθμούς μετάδοσης των δεδομένων με ταχύτητες που αγγίζουν σε θεωρητικό επίπεδο τα 9.6Gbps.
- Αυξάνει το εύρος του ασύρματου καναλιού και χρησιμοποιεί τεχνικές που επιτρέπουν σε πολλαπλούς χρήστες να χρησιμοποιούν ταυτόχρονα το ίδιο κανάλι πιο αποτελεσματικά, μειώνοντας τις καθυστερήσεις μετάδοσης δεδομένων.
- Παρέχει ισχυρούς αλγόριθμους κρυπτογράφησης για μεγαλύτερη ασφάλεια με τη χρήση του πρωτοκόλλου WPA3.
- Με τη λειτουργία TWT επιτρέπει στις συσκευές να καταναλώνουν λιγότερη ενέργεια και να έχουν μεγαλύτερη διάρκεια ζωής.
- Καταφέρνει να μειώσει τις παρεμβολές από γειτονικά δίκτυα σε πυκνοκατοικημένες περιοχές με τη χρήση της λειτουργίας BSS Coloring.

- Είναι συμβατό με συσκευές προηγούμενης γενιάς δικτύων
- Αποδίδει ικανοποιητικά σε εσωτερική (Indoor) χρήση
- Είναι εύκολα υλοποιήσιμο και κλιμακούμενο λόγω της μεγάλης χωρητικότητας του σε συσκευές.

Στον αντίποδα όμως πέρα από τα θετικά χαρακτηριστικά που διαθέτει το Wi-Fi 6 έχει και αυτό τα μειονεκτήματα του. Συγκεκριμένα:

- Για να επιτευχθεί η σύνδεση των συσκευών και να χρησιμοποιηθεί το πρότυπο 802.11ax πρέπει να υπάρχει μια Gigabit σύνδεση
- Λειτουργεί σε μη αδειοδοτημένες συχνότητες, με αποτέλεσμα να προκαλούνται παρεμβολές από σήματα άλλων συσκευών.
- Δύσκολα υλοποιήσιμο για εξωτερικές (Outdoor) χρήσεις, αφού έχει σχετικά μικρή εμβέλεια
- Η χρήση της ζώνης συχνοτήτων 5GHz μπορεί να έχει υψηλή ταχύτητα, αλλά δύσκολα διαπερνά εμπόδια, με αποτέλεσμα η χρήση της να περιορίζεται μόνο όταν είναι δυνατή η οπτική επαφή της συσκευής με τον δρομολογητή
- Υψηλό κόστος εξοπλισμού που υποστηρίζει αυτή την τεχνολογία.

### 3.5 Εμπειρία χρηστών IIoT στο Wi-Fi 6.

Η λειτουργία του βιομηχανικού διαδικτύου των πραγμάτων στηρίζεται στη διασύνδεση συσκευών μέσα σε ένα δίκτυο. Καθημερινά σε βιομηχανικά περιβάλλοντα αντικαθίστανται οι ξεπερασμένες και προβληματικές συσκευές με νεότερες καλύτερης τεχνολογίας. Οι συσκευές αποτελούν τους κόμβους του δικτύου και έχουν καθοριστικό ρόλο στην εκτέλεση σημαντικών διεργασιών της παραγωγικής διαδικασίας. Το μεγάλο πλήθος συσκευών απαιτεί υποστήριξη για συνεχή λειτουργία χωρίς καθυστερήσεις, εξοικονομώντας όσο το δυνατόν περισσότερη ενέργεια. Οι βλάβες στους κόμβους, αλλά και η συμφόρηση του δικτύου μπορούν να αποβούν μοιραίες για την παραγωγική

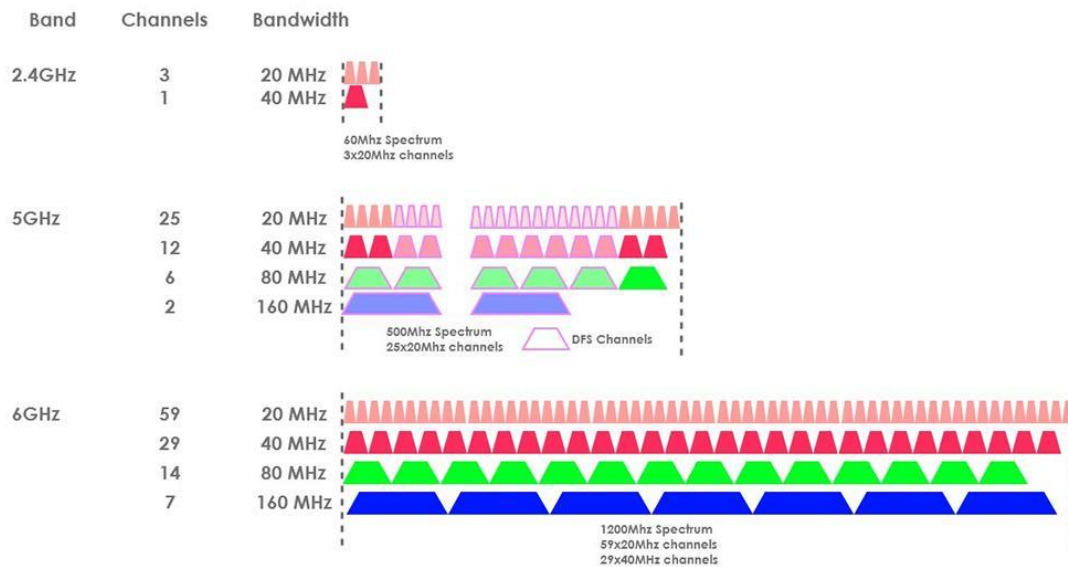
διαδικασία, έχοντας σημαντικό οικονομικό αντίκτυπο. Παράλληλα οι βιομηχανίες έχουν την ανάγκη να διασφαλίσουν την ακεραιότητα των δεδομένων τους και για το λόγο αυτό εστιάζουν πολύ στην ασφάλεια των συστημάτων που χρησιμοποιούν. Με βλέψεις για αύξηση της παραγωγικότητας, μείωση του κόστους λειτουργίας και ενίσχυση του αυτοματισμού το ασύρματο δίκτυο Wi-Fi 6 αποτελεί ιδανική επιλογή.

Η τεχνολογία του Wi-Fi 6 συναντά τις απαιτήσεις των βιομηχανικών συσκευών. Για παράδειγμα, είναι αρκετά πρακτικό συσκευές όπως οι αισθητήρες να έχουν μεγάλη διάρκεια ζωής μπαταριών. Αυτό επιτυγχάνεται εύκολα μέσα από τον μηχανισμό target wake time (TWT) που εξοικονομεί σχεδόν τα 2/3 της ενέργειας μιας συσκευής, ενεργοποιώντας την μόνο προκαθορισμένες στιγμές. Παράλληλα δίνει την δυνατότητα σε μεγάλο πλήθος συσκευών να συνδέονται στο ίδιο κανάλι μετάδοσης ταυτόχρονα και να αποστέλλουν δεδομένα με ταχύτατους ρυθμούς (9.6Gbps). Οι περισσότερες IIoT συσκευές χρησιμοποιούν την ζώνη συχνοτήτων 2.4GHz, λόγω του μεγαλύτερου μήκους κύματος και την υψηλότερης ανοχής σε εμπόδια. Ακόμη πολλά AP μπορούν να μεγαλώσουν την εμβέλεια του δικτύου, αυξάνοντας την συνολική αποτελεσματικότητα του και μειώνοντας τις παρεμβολές από γειτονικές συγκρούσεις σημάτων. Το Wi-Fi 6 παρέχει στα IIoT συστήματα την ασφάλεια που αναζητούν. Με ισχυρούς κρυπτογραφικούς αλγορίθμους και την ασφάλεια του πρωτοκόλλου WPA3, επίδοξοι hackers αδυνατούν να αποκρυπτογραφήσουν ή να αποσπάσουν την οποιαδήποτε πληροφορία. Ακόμη, δίνει την δυνατότητα στους χρήστες να προσθέτουν πολύ εύκολα συσκευές στο δίκτυο σκανάροντας απλά το QR code της συσκευής, δίχως να χρειάζεται να την ενεργοποιήσουν μέσω κάποιου interface.

Κάποιες συσκευές που μπορούν να λειτουργήσουν σε ασύρματα δίκτυα Wi-Fi 6 είναι οι αισθητήρες, έξυπνες κάμερες, αυτόνομα κινητά ρομπότ (AMR), αυτόματα επίγεια οχήματα (AGV), safety controls, AR/VR/XR κ.ά. [43].

### 3.6 Wi-Fi 6E.

Το 2020 ύστερα από προτροπή της Ομοσπονδιακής Επιτροπής Επικοινωνιών (FCC), μαζί με τις ζώνες συχνοτήτων 2.4GHz και 5GHz, άρχισε να χρησιμοποιείται και το εύρος ζώνης των 6GHz. Αυτό σήμανε και την είσοδο του Wi-Fi 6E σαν νέο τεχνολογικό επίτευγμα στα ασύρματα δίκτυα. Ο λόγος της δημιουργίας του ήταν η αυξημένη κίνηση στα δίκτυα Wi-Fi εξαιτίας του μεγάλου αριθμού συσκευών σε αυτό. Το Wi-Fi 6E αποτελεί εξέλιξη του δικτύου Wi-Fi 6 έχοντας τα ίδια τεχνικά χαρακτηριστικά, αλλά εισάγοντας νέο εύρος συχνοτήτων λειτουργίας. Με την νέα ζώνη να κυμαίνεται μεταξύ των συχνοτήτων 5.9 GHz και 7.1GHz, το Wi-Fi 6E επωφεληθήκε επιπλέον με 1200MHz φάσματος. Με επτά πρόσθετα κανάλια των 160MHz διαθέσιμα, οι συσκευές μπορούν να παρέχουν μεγαλύτερη απόδοση ικανοποιώντας τις συνεχώς αυξανόμενες ανάγκες Wi-Fi.



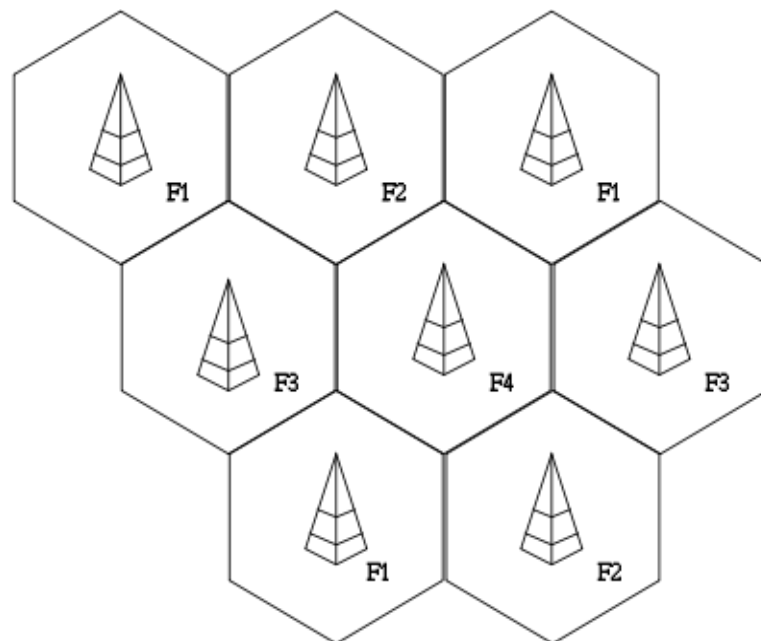
Εικόνα 22: Διαθέσιμα κανάλια

Η υποστήριξη μεγαλύτερων σε εύρος καναλιών επιτρέπει την αποσυμφόρηση του δικτύου, αφού περισσότερα δεδομένα μεταδίδονται με μεγαλύτερη άνεση μεταξύ των κόμβων του. Η ζώνη των 6GHz διασφαλίζει πως το εύρος συχνοτήτων παραμένει καθαρό από συσκευές που επιβαρύνουν το δίκτυο, αφού μπορεί να υποστηρίξει μόνο νέα μοντέλα Wi-Fi 6. Έτσι το φάσμα των 5GHz που είναι συμβατό και με συσκευές παλαιότερων δικτύων Wi-Fi, έχει την δυνατότητα να μοιράζει τις συσκευές Wi-Fi 6 με την ζώνη των 6GHz για να μειώσει την κίνηση του. Από την άλλη επειδή το Wi-Fi 6E πρόκειται για μια νέα τεχνολογία που δεν μπορεί να απορροφήθει κατευθείαν στην παγκόσμια αγορά, απαιτεί ορισμένα στάδια ενσωμάτωσης με τα πλεονεκτήματά του να μην είναι άμεσα φανερά. Τέλος το υπερβολικό κόστος αντικατάστασης των συσκευών με νέες που συμβαδίζουν στα πρότυπα του Wi-Fi 6 για την υλοποίηση του δικτύου λειτουργεί σαν ένας κατασταλτικός παράγοντας [44].

## 4 Κυψελωτό δίκτυο 5G

### 4.1 Εισαγωγή στο κυψελωτό δίκτυο 5G.

Μια από τις σημαντικότερες εξελίξεις στις επικοινωνίες δεδομένων και στις τηλεπικοινωνίες γενικότερα είναι η εφαρμογή κυψελοειδών δικτύων. Τα κυψελοειδή δίκτυα αποτελούν τη βάση των κινητών ασύρματων επικοινωνιών και υποστηρίζουν συσκευές, όπως smartphones και tablets που δεν μπορούν να εξυπηρετηθούν ενσύρματα. Η ασύρματη μετάδοση σε κυψελοειδή δίκτυα είναι μια τεχνική που χρησιμοποιήθηκε για την υποστήριξη μεγαλύτερου αριθμού συσκευών στη κινητή ραδιοτηλεφωνία. Σε αντίθεση με παλαιότερες μεθόδους τα κυψελωτά δίκτυα χρησιμοποιούν πομπούς χαμηλής ισχύος με μικρότερη ακτίνα κάλυψης. Προκειμένου να μπορέσει να αναπτυχθεί ένα δίκτυο κυψελών χρειάζεται πολλαπλές κεραιές εκπομπής να τοποθετηθούν με τέτοιο τρόπο ώστε να σχηματίσουν κυψέλες (κύτταρα). Σε κάθε κυψέλη υπάρχει ο σταθμός βάσης (ΣΒ) που περιλαμβάνει την κεραιά εκπομπής, ένα σύνολο από δέκτες και έναν ελεγκτή. Συγκεκριμένα, τα κυψελοειδή δίκτυα χρησιμοποιούνται από ασύρματες συσκευές των οποίων η γεωγραφική τους θέση μεταβάλλεται συνεχώς (κινητές μονάδες) και αυτό έχει σαν αποτέλεσμα να αλλάζουν τακτικά κυψέλες. Για τη διαχείριση της επικοινωνίας μεταξύ της κινητής μονάδας και του υπόλοιπου δικτύου χρησιμοποιείται ο ελεγκτής. Ακόμη, σε μια προσπάθεια για να αποφεύγονται οι συγκρούσεις και οι παρεμβολές μεταξύ των κυψελών, καθεμία χρησιμοποιεί διαφορετικές συχνότητες με τις γειτονικές της. Όμως, κυψέλες που απέχουν αρκετή απόσταση μεταξύ τους μπορούν να χρησιμοποιούν την ίδια ζώνη συχνοτήτων, όπως φαίνεται και στη παρακάτω Εικόνα 23 [45].



Εικόνα 23: Κυψελωτό δίκτυο.

Η πρώτη εμφάνιση της κυψελοειδούς τεχνολογίας έγινε στο Τόκιο το 1979 από την εταιρία Nippon Telephone and Telegraph (NTT) με την ονομασία 1G. Σε πρώτη φάση το δίκτυο πρώτης γενιάς (1G) κάλυψε σε εθνικό επίπεδο όλη την χώρα, καθιστώντας την Ιαπωνία, πρώτη χώρα παγκοσμίως που έκανε χρήση της συγκεκριμένης τεχνολογίας. Γρήγορα απέκτησε δημοφιλία και στις ΗΠΑ, τον Καναδά και άλλες Ευρωπαϊκές χώρες, οι οποίες με την σειρά τους άρχισαν να δημιουργούν τις απαραίτητες εγκαταστάσεις για την υποστήριξη δικτύων πρώτης γενιάς. Το 1G παρουσιάστηκε ως ένα τηλεπικοινωνιακό πρότυπο βασισμένο στην αναλογική τεχνολογία για κινητά συστήματα (AMPS), με δυνατότητα υποστήριξης υπηρεσιών φωνής που λειτουργούσε σε συχνότητες 800-900MHz και χρησιμοποιούσε πολλαπλή πρόσβαση διαίρεσης συχνότητας (FDMA) σε κανάλια των 10KHz με ρυθμούς μετάδοσης δεδομένων στα 2.4kbps.

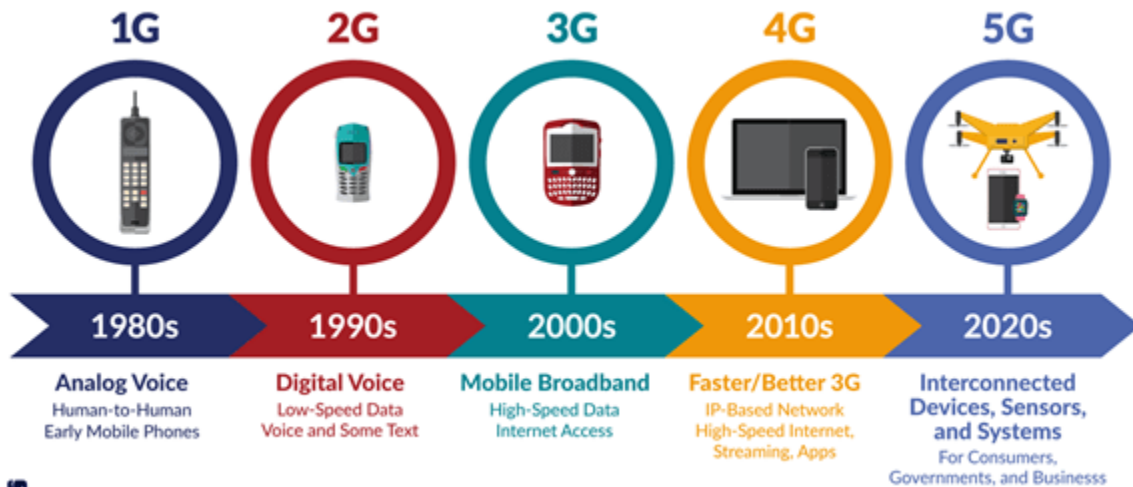
Το πρώτο εμπορικά διαθέσιμο κινητό που έκανε χρήση του συγκεκριμένου δικτύου παρουσιάστηκε από την Motorola με την ονομασία DynaTAC, με τη τιμή του να ανέρχεται στα 3,995 δολάρια. Τα πρώτα προβλήματα δεν άργησαν να φανούν αφού η ανύπαρκτη ασφάλεια επέτρεπε στον οποιοδήποτε, επιλέγοντας την κατάλληλη συχνότητα, να αποκτήσει πρόσβαση στη κλήση. Ακόμη τα παράπονα για κακή ποιότητα υπηρεσιών φωνής λόγω παρεμβολών από εξωτερικούς θορύβους, αλλά και το μεγάλο μέγεθος των συσκευών που τις καθιστούσαν δύσχρηστες για καθημερινή χρήση, ανάγκασαν τις εταιρίες να προχωρήσουν στην ανάπτυξη της δεύτερης γενιάς κυψελωτών δικτύων. Η μοναδική χώρα που ακόμη και σήμερα κάνει χρήση της συγκεκριμένης τεχνολογίας είναι η Ρωσία.

Με βάση τους περιορισμούς της πρώτης έκδοσης, κυκλοφόρησαν μια δεκαετία αργότερα τα δίκτυα δεύτερης γενιάς. Για πρώτη φορά το 1991 το Παγκόσμιο Σύστημα Επικοινωνιών (GSM) κυκλοφόρησε με τη Φινλανδία να αποτελεί τη πρώτη χώρα που το χρησιμοποίησε. Το GSM είναι ένα πρότυπο που αναπτύχθηκε για να περιγράψει τα πρωτόκολλα που χρησιμοποιούνται από τις συσκευές στα ψηφιακά κυψελωτά δίκτυα δεύτερης γενιάς και βασίζεται στις τεχνικές πολλαπλής πρόσβασης FDMA και TDMA. Η μετατροπή του σήματος από αναλογική σε ψηφιακή μορφή, επέτρεψε τη καλύτερη χρήση του φάσματος και πιο αποτελεσματική ποιότητα υπηρεσιών. Για πρώτη φορά οι κλήσεις κρυπτογραφήθηκαν και αυξήθηκε η συνολική ασφάλεια του δικτύου. Η ποιότητα του ήχου βελτιώθηκε σε σύγκριση με το 1G, καθώς η ταχύτητα αυξήθηκε στα 0.2Mbps, απομονώνοντάς παράλληλα τους εξωτερικούς θορύβους. Το 2G διασφάλιζε μέσω της περιαγωγής (roaming) ότι μια κινούμενη συσκευή μπορεί να παραμένει συνδεδεμένη στο δίκτυο, χωρίς να χάνει την δυνατότητα επικοινωνίας της με άλλες συσκευές. Ακόμη επέτρεπε την ασύγχρονη επικοινωνία μεταξύ 2 άκρων μέσω της αποστολής γραπτών μηνυμάτων SMS και MMS με ταχύτητα που δεν ξεπερνούσε τα 64Kbps. Η βελτιστοποίηση της διάρκειας ζωής των μπαταριών σε συνδυασμό με τη μείωση του μεγέθους των συσκευών, άρχισε να κάνει το 2G ιδιαίτερα δημοφιλές με τις πωλήσεις των κινητών να αυξάνονται κατακόρυφα.

Τα κυψελοειδή δίκτυα άρχισαν να παίρνουν τη σημερινή τους μορφή με την εκρηκτική είσοδο του 3G στις αρχές του 2000. Για μια ακόμη φορά η εταιρία NTT DoCoMo προκάλεσε αναστάτωση στην παγκόσμια τεχνολογική κοινότητα παρουσιάζοντας το 2001 στην Ιαπωνία το δίκτυο 3G. Η πρώτη εμπορική έκδοση του 3G δεν είχε μεγάλες τεχνικές διαφοροποιήσεις ως προς την προηγούμενη έκδοση 2G πέρα από την ταχύτητα. Με δυνατότητα μεταφοράς μέχρι και τέσσερις φορές περισσότερων δεδομένων με ταχύτητες που έφταναν τα 2MB το δευτερόλεπτο, το 3G εστίαζε λιγότερο σε φωνητικές κλήσεις και περισσότερο στη κοινωνική δικτύωση των χρηστών του. Έτσι, επέτρεψε τις βιντεοκλήσεις, τα online παιχνίδια, την αναπαραγωγή μουσικής από κινητά αλλά και το σημαντικότερο όλων, την περιήγηση μέσω ασύρματων συσκευών σε απλές HTML ιστοσελίδες. Οι χρήστες μπορούσαν να έχουν πρόσβαση στα δεδομένα από παντού, αφού το κυψελωτό δίκτυο 3<sup>ης</sup> γενιάς διέθετε διεθνή περιαγωγή. Όλα τα παραπάνω οδήγησαν στην ανάγκη παραγωγής κατάλληλων συσκευών που θα μπορούσαν να υποστηρίξουν αυτές τις λειτουργίες, με τις Apple και BlackBerry να είναι οι πρώτες εταιρίες στην κατασκευή smartphones στο χώρο. Έπειτα από το 3G ακολούθησαν και άλλες εκδόσεις όπως το 3.5G που εισήγαγε την τεχνολογία High Speed Uplink Packet Access (HSPA), το 3.75G με την τεχνολογία High Speed Uplink Packet Access Plus που μετέπειτα εξελίχθηκε στα συστήματα Long Term Evolution (LTE) όπως είναι γνωστή και η τελευταία έκδοση 3.9G. Το 3G αποτέλεσε ορόσημο για τα μελλοντικά δίκτυα που ακολούθησαν.

Στα τέλη του 2009 κυκλοφόρησε η μέχρι πρότινος πιο χρησιμοποιούμενη έκδοση κυψελοειδούς δικτύου, το 4G. Η τέταρτη γενιά αποτελεί την πιο πετυχημένη έκδοση δικτύου κινητής τηλεφωνίας και έκανε την εμφάνιση της στη Βόρεια Ευρώπη και συγκεκριμένα στις σκανδιναβικές χώρες Νορβηγία και Σουηδία. Ωστόσο η μετάβαση από το 3G στο 4G δεν ήταν τόσο απλή υπόθεση. Η διεθνής ένωση ραδιοτηλεπικοινωνιών (ITU-R), έθεσε στην αρχή ως ελάχιστη ταχύτητα μετάδοσης των δεδομένων για το 4G τα 12.5Mbps, γεγονός που ήταν δύσκολο να επιτευχθεί στα αρχικά στάδια του δικτύου. Έτσι η ITU-R αποφάσισε πως αν το LTE φέρει σημαντικές αλλαγές μπορεί να χαρακτηριστεί ως δίκτυο 4G. Μόλις δυο χρόνια αργότερα στο Καναδά κυκλοφόρησε το πρώτο 4G LTE δίκτυο με ταχύτητα λίγο μεγαλύτερη των 12.5Mbps, προσφέροντας όλες τις σύγχρονες τυπικές υπηρεσίες, όπως βίντεο υψηλής ποιότητας, μειωμένη καθυστέρηση στη μετάδοση δεδομένων και ισχυρή ασφάλεια. Το 4G είναι το πρώτο δίκτυο που χρησιμοποιεί το VoIP, βελτιώνοντας έτσι την συνολική ποιότητα υπηρεσιών που προσφέρουν όλα τα προηγούμενα δίκτυα. Μπορεί το 4G να έχει την ικανότητα να υποστηρίξει πολλές συσκευές, αλλά δεν μπορεί να εξυπηρετήσει συσκευές προηγούμενων τεχνολογιών. Για παράδειγμα, ενώ παλιότερα η εναλλαγή από 2G σε 3G γινόταν απλά μέσω της κάρτας SIM, στα δίκτυα 4G η κινητές συσκευές πρέπει να είναι συμβατές με την τεχνολογία 4<sup>ης</sup> γενιάς τηλεπικοινωνιακών δικτύων. Ακόμη χρησιμοποιούνται οι τεχνολογίες COFDM και MIMO, με τις ταχύτητες του δικτύου σήμερα να φτάνουν (σε θεωρητικό επίπεδο) τα 200Mbps.

Η τελευταία τεχνολογία ασύρματης κινητής τηλεφωνίας που εμφανίστηκε το Μάρτιο του 2019 στη Νότια Κορέα με την ονομασία 5G, αποτελεί ίσως και την πιο πολυσυζητημένη στην ιστορία των κυψελοειδών δικτύων. Οι αυξημένες προσδοκίες για το τι μπορεί και τι δεν μπορεί να κάνει το 5G, ανέβασαν αρκετά ψηλά τον πήχη, με τις επιδόσεις του στα πρώτα χρόνια λειτουργίας να μην εντυπωσιάζουν, αφού οι εταιρίες πρόσφεραν την εμπειρία του 5G και όχι στη πραγματικότητα τις νέες τεχνολογίες του. Το 2020 άρχισε επίσημα η εμπορική χρήση του από τις περισσότερες χώρες, με προοπτικές εξέλιξης μέχρι το 2025. Τα δίκτυα 5G αποτελούν την επόμενη γενιά κινητών συσκευών που υποστηρίζουν τη τέταρτη βιομηχανική επανάσταση. Όπως όλες οι προηγούμενες εκδόσεις έτσι και τα δίκτυα 5<sup>ης</sup> γενιάς στοχεύουν στην αύξηση του ρυθμού μετάδοσης των δεδομένων, προσφέροντας ταχύτητες με μέγιστο θεωρητικό ρυθμό στα 10-20Gbps. Στη πράξη αυτές οι ταχύτητες είναι δύσκολο να επιτευχθούν ακόμα, οπότε ένα δίκτυο θεωρείται 5G αν η ταχύτητα του δεν είναι μικρότερη από 1Gbps. Η καθυστέρηση (latency) κάτω του 1msec, η χαμηλή κατανάλωση μπαταριών και η υποστήριξη μεγάλου αριθμού συσκευών καθιστά το 5G ιδανικό για κρίσιμα συστήματα IIoT. Ακόμη το 5G χρησιμοποιεί ένα νέο υψηλότερο εύρος συχνοτήτων τα mm Wave στη περιοχή 30 με 300GHz. Το πρόβλημα με αυτές τις συχνότητες είναι πως δεν μπορούν να μεταδοθούν σε μεγάλες αποστάσεις και συνάμα δεν μπορούν να ξεπεράσουν τα εμπόδια που συναντούν. Για το λόγω αυτό οι πάροχοι τηλεπικοινωνιακών υπηρεσιών προχώρησαν στην εγκατάσταση κεραιών μικρότερου μεγέθους, πιο κοντά μεταξύ τους (μικρό-κυψέλες). Το 5G υποστηρίζει ακόμη τις λειτουργίες διαμόρφωση δέσμης (Beamforming) και ορθογώνια πολυπλεξία διαίρεση συχνότητας (OFDM) [46][47].



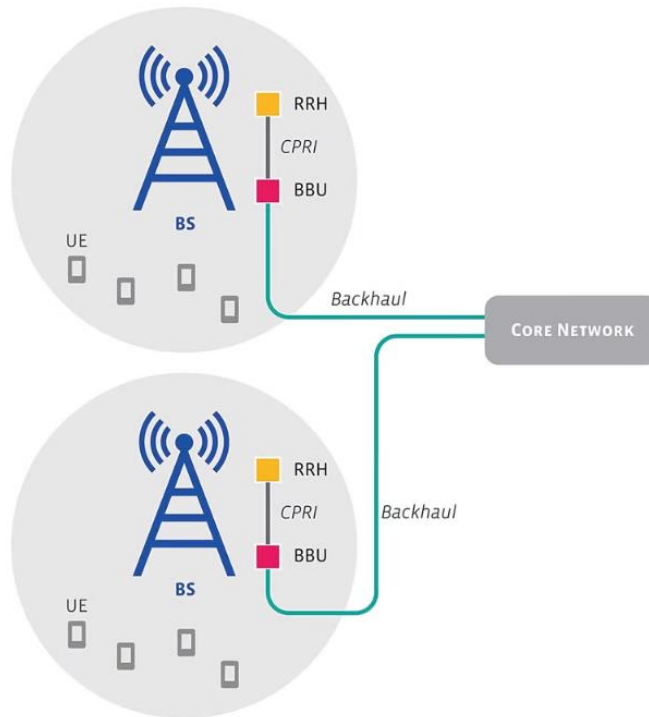
Εικόνα 24: Εξέλιξη κυψελωτών δικτύων (πηγή: <https://www.google.com/url?sa=i&url=https%3A%2F%2Fmarkkalin.com%2Fthe-evolution-from-1g-to-5g%2F&psig=AOvVaw0vsmL7WeIVADVTPRLjcDP7&ust=1664219194287000&source=images&cd=vfe&ved=0CAwQjRxqFwoTCID87OHRsPoCFQAAAAAdAAAAABAD>)



## 4.2 Αρχιτεκτονική 5G.

Το κυψελωτό δίκτυο 5<sup>ης</sup> γενιάς χρησιμοποιεί μια πιο «έξυπνη» αρχιτεκτονική σε σύγκριση με τις προηγούμενες εκδόσεις του. Ο τρόπος με τον οποίο έχει στηθεί το 5G, καθιστά το δίκτυο ιδανικό για εμπορικά και βιομηχανικά IoT περιβάλλοντα, αυτόνομα συστήματα και εργασίες ζωτικής σημασίας. Ωστόσο όπως και όλα τα προηγούμενα δίκτυα, έτσι και το 5G δεν μπορεί να έχει το μονοπώλιο, αλλά θα συνυπάρχει με παλαιότερες τεχνολογίες όπως το 3G και το 4G LTE. Αυτό συμβαίνει για τους παρακάτω λόγους. Πρώτον η ανάπτυξη νέων δικτύων είναι μια χρονοβόρα και πανάκριβη διαδικασία που απαιτεί τη συνεργασία πολλών φορέων και δεύτερον υπάρχουν χρήστες που έχουν επενδύσει και κάνουν χρήση παλαιότερων τεχνολογιών, διότι δεν είναι ακόμα βέβαιοι για την βιωσιμότητα των νέων συστημάτων. Οι περισσότερες χώρες δεν χρησιμοποιούν πλέον τα δίκτυα 1<sup>ης</sup> και 2<sup>ης</sup> γενιάς, ανοίγοντας τον δρόμο για το 5G. Για να αντιμετωπίσει τις απαιτήσεις συνδεσιμότητας σε βιομηχανικά περιβάλλοντα ο οργανισμός 3<sup>rd</sup> Generation Partnership Project (3GPP), που αναπτύσσει διεθνή πρότυπα για τις κινητές τηλεφωνίες, έθεσε τα θεμέλια για την αρχιτεκτονική του 5G. Η σχεδίαση της αρχιτεκτονικής για πολύπλοκες εφαρμογές είναι εξαιρετικά δύσκολη και χωρίζεται σε 2 βασικά μέρη. Το Radio Access Network (RAN) και το βασικό δίκτυο κορμού (Core Network).

Το RAN είναι ένα είδος δικτυακής υποδομής που συναντάται συνήθως σε δίκτυα κινητής τηλεφωνίας όπου οι σταθμοί βάσης (Base Station - BS) έχουν μεγάλες κεραιές. Ένα RAN μπορεί να συνδέει τις συσκευές των χρηστών (User Equipment - UE) με άλλα μέρη ενός δικτύου. Η radio unit (RU) επεξεργάζεται τα ψηφιακά σήματα που εκπέμπει και λαμβάνει για το σταθμό βάσης (BS). Όταν λαμβάνει πληροφορία η RU επικοινωνεί με τη μονάδα βασικής ζώνης (BBU) χρησιμοποιώντας τη κοινή δημόσια ραδιοδιασύνδεση (CPRI). Η μονάδα βασικής ζώνης λαμβάνει τις πληροφορίες, τις επεξεργάζεται και τις προωθεί στο κεντρικό δίκτυο (Core Network). Τα δεδομένα επιστρέφουν μέσω της αντίστροφης διαδικασίας. Μια βασική υποδομή RAN περιέχει τον σταθμό βάσης τις μονάδες RU, BBU και κεραιές που καλύπτουν μια συγκεκριμένη περιοχή. Υπάρχουν διάφοροι τύποι όπως GRAN, GERAN, UTRAN, E-UTRAN.



Εικόνα 25: Radio Access Network (πηγή: [49])

Το δεύτερο βασικό μέρος της αρχιτεκτονικής του 5G είναι το κεντρικό δίκτυο (Core Network). Το κεντρικό δίκτυο στηρίζεται στην αρχιτεκτονική βασισμένη σε υπηρεσίες (SBA), για υποστήριξη ελέγχου ασφαλείας, διαχείριση δεδομένων και σύνδεση στο διαδίκτυο. Περιλαμβάνει επίσης τη βελτίωση του χρόνου απόκρισης από τους διακομιστές του δικτύου, μειώνοντας τη συνολική καθυστέρηση. Τα βασικά στοιχεία ενός κεντρικού δικτύου 5G είναι [48][49]:

- **Λειτουργία επιπέδου χρήστη (UPF):** Δρομολόγηση και επιθεώρηση πακέτων,
- **Δίκτυο δεδομένων (DN):** Υπηρεσίες χειριστή, πρόσβαση στο διαδίκτυο,
- **Λειτουργία βασικής πρόσβασης κινητικότητας (AMF):** Εξουσιοδότηση και έλεγχος ταυτότητας,
- **Λειτουργία ελέγχου ταυτότητας διακομιστή (AUSF):** Υποστηρίζει έλεγχο ταυτότητας για πρόσβαση 3GPP,
- **Λειτουργία διαχείρισης συνεδρίας (SMF):** Υπεύθυνο για λειτουργίες που σχετίζονται με τη συνεδρία πχ εγκατάσταση , απελευθέρωση κλπ.
- **Λειτουργία επιλογής δικτύου (NSSF):** Επιλέγει τα επίπεδα εξυπηρέτησης του UE,
- **Λειτουργία έκθεσης δικτύου (NEF):** παρέχει πληροφορίες για εσωτερικές και εξωτερικές επικοινωνίες,

- **NF λειτουργία αποθετηρίου (NRF):** Υποστηρίζει τη λειτουργία εντοπισμού υπηρεσίας,
- **Λειτουργία ελέγχου πολιτικής (PCF):** ρυθμίζει τη συμπεριφορά του δικτύου, παρέχει κανόνες και πολιτικές πρόσβασης.
- **Ενοποιημένη διαχείριση δεδομένων (UDM):** Υπεύθυνο για τη διαχείριση των δεδομένων για διάφορες υπηρεσίες, όπως εξουσιοδότηση πρόσβασης, διαχείριση SMS
- **Λειτουργία εφαρμογής (AF):** αλληλοεπιδρά με το κεντρικό δίκτυο προκειμένου να παρέχει υπηρεσίες.

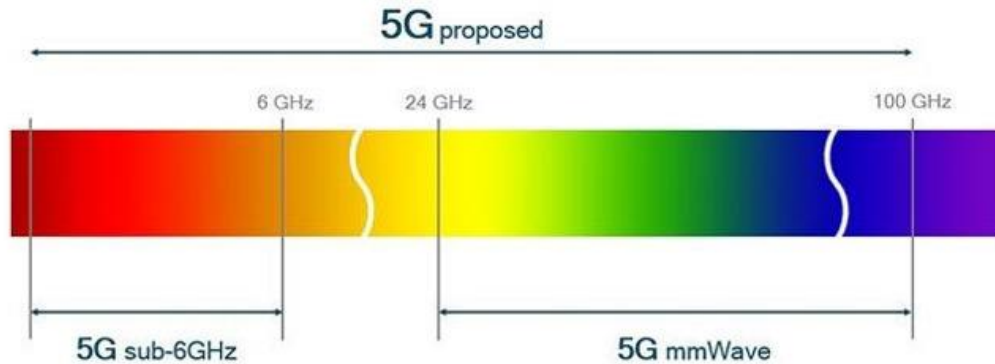
### 4.3 Τεχνικά χαρακτηριστικά 5G.

Καθώς ο αριθμός των ασύρματων συσκευών αλλά και οι ανάγκες των χρηστών μεγαλώνουν, σε συνδυασμό με τον αυξανόμενο όγκο των δεδομένων και τις απαιτήσεις του IoT για γρηγορότερες και πιο αξιόπιστες συνδέσεις, τα παλαιότερα κυψελοειδή δίκτυα όπως το 3G δεν καθίστανται πλέον αρκετά. Η δημιουργία των 5G δικτύων αποτελεί μονόδρομο για την αντιμετώπιση αυτών των προβλημάτων. Για να μπορέσει να υποστηρίξει τις αυξημένες προσδοκίες, το δίκτυο 5G φέρει σημαντικές βελτιώσεις σε αρκετούς τομείς των κυψελωτών δικτύων σε σχέση με τις προηγούμενες εκδόσεις. Οι τεχνολογίες που χρησιμοποιεί μπορεί να μην είναι όλες καινούργιες, ωστόσο κάποια τεχνολογικά χαρακτηριστικά έχουν εξελιχθεί σε σχέση με παλαιότερα μοντέλα και καθιστούν το 5G ιδανικό για χρήση από μικρές εφαρμογές, μέχρι πολύπλοκα συστήματα σε βιομηχανικά περιβάλλοντα. Παρακάτω παρουσιάζονται τα τεχνικά χαρακτηριστικά των κυψελοειδών δικτύων 5<sup>ης</sup> γενιάς:

#### 4.3.1 Εύρος Ζώνης Συχνοτήτων, Ταχύτητα, Καθυστέρηση.

Σε ένα δίκτυο με πολλές συσκευές δεν μπορεί να υπάρχει μια κοινή προσέγγιση λειτουργίας. Ενδεικτικά, κάποιες εφαρμογές απαιτούν μεγαλύτερες ταχύτητες για τη μετάδοση δεδομένων, κάποιες άλλες μεγαλύτερη κάλυψη του δικτύου, ενώ μπορεί να υπάρχει ανάγκη για το συνδυασμό των δυο παραπάνω. Για τον λόγο αυτό, το δίκτυο 5G έχει την ικανότητα να λειτουργεί σε τρεις ζώνες συχνοτήτων, την χαμηλή, την μεσαία και την υψηλή. Η χαμηλή ζώνη λειτουργεί με συχνότητες κάτω από 1GHz και παρέχει μεγαλύτερη κάλυψη, με μικρότερο ρυθμό μετάδοσης των δεδομένων συγκριτικά με τις άλλες δυο μπάντες. Η μεσαία ζώνη που χαρακτηρίζεται αλλιώς και ως sub-6GHz, λειτουργεί στη περιοχή συχνοτήτων 1 έως 6GHz. Στο εύρος αυτό, η εμβέλεια του δικτύου είναι όσο περίπου μια αστική ή προαστιακή περιοχή, με ταχύτητες αρκετά εκατοντάδες Mbps. Οι προηγούμενες δυο ζώνες χρησιμοποιούνται και από παλαιότερα δίκτυα όπως το 4G LTE. Η διαφοροποίηση του 5G έρχεται με την εισαγωγή της υψηλής ζώνης

συχνοτήτων, γνωστή ως mm Wave στο εύρος 24 – 100GHz. Η συγκεκριμένη ζώνη προσφέρει υψηλό ρυθμό μετάδοσης των δεδομένων γύρω στα 10Gbps, όμως έχει μικρή περιοχή κάλυψης. Σε γενικές γραμμές τα κυψελωτά δίκτυα λειτουργούν αποκλειστικά σε αδειοδοτημένες ζώνες, δηλαδή οι εταιρείες παροχής εξαγοράζουν μια ζώνη συχνοτήτων την οποία χρησιμοποιούν οι πελάτες επί πληρωμή. Ωστόσο δεν ισχύει το ίδιο και για τα δίκτυα 5<sup>ης</sup> γενιάς που μπορούν να λειτουργούν και με μη αδειοδοτημένα όρια. Αυτό, όμως, ενδέχεται να προκαλέσει παρεμβολές από άλλα δίκτυα που χρησιμοποιούν την ίδια ζώνη.



Εικόνα 26: Φάσμα 5G (πηγή:

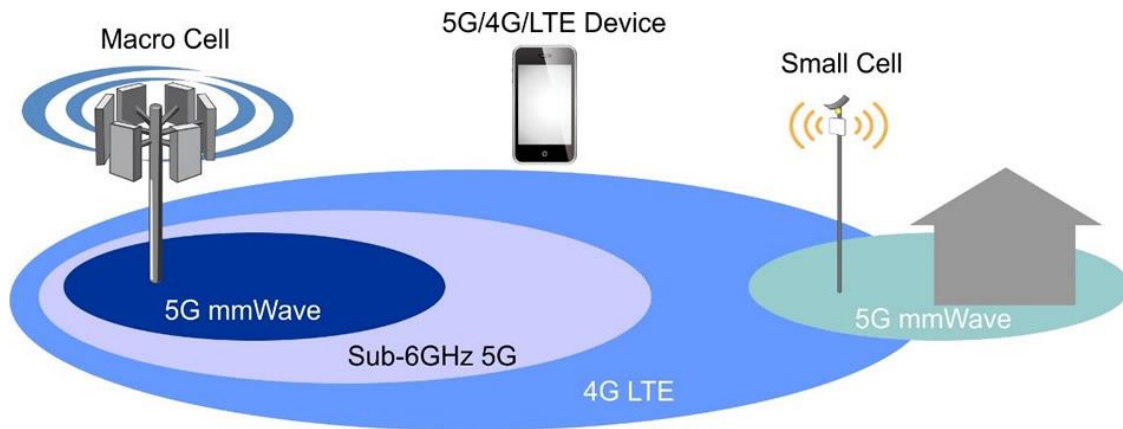
<https://www.google.com/url?sa=i&url=https%3A%2F%2Ftechblog.comsoc.org%2F2019%2F05%2F22%2Ftech-mahindra-india-needs-to-begin-5g-spectrum-auction-now%2F&psig=AOvVaw2sIO-FafPJTdcccbbIA9qA&ust=1664219413673000&source=images&cd=vfe&ved=0CAwQjRxqFwoTCJjh2MvSsPoCFQAAAAAdAAAAABAD>)

Κάθε νέο δίκτυο έρχεται με σημαντική ενίσχυση στη ταχύτητα που μπορεί να προσφέρει. Το ίδιο έγινε και με το 5G. Η ταχύτητά του μπορεί να φτάσει σε θεωρητικά επίπεδα τα 10 με 20GB το δευτερόλεπτο, κάνοντας το έως και εκατό φορές ταχύτερο από το 4G δίκτυο με μέγιστο θεωρητικό ρυθμό τα 100 με 200Mbps. Σε εμπορικό επίπεδο δεν έχουν επιτευχθεί ακόμη μεγάλες ταχύτητες, αλλά με τη δημιουργία νέων υποδομών από τις τηλεπικοινωνιακές εταιρείες φαντάζει κάτι που μπορεί να γίνει στο άμεσο μέλλον. Σε γενικές γραμμές οποιαδήποτε ταχύτητα μεγαλύτερη του 1Gbps θεωρείται ικανοποιητική για να μπορέσει να υποστηρίξει δίκτυα 5G. Ένα ακόμη σπουδαίο χαρακτηριστικό είναι η χαμηλή καθυστέρηση που προσφέρει το 5G. Σε σύγκριση με το 4G όπου η καθυστέρηση κυμαίνονταν από 60 μέχρι 80msec, με το 5G η τιμή αυτή γίνεται μικρότερη του 1msec. Η σπουδαιότητα του χαρακτηριστικού αυτού είναι πως ανοίγει τις πόρτες για διάφορες σημαντικές εφαρμογές πραγματικού χρόνου, όπως τα έξυπνα οχήματα. Παραδείγματος χάριν, η ταχύτητα αντίδρασης του μέσου ανθρώπου, από την στιγμή που θα αντιληφθεί ένα εμπόδιο και θα πραγματοποιήσει μια ενέργεια ανέρχεται στα 250msec. Με το 5G το αυτόνομο όχημα θα αντιδράσει 250 φορές πιο γρήγορα.

### 4.3.2 Μικρό-κυψέλες (Small Cells).

Η συχνότητα ενός σήματος παίζει καθοριστικό ρόλο στη μετάδοση του. Αυτό το συμπεραίνουμε καθώς όσο μικρότερη είναι η συχνότητα, τόσο μεγαλύτερο είναι το μήκος κύματος και το εύρος ζώνης, δηλαδή το σήμα μεταφέρει περισσότερη πληροφορία σε μεγαλύτερη απόσταση. Το ακριβές αντίθετο συμβαίνει όταν η συχνότητα είναι μεγάλη. Επειδή το 5G χρησιμοποιεί συνήθως υψηλές συχνότητες (mm Waves), το σήμα δεν μπορεί να μεταδοθεί σε μεγάλες αποστάσεις και να προσπεράσει εμπόδια δίχως να εξασθενίσει. Οι κεραιές που χρησιμοποιούνται σε έναν σταθμό βάσης για 5G συστήματα πρέπει να έχουν μέγεθος ανάλογο του μήκους κύματος ( $\frac{\lambda}{30}$ ) του σήματος και να είναι πιο πυκνά εγκατεστημένες μεταξύ τους. Η εγκατάσταση κεραιών 5G ακολουθεί το σχεδιασμό των κυψελωτών δικτύων δηλαδή χρησιμοποιεί μικρές κυψέλες όπου κάθε μια περιλαμβάνει ένα σταθμό βάσης με μικρή εμβέλεια και χαμηλή κατανάλωση ισχύος. Οι μικρές κυψέλες μπορούν να χωριστούν σε 3 κατηγορίες [46]:

- **Femtocells:** Τα femtocells είναι σχεδιασμένα για εσωτερική χρήση, σε μέγεθος ενός μεγάλου δωματίου. Μπορούν να υποστηρίξουν μέχρι λίγους χρήστες και έχουν μικρό κόστος.
- **Picocells:** Τα picocells έχουν μεγαλύτερη εμβέλεια από τα femtocells και μπορούν να επεκταθούν σε μικρές περιοχές ή επιχειρήσεις. Είναι σχεδιασμένα για εσωτερική και για εξωτερική χρήση και μπορούν με χαμηλό κόστος να καλύψουν μέχρι και 64 χρήστες.
- **Microcells:** Τα microcells είναι καθαρά σχεδιασμένα για εξωτερικό χώρο. Μπορούν να καλύψουν μεγαλύτερη απόσταση σε σχέση με τις 2 προηγούμενες κατηγορίες φτάνοντας μερικά χιλιόμετρα και υποστηρίζοντας εκατοντάδες χρήστες.



Εικόνα 27 Κυψέλες και εύρος συχνοτήτων (πηγή:

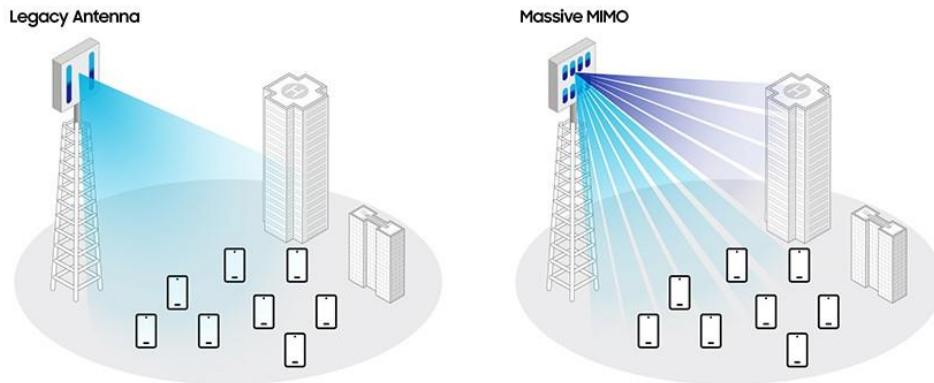
<https://www.google.com/url?sa=i&url=https%3A%2F%2Fmedux.com%2F5g-deployments-reducing-energy-consumption%2F&psig=AOvVaw2sIO->

FafPJTdcccchbIA9qA&ust=1664219413673000&source=images&cd=vfe&ved=0CAwQjRxqFwoTCJjh2MvSsPoCFQAAAAAdAAAAABAI)

### 4.3.3 Massive MIMO, Beamforming.

Η ανάγκη για υποστήριξη περισσότερων συσκευών ταυτόχρονα υποχρέωσε το 5G όπως και πολλά άλλα ασύρματα δίκτυα να κάνουν χρήση της τεχνολογίας συστημάτων πολλαπλής εισόδου – πολλαπλής εξόδου. Συγκεκριμένα, τα κυψελωτά δίκτυα 5G χρησιμοποιούν την τεχνολογία massive MIMO, που όπως υποδηλώνει και το όνομα της είναι η μέθοδος MIMO σε πολύ μεγαλύτερη κλίμακα. Το massive MIMO χρησιμοποιεί πολλαπλές κεραιές για ταυτόχρονη αποστολή και λήψη δεδομένων. Ο αριθμός των κεραιών πομπού-δέκτη σε ένα massive MIMO σύστημα συνήθως μπορεί να φτάσει και τις 64, προσφέροντας καλύτερη κάλυψη και δίνοντας την δυνατότητα σε περισσότερες συσκευές να συνδεθούν στο δίκτυο, διατηρώντας υψηλή απόδοση, ικανοποιητική ταχύτητα και ελάχιστες καθυστερήσεις. Σε ένα σύστημα massive MIMO, ο πομπός μπορεί να στέλνει ταυτόχρονα σε πολλούς χρήστες κάνοντας χρήση του ίδιου διαύλου, ενώ παράλληλα ο δέκτης μπορεί να λαμβάνει το ίδιο σήμα με διαφορετική φάση, αλλοιωμένο ή χρονικά καθυστερημένο και ύστερα από τον συνδυασμό τους να προκύπτει το αρχικό.

Η διαμόρφωση δέσμης είναι άλλη μια τεχνική που χρησιμοποιείται αρκετά στα ασύρματα δίκτυα, όπως αυτά του Wi-Fi και για την εφαρμογή της είναι απαραίτητη η λειτουργία MIMO. Το Beamforming είναι η αποστολή ισχυρών κατευθυντικών σημάτων προς μια κεραιά λήψης απευθείας, αντί για την ευρεία εκπομπή του σήματος προς όλες τις κατευθύνσεις. Επειδή το 5G λειτουργεί σε υψηλές συχνότητες, η μετάδοση του σήματος επηρεάζεται αρκετά από τα φυσικά και τεχνητά εμπόδια που βρίσκονται στο δίαυλο επικοινωνίας. Η διαμόρφωση δέσμης μπορεί να δώσει λύση σε αυτό το πρόβλημα και να μειώσει αποτελεσματικά τις παρεμβολές από άλλα σήματα, καθώς και να αυξήσει την ταχύτητα του δικτύου υποστηρίζοντας συνδέσεις point-to-point μεταξύ των κόμβων του δικτύου Εικόνα 28 [46].



Εικόνα 28: Εκπομπή με απλή κεραία και κεραία με Massive MIMO(πηγή:

[https://www.google.com/url?sa=i&url=https%3A%2F%2Fnews.samsung.com%2Fglobal%2Fsamsung-shares-massive-mimo-roadmap-in-new-whitepaper&psig=AOvVaw218V5jtcV\\_v5DU4mIUcdiw&ust=1664219582419000&source=images&cd=vfe&ved=0CAwQjRxqFwoTCJDRiprTsPoCFQAAAAAdAAAAABAD](https://www.google.com/url?sa=i&url=https%3A%2F%2Fnews.samsung.com%2Fglobal%2Fsamsung-shares-massive-mimo-roadmap-in-new-whitepaper&psig=AOvVaw218V5jtcV_v5DU4mIUcdiw&ust=1664219582419000&source=images&cd=vfe&ved=0CAwQjRxqFwoTCJDRiprTsPoCFQAAAAAdAAAAABAD))

#### 4.3.4 Ορθογώνια πολυπλεξία διαίρεση συχνότητας (OFDM).

Η τεχνική ορθογώνιας πολυπλεξίας διαίρεσης συχνότητας (OFDM) έχει οδηγήσει σε μεγάλη επέκταση της χωρητικότητας των ασύρματων δικτύων και αποτελεί την κύρια τεχνολογία διεπαφής αέρα που υιοθέτησαν τα κυβελοειδή δίκτυα από το 3G και έπειτα. Η τεχνική OFDM που χρησιμοποιούσε το 4G δεν ήταν αρκετή για την ανάπτυξη δικτύων 5<sup>ης</sup> γενιάς, έτσι το 5G προχώρησε στην χρήση νέων τεχνικών όπως το CP-OFDM και το DFT-OFDM. Το OFDM παρέχει καλή φασματική απόδοση, ενώ παράλληλα δίνει τη δυνατότητα υλοποίησης διαμόρφωσης OFDMA.

Η πρώτη τεχνική CP-OFDM χρησιμοποιείται στη κατερχόμενη ζεύξη (DL) του 5G και είναι παρόμοια με το OFDM που χρησιμοποιεί το 4G. Μέσα στο CP-OFDM το τελευταίο μέρος του πλαισίου συνδέεται με την αρχή του πλαισίου OFDM και το μήκος του κυκλικού προθέματος επιλέγεται να είναι μεγαλύτερο από την καθυστέρηση του καναλιού. Με αυτό τον τρόπο υπερνικά τη διασυμβολική παρεμβολή. Στον αντίποδα, όμως, η ανοδική ζεύξη (UL) του 5G διαφέρει αρκετά από αυτή του 4G. Το 5G χρησιμοποιεί κυματομορφές που βασίζονται στις τεχνικές CP-OFDM και DFT-OFDM. Το DFT-OFDM προσφέρει σημαντική ευελιξία σε ένα σύστημα κινητών επικοινωνιών και είναι ευρύτερα γνωστό ως SC-FDMA. Το SC-FDMA είναι αρκετά παρόμοιο με το OFDMA που περιεγράφηκε στο κεφάλαιο του Wi-Fi 6. Το 5G χρησιμοποιεί διαφορετικές διαμορφώσεις όπως OFDMA, PSK και QAM. Η διαμόρφωση PSK χρησιμοποιείται ταυτόχρονα με το DFT-OFDM στην ανοδική ζεύξη, ενώ η διαμόρφωση QAM έχει

καλύτερη φασματική απόδοση και ποικίλει από 16QAM, 64QAM και 256QAM ανάλογα την ποιότητα της σύνδεσης [46][50].

#### 4.4 Θέματα ασφαλείας 5G.

Αρκετό καιρό πριν την εφαρμογή του, όταν το κυψελωτό δίκτυο 5<sup>ης</sup> γενιάς ήταν ακόμα υπό κατασκευή, ένα μεγάλο κομμάτι της επιστημονικής κοινότητας εξέφρασε τις ανησυχίες του σχετικά με τα διάφορα ζητήματα ασφάλειας που θα ακολουθούσαν την εφαρμογή του 5G στον πραγματικό κόσμο, δημιουργώντας προβληματισμό στο ευρύ κοινό. Έχοντας την δυνατότητα να υποστηρίξει εκατομμύρια συσκευές στο διαδίκτυο, με τις περισσότερες από αυτές να χρησιμοποιούνται σε εφαρμογές IoT, το 5G εξαπέλυσε έναν τεράστιο όγκο δεδομένων και συνοδευόταν από ερωτήματα που αφορούσαν τη συλλογή, την αποθήκευση και την ακεραιότητα των δεδομένων, καθώς επίσης και την ιδιωτικότητα των χρηστών του δικτύου.

Στο 4G οι σταθμοί βάσης βρίσκονται μακριά ο ένας από τον άλλον και έτσι είναι πιο δύσκολο να εντοπιστεί η ακριβής τοποθεσία μιας συσκευής στο δίκτυο. Με το 5G αυτό αλλάζει, καθώς εξαιτίας της υψηλής συχνότητας που χρησιμοποιεί το δίκτυο υπάρχει αδυναμία μετάδοσης των σημάτων σε μεγάλες αποστάσεις, αλλά και σε περιβάλλοντα με πολλά εμπόδια. Για το λόγο αυτό στο κυψελωτό δίκτυο 5G οι κεραιές είναι πυκνά τοποθετημένες μεταξύ τους σε εσωτερικούς ή εξωτερικούς χώρους. Η γνώση τού ποια κεραία επικοινωνεί με ποιον χρήστη δίνει την δυνατότητα σε τρίτους να ανακαλύψουν πληροφορίες σχετικά με την τοποθεσία της συσκευής του χρήστη. Το μεγάλο πλήθος των κεραιών που χρησιμοποιεί το 5G δίνει την άνεση στις εταιρείες κινητής τηλεφωνίας να γνωρίζουν την ακριβή τοποθεσία του χρήστη όταν αυτός συνδέεται με οποιαδήποτε κεραία σε έναν σταθμό βάσης.

Μεγάλη ανησυχία έχει προκαλέσει στους χρήστες η τήρηση του απόρρητου σχετικά με τα προσωπικά τους δεδομένα, όπως η τοποθεσία και η ταυτότητα τους στο δίκτυο. Πλέον όλες οι έξυπνες συσκευές και ορισμένες εφαρμογές απαιτούν προσωπικά δεδομένα των χρηστών για να μπορέσουν να συνδεθούν στο δίκτυο. Αυτό είναι ένα ιδιαίτερα μεγάλο κίνητρο για τους επιδέξιους hackers, που με επιθέσεις σύλληψης της διεθνούς ταυτότητας συνδρομητών κινητής τηλεφωνίας (IMSI), μπορούν να αποκτήσουν πρόσβαση σε αυτά τα δεδομένα. Γνωρίζοντας την IMSI της συσκευής ο επιτιθέμενος μπορεί να υποκλέψει και να παρακολουθεί την επικοινωνία ακόμα και αν ο χρήστης αλλάζει κυψέλες, έχει την δυνατότητα να λαμβάνει τον αριθμό των εξερχόμενων κλήσεων αλλά και το περιεχόμενο των μηνυμάτων που αποστέλλονται σε κρυπτογραφημένη μορφή. Ακόμη μπορεί να παρεμποδίσει την ορθή λειτουργία του δικτύου δημιουργώντας συμφόρηση με επιθέσεις άρνησης εξυπηρέτησης (DoS). Ένας σύνηθες τρόπος με τον οποίο οι hackers αποκτούν την IMSI ενός χρήστη είναι μέσα από τη δημιουργία ενός ψεύτικου σταθμού βάσης προσποιούμενο τον βασικό σταθμό που



θα συνδεθεί η συσκευή του χρήστη, έτσι καταφέρνει να αποσπάσει την ταυτότητα του συνδρομητή κινητής τηλεφωνίας.

Αρκετές είναι η χώρες που έχουν διακόψει την εισαγωγή και την χρήση έξυπνων συσκευών από μη αξιόπιστους προμηθευτές που δεν διαμορφώνουν τα προϊόντα τους σύμφωνα με τα εθνικά τους πρότυπα. Οι ΗΠΑ κατηγόρησαν στο παρελθόν τον κινέζικο κολοσσό Huawei ότι εξάγει προϊόντα με σκοπό να μπορεί να παρακολουθεί ξένους πελάτες. Γενικότερα οποιαδήποτε συσκευή εισάγεται σε ένα δίκτυο και είναι συνδεδεμένη στο Internet ενδεχομένως να αποτελεί τρωτό σημείο και συνάμα ευπάθεια για το υπόλοιπο δίκτυο **Σφάλμα! Το αρχείο προέλευσης της αναφοράς δεν βρέθηκε.**[52].

#### 4.5 Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα 5G.

Όπως κάθε νέο τεχνολογικό επίτευγμα έτσι και τα κυψελωτά δίκτυα 5<sup>ης</sup> γενιάς προσπαθούν να λύσουν τα προβλήματα του παρελθόντος και να προσφέρουν νέες δυνατότητες στους χρήστες του. Μέσα από μια σειρά καινοτόμων χαρακτηριστικών που αναλύθηκαν παραπάνω σε αυτό το κεφάλαιο, το 5G προσφέρει αρκετά πλεονεκτήματα που το καθιστούν ιδιαίτερα δημοφιλές τόσο για τους καταναλωτές, όσο και για βιομηχανικές εφαρμογές. Μερικά από αυτά τα πλεονεκτήματα είναι:

- Ο ελάχιστος χρόνος απόκρισης που προσφέρει το 5G δίνει την δυνατότητα υποστήριξης real-time εφαρμογών. Έτσι η καθυστέρηση (latency) κάτω του 1msec επιτρέπει την εξάπλωση του 5G δικτύου ακόμα και σε περίπλοκα περιβάλλοντα όπως το βιομηχανικό.
- Ο υψηλός ρυθμός μετάδοσης των δεδομένων γύρω στα 20Gbps που υπόσχεται το 5G καθιστά πιο γρήγορη την επικοινωνία μεταξύ των συσκευών του δικτύου. Σε συνδυασμό ακόμη με την αύξηση του καναλιού μετάδοσης περισσότερες συσκευές μπορούν να συνδέονται στο ίδιο δίκτυο και να λαμβάνουν ταυτόχρονα μεγαλύτερο όγκο δεδομένων.
- Οι υψηλές συχνότητες (mm Waves) που χρησιμοποιούνται από τα δίκτυα 5<sup>ης</sup> γενιάς απαιτούν την εγκατάσταση νέων κεραιών, μικρότερου μεγέθους πιο κοντά μεταξύ τους. Αυτό κάνει πιο αποτελεσματικό το δίκτυο, καθώς υπάρχει καλύτερη κάλυψη και σταθερή επικοινωνία μεταξύ των συσκευών και των σταθμών βάσης χωρίς παρεμβολές με τη βοήθεια της διαμόρφωσης ζώνης. Ακόμη χάρης την περιαγωγή υπάρχει εξαιρετική κινητικότητα των συσκευών στο δίκτυο.
- Το 5G επιτρέπει την υλοποίηση εικονικών δικτύων με την λειτουργία network slicing, που δημιουργεί υποδίκτυα προκειμένου να εξυπηρετεί τις συσκευές ανάλογα με τις ανάγκες τους.

- Οι συσκευές 5G έχουν χαμηλότερη κατανάλωση μπαταρίας, με αποτέλεσμα η διάρκεια ζωής τους να φτάνει τα αρκετά έτη.

Πέρα από τα θετικά χαρακτηριστικά που διαθέτει το 5G, υπάρχουν ορισμένα μειονεκτήματα που καθιστούν πιο δύσκολη την λειτουργία του. Για παράδειγμα:

- Το 5G έχει ανακοινωθεί αρκετά χρόνια πριν σαν τεχνολογία, αλλά ακόμα και σήμερα είναι υπό ανάπτυξη εξαιτίας των πολλών προβλημάτων που αντιμετωπίζει. Αυτό δημιουργεί απορίες στους χρήστες του σχετικά με το αν εν τέλη θα μπορέσει να επικρατήσει ή αν θα συνεχίσει να συνυπάρχει με τα κυψελωτά δίκτυα προηγούμενων γενιών, όπως το 4G LTE.
- Τα νέα χαρακτηριστικά που διαθέτει το 5G όπως τα mm Waves απαιτούν την εγκατάσταση νέων δικτύων που μπορούν να τις υποστηρίξουν. Η μετάβαση από το 4G στο 5G έχει μεγάλο κόστος για τις εταιρίες τηλεπικοινωνιών που αναλαμβάνουν την αλλαγή του εξοπλισμού. Το κόστος όμως είναι εξίσου μεγάλο και για τους καταναλωτές που για να απολαύσουν τις υπηρεσίες που προσφέρει το 5G θα πρέπει να εξιχνώσουν τις συσκευές τους ώστε να είναι συμβατές με την τελευταία γενιά.
- Μπορεί το 5G προσφέρει τρομερές ταχύτητες και μικρή καθυστέρηση, όμως αντιμετωπίζει σοβαρά προβλήματα με τα εμπόδια που συναντά. Η υψηλές συχνότητες δεν έχουν την δυνατότητα να μεταδίδονται σε μεγάλες αποστάσεις εξαιτίας των εμποδίων (φυσικών ή τεχνητών) που συναντούν με αποτέλεσμα τα σήματα να εξασθενούν πολύ γρήγορα [53].

#### 4.6 Παραδείγματα 5G στο IIoT.

Η πέμπτη γενιά κυψελοειδών δικτύων διαθέτει επαναστατικά χαρακτηριστικά και μπορεί να υποστηρίξει σημαντικές εφαρμογές πραγματικού χρόνου πέρα από απλές έξυπνες συσκευές και smartphones. Η σχεδίαση του 5G επιτρέπει δυνατότητες σε IIoT περιβάλλοντα που μέχρι πριν λίγα χρόνια έμοιαζαν αδύνατα και μπορούν να συμβάλουν στην εξάλειψη μεγαλύτερων περιορισμών στα βιομηχανικά περιβάλλοντα.

Ο τομέας της υγείας μπορεί να επωφεληθεί αρκετά από τις δυνατότητες που προσφέρει το 5G. Η ελάχιστη καθυστέρηση και οι μεγάλες ταχύτητες που προσφέρει η Πέμπτη γενιά ανοίγει τον δρόμο για νέες εφαρμογές στην ιατρική. Συγκεκριμένα καθιστά δυνατή την πραγματοποίηση απομακρυσμένων χειρουργικών επεμβάσεων μέσω ρομποτικών συστημάτων ακριβείας σε πραγματικό χρόνο, αλλά και την παρακολούθηση των ασθενών με την βοήθεια έξυπνων συσκευών που λαμβάνουν μετρήσεις σχετικές με την υγεία τους. Στη γεωργία η τοποθέτηση αισθητήρων σε καλλιεργήσιμες εκτάσεις γης μπορούν να συγκεντρώνουν συνεχώς πληροφορίες σχετικά με την σοδιά,

ενημερώνοντας έγκαιρα και με ακρίβεια τους αγρότες για την κατάσταση της, όπως τα επίπεδα υγρασίας, την θερμοκρασία του αέρα και άλλα. Ανάλογα με τα δεδομένα που συλλέγονται, οι κόμβοι του δικτύου μπορούν να επικοινωνούν μεταξύ τους και να λαμβάνονται αυτόματα αποφάσεις όπως το άνοιγμα των ποτιστικών σε περιόδους ξηρασίας κ.α.

Ο μεγαλύτερος όγκος δεδομένων που φέρουν τα 5G δίκτυα, τους δίνουν τη δυνατότητα να υποστηρίζουν ένα τεράστιο αριθμό συσκευών. Αυτό είναι ένα ιδιαίτερα σημαντικό χαρακτηριστικό, ειδικά αν μιλάμε για εργοστασιακές εγκαταστάσεις, όπου τα ρομποτικά συστήματα κυριαρχούν την σημερινή εποχή. Το 5G μαζί με την βοήθεια της τεχνητής νοημοσύνης (AI) αλλάζουν τις παλιές και παραδοσιακές μεθόδους και μπορούν να συνεισφέρουν στην αύξηση της παραγωγικότητας και στην καλύτερη διαχείριση της λειτουργίας των βιομηχανικών εγκαταστάσεων μειώνοντας σημαντικά τα περιθώρια λάθους κατά τη παραγωγή.

Ακόμη, η 5<sup>η</sup> γενιά έχει την ικανότητα να υποστηρίξει τις μεταφορές (logistics) προϊόντων και την ναυτιλία. Μπορεί να ενεργοποιήσει λειτουργίες όπως η αυτόνομη οδήγηση οχημάτων του στόλου μιας εταιρείας και η παρακολούθηση της διαδρομής του αποθέματος από την αποθήκη μέχρι την παράδοση. Με την βοήθεια της επαυξημένης πραγματικότητας (VR) ο χειριστής ενός οχήματος μπορεί να βρίσκεται στο σπίτι του και μέσω κατάλληλου εξοπλισμού θα μπορεί να κατευθύνει το όχημα στον τελικό προορισμό του, προσφέροντας μεγαλύτερη άνεση και ασφάλεια.

## 5 Συγκριτική μελέτη των τεχνολογιών Wi-Fi 6 και 5G

### 5.1 Ανάλυση χαρακτηριστικών μεταξύ των τεχνολογιών Wi-Fi 6 και 5G.

Το Wi-Fi και τα κυψελωτά δίκτυα είναι δυο τύποι ασύρματης δικτύωσης που συνυπάρχουν εδώ και λίγες δεκαετίες. Τα τελευταία χρόνια τα δίκτυα 5<sup>ης</sup> γενιάς, γνωστά και ως 5G, που αναπτύσσουν οι πάροχοι κινητής τηλεφωνίας έχουν τραβήξει την προσοχή συγκριτικά με την, επίσης, νέα τεχνολογία ασύρματης τοπικής δικτύωσης που ονομάζεται Wi-Fi 6. Με τα δυο αυτά ασύρματα δίκτυα να υπόσχονται σημαντικές βελτιώσεις στην ταχύτητα, καλύτερες αποδόσεις και υποστήριξη νέων δυνατοτήτων στο διαδίκτυο των πραγμάτων και στις επικοινωνίες μηχανής-με-μηχανή, το μέλλον φαντάζει ιδιαίτερα λαμπρό. Ωστόσο, η σύγκριση των δυο τεχνολογιών δεν είναι καινούργια, αλλά υπάρχει αρκετό καιρό από όταν πρωτοεμφανίστηκαν τα δίκτυα 3G, τα οποία ενεργοποιούσαν παρόμοιες δυνατότητες με το Wi-Fi. Έκτοτε, κυριαρχεί η απορία αν οι τεχνολογίες αυτές λειτουργούν ως συμπληρωματικές μεταξύ τους ή ανταγωνίζονται η μια την άλλη. Παρακάτω γίνεται σύγκριση του Wi-Fi 6 με το 5G στα τεχνικά χαρακτηριστικά τους, στην αρχιτεκτονική που χρησιμοποιούν αλλά και στο συνολικό κόστος υλοποίησης των δικτύων [54].

#### 5.1.1 Τεχνικά χαρακτηριστικά Wi-Fi 6 και 5G.

##### A. Είδος Δικτύου

Το Wi-Fi 6 είναι ένα είδος ασύρματου τοπικού δικτύου (WLAN) που χρησιμοποιεί σήματα ραδιοσυχνοτήτων αντί για καλώδια για να επιτύχει τις συνδέσεις συσκευών με το διαδίκτυο. Με σκοπό να λειτουργήσει ένα WLAN δίκτυο είναι αναγκαία τρία βασικά στοιχεία: μια κεραία εκπομπής, ένας ραδιοδιάυλος επικοινωνίας και μια κεραία λήψης. Τα δίκτυα 5<sup>ης</sup> γενιάς από την άλλη οργανώνουν την λειτουργία τους με διαφορετικό τρόπο. Σαν κυψελωτό δίκτυο, το 5G χρησιμοποιεί ένα σύνολο από σταθμούς βάσεις που είναι τοποθετημένοι μεταξύ τους σχηματίζοντας κυψέλες. Κάθε κυψέλη περιέχει έναν σταθμό βάσης και αυτός με τη σειρά του διαθέτει ένα σύνολο από κεραίες εκπομπής και λήψης.

Πίνακας 3: Είδος δικτύων

Προδιαγραφές	5G	Wi-Fi 6
Είδος Δικτύου	Κυψελωτό Δίκτυο	Ασύρματο Τοπικό Δίκτυο

##### B. Ταχύτητα Μετάδοσης Δεδομένων

Από τις σημαντικότερες αναβαθμίσεις που φέρουν και τα δυο δίκτυα είναι η υψηλές ταχύτητες δεδομένων που μπορούν να προσφέρουν. Το 5G έχει τη δυνατότητα

να υποστηρίξει σε θεωρητικό μέχρι τώρα επίπεδο ταχύτητες που φτάνουν τα 10 με 20Gbps. Στην πράξη, όμως, οποιαδήποτε ταχύτητα μεγαλύτερη του 1Gigabit το δευτερόλεπτο θεωρείται ικανοποιητική για την υποστήριξη δικτύων 5<sup>ης</sup> γενιάς. Εάν ευνοούν οι συνθήκες για την σωστή ανάπτυξη του Wi-Fi 6 δικτύου τότε η ταχύτητα μετάδοσης των δεδομένων μπορεί να ξεπεράσει αυτή των κυψελωτών δικτύων και να φτάσει μέχρι τα 9.6Gbps.

Πίνακας 4: ταχύτητα μετάδοσης δεδομένων

Προδιαγραφές	5G	Wi-Fi 6
Ρυθμός μετάδοσης Δεδομένων	> 1Gbps	9.6Gbps

### Γ. Ζώνες Συχνοτήτων

Τα κυψελωτά δίκτυα λειτουργούν κατεξοχήν σε αδειοδοτημένες περιοχές φάσματος. Αυτό πρακτικά σημαίνει πως οι τηλεπικοινωνιακές εταιρίες αγοράζουν ένα εύρος συχνοτήτων για να παρέχουν τις υπηρεσίες τους στους πελάτες, έναντι κάποιας συνδρομής. Το 5G, ωστόσο, είναι η πρώτη έκδοση κυψελωτών δικτύων που μπορεί να λειτουργήσει και εκτός αδειοδοτημένων περιοχών. Συγκεκριμένα, μπορεί να χρησιμοποιήσει 3 ζώνες συχνοτήτων. Τη χαμηλή ζώνη που περιέχει συχνότητες μικρότερες από 1GHz, την μεσαία ζώνη που ονομάζεται αλλιώς και ως sub-6GHz και περιλαμβάνει το εύρος από 1 έως 6GHz και τέλος την υψηλή ζώνη συχνοτήτων. Η τελευταία ζώνη χαρακτηρίζεται ως mm Wave και είναι η καινούργια ζώνη που εισάγεται στα ασύρματα δίκτυα με την είσοδο του 5G και καταλαμβάνει το εύρος από 24 ως 100GHz. Στον αντίποδα το Wi-Fi 6 λειτουργεί μόνο σε μη αδειοδοτημένη περιοχή συχνοτήτων και συγκεκριμένα εκπέμπει μονάχα σε δυο ζώνες, 2.4 GHz και 5GHz. Επόμενη έκδοση του προτύπου 802.11ax (Wi-Fi 6), ανοίγει μια καινούργια ζώνη αυτή των 6GHz. Όσο μεγαλύτερη είναι η συχνότητα που χρησιμοποιείται, τόσο μεγαλύτερη είναι και η ταχύτητα που μπορεί να επιτευχθεί κατά την μετάδοση των δεδομένων. Το πρόβλημα με τη χρήση μη αδειοδοτημένων ζωνών είναι οι παρεμβολές από γειτονικά σήματα που χρησιμοποιούν την ίδια ζώνη.

Πίνακας 5: Ζώνες συχνοτήτων που λειτουργούν

Προδιαγραφές	5G	Wi-Fi 6
Ζώνη Συχνοτήτων	< 1GHz, sub-6GHz, mm Waves	2.4GHz & 5GHz
Φάσμα	Αδειοδοτημένο & Μη Αδειοδοτημένο	Μη Αδειοδοτημένο

### Δ. Υποστήριξη Πολλαπλών Χρηστών

Η δραματική αύξηση των συσκευών στα δίκτυα δημιούργησε την ανάγκη για καλύτερη ποιότητα υπηρεσιών και υποστήριξη όλων αυτών των χρηστών. Και οι δυο τεχνολογίες έχουν την ικανότητα να υποστηρίξουν ένα μεγάλο πλήθος συσκευών στα δίκτυά τους, χωρίς να μειώσουν την απόδοσή τους. Η τεχνολογία πολλαπλής εισόδου, πολλαπλής εξόδου, πολλών χρηστών (MU-MIMO) που χρησιμοποιεί το Wi-Fi 6, επιτρέπει σε Uplink και Downlink συνδέσεις να χρησιμοποιούν ταυτόχρονα τις ίδιες συχνότητες και μπορεί να υποστηρίξει μέχρι 8 ροές επικοινωνίας (8Tx8R). Από την δικιά του πλευρά το 5G σαν δίκτυο ευρείας κλίμακας πρέπει να έχει την ικανότητα να εξυπηρετεί πολύ μεγαλύτερο αριθμό χρηστών. Αυτό το καταφέρνει μέσα από το massive MIMO. Το massive MIMO χρησιμοποιεί πολλαπλές κεραιές για ταυτόχρονη αποστολή και λήψη δεδομένων. Ο αριθμός των κεραιών πομπού-δέκτη σε ένα τέτοιο σύστημα συνήθως κυμαίνεται στις 64Tx64R, προσφέροντας καλύτερη κάλυψη και δίνοντας την δυνατότητα σε περισσότερες συσκευές να συνδεθούν στο δίκτυο, διατηρώντας υψηλή απόδοση, ικανοποιητική ταχύτητα και ελάχιστες καθυστερήσεις.

Η τεχνική της διαμόρφωσης δέσμης που χρησιμοποιείται πλέον στα νεότερα ασύρματα δίκτυα (όπως το Wi-Fi 6 και το 5G), είναι αποτέλεσμα της εφαρμογής των λειτουργιών MIMO που αναφέρθηκαν νωρίτερα. Ουσιαστικά το Beamforming είναι η αποστολή ισχυρών κατευθυντικών σημάτων από την κεραία εκπομπής στην κεραία λήψης, αντί για την ευρεία εκπομπή του σήματος προς όλες τις κατευθύνσεις. Αυτό επιτρέπει στις συσκευές να λαμβάνουν το σήμα πιο ενισχυμένο και να συναντούν λιγότερες παρεμβολές.

Μια ακόμη μέθοδος που χρησιμοποιούν τα ασύρματα τοπικά δίκτυα Wi-Fi είναι η πολλαπλή πρόσβαση ορθογωνίας διαίρεσης συχνοτήτων (OFDMA). Το OFDMA είναι εξέλιξη της ψηφιακής διαμόρφωσης OFDM και χρησιμοποιείται σε UL και DL συνδέσεις, ώστε να εξυπηρετούνται ταυτόχρονα περισσότεροι χρήστες και να μειώνονται σημαντικά οι καθυστερήσεις στο ασύρματο κανάλι, μέσω της διαίρεσης του σε μικρότερα τμήματα που ονομάζονται μονάδες πόρων. Το 5G από την άλλη πλευρά προχώρησε στην χρήση νέων τεχνικών όπως το CP-OFDM για DL και το DFT-OFDM για UL συνδέσεις. Και τα δυο αποτελούν εξέλιξη της τεχνικής ορθογωνίας πολυπλεξίας διαίρεσης συχνότητας (OFDM) που χρησιμοποιούσαν οι προηγούμενες εκδόσεις κυψελωτών δικτύων. Το DFT-OFDM προσφέρει σημαντική ευελιξία σε ένα σύστημα κινητών επικοινωνιών και είναι ευρύτερα γνωστό ως SC-FDMA. Το SC-FDMA είναι αρκετά παρόμοιο με το OFDMA που χρησιμοποιείται στο Wi-Fi 6.

Πίνακας 6: Τεχνικές υποστήριξης πολλών χρηστών

Προδιαγραφές	5G	Wi-Fi 6
Σύστημα	Massive MIMO	MU-MIMO
Διαμόρφωση Δέσμης	Ναι	Ναι

<b>Τεχνικές Πολυπλεξίας</b>	CP-OFDM & DFT-OFDM	OFDMA
-----------------------------	--------------------	-------

### Ε. Διαμόρφωση QAM

Στα ασύρματα δίκτυα, όταν 2 άκρα επικοινωνούν μεταξύ τους τα σήματα που στέλνουν έχουν αναλογική μορφή, αφού ακόμα δεν έχει βρεθεί κάποιος τρόπος για μετάδοση δυαδικών ψηφίων. Η διαμόρφωση τετραγωνικού πλάτους (QAM) είναι μια μέθοδος που χρησιμοποιείται τόσο από τα κυψελωτά δίκτυα 5<sup>ης</sup> γενιάς, όσο και από τα ασύρματα τοπικά δίκτυα Wi-Fi για την κωδικοποίηση δυαδικών ψηφίων σε ραδιοκύματα. Η διαμόρφωση QAM χρησιμοποιεί σύμβολα για να προσδιορίσει την ποιότητα ενός δικτύου. Έτσι, για παράδειγμα, η διαμόρφωση 16-QAM, έχει 16 πιθανά σύμβολα με 4 bit το καθένα. Το 5G χρησιμοποιεί διαμόρφωση 256-QAM με 8 bit ανά σύμβολο, ενώ το Wi-Fi 6 χρησιμοποιεί 1024-QAM με 10 bit ανά σύμβολο. Ο συνολικός αριθμός των συμβόλων του Wi-Fi 6 είναι τετραπλάσιος συγκριτικά με αυτόν του 5G με αποτέλεσμα να έχει 25% καλύτερη ταχύτητα.

Πίνακας 7: Διαμόρφωση

Προδιαγραφές	5G	Wi-Fi 6
<b>Διαμόρφωση</b>	256 QAM	1024 QAM

### ΣΤ. Κάλυψη Δικτύου

Σε πυκνοκατοικημένα περιβάλλοντα όπου ο αριθμός των συσκευών είναι τεράστιος ενδεχομένως να υπάρχει μεγάλη κίνηση κατά την ανταλλαγή δεδομένων, με αποτέλεσμα να προκαλείται συμφόρηση στο δίκτυο. Για το λόγο αυτό είναι ιδιαίτερα σημαντικό η απόδοση των ασύρματων δικτύων να παραμένει σταθερή και σε ικανοποιητικά επίπεδα για όλους τους χρήστες. Το Wi-Fi 6 θέλοντας να αποφύγει τις παρεμβολές από γειτονικά δίκτυα βασίστηκε στην λειτουργία BSS Coloring. Η λειτουργία αυτή επιτρέπει σε ένα σημείο πρόσβασης να χρησιμοποιεί μια 6-bit τιμή στην επικεφαλίδα των δεδομένων που ονομάζεται χρώμα. Το χρώμα βοηθάει τις συσκευές να γνωρίζουν τον αποστολέα των δεδομένων και να προσδιορίζουν αν τα δεδομένα είναι του ίδιου ή διαφορετικού δικτύου. Σε περίπτωση που οι συσκευές δεν είναι οι παραλήπτες των δεδομένων, απλά τα αγνοούν. Σε ένα Basic Service Set ανήκουν όλες οι συσκευές και τα σημεία πρόσβασης του δικτύου.

Από την μεριά του 5G αυτό διασφαλίζεται μέσα από τις λειτουργίες της περιαγωγής (roaming) και της μεταπομπής (handoff ή handover). Όπως έχει ήδη αναφερθεί η οργάνωση των κυψελωτών δικτύων γίνεται σε μικρές κυψέλες. Κάθε κυψέλη έχει τη δικιά της κεραία εκπομπής που εκπέμπει σε διαφορετικές συχνότητες με τις γειτονικές της, σε μια προσπάθεια για να αντιμετωπιστούν τα προβλήματα

παρεμβολών από τυχόν συγκρούσεις. Το 5G χρησιμοποιεί την λειτουργία της περιαγωγής για να διατηρεί μια συσκευή συνδεδεμένη στο δίκτυο ακόμα και όταν αυτή αλλάζει κυψέλη, ενώ χρησιμοποιεί την λειτουργία της μεταπομπής για να διατηρεί τον χρήστη συνδεδεμένο ακόμα και σε περίπτωση που κατά την αλλαγή κυψέλης υπάρχει κλήση σε εξέλιξη.

Πίνακας 8: Τεχνικές κάλυψης των συσκευών εσωτερικά των δικτύων

Προδιαγραφές	5G	Wi-Fi 6
Κάλυψη Δικτύου	Περιαγωγή, Μεταπομπή	BSS Coloring

## Ζ. Ασφάλεια

Η ασφάλεια αποτελεί πρωταρχικό στόχο και για τις δυο τεχνολογίες. Το Wi-Fi 6 έρχεται με ενσωματωμένο το πρωτόκολλο ασφαλείας WPA3, που παρέχει ισχυρότερη κρυπτογράφηση με χρήση κλειδιού 192bit AES GCMP. Για να αποκτήσει πρόσβαση μια συσκευή στο δρομολογητή, πρέπει να εγκατασταθεί σύνδεση 4-way handshake μεταξύ αυτής και του router. Επιπλέον, διαθέτει έλεγχο ταυτότητας που ονομάζεται Simultaneous Authentication of Equals (SAE) για μεγαλύτερη ασφάλεια και ευκαιριακή ασύρματη κρυπτογράφηση (OWE) για την κρυπτογράφηση όλης της ασύρματης κίνησης στο κανάλι. Αντίστοιχα και το 5G υιοθετεί ισχυρότερη ασφάλεια σε σχέση με τους προκατόχους του. Συγκεκριμένα, χρησιμοποιεί κλειδί EAP-AKA και EAP-Transport Layer Security με μεγαλύτερο μέγεθος από πριν από 128 στα 256 bits. Όσο μεγαλύτερο είναι το κλειδί, τόσο υψηλότερη θεωρείται η ασφάλεια.

Πίνακας 9: Μέγεθος κλειδιού κρυπτογράφησης

Προδιαγραφές	5G	Wi-Fi 6
Μέγεθος Κλειδιού	256 bits	192 bits

### 5.1.2 Επεκτασιμότητα δικτύων Wi-Fi 6 και 5G.

Αν και δεν είναι υποχρεωτικό, έχει επικρατήσει τα ασύρματα τοπικά δίκτυα LAN, όπως το Wi-Fi 6 να χρησιμοποιούνται σε εσωτερικούς χώρους και τα κυψελωτά δίκτυα όπως το 5G σε εξωτερικούς. Οι λόγοι που έχει επικρατήσει αυτό το μοτίβο έχουν να κάνουν με την δυνατότητα επέκτασης των δικτύων αυτών, αλλά και με τις ζώνες συχνοτήτων που χρησιμοποιούν. Τα δίκτυα Wi-Fi 6 είναι αρκετά μικρότερα σε κλίμακα από τα αντίστοιχα 5G. Η εμβέλεια των δικτύων αυτών μπορεί να φτάσει τα αρκετά δεκάδες μέτρα με την χρήση πρόσθετων σημείων πρόσβασης. Επειδή λειτουργούν σε μη αδειοδοτημένες ζώνες συχνοτήτων υπάρχει κίνδυνος παρεμβολής από άλλες συσκευές



που λειτουργούν στις ίδιες συχνότητες. Στον αντίποδα το 5G έχει αποδειχθεί αποδοτικότερο στην κάλυψη δικτύων ευρείας εμβέλειας. Αυτό οφείλεται στο ιδιαίτερο στήσιμο του δικτύου και την χρήση μικρών κυψελών που είναι πιο πυκνά συνδεδεμένες μεταξύ τους. Οι υψηλές συχνότητες που χρησιμοποιούν τα δίκτυα 5<sup>ης</sup> γενιάς μπορεί να επιτρέπουν τη μετάδοση δεδομένων με μεγαλύτερες ταχύτητες, όμως είναι απαγορευτικές για περιβάλλοντα με πολλά εμπόδια, σαν αυτά που υπάρχουν στο χώρο ενός δωματίου.

Πίνακας 10: Επεκτασιμότητα δικτύων

Προδιαγραφές	5G	Wi-Fi 6
Εφαρμογή Δικτύου	Outdoor	Indoor
Κλίμακα	Δίκτυα μεγάλης κλίμακας	Δίκτυα μικρής κλίμακας

### 5.1.3 Κόστος δικτύων και συσκευές Wi-Fi 6 και 5G.

Τα κυψελωτά δίκτυα λειτουργούν σε αδειοδοτημένες ζώνες συχνοτήτων, αυτό πρακτικά σημαίνει πως οι πάροχοι κινητής τηλεφωνίας δεσμεύουν επί πληρωμή μια περιοχή φάσματος την οποία παραχωρούν στους πελάτες τους έναντι κάποιας συνδρομής. Το ακριβώς αντίθετο συμβαίνει με τα δίκτυα Wi-Fi, που λειτουργούν σε μη αδειοδοτημένες ζώνες συχνοτήτων. Στην περίπτωση αυτή οι χρήστες μπορούν να χρησιμοποιήσουν τις υπηρεσίες που προσφέρει το ασύρματο δίκτυο Wi-Fi, αγοράζοντας μόνο μια συμβατή συσκευή (πχ δρομολογητής). Σε κάθε περίπτωση οι συσκευές που συνδέονται και στα δυο δίκτυα, έχουν την ανάγκη να διατηρούν την κατανάλωση της ισχύς τους όσο το δυνατόν πιο χαμηλή. Με αυτό τον τρόπο οι συσκευές μπορούν να λειτουργούν για αρκετό καιρό δίχως προβλήματα και συχνές αλλαγές. Για παράδειγμα, το Wi-Fi 6 το επιτυγχάνει αυτό μέσα από έναν μηχανισμό που ονομάζεται TWT. Αυτός ο μηχανισμός βελτιστοποιεί την κατανάλωση ενέργειας και ως εκ τούτου αυξάνει την διάρκεια ζωής της μπαταρίας. Συγκεκριμένα, θέτει σε κατάσταση αναμονής τις συσκευές κάθε φορά που δεν χρησιμοποιούνται. Έτσι αυξάνεται το προσδόκιμο ζωής της μπαταρίας και μειώνεται ο συνολικός φόρτος του δικτύου.

Πίνακας 11: Σύγκριση στο κόστος υλοποίησης και στη διαχείριση της ενέργειας

Προδιαγραφές	5G	Wi-Fi 6
Κόστος Υλοποίησης	Ακριβό	Φθηνό
Ενεργειακή Διαχείριση	Ναι	Ναι

#### 5.1.4 Αρχιτεκτονική δικτύων Wi-Fi 6 και 5G.

Ο σχεδιασμός των δικτύων Wi-Fi είναι ιδιαίτερα απλός και εύκολα υλοποιήσιμος. Το βασικό στοιχείο είναι οι κόμβοι του δικτύου. Με τον όρο αυτό μπορούμε να χαρακτηρίσουμε οποιαδήποτε συσκευή που συμμετέχει στην ανάπτυξη ενός δικτύου Wi-Fi, όπως για παράδειγμα οι δρομολογητές, τα Access Point και λοιπές φορητές συσκευές (πχ κινητά και tablet). Οι κόμβοι ενός δικτύου ομαδοποιούνται σε μονάδες που ονομάζονται σύνολο βασικών υπηρεσιών (BSS) και ανταγωνίζονται μεταξύ τους για να αποκτήσουν πρόσβαση στο ίδιο μέσο. Επειδή οι συσκευές που περιέχονται σε ένα σύνολο δεν έχουν την δυνατότητα άμεσης επικοινωνίας μεταξύ τους αλλά το επιτυγχάνουν με την βοήθεια access point το σύνολο αυτό ονομάζεται Infrastructure BSS. Σε οποιαδήποτε άλλη περίπτωση που οι συσκευές μπορούν να εγκαταστήσουν άμεσες συνδέσεις μεταξύ τους τότε το σύνολο καλείται Independent BSS. Κάθε σύνολο βασικών υπηρεσιών μπορεί να συνδέεται σε ένα κεντρικό καταναμημένο σύστημα (DS) μέσο access point. Το κεντρικό καταναμημένο σύστημα μπορεί να είναι ένα switch, ένα ενσύρματο ή ασύρματο δίκτυο. Ακόμη, οι κόμβοι ενός δικτύου είναι δυναμικοί, δηλαδή μπορούν να ενεργοποιούνται και να απενεργοποιούνται, καθώς επίσης και να περιέχονται σε περισσότερα από ένα BSS σε περίπτωση που αυτά επικαλύπτονται. Τέλος, ένα εκτεταμένο σύνολο υπηρεσιών (ESS) αποτελείται από δυο ή περισσότερα BSS που συνδέονται μεταξύ τους μέσω ενός DS [45].

Όλα τα παραπάνω ακολουθούν το σχεδιασμό που περιλαμβάνει το φυσικό επίπεδο για το πρότυπο 802.11ax. Επειδή το Wi-Fi, όπως και όλες οι υπόλοιπες κατηγορίες WLAN, λειτουργούν στα πρώτα 2 επίπεδα του μοντέλου OSI, είναι ανάγκη να αναλυθεί και ο σχεδιασμός στο επίπεδο ζεύξης δεδομένων. Το δεύτερο επίπεδο αποτελείται από τα υποεπίπεδα, Logical Link Control (LLC) και Media Access Control (MAC). Το υποεπίπεδο LLC παρέχει έλεγχο ροής, έλεγχο λαθών, πολυπλεξία και συγχρονισμό των δεδομένων. Από την άλλη το υποεπίπεδο MAC είναι υπεύθυνο για την μετάδοση πακέτων από και προς την κάρτα δικτύου. Χρησιμοποιεί το πρωτόκολλο πολλαπλής πρόσβασης με αίσθηση φέροντος και αποφυγή σύγκρουσης (CSMA/CA). Επιπλέον, γίνονται και κάποιες λειτουργίες συντονισμού όπως:

- Η καταναμημένη λειτουργία συντονισμού (DFC) που είναι υποχρεωτική στο επίπεδο MAC, αναπτύσσεται είτε στο Infrastructure BSS είτε στο Independent BSS και χρησιμοποιεί καταναμημένη πρόσβαση καναλιού που βασίζεται σε διαμάχη και
- Η λειτουργία συντονισμού σημείου (PCF) που είναι προαιρετική λειτουργία στο επίπεδο MAC, αναπτύσσεται μόνο στο Infrastructure BSS και χρησιμοποιεί κεντρική πρόσβαση καναλιού χωρίς διαμάχη.

Το κυψελωτό δίκτυο 5<sup>ης</sup> γενιάς ακολουθεί μια πιο «έξυπνη» αρχιτεκτονική σε σύγκριση με τις προηγούμενες εκδόσεις του, βασισμένη στα πρότυπα που έθεσε ο οργανισμός 3<sup>rd</sup> Generation Partnership Project (3GPP). Ο σχεδιασμός για πολύπλοκες

εφαρμογές είναι αρκετά δύσκολος και χωρίζεται σε 2 βασικά μέρη. Το Radio Access Network (RAN) και το βασικό δίκτυο κορμού (Core Network).

Το RAN είναι μια δικτυακή υποδομή που συναντάται στην κινητή τηλεφωνία και χρησιμοποιεί σταθμούς βάσης με μεγάλες κεραιές. Κάθε σταθμός βάσης έχει την ικανότητα να συνδέει τις κινητές συσκευές των χρηστών με τα υπόλοιπα μέρη του δικτύου. Το RAN περιλαμβάνει μια μονάδα που ονομάζεται radio unit (RU), η οποία είναι υπεύθυνη για την επεξεργασία των ψηφιακών σημάτων που λαμβάνονται και αποστέλλονται από και προς τον σταθμό βάσης. Κάθε φορά που λαμβάνει μια πληροφορία η RU επικοινωνεί με τη μονάδα βασικής ζώνης χρησιμοποιώντας τη κοινή δημόσια ραδιοδιασύνδεση (CPRI). Η μονάδα βασικής ζώνης λαμβάνει τις πληροφορίες, τις επεξεργάζεται και τις προωθεί στο κεντρικό δίκτυο (Core Network). Η ακριβώς αντίθετη διαδικασία ακολουθείται όταν τα δεδομένα επιστρέφουν προς τον σταθμό βάσης. Η βασική υποδομή RAN περιέχει τον σταθμό βάσης τις μονάδες RU, BBU και κεραιές που καλύπτουν μια συγκεκριμένη περιοχή. Υπάρχουν διάφοροι τύποι RAN όπως GRAN, GERAN, UTRAN, E-UTRAN.

Το επόμενο βασικό στοιχείο της αρχιτεκτονικής 5G είναι το δίκτυο κορμού (Core Network), το οποίο είναι βασισμένο σε υπηρεσίες (SBA) για υποστήριξη ελέγχου ασφαλείας, διαχείριση δεδομένων και σύνδεση στο διαδίκτυο. Ακόμη περιλαμβάνει βελτιωμένο χρόνο απόκρισης από τους διακομιστές τους δικτύου, μειώνοντας τη συνολική καθυστέρηση. Τα βασικά στοιχεία ενός κεντρικού δικτύου 5G είναι:

- **Λειτουργία επιπέδου χρήστη (UPF):** Δρομολόγηση και επιθεώρηση πακέτων,
- **Δίκτυο δεδομένων (DN):** Υπηρεσίες χειριστή, πρόσβαση στο διαδίκτυο,
- **Λειτουργία βασικής πρόσβασης κινητικότητας (AMF):** Εξουσιοδότηση και έλεγχος ταυτότητας,
- **Λειτουργία ελέγχου ταυτότητας διακομιστή (AUSF):** Υποστηρίζει έλεγχο ταυτότητας για πρόσβαση 3GPP,
- **Λειτουργία διαχείρισης συνεδρίας (SMF):** Υπεύθυνο για λειτουργίες που σχετίζονται με τη συνεδρία πχ εγκατάσταση , απελευθέρωση κλπ.
- **Λειτουργία επιλογής δικτύου (NSSF):** Επιλέγει τα επίπεδα εξυπηρέτησης του UE,
- **Λειτουργία έκθεσης δικτύου (NEF):** παρέχει πληροφορίες για εσωτερικές και εξωτερικές επικοινωνίες,
- **NF λειτουργία αποθετηρίου (NRF):** Υποστηρίζει τη λειτουργία εντοπισμού υπηρεσίας,

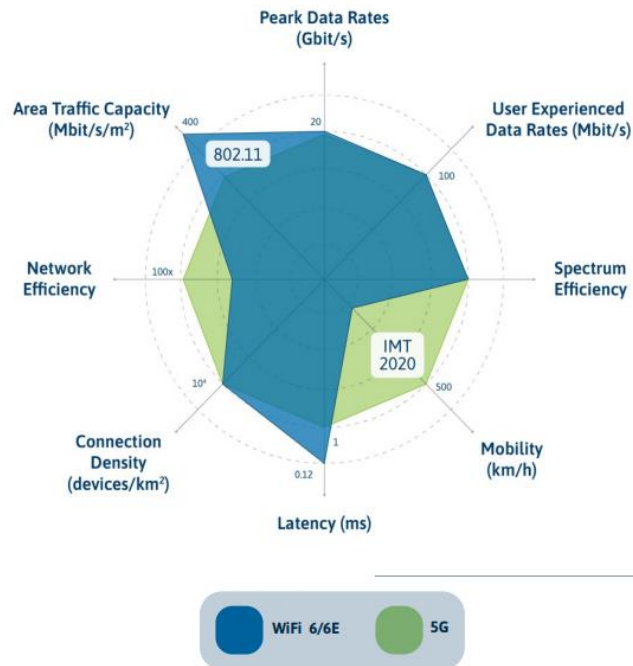
- **Λειτουργία ελέγχου πολιτικής (PCF):** ρυθμίζει τη συμπεριφορά του δικτύου, παρέχει κανόνες και πολιτικές πρόσβασης.
- **Ενοποιημένη διαχείριση δεδομένων (UDM):** Υπεύθυνο για τη διαχείριση των δεδομένων για διάφορες υπηρεσίες, όπως εξουσιοδότηση πρόσβασης, διαχείριση SMS
- **Λειτουργία εφαρμογής (AF):** αλληλοεπιδρά με το κεντρικό δίκτυο προκειμένου να παρέχει υπηρεσίες.

### 5.1.5 Επιλογή καταλληλότερης τεχνολογίας ανάμεσα στο Wi-Fi 6 και το 5G.

Σύμφωνα λοιπόν με όλα τα παραπάνω, καταλήγουμε στο συμπέρασμα πως είναι αδύνατον η μια τεχνολογία να αντικαταστήσει την άλλη, αφού τόσο το κυψελωτό δίκτυο 5G, όσο και το Wi-Fi 6 προσφέρουν μοναδικά χαρακτηριστικά που μπορούν να απογειώσουν την ποιότητα των σύγχρονων ασύρματων δικτύων. Το πιθανότερο σενάριο είναι η συνύπαρξη των δυο τεχνολογιών, καθώς ο συνδυασμός τους μπορεί να ξεκλειδώσει νέες ανεκμετάλλευτες μέχρι τώρα εφαρμογές.

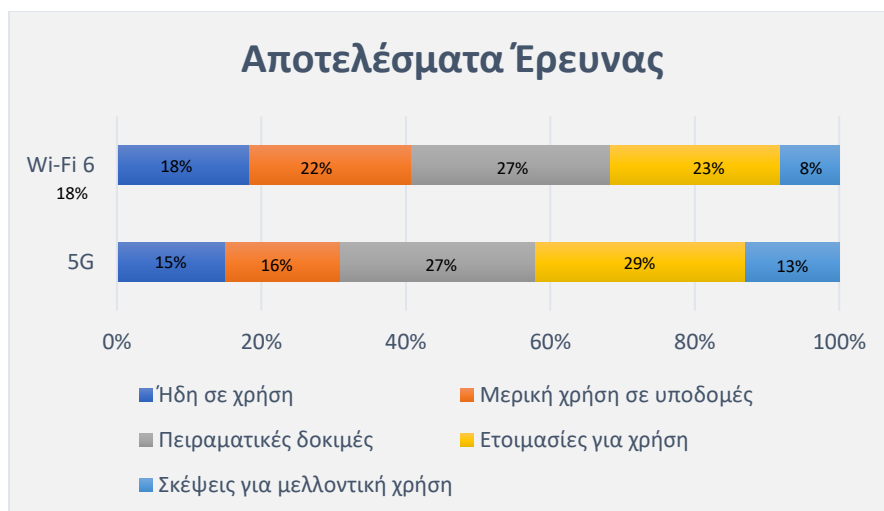
## 5.2 Βασικοί δείκτες απόδοσης (KPI)

Οι βασικοί δείκτες απόδοσης (Key Performance Indicators - KPI) είναι μετρήσεις σχετικές με την απόδοση, που μπορούν να αναπαρασταθούν με γραφική απεικόνιση. Ως στόχο έχουν να βοηθήσουν στην κατανόηση και την αξιολόγηση ενός συστήματος ή μιας τεχνολογίας, ή να δείξουν την τάση μεταξύ παρόμοιων συστημάτων ή τεχνικών. Για τη σύγκριση μεταξύ Wi-Fi 6 και 5G τεχνολογιών χρησιμοποιούνται ως δείκτες απόδοσης η καθυστέρηση, ο ρυθμός δεδομένων, η χωρητικότητα κίνησης, η χρήση φάσματος και πυκνότητα σύνδεσης, η κινητικότητα και η αποδοτικότητα του δικτύου. Τα αποτελέσματα της σύγκρισης παρουσιάζονται στην Εικόνα 29. Στη γραφική παράσταση διακρίνεται πως δεν υπάρχει επικρατέστερη τεχνολογία, αλλά οι δυο τους ανταγωνίζονται. Η κύρια διαφορά τους βρίσκεται στην επεκτασιμότητα καθώς όπως είναι λογικό τα δίκτυα Wi-Fi 6 είναι μικρότερης κλίμακας, ενώ τα δίκτυα 5G με την βοήθεια της περιαγωγής μπορούν να αλλάζουν πολύ πιο εύκολα και γρήγορα σταθμούς επικοινωνίας. Ακόμη, φαίνεται τα δίκτυα Wi-Fi επειδή χρησιμοποιούν μεγαλύτερα σε εύρος κανάλια από εκείνα του 5G διακινούν περισσότερες πληροφορίες μέσα σε αυτά.



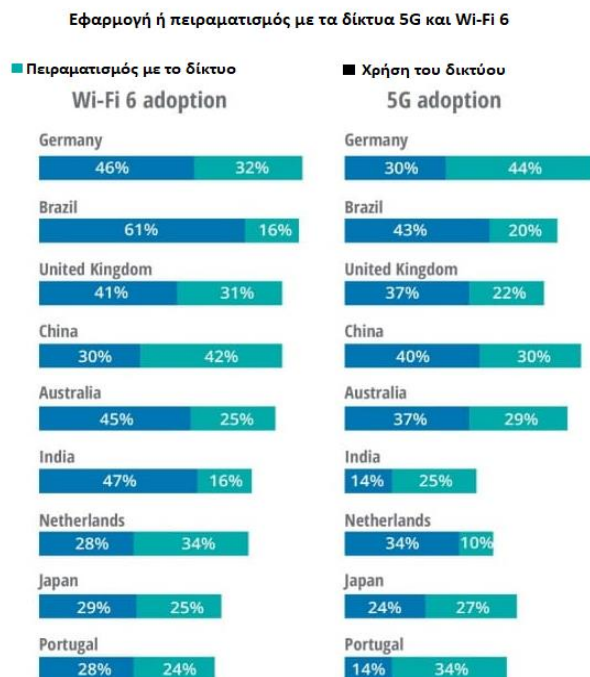
Εικόνα 29: Γραφική αναπαράσταση απόδοσης των δυο τεχνολογιών (πηγή: [https://wballiance.com/wp-content/uploads/2022/06/WBA\\_IOT\\_INFOGRAPHIC\\_2.pdf](https://wballiance.com/wp-content/uploads/2022/06/WBA_IOT_INFOGRAPHIC_2.pdf))

Τα ασύρματα δίκτυα 5G και Wi-Fi 6 υπόσχονται καλύτερες αποδόσεις και νέες λειτουργίες σε σχέση με τις προηγούμενες γενιές τους. Τα μοναδικά χαρακτηριστικά που διαθέτουν, ενεργοποιούν ανεκμετάλλευτες μέχρι τώρα δυνατότητες, που μπορούν να προσφέρουν καινοτόμες υλοποιήσεις σε επιχειρήσεις και λοιπά βιομηχανικά περιβάλλοντα. Το 2020 η Deloitte πραγματοποίησε μελέτη στις ΗΠΑ σχετικά με τα κύρια δίκτυα που χρησιμοποιούνταν. Τα αποτελέσματα έδειξαν πως οι περισσότερες βιομηχανίες έκαναν χρήση του 4G LTE και των προηγούμενων γενιών Wi-Fi. Ωστόσο, λίγους μήνες αργότερα οι επιχειρήσεις άρχισαν να στρέφονται προς τα κυψελωτά δίκτυα 5<sup>ης</sup> γενιάς και το Wi-Fi 6, καθώς θεώρησαν πως πρόκειται για τις πιο κρίσιμες ασύρματες τεχνολογίες, μέσα από τις οποίες μπορούν να επιτευχθούν οι μεγαλύτεροι στόχοι τους.



Εικόνα 30: Αποτελέσματα έρευνας (αναδημιουργία γραφικής παράστασης από: [55])

Όπως φαίνεται και στην παραπάνω γραφική παράσταση (Εικόνα 30), ένα ποσοστό λίγο κάτω από το 20% χρησιμοποιεί ήδη κάποιο τα δυο δίκτυα, ενώ μεγαλύτερα είναι τα ποσοστά για τη μερική χρήση και τις πειραματικές δοκιμές αυτών από κάποιες εταιρίες. Μιας και το 5G είναι ακόμη υπό ανάπτυξη, ένα ποσοστό της τάξης του 42% σκέφτεται ή κάνει προετοιμασίες για να το χρησιμοποιήσει στο μέλλον, έναντι του 31% που κατέχει το Wi-Fi 6. Τέλος, σύμφωνα με την έρευνα παρουσιάζονται στην τελευταία Εικόνα 31 κάποιες από τις χώρες με τα μεγαλύτερα ποσοστά χρήσης ή δοκιμαστικής λειτουργίας των δικτύων 5G και Wi-Fi 6 στις επιχειρήσεις τους [55].



Εικόνα 31: Ποσοστά υιοθέτησης των δικτύων από διάφορες χώρες(πηγή: [55])

## 6 Σύνοψη

Με βάση το περιεχόμενο της παραπάνω εργασίας, γίνονται εύκολα αντιληπτές οι νέες τάσεις της ασύρματης τεχνολογίας σε περιβάλλοντα ζωτικής σημασίας όπως είναι το βιομηχανικό. Η μετάβαση από τα παραδοσιακά μηχανήματα στις διασυνδεδεμένες συσκευές, ενεργοποίησαν αυτό που ονομάζεται 4<sup>η</sup> βιομηχανική επανάσταση ή Industry 4.0. Το Industry 4.0 άνοιξε τους ορίζοντες για νέες εφαρμογές τόσο στις επιχειρήσεις, όσο και στους απλούς καταναλωτές. Η είσοδος του IIoT στον βιομηχανικό τομέα σηματοδοτεί ένα πρωτοποριακό σύστημα επικοινωνίας μεταξύ των διασυνδεδεμένων συσκευών με σκοπό την βελτίωση των αυτοματοποιημένων διαδικασιών. Το IIoT αποτελεί απαραίτητο στοιχείο για την εξέλιξη της βιομηχανικής νοημοσύνης και σίγουρα είναι το μέλλον για τις περισσότερες σύγχρονες μεγάλες εταιρίες, αλλά και για τις παραδοσιακές βιομηχανίες.

Η ανάπτυξη του βιομηχανικού IoT μπορεί να είναι πιο αργή σε σχέση με το καταναλωτικό, παρόλα αυτά επιφέρει μεγαλύτερο κέρδος στην οικονομία. Τα IIoT συστήματα βασίζονται στην ενίσχυση της επικοινωνίας μεταξύ των συσκευών (machine centric), που αποτελούν απαραίτητα δομικά συστατικά για την υλοποίηση αυτών των δικτύων. Το βιομηχανικό διαδίκτυο των πραγμάτων, έχει εφαρμογή σε πολλούς τομείς όπως η ενέργεια, τα εργοστάσια, η γεωργία, η ασφάλεια, η υγεία, οι έξυπνες πόλεις και πολλά άλλα.

Η ανάπτυξη ασύρματων δικτύων επόμενης γενιάς (next generation) όπως το Wi-Fi 6 και το 5G φέρουν δυνατότητες που μπορούν να απογειώσουν τις εφαρμογές στα βιομηχανικά περιβάλλοντα. Όπως έχει ήδη αναφερθεί το IIoT είναι ένα σύστημα μηχανοκεντρικό και όλη του η λειτουργία περιστρέφεται γύρω από την σωστή επικοινωνία των συσκευών. Και τα δυο ασύρματα δίκτυα έχουν την ικανότητα να υποστηρίξουν τις συσκευές IIoT και μάλιστα με το παραπάνω. Αρχικά, οι τεράστιες ταχύτητες μεταφοράς δεδομένων και η ελάχιστη καθυστέρηση, επιτρέπουν στις συσκευές να συλλέγουν και να μεταφέρουν τα δεδομένα από τους αισθητήρες σε πραγματικό χρόνο.

Τα βιομηχανικά περιβάλλοντα είναι σίγουρα από τα πιο απαιτητικά, αφού ο τεράστιος αριθμός των συσκευών στα δίκτυα τους απαιτεί ταυτόχρονη και ισότιμη εξυπηρέτηση. Χάρη τις λειτουργίες MIMO πολλών χρηστών και πολυπλεξίας τα δίκτυα Wi-Fi 6 και 5G αυξάνουν τον αριθμό των συσκευών που μπορούν να υποστηρίξουν, χωρίς να υπάρχει καθυστέρηση στο δίκτυο. Οποιαδήποτε διακοπή λειτουργίας του δικτύου μπορεί να επιβαρύνει οικονομικά την επιχείρηση. Για να αποφευχθούν τέτοια λάθη και τα δυο δίκτυα έχουν προβεί στην ενίσχυση της ασφάλειας τους απέναντι σε κυβερνοεπιθέσεις. Τέλος, έχουν καταφέρει να μειώσουν σημαντικά την κατανάλωση ισχύος των συσκευών με αποτέλεσμα να αυξηθεί η διάρκεια τους σε αρκετά έτη.

Ποιο όμως δίκτυο από τα δυο είναι καταλληλότερο για τον βιομηχανικό τομέα; Η απάντηση δεν είναι απλή. Τα μέχρι τώρα στοιχεία δείχνουν πως ο συνδυασμός των δυο τεχνολογιών είναι ίσως η καλύτερη επιλογή, δεδομένου όμως του χαμηλού κόστους των δικτύων Wi-Fi 6 και της μεγάλης κλίμακας του δικτύου 5G, κάθε επιχείρηση μπορεί να επιλέξει αυτό που θα της αποφέρει περισσότερα κέρδη.



## BIBΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] Martin Serror, Sacha Hack, Martin Henze, Marko Schuba, and Klaus Wehrle. "Challenges and Opportunities in Securing the Industrial Internet of Things".
- [2] Schneider, S. (2017). The industrial internet of things (iiot) applications and taxonomy. *Internet of Things and Data Analytics Handbook*, 41-81.
- [3] Serpanos, D., & Wolf, M. (2017). *Internet-of-things (IoT) systems: architectures, algorithms, methodologies*. Springer.
- [4] Yu, H., Yu, D., Hu, Y., & Wang, C. (2020, December). IIoT based hierarchical data distribution strategy over edge and end device. In *2020 IEEE 6th International Conference on Computer and Communications (ICCC)* (pp. 953-959). IEEE.
- [5] Sisinni, E., Saifullah, A., Han, S., Jennehag, U., & Gidlund, M. (2018). Industrial internet of things: Challenges, opportunities, and directions. *IEEE transactions on industrial informatics*, 14(11), 4724-4734.
- [6] IBM (χ.χ.). What is Industry 4.0?. Ανακτήθηκε (8/2022) από: <https://www.ibm.com/topics/industry-4-0>
- [7] Graham Immerman (2018). Ανακτήθηκε (8/2022) από: <https://www.machinemetrics.com/blog/industry-4-0-internet-of-things-what-s-the-difference>
- [8] TechTarget Posey Brien, Rosencrance Linda, Shea Sharon (2022). Industrial internet of things (IIoT). Ανακτήθηκε (8/2022) από: <https://www.techtarget.com/iotagenda/definition/Industrial-Internet-of-Things-IIoT>
- [9] Syntegra (2022). Internet of Things: The Five Types of IoT. Ανακτήθηκε από: <https://www.pareteum.com/internet-of-things-the-five-types-of-iot/>
- [10] Record.evolution (2020). The IIoT Architecture: How to Tap Into Its Full Potential?. Ανακτήθηκε από: <https://www.record-evolution.de/en/blog/the-iiot-architecture-design-an-overview/>
- [11] Soumyalatha, S. G. H. (2016, May). Study of IoT: understanding IoT architecture, applications, issues and challenges. In *1st International Conference on Innovations in Computing & Net-working (ICICN16)*, CSE, RRCE. *International Journal of Advanced Networking & Applications* (Vol. 478).
- [12] Θεανώ Β. Μαλούτα, Ελένη Ζ. Μίχου. "Το Διαδίκτυο των Πραγμάτων (IoT) Συγκριτική παρουσίαση και αξιολόγηση των σημαντικότερων τεχνολογιών υλοποίησης".
- [13] Sengupta, J., Ruj, S., & Bit, S. D. (2020). A comprehensive survey on attacks, security issues and blockchain solutions for IoT and IIoT. *Journal of Network and Computer Applications*, 149, 102481.

- [14] Intuz (2021). Industrial IoT vs. Consumer IoT: Everything You Should Know About. Ανακτήθηκε (8/2022) από: <https://www.intuz.com/blog/guide-on-industrial-vs-consumer-iot>
- [15] BEHRTECH (χ.χ.). Consumer vs. Industrial IoT: What You Need to Know. Ανακτήθηκε (8/2022) από: <https://behrtech.com/blog/infographic-consumer-vs-industrial-iot-what-you-need-to-know/>
- [16] CopaData (χ.χ.). What is IoT vs IIoT?. Ανακτήθηκε (8/2022) από: <https://www.copadata.com/en/product/platform-editorial-content/what-is-the-iot-and-iiot/>
- [17] Cyberlaw (2021). Power grid cyberattack in Ukraine (2015). Ανακτήθηκε (2022) από: [https://cyberlaw.ccdcoe.org/wiki/Power\\_grid\\_cyberattack\\_in\\_Ukraine\\_\(2015\)](https://cyberlaw.ccdcoe.org/wiki/Power_grid_cyberattack_in_Ukraine_(2015))
- [18] Panchal, A. C., Khadse, V. M., & Mahalle, P. N. (2018, November). Security issues in IIoT: A comprehensive survey of attacks on IIoT and its countermeasures. In *2018 IEEE Global Conference on Wireless Computing and Networking (GCWCN)* (pp. 124-130). IEEE.
- [19] Sadeghi, A. R., Wachsmann, C., & Waidner, M. (2015, June). Security and privacy challenges in industrial internet of things. In *2015 52nd ACM/EDAC/IEEE Design Automation Conference (DAC)* (pp. 1-6). IEEE.
- [20] RF Page (2022). Applications of Industrial Internet of Things. Ανακτήθηκε (8/2022) από: <https://www.rfpage.com/applications-of-industrial-internet-of-things/>
- [21] Jaidka, H., Sharma, N., & Singh, R. (2020, May). Evolution of iot to iiot: Applications & challenges. In *Proceedings of the international conference on innovative computing & communications (ICICC)*.
- [22] TREND MICRO (χ.χ.). Industrial Internet of Things (IIoT). Ανακτήθηκε (8/2022) από: <https://www.trendmicro.com/vinfo/us/security/definition/industrial-internet-of-things-iiot>
- [23] Khan, W. Z., Rehman, M. H., Zangoti, H. M., Afzal, M. K., Armi, N., & Salah, K. (2020). Industrial internet of things: Recent advances, enabling technologies and open challenges. *Computers & Electrical Engineering*, *81*, 106522.
- [24] Sasha Moonilal (2021). 5G vs Wi-Fi 6: The Future of Internet Connectivity. Ανακτήθηκε (8/2022) από: <https://www.cengn.ca/information-centre/innovation/5g-vs-wi-fi-6-the-future-of-internet-connectivity/>
- [25] Extreme (χ.χ.). What is 802.11ax (Wi-Fi 6)? Ανακτήθηκε (8/2022) από: <https://www.extremenetworks.com/wifi6/what-is-80211ax/>
- [26] Purple (2014). The evolution of WiFi. Ανακτήθηκε (8/2022) από: <https://purple.ai/blogs/history-wifi/>
- [27] Element14 (χ.χ.). Wi-Fi Architecture, Implementation and Applications. Ανακτήθηκε (8/2022) από: <https://th.element14.com/wi-fi-architecture-implementation-and-applications>

- [28] Tutorialspoint (χ.χ.). The 802.11 Physical Layer. Ανακτήθηκε (8/2022) από: <https://www.tutorialspoint.com/the-802-11-physical-layer>
- [29] MPIRICAL (χ.χ.). Distribution System. Ανακτήθηκε (8/2022) από: <https://www.mpirical.com/glossary/ds-distribution-system>
- [30] Tutorialspoint (χ.χ.). The 802.11 MAC Sublayer Protocol. Ανακτήθηκε (8/2022) από: <https://www.tutorialspoint.com/the-802-11-mac-sublayer-protocol>
- [31] Tektronix. “Wi-Fi: Overview of the 802.11 Physical Layer and Transmitter Measurements:.
- [32] Haitham Hassanieh. “Wireless Communications From 5G and Wi-Fi 6 to Low Power IoT”.
- [33] RF Wireless World (χ.χ.). Advantages of Wi-Fi 6 | Disadvantages of Wi-Fi 6, 802.11ax. Ανακτήθηκε (8/2022) από: <https://www.rfwireless-world.com/Terminology/Advantages-and-Disadvantages-of-802-11ax.html>
- [34] Industrial ethernet book (2021). Wi-Fi 6: boost in efficiency for industrial applications?. Ανακτήθηκε (8/2022) από: <https://iebmedia.com/technology/iiot/wi-fi-6-boost-in-efficiency-for-industrial-applications/>
- [35] Info-Finder (χ.χ.). What is OFDMA. Ανακτήθηκε (8/2022) από: <https://info.support.huawei.com/info-finder/encyclopedia/en/OFDMA.html>
- [36] NetworkWorld, Keith Shaw (2022). What is beamforming and how does it make wireless better. Ανακτήθηκε (8/2022) από: <https://www.networkworld.com/article/3445039/beamforming-explained-how-it-makes-wireless-communication-faster.html>
- [37] Ni (2022). Introduction to 802.11ax High-Efficiency Wireless. Ανακτήθηκε (8/2022) από: [Introduction to 802.11ax High-Efficiency Wireless - NI](https://www.ni.com/white-paper/37712/introduction-to-802-11ax-high-efficiency-wireless.html)
- [38] Minim, Caleb Mckee (2021). What is QAM? 1024QAM in Wi-Fi 6 explained. Ανακτήθηκε (8/2022) από: <https://www.minim.com/blog/what-is-qam>
- [39] CenturyLink (χ.χ.). The difference between 2.4GHz and 5GHz WiFi. Ανακτήθηκε (8/2022) από: <https://www.centurylink.com/home/help/internet/wireless/which-frequency-should-you-use.html>
- [40] WiFi Alliance (χ.χ.). Discover Wi-Fi Security. Ανακτήθηκε (8/2022) από: [Security | Wi-Fi Alliance](https://www.wi-fi.com/press-releases/2022/08/01/discover-wi-fi-security)
- [41] Aziz, T. A. T., Abd Razak, M. R., & Ghani, N. E. A. (2017, September). The performance of different IEEE802. 11 security protocol standard on 2.4 GHz and 5GHz WLAN networks. In *2017 International Conference on Engineering Technology and Technopreneurship (ICE2T)* (pp. 1-7). IEEE.
- [42] Acton (χ.χ.). Wi-Fi 6 to Deliver More Than Just Speed. Ανακτήθηκε (8/2022) από: <https://www.accton.com/Technology-Brief/high-efficiency-wifi-6-ieee-802-11ax/>

- [43] IEEE LIAISON. WiFi 6/6E INDUSTRIAL IOT (IIOT). Ανακτήθηκε (8/2022) από: <https://www.ieee802.org/1/files/public/docs2022/liaison-WBA-WiFi6E-WTSN-IIOT-0322-v02.pdf>
- [44] ABI research for visionaries. “What 6 GHz Spectrum Means for Connectivity, Key Industries, and Technology Implementers”. Ανακτήθηκε (8/2022) από: [ABI Research The Future Of Wi-Fi.pdf \(hubspot.net\)](#)
- [45] Beard C. Stallings W. (2016). Ασύρματες Επικοινωνίες Δίκτυα & Συστήματα Εκδόσεις Τζιόλα
- [46] Bibek Devkota, Hari Bhandari. “Next Generation of wireless Networks WiFi 6 and 5G”.
- [47] Cengn, Richard Galazzo (2020). Timeline from 1G to 5G: A brief history on cell phones. Ανακτήθηκε (8/2022) από: <https://www.cengn.ca/information-centre/innovation/timeline-from-1g-to-5g-a-brief-history-on-cell-phones/>
- [48] Digi (χ.χ.). What is 5G Network Architecture?. Ανακτήθηκε (8/2022) από: <https://www.digi.com/blog/post/5g-network-architecture>
- [49] SDxCentral Studios (2018). What is radio Access Network (RAN)?. Ανακτήθηκε (8/2022) από: <https://www.sdxcentral.com/5g/ran/definitions/radio-access-network/>
- [50] Electronicsnotes (χ.χ.). 5G Waveforms & modulation: CP-OFDM & DFT-s-OFDM. Ανακτήθηκε (8/2022) από: <https://www.electronics-notes.com/articles/connectivity/5g-mobile-wireless-cellular/waveforms-ofdm-modulation.php>
- [51] Ahmad, I., Kumar, T., Liyanage, M., Okwuibe, J., Ylianttila, M., & Gurtov, A. (2018). Overview of 5G security challenges and solutions. *IEEE Communications Standards Magazine*, 2(1), 36-43.
- [52] Nokia (χ.χ.). Privacy challenges and security solutions for 5G networks. Ανακτήθηκε (8/2022) από: <https://www.nokia.com/networks/insights/privacy-challenges-security-solutions-5g-networks/>
- [53] Eze, K. G., Sadiku, M. N., & Musa, S. M. (2018). 5G wireless technology: A primer. *International Journal of Scientific Engineering and Technology*, 7(7), 62-64.
- [54] Oughton, E. J., Lehr, W., Katsaros, K., Selinis, I., Bublely, D., & Kusuma, J. (2021). Revisiting wireless internet connectivity: 5G vs Wi-Fi 6. *Telecommunications Policy*, 45(5), 102127.
- [55] Deloitte (2021). Accelerating enterprise innovation and transformation with 5G and Wi-Fi 6: Ανάκτηση (8/2022) από: <https://www2.deloitte.com/xs/en/insights/industry/technology/global-5g-transformation.html>
- [56] Wevolver, Cees Links. (2022). The Evolution of Wifi networks: from IEEE 802.11 to WiFi 6E. Ανακτήθηκε (8/2022) από: <https://www.wevolver.com/article/the-evolution-of-wi-fi-networks-from-ieee-80211-to-wi-fi-6e>

- [57] Boyes, H., Hallaq, B., Cunningham, J., & Watson, T. (2018). The industrial internet of things (IIoT): An analysis framework. *Computers in industry*, 101, 1-12.