



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΙΩΑΝΝΙΝΩΝ
ΣΧΟΛΗ ΟΙΚΟΝΟΜΙΚΩΝ ΚΑΙ ΔΙΟΙΚΗΤΙΚΩΝ ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ ΚΑΙ ΤΗΛΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΩΝ

ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΕΣ ΚΑΤΕΥΘΥΝΣΕΙΣ ΓΙΑ ΤΟ WI-FI 8

Έλλη Χονδρογιάννη

Επιβλέπων: Κωνσταντίνος Θ. Αγγέλης

Άρτα, Οκτώβριος 2025

ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΕΣ ΚΑΤΕΥΘΥΝΣΕΙΣ ΓΙΑ ΤΟ WI-FI 8

Έλλη Χονδρογιάννη

Επιβλέπων: Κωνσταντίνος Θ. Αγγέλης

Άρτα, Οκτώβριος 2025

FUTURE DIRECTIONS FOR WI-FI 8

Εγκρίθηκε από τριμελή εξεταστική επιτροπή

Άρτα, 10 Οκτωβρίου 2025

ΕΠΙΤΡΟΠΗ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗΣ

1. Επιβλέπων καθηγητής
Κωνσταντίνος Θ. Αγγέλης,
2. Μέλος επιτροπής
Ανδρέας Τσορμπατζόγλου
3. Μέλος επιτροπής
Βασίλειος Χαριλόγης

© Χονδρογιάννη Έλλη, 2025.

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.

Επίθετο, Όνομα

Χονδρογιάννη Έλλη

Υπογραφή



ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Αυτή η εργασία διερευνά τις προοπτικές εξελίξεις και τις τεχνικές δυνατότητες του Wi-Fi 8, της επόμενης γενιάς τεχνολογίας ασύρματων τοπικών δικτύων. Βασιζόμενο στα θεμέλια προηγούμενων προτύπων Wi-Fi, το Wi-Fi 8 στοχεύει στην παροχή πρωτοφανών μέγιστων ρυθμών δεδομένων που ξεπερνούν τα 46,4 Gbps, αξιοποιώντας ευρύτερα εύρη ζώνης καναλιών, σχήματα διαμόρφωσης υψηλότερης τάξης και βελτιωμένες τεχνολογίες πολλαπλών χρηστών όπως MU-MIMO και OFDMA. Η μελέτη παρέχει μια ολοκληρωμένη σύγκριση μεταξύ του Wi-Fi 8 και των αναδυόμενων δικτύων κινητής τηλεφωνίας 6G, επισημαίνοντας τις διαφορές στην κάλυψη, τα μοντέλα ανάπτυξης, την αξιοποίηση του φάσματος και την ενεργειακή απόδοση. Δίνεται έμφαση στον ρόλο του Wi-Fi 8 σε πυκνά εσωτερικά περιβάλλοντα και στις δυνατότητές του να συμπληρώσει τις τεχνολογίες κινητής τηλεφωνίας μέσω ασύρματης πρόσβασης χαμηλού κόστους και υψηλής χωρητικότητας. Η εργασία συζητά επίσης βασικές μελλοντικές τάσεις, συμπεριλαμβανομένων των προκλήσεων κατανομής φάσματος, της ενσωμάτωσης με αναδυόμενες τεχνολογίες και της σημασίας της αντιμετώπισης της ψηφιακής ένταξης για τη γεφύρωση των κενών συνδεσιμότητας. Αναλύοντας την τρέχουσα έρευνα και τις εξελίξεις στον κλάδο, η παρούσα εργασία σκιαγραφεί κρίσιμες οδούς για την εξέλιξη του Wi-Fi 8, τοποθετώντας το ως μια κεντρική τεχνολογία για τα μελλοντικά οικοσυστήματα ασύρματης επικοινωνίας.

Λέξεις-κλειδιά: Wi-Fi 8, Ασύρματα δίκτυα, MU-MIMO, Κατανομή φάσματος, Σύγκριση 6G

ABSTRACT

The current study explores the prospective developments and technical capabilities of Wi-Fi 8, the next generation of wireless local area network technology. Building on the foundation of previous Wi-Fi standards, Wi-Fi 8 aims to deliver unprecedented peak data rates exceeding 46.4 Gbps, leveraging wider channel bandwidths, higher-order modulation schemes, and improved multi-user technologies such as MU-MIMO and OFDMA. The study provides a comprehensive comparison between Wi-Fi 8 and emerging 6G mobile networks, highlighting differences in coverage, deployment models, spectrum utilization, and energy efficiency. Emphasis is placed on the role of Wi-Fi 8 in dense indoor environments and its potential to complement mobile technologies through low-cost, high-capacity wireless access. The study also discusses key future trends, including spectrum allocation challenges, integration with emerging technologies, and the importance of addressing digital inclusion to bridge connectivity gaps. By analyzing current research and industry developments, this paper outlines critical pathways for the evolution of Wi-Fi 8, positioning it as a central technology for future wireless ecosystems.

Keywords: Wi-Fi 8, Wireless Networks, MU-MIMO, Spectrum Allocation, 6G Comparison

ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ

ΠΕΡΙΛΗΨΗ.....	i
ABSTRACT	ii
ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ	iii
ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ.....	vi
ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΕΙΚΟΝΩΝ	vii
1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	1
1.1 Θεωρητικό υπόβαθρο	1
1.2 Στόχοι της Μελέτης.....	2
2 Γενιές Wi-Fi: Μια επισκόπηση.....	4
2.1 Εξέλιξη των προτύπων IEEE 802.11.....	4
2.2 Βασική έκδοση IEEE 802.11	7
2.2.1 Αρχιτεκτονική MAC και Βασικές Τεχνολογίες	7
2.2.2 Κατανεμημένη Συνάρτηση Συντονισμού (DCF).....	7
2.2.3 Διαδικασία Υποχώρησης.....	8
2.2.4 Μηχανισμός Εικονικής Ανίχνευσης Φέροντος.....	9
2.3 Προδιαγραφές PHY και Βασικές Τεχνολογίες	9
2.3.1 Επισκόπηση Φυσικού Επιπέδου	10
2.3.2 Φάσμα Διασποράς Μεταπήδησης Συχνότητας (FHSS).....	10
2.3.3 Άμεση Διασπορά Φάσματος Ακολουθίας (DSSS)	11
2.4. IEEE 802.11a	12
2.4.1 Προδιαγραφές.....	12
2.4.2 Ορθογώνια Πολυπλεξία Διαίρεσης Συχνότητας (OFDM).....	12
2.5 IEEE 802.11b/g	13
2.5.1 Προδιαγραφές.....	13
2.5.2 Συμπληρωματική Κλειδοποίηση Κώδικα (CCK).....	14

2.6. Βελτιώσεις στο IEEE 802.11g	15
2.7 IEEE 802.11n και 802.11ac	15
2.7.1 Προδιαγραφές	16
2.8 Σύγκριση Προτύπων IEEE 802.11	16
3 Wi-Fi 6 and Wi-Fi 6E	20
3.1 Wi-Fi 6	20
3.2 Παραδείγματα Σεναρίων για την Ανάπτυξη Wi-Fi 6 (Merlin, 2015)	25
3.3 Επισκόπηση Βασικών Βελτιώσεων στο Wi-Fi 6	27
3.3.1. Ορθογώνια Πολλαπλή Πρόσβαση Διαίρεσης Συχνοτήτων (OFDMA)	28
3.3.2. Χωρική Επαναχρησιμοποίηση (SR)	28
3.3.3. Χρόνος Αφύπνισης Στόχου (TWT).....	29
3.3.4. MIMO Πολλαπλών Χρηστών (MU-MIMO).....	29
3.3.5. Βελτιώσεις Διαμόρφωσης	29
3.4 Wi-Fi 6E: Εκτεταμένη Ζώνη Συχνοτήτων.....	30
3.4.1. Πυκνές Αναπτύξεις	30
3.4.2. Διαδίκτυο των Πραγμάτων (IoT).....	30
3.4.3. Εφαρμογές Πολυμέσων.....	30
3.5 OFDMA στο Wi-Fi 6.....	31
3.5.1 Βελτιώσεις στο Φυσικό Επίπεδο	31
3.5.2 Ευέλικτη Κατανομή Φάσματος	31
3.5.3 Μονάδες Πόρων στο Wi-Fi 6	32
3.5.4 Διάρκεια συμβόλων και διαστήματα προστασίας	33
3.6 Βελτιώσεις επιπέδου MAC	35
3.6.1 Handshake RTS/CTS Πολλαπλών Χρηστών	35
3.6.2 Μετάδοση Downlink.....	36
3.6.3 Μετάδοση Ανοδικής Ζεύξης	37
3.7 Ανοιχτές Προκλήσεις στο Wi-Fi 6	38

3.7.1 Διαχείριση Σύνθετων Αναπτύξεων Wi-Fi 6.....	39
3.7.2 Υποστήριξη Ποιότητας Υπηρεσίας (QoS).....	40
3.7.3 Διαλειτουργικότητα.....	41
3.8 Συγκεντρωτικά Χαρακτηριστικά του Wi-Fi 6	42
3.9 Wi-Fi 6E: Επέκταση στα 6 GHz	43
3.10 Wi-Fi 7	45
4 Wi-Fi 8: Μελλοντικές Κατευθύνσεις στο Ασύρματο Ευρυζωνικό Δίκτυο	47
4.1 Σενάρια για τη μελλοντική ζήτηση Wi-Fi και ο ρόλος του Wi-Fi 8	48
4.2 Περιπτώσεις Χρήσης Wi-Fi 8 και Αναδύομενα Τεχνικά Χαρακτηριστικά	51
4.2.1. Μηχανική Μάθηση (ML) για τη Διαχείριση Δικτύου Wi-Fi	55
4.2.2 Μη Επίγεια Συνδεσιμότητα και Επέκταση Wi-Fi	56
4.2.3 Ραδιοφωνική Εντοπισμός και Αισθητήρας στο Wi-Fi 8.....	57
4.2.4 Επέκταση Φάσματος: Άνω 6 GHz και Υπο-Τεραχέρτζ για Wi-Fi 8	58
4.2.5 Ενεργειακή απόδοση.....	58
4.2.6 Ασφάλεια και ιδιωτικότητα	59
4.3 Αναδύομενα Τεχνικά Χαρακτηριστικά των Wi-Fi 7 και Wi-Fi 8	61
4.4 Προώθηση Τεχνολογιών Wi-Fi: Wi-Fi 7 και Wi-Fi 8.....	66
4.5 Wi-Fi 8 στο ευρύτερο τοπίο της συνδεσιμότητας.....	72
Συμπεράσματα.....	74
Βιβλιογραφία	76

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ

Πίνακας 2.1 Βασικές διαφορές μεταξύ διαφόρων προτύπων IEEE 802.11 και των αντίστοιχων επεκτάσεών τους.	19
Πίνακας 3.1 Τεχνικές προδιαγραφές για τις πρόσφατες γενιές Wi-Fi.....	21
Πίνακας 3.2 Καινοτομίες στο Wi-Fi 6.....	27
Πίνακας 3.3 Σύγκριση Wi-Fi 6 και Wi-Fi 6E	44
Πίνακας 3.4 Προδιαγραφές επιπέδων PHY και MAC για Wi-Fi 4 έως Wi-Fi 7.	45
Πίνακας 4.1 Τεχνικές δυνατότητες σε όλα τα παλαιότερα και τα τρέχοντα ασύρματα πρότυπα.	63
Πίνακας 4.2 Προοπτική σύγκριση των πιθανών χαρακτηριστικών του 6G και του Wi-Fi 7/8.	69
Πίνακας 4.3 Wi-Fi 8 vs. 6G: Τεχνική σύγκριση και σύγκριση εφαρμογών	72

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΕΙΚΟΝΩΝ

Εικόνα 2.1 Αρχιτεκτονική MAC (D. Chen, 2017; Sharma & Singh, 2016).....	7
Εικόνα 2.2 Επισκόπηση της διαδικασίας υποχώρησης.....	9
Εικόνα 3.1 Σύγκριση Wi-Fi 5 και Wi-Fi 6 όσον αφορά την απόσταση μεταξύ υποφορέων και τη διάρκεια συμβόλων OFDM. Η διάρκεια συμβόλων ωφέλιμου φορτίου είναι αντίστροφη με την απόσταση μεταξύ υποφορέων.	32
Εικόνα 3.2 Μεγέθη RU σε κανάλι 20 MHz.	33
Εικόνα 3.3 Η μορφή προοιμίου στο Wi-Fi 6 εξαρτάται από τον τύπο πλαισίου.	34
Εικόνα 3.4 Μετάδοση DL MU OFDMA μέσω διαφορετικών RU και απαιτήσεων κυκλοφορίας εντός ενός καναλιού 40 MHz.	36
Εικόνα 3.5 Προγραμματισμένη και τυχαία πρόσβαση UL MU OFDMA εντός καναλιού 40 MHz. (α) Μετάδοση προγραμματισμένης πρόσβασης UL MU OFDMA μέσω διαφορετικών RU και απαιτήσεων κυκλοφορίας. (β) Μετάδοση τυχαίας πρόσβασης UL OFDMA (UORA) μέσω διαφορετικών RU (οι σταθμοί 1, 2 και 3 έχουν τα Αναγνωριστικά Συσχέτισης (AIDs) 1, 2 και 3, αντίστοιχα. Ο σταθμός 4 δεν είναι συσχετισμένος).	38
Εικόνα 4.1 Βασικές τάσεις ζήτησης ασύρματης ευρυζωνικής πρόσβασης.	50
Εικόνα 4.2 Χρονοδιάγραμμα της IMT προς το 2030 και μετά (τυποποίηση 6G) (E. Oughton et al., 2024; Shen et al., 2023).....	54
Εικόνα 4.3 Βασικές πτυχές του δικτύου 6G.....	55
Εικόνα 4.4 Χρονοδιάγραμμα για Wi-Fi 7 και 8 (Galati-Giordano et al., 2024).	65

1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1 Θεωρητικό υπόβαθρο

Η ασύρματη επικοινωνία έχει γίνει ο ακρογωνιαίος λίθος της σύγχρονης κοινωνίας, τροφοδοτώντας τη συνδεσιμότητα σε σπίτια, επιχειρήσεις, πόλεις και βιομηχανίες. Μεταξύ των διαθέσιμων τεχνολογιών, το Wi-Fi (IEEE 802.11) έχει ιδιαίτερα επηρεάσει την προσιτή και ευρεία πρόσβαση στο ευρυζωνικό δίκτυο. Σήμερα, το Wi-Fi υποστηρίζει τα πάντα, από την ψυχαγωγία και την απομακρυσμένη εργασία έως τον βιομηχανικό αυτοματισμό και την τηλεϊατρική (Deng et al., 2020; Khoron et al., 2019; Shahin et al., 2019). Ωστόσο, καθώς οι ψηφιακές υπηρεσίες γίνονται ολοένα και πιο καθηλωτικές και απαιτούν ολοένα και περισσότερα δεδομένα, τα υπάρχοντα πρότυπα Wi-Fi αντιμετωπίζουν αυξανόμενες προκλήσεις. Οι αναδυόμενες εφαρμογές, όπως η επαυξημένη και η εικονική πραγματικότητα (AR/VR), η ροή βίντεο 8K, οι έξυπνες υποδομές και το IoT μεγάλης κλίμακας, απαιτούν επίπεδα αξιοπιστίας, καθυστέρησης και αποδοτικότητας που οι τρέχουσες γενιές Wi-Fi δεν μπορούν να εγγυηθούν με συνέπεια.

Οι διαδοχικές γενιές Wi-Fi έχουν επεκτείνει την απόδοση, έχουν βελτιώσει την αποδοτικότητα του φάσματος και έχουν εισαγάγει μηχανισμούς για καλύτερη υποστήριξη πολλαπλών χρηστών. Ωστόσο, κάθε επανάληψη έχει αφήσει βασικές προκλήσεις ανεπίλυτες. Το Wi-Fi 6 βελτίωσε την χωρητικότητα μέσω OFDMA και Target Wake Time, αλλά η ντετερμινιστική χαμηλή καθυστέρηση —κρίσιμη για εφαρμογές πραγματικού χρόνου— παραμένει δύσκολο να επιτευχθεί (Gallo et al., 2018; Guimaraes et al., 2013; E. J. Oughton et al., 2021). Το Wi-Fi 7, με τα ευρύτερα κανάλια του, το 4K-QAM και τη λειτουργία πολλαπλών συνδέσεων, αυξάνει τους μέγιστους ρυθμούς δεδομένων σε επίπεδα παρόμοια με αυτές των οπτικών ινών, αλλά εξακολουθεί να δυσκολεύεται σε εξαιρετικά πυκνά περιβάλλοντα, όπου οι παρεμβολές και οι διαφωνίες υποβαθμίζουν την ποιότητα της υπηρεσίας (D. Chen, 2017; Forge & Vu, 2020; Navío-Marco et al., 2019; Sharma & Singh, 2016). Αυτές οι αδυναμίες υπογραμμίζουν έναν κεντρικό περιορισμό: τα σταδιακά κέρδη απόδοσης από μόνα τους δεν επαρκούν για την κάλυψη των μελλοντικών απαιτήσεων συνδεσιμότητας.

Κοιτάζοντας μπροστά, το Wi-Fi 8 αναμένεται να μετατοπίσει την εστίαση από την ταχύτητα στην εξαιρετικά αξιόπιστη, την ντετερμινιστική καθυστέρηση, τον μαζικό συντονισμό συσκευών και την ενεργειακή απόδοση. Σε αντίθεση με τους προκατόχους του, το Wi-Fi 8 στοχεύει στην παροχή εγγυήσεων απόδοσης που απαιτούνται για κρίσιμα σενάρια, όπως η αυτόνομη κινητικότητα, η παρακολούθηση της υγειονομικής περιθάλψης, η βιομηχανική ρομποτική και οι μεγάλης κλίμακας αναπτύξεις σε έξυπνες πόλεις (Galati Giordano et al., 2023). Η επίτευξη αυτού θα απαιτήσει καινοτομίες όχι μόνο στη διαμόρφωση και το εύρος ζώνης, αλλά και στην αρχιτεκτονική του συστήματος, τη διαχείριση του φάσματος και τον έξυπνο συντονισμό μεταξύ των σημείων πρόσβασης.

Ταυτόχρονα, το παγκόσμιο τοπίο του φάσματος προσθέτει περαιτέρω πολυπλοκότητα. Η συμφόρηση του φάσματος στις ζώνες των 2,4 και 5 GHz, ο κατακερματισμός στην περιοχή των 6 GHz και οι συνεχιζόμενες συζητήσεις σχετικά με την πρόσβαση σε ζώνες υψηλότερων συχνοτήτων θέτουν σημαντικές πολιτικές και τεχνικές προκλήσεις (Akhmetov et al., 2022). Η ενεργειακή απόδοση παραμένει επίσης μια κρίσιμη ανησυχία, ιδίως καθώς δισεκατομμύρια συσκευές IoT αναμένεται να βασίζονται στη συνδεσιμότητα Wi-Fi. Χωρίς σημαντικές βελτιώσεις, το ενεργειακό αποτύπωμα των ασύρματων δικτύων κινδυνεύει να υπονομεύσει τόσο τους στόχους βιωσιμότητας όσο και τη διάρκεια ζωής της μπαταρίας των συσκευών.

Σε αυτό το πλαίσιο, το Wi-Fi 8 δεν αντιπροσωπεύει μόνο το επόμενο σταδιακό βήμα, αλλά μια απαραίτητη αλλαγή παραδείγματος. Αντιμετωπίζοντας μακροχρόνια ζητήματα σε σχέση με την καθυστέρηση, την αξιοπιστία, την επεκτασιμότητα και την αποδοτικότητα, έχει τη δυνατότητα να μετατρέψει το Wi-Fi από μια τεχνολογία βέλτιστης προσπάθειας σε μια πραγματικά ντετερμινιστική και ανθεκτική πλατφόρμα επικοινωνίας. Αυτή η διατριβή διερευνά τις αναδυόμενες απαιτήσεις, τις τεχνικές κατευθύνσεις και τις πολιτικές παραμέτρους που διαμορφώνουν το Wi-Fi 8, με στόχο να σκιαγραφήσει τον ρόλο του στο ευρύτερο μέλλον της ασύρματης συνδεσιμότητας.

1.2 Στόχοι της Μελέτης

Η παρούσα εργασία στοχεύει να διερευνήσει τις μελλοντικές κατευθύνσεις του Wi-Fi 8, προσδιορίζοντας τις βασικές τεχνολογικές απαιτήσεις, τις προκλήσεις και τις πιθανές σχεδιαστικές οδούς. Ειδικοί στόχοι περιλαμβάνουν:

- Να εξετάσει την ιστορική εξέλιξη των προτύπων Wi-Fi, ιδιαίτερα των Wi-Fi 6, 6E και 7.
- Να εντοπίσει τις αναδυόμενες περιπτώσεις χρήσης και απαιτήσεις απόδοσης για μελλοντικά ασύρματα δίκτυα.
- Να αναλύσει τεχνικές και κανονιστικούς περιορισμούς που αντιμετωπίζουν τα τρέχοντα και τα επερχόμενα πρότυπα Wi-Fi.
- Να προτείνει πιθανά χαρακτηριστικά και αρχιτεκτονικές αλλαγές που θα μπορούσαν να εισαχθούν στο Wi-Fi 8.
- Να επισημάνει το ρόλο της τεχνητής νοημοσύνης, της καινοτομίας στο φάσμα και της βελτιστοποίησης διαστρωματικών επιπέδων στη διαμόρφωση των μελλοντικών ασύρματων LAN.

Αυτοί οι στόχοι επιτυγχάνονται μέσω μιας συστηματικής ανασκόπησης και σύνθεσης πρόσφατης ακαδημαϊκής έρευνας και εκθέσεων του κλάδου. Η μεθοδολογία βασίζεται σε μια βιβλιογραφική ανασκόπηση δημοσιεύσεων κυρίως IEEE και Elsevier από το 2018 έως το 2024, η οποία συμπληρώνεται από λευκές βίβλους και εκθέσεις από οργανισμούς όπως η Wi-Fi Alliance, η Cisco και η Ομάδα Εργασίας IEEE 802.11. Συνδυάζοντας τεχνικές, οικονομικές και πολιτικές προοπτικές, η μελέτη παρέχει μια ολοκληρωμένη εικόνα για την πιθανή πορεία του Wi-Fi 8.

2 Γενιές Wi-Fi: Μια επισκόπηση

2.1 Εξέλιξη των προτύπων IEEE 802.11

Οι Sourangsu Banerji et al. διεξήγαγαν μια ολοκληρωμένη μελέτη για το IEEE 802.11, ευρέως γνωστό ως τεχνολογία ασύρματου LAN (WLAN). Περιέγραψαν το IEEE 802.11 ως ένα σύνολο προτύπων που επιτρέπουν την επικοινωνία υπολογιστών μέσω ασύρματων δικτύων που λειτουργούν στις ζώνες συχνοτήτων 2,4 GHz, 3,6 GHz, 5 GHz και 60 GHz. Η τεχνολογία WLAN, που χρησιμοποιείται κυρίως για επικοινωνίες μικρής εμβέλειας, έχει γίνει δημοφιλής σε σπίτια, σχολεία, γραφεία και δημόσιους χώρους λόγω του χαμηλού κόστους υποδομής και της ευκολίας ανάπτυξης. Παρά την ευρεία υιοθέτησή της, οι συγγραφείς επεσήμαναν βασικούς περιορισμούς, όπως η υποβάθμιση της απόδοσης με την αυξανόμενη πυκνότητα χρηστών και τα ανεπύλτα ζητήματα ασφάλειας. Η εργασία κατηγοριοποίησε επίσης διάφορες επεκτάσεις IEEE 802.11 και συζήτησε τα χρονοδιαγράμματα επικύρωσης κάθε προτύπου (D. Chen, 2017; Sharma & Singh, 2016).

Οι Seema και Vikram Nandal ανέλυσαν την απόδοση των Κινητών Δικτύων Ad-hoc (MANETs) χρησιμοποιώντας το πρωτόκολλο Optimized Link State Routing (OLSR) σύμφωνα με τα πρότυπα IEEE 802.11a και 802.11b. Η αξιολόγησή τους επικεντρώθηκε σε βασικές παραμέτρους Ποιότητας Υπηρεσίας (QoS), συμπεριλαμβανομένου του φορτίου δικτύου, της καθυστέρησης, της απόδοσης και της επιβάρυνσης δρομολόγησης. Χρησιμοποιώντας προσομοιώσεις OPNET, εξέτασαν δύο σενάρια δικτύου - ένα με 50 κόμβους και ένα άλλο με 60 κόμβους - και διαπίστωσαν ότι τα MANET με 60 κόμβους παρουσίασαν καλύτερη απόδοση (Dixon, B. J., Pollard & Iezekiel, 2002; Sharma et al., 2013).

Οι Sandeep Kaur et al. διερεύνησαν την Ορθογώνια Πολυπλεξία Διαίρεσης Συχνότητας (OFDM), μια τεχνική διαμόρφωσης που χρησιμοποιείται σε ασύρματα συστήματα 4G. Τόνισαν τα πλεονεκτήματα του OFDM, όπως η μειωμένη παρεμβολή μεταξύ συμβόλων, η υψηλή φασματική απόδοση και ο απλοποιημένος σχεδιασμός δέκτη. Η τεχνική έχει εφαρμοστεί ευρέως στην ψηφιακή ραδιοτηλεοπτική μετάδοση, το WiMAX και τα τοπικά δίκτυα (Dixon, B. J., Pollard & Iezekiel, 2002).

Ομοίως, οι Manushree Bharadwaj et al. εξέτασαν το OFDM ως μια στρατηγική μετάδοσης πολλαπλών φορέων που διαιρεί τη ροή δεδομένων σε υποφορείς χαμηλότερου ρυθμού. Σύμφωνα με τα ευρήματά τους, το OFDM, το οποίο επιλέχθηκε από το IEEE για να

υποστηρίζει ταχύτητες που κυμαίνονται από 6 έως 54 Mbps, βελτιώνει την απόδοση και την ποιότητα μετάδοσης. Η εργασία τους κατέληξε στο συμπέρασμα ότι η επίτευξη υψηλών ρυθμών δεδομένων είναι εφικτή όταν το συνολικό εύρος ζώνης μετάδοσης υπερβαίνει το συνεκτικό εύρος ζώνης του καναλιού (D. Chen, 2017; SHEN, 2008).

Οι Dharam Vir et al. αξιολόγησαν την απόδοση του προτύπου IEEE 802.11e, που έχει σχεδιαστεί για να υποστηρίζει την Ποιότητα Υπηρεσίας (QoS), σε συνδυασμό με τα πρωτόκολλα δρομολόγησης AODV και DSR. Χρησιμοποιώντας τον προσομοιωτή QualNet, μέτρησαν παραμέτρους όπως το jitter, την απόδοση, την καθυστέρηση από άκρο σε άκρο και την κατανάλωση ενέργειας σε διαφορετικές καταστάσεις δικτύου. Τα αποτελέσματα παρείχαν πληροφορίες σχετικά με τις δυνατότητες QoS του IEEE 802.11e σε δυναμικά περιβάλλοντα δικτύου.

Οι Prinu C. Philip et al. παρουσίασαν μια συγκριτική ανάλυση των πρωτοκόλλων δρομολόγησης - AODV, DYMO και Fisheye State Routing (FSR) - σε περιβάλλοντα Wi-Fi (IEEE 802.11n) και WiMAX (IEEE 802.16). Η απόδοση αξιολογήθηκε με βάση την απόδοση, το jitter, τα συνολικά δεδομένα που ελήφθησαν και την καθυστέρηση από άκρο σε άκρο. Τα ευρήματα έδειξαν ότι το AODV παρείχε σταθερά υψηλή απόδοση σε δίκτυα Wi-Fi, ενώ τόσο το AODV όσο και το DYMO είχαν παρόμοια απόδοση στο WiMAX. Επιπλέον, το AODV παρουσίασε επίσης χαμηλότερο jitter και καθυστέρηση από άκρο σε άκρο και στις δύο τεχνολογίες (Sharma & Singh, 2016).

Οι Morigere Subramanya Bhat et al. διερεύνησαν την απόδοση του πρωτοκόλλου δρομολόγησης AODV σε σχέση με τα πρότυπα IEEE 802.11 και IEEE 802.15.4. Προσομοιώσεις που πραγματοποιήθηκαν με 10 και 50 κόμβους έδειξαν ότι το AODV πέτυχε ανώτερη απόδοση - μετρούμενη ως προς την καθυστέρηση από άκρο σε άκρο, την αναλογία παράδοσης πακέτων και την απόδοση - σε WLAN IEEE 802.11 σε σύγκριση με το IEEE 802.15.4 (Sharma et al., 2013; Sharma & Singh, 2016).

Οι Anjali et al. εξέτασαν την απόδοση των πρωτοκόλλων δρομολόγησης AODV, OLSR και GRP σε σχέση με τα IEEE 802.11a και 802.11g. Μετρήσεις όπως το φορτίο δικτύου, η απόδοση, οι προσπάθειες αναμετάδοσης και η καθυστέρηση πρόσβασης σε μέσα αναλύθηκαν υπό ποικίλες φυσικές συνθήκες και πυκνότητες κόμβων. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι το OLSR πέτυχε την καλύτερη απόδοση και τη χαμηλότερη καθυστέρηση, ενώ

το GRP ξεπέρασε άλλα στην απόδοση αναμετάδοσης υπό συνθήκες υψηλών κόμβων (75 και 150 κόμβοι).

Ο Er. Richa Sharma πρότεινε βελτιώσεις στο AODV ενσωματώνοντας πρόσθετες πληροφορίες δρομολόγησης, με αποτέλεσμα ένα πρωτόκολλο "Βελτιστοποιημένο AODV". Τα αποτελέσματα προσομοίωσης έδειξαν βελτιωμένη απόδοση σε δίκτυα μεγάλης κλίμακας με υψηλό φορτίο και κινητικότητα. Το βελτιστοποιημένο AODV προτάθηκε για σενάρια που απαιτούν ελάχιστη επιβάρυνση δρομολόγησης, χαμηλή καθυστέρηση και υψηλό λόγο παράδοσης πακέτων (Sharma & Singh, 2016).

Ο Ravinder Kumar αξιολόγησε την απόδοση του πρωτοκόλλου δρομολόγησης GRP σε MANETs υπό IEEE 802.11a και 802.11g. Αναλύθηκαν παράμετροι όπως η συνολική κίνηση που στάλθηκε και ελήφθη, η καθυστέρηση MAC, το φορτίο δικτύου και η απόδοση. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι το GRP παρείχε σταθερά ανώτερη απόδοση και στα δύο πρότυπα.

Thomas Paul et al. επικεντρώθηκαν στο πρότυπο IEEE 802.11n, δίνοντας έμφαση στην ικανότητά του να αυξάνει την απόδοση και την εμβέλεια του WLAN. Η εργασία τους κατέδειξε ότι οι πολλαπλές κεραίες μετάδοσης και λήψης, ή MIMO, ήταν κρίσιμες για την επίτευξη υψηλότερων ρυθμών δεδομένων και βελτιωμένης αξιοπιστίας σύνδεσης (Anjali & Singh, 2012).

Ο M. Anil Kumar συζήτησε τις τεχνικές βελτιώσεις και διευκρινίσεις που εισήχθησαν στο IEEE 802.11, ιδιαίτερα όσον αφορά τα επίπεδα MAC και PHY. Η μελέτη του στόχευε στη βελτίωση της Ποιότητας Υπηρεσίας (QoS) σε WLAN μέσω καλύτερου σχεδιασμού πρωτοκόλλου.

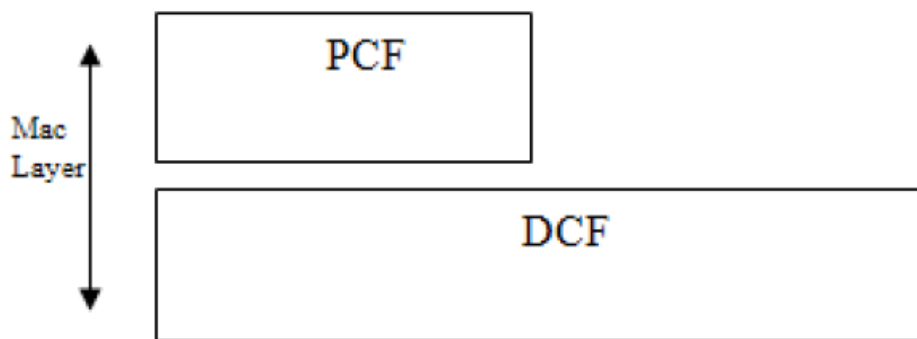
Τέλος, οι Puja Sharma et al. συνέκριναν διάφορα πρότυπα IEEE 802.11, συμπεριλαμβανομένων των 802.11a, b, g, n και ac. Η σύγκρισή τους έλαβε υπόψη πολλαπλές παραμέτρους απόδοσης, όπως ο ρυθμός δεδομένων, η εμβέλεια, οι τεχνικές διαμόρφωσης και οι συχνότητες λειτουργίας. Η εργασία κατέληξε στο συμπέρασμα ότι κάθε πρότυπο προσφέρει συμβιβασμούς όσον αφορά την απόδοση, το κόστος και το σενάριο ανάπτυξης (Sharma et al., 2013; Sharma & Singh, 2016).

2.2 Βασική έκδοση IEEE 802.11

Η αρχική έκδοση του IEEE 802.11, γνωστή ως IEEE 802.11-1997, παρουσιάστηκε το 1997. Αυτή η αρχική έκδοση σχεδιάστηκε για να υποστηρίξει την ταχεία ανάπτυξη φορητών ασύρματων δικτύων, δίνοντας προτεραιότητα στην κινητικότητα έναντι της ταχύτητας μετάδοσης δεδομένων. Αν και δεν χρησιμοποιείται πλέον, αυτή η βασική έκδοση όρισε αρκετές βασικές έννοιες και μηχανισμούς που εξακολουθούν να αποτελούν τη βάση των σύγχρονων προτύπων 802.11.

2.2.1 Αρχιτεκτονική MAC και Βασικές Τεχνολογίες

Το υποεπίπεδο Ελέγχου Πρόσβασης Μέσου (MAC) στο IEEE 802.11-1997 περιλαμβάνει δύο κύριες λειτουργίες συντονισμού: τη Συνάρτηση Κατανεμημένου Συντονισμού (DCF) και τη Συνάρτηση Συντονισμού Σημείων (PCF). Το DCF παρέχει πρόσβαση βάσει ανταγωνισμού και χρησιμεύει ως ο βασικός μηχανισμός πρόσβασης, ενώ το PCF προσφέρει υπηρεσίες χωρίς ανταγωνισμό και βασίζεται στο DCF. Αυτό το μοντέλο διπλής αρχιτεκτονικής έχει διατηρηθεί—με βελτιώσεις—σε επόμενες εκδόσεις του προτύπου.



Εικόνα 2.1 Αρχιτεκτονική MAC (D. Chen, 2017; Sharma & Singh, 2016)

2.2.2 Κατανεμημένη Συνάρτηση Συντονισμού (DCF)

Το DCF χρησιμοποιεί το πρωτόκολλο Πολλαπλής Πρόσβασης με Αίσθηση Φέροντος με Αποφυγή Συγκρούσεων (CSMA/CA) για τη διαχείριση της πρόσβασης στο μέσο μεταξύ των σταθμών (STA). Εξασφαλίζει δίκαιη πρόσβαση στο ασύρματο μέσο ανιχνεύοντας δραστηριότητα στο κανάλι και αποφεύγοντας τις συγκρούσεις. Όταν ένας σταθμός επιθυμεί

να μεταδώσει δεδομένα, πρώτα ακούει το κανάλι. Εάν το μέσο είναι αδρανές για χρονικό διάστημα μεγαλύτερο από τον Κατανεμημένο Χώρο Διαπλαισίων (DIFS), ξεκινά μια τυχαία διαδικασία υποχώρησης για να μειώσει περαιτέρω την πιθανότητα σύγκρουσης (D. Chen, 2017; Sharma & Singh, 2016).

Ο χρόνος υποχώρησης υπολογίζεται ως:

$$\text{Χρόνος Υποχώρησης} = \text{Random}() \times \text{aSlotTime}$$

Όπου:

Το $\text{Random}()$ δημιουργεί έναν ομοιόμορφο ψευδοτυχαίο ακέραιο μεταξύ 0 και του τρέχοντος παραθύρου ανταγωνισμού (CW),

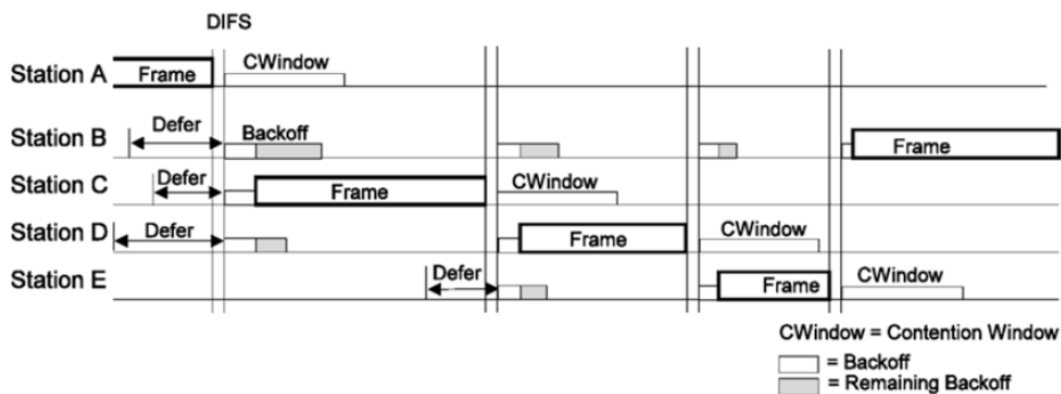
το aSlotTime είναι μια τιμή χρόνου υποδοχής που εξαρτάται από το φυσικό επίπεδο.

Αυτή η διαδικασία βοηθά στην κλιμάκωση των μεταδόσεων από διαφορετικούς σταθμούς που προσπαθούν να έχουν πρόσβαση στο μέσο ταυτόχρονα.

2.2.3 Διαδικασία Υποχώρησης

Ο μηχανισμός υποχώρησης ενεργοποιείται εάν το μέσο ανιχνευθεί ως κατειλημμένο—είτε φυσικά είτε εικονικά—ή εάν μια μετάδοση αποτύχει. Ο σταθμός ορίζει ένα χρονόμετρο υποχώρησης όπως περιγράφεται παραπάνω. Παρακολουθεί το κανάλι κατά τη διάρκεια κάθε χρόνου υποδοχής (D. Chen, 2017; Sharma & Singh, 2016):

- Εάν το κανάλι είναι αδρανές, ο χρονόμετρο μειώνεται κατά μία υποδοχή.
- Εάν το κανάλι γίνει κατειλημμένο, η αντίστροφη μέτρηση διακόπτεται μέχρι το μέσο να είναι ξανά αδρανές για μια πλήρη περίοδο DIFS.
- Όταν ο χρονόμετρο φτάσει στο μηδέν, ο σταθμός συνεχίζει με τη μετάδοσή του.



Εικόνα 2.2 Επισκόπηση της διαδικασίας υποχώρησης.

2.2.4 Μηχανισμός Εικονικής Ανίχνευσης Φέροντος

Για να συμπληρώσει τη φυσική ανίχνευση, το IEEE 802.11 χρησιμοποιεί επίσης έναν μηχανισμό εικονικής ανίχνευσης φέροντος. Αυτό περιλαμβάνει την ανταλλαγή πλαισίων Αίτησης Αποστολής (RTS) και Εκκαθάρισης Αποστολής (CTS) πριν από τη μετάδοση δεδομένων. Όταν άλλοι σταθμοί ακούν πλαίσια RTS ή CTS που απευθύνονται σε διαφορετικούς σταθμούς, ενημερώνουν το Διάνυσμα Κατανομής Δικτύου (NAV) για να αντικατοπτρίζουν την αναμενόμενη διάρκεια κατοχής του καναλιού.

Αυτός ο μηχανισμός βοηθά στον μετριάσμό του προβλήματος του κρυφού κόμβου και βελτιώνει την αποδοτικότητα του δικτύου. Ωστόσο, η χειραψία RTS/CTS είναι προαιρετική και συνήθως αποφεύγεται σε περιβάλλοντα με χαμηλή ένταση ανταγωνισμού ή κατά τη μετάδοση μικρών πακέτων δεδομένων, καθώς μπορεί να προκαλέσει περιττή επιβάρυνση (D. Chen, 2017).

2.3 Προδιαγραφές PHY και Βασικές Τεχνολογίες

Το αρχικό πρότυπο IEEE 802.11 λειτουργεί εντός της ζώνης ISM (Βιομηχανικής, Επιστημονικής και Ιατρικής) των 2,4 GHz και υποστηρίζει τρεις τύπους τεχνολογιών φυσικού (PHY) επιπέδου: Φάσμα Εξάπλωσης Συχνότητας (FHSS), Φάσμα Εξάπλωσης Άμεσης Ακολουθίας (DSSS) και Μετάδοση Υπερύθρων (IR). Μεταξύ αυτών, το IR PHY, παρά το γεγονός ότι προσφέρει ορισμένα μοναδικά πλεονεκτήματα, δεν υιοθετήθηκε ευρέως λόγω περιορισμών στην εμβέλεια και πιθανών τρωτών σημείων ασφαλείας.

2.3.1 Επισκόπηση Φυσικού Επιπέδου

Το επίπεδο PHY στο IEEE 802.11 χωρίζεται σε δύο υποεπίπεδα (Navío-Marco et al., 2019; Sharma et al., 2013):

Διαδικασία Σύγκλισης Φυσικού Επιπέδου (PLCP): Λειτουργεί ως η διεπαφή μεταξύ του επιπέδου MAC και του φυσικού μέσου μετάδοσης. Λαμβάνει δεδομένα από το επίπεδο MAC, προσθέτει μια κεφαλίδα και τα μεταδίδει στο υποεπίπεδο PMD.

Εξαρτώμενο από το Φυσικό Μέσο (PMD): Χειρίζεται την πραγματική μετάδοση δεδομένων μέσω του φυσικού μέσου.

Λειτουργώντας στη μη αδειοδοτημένη ζώνη ISM των 2,4 GHz, οι συσκευές IEEE 802.11 πρέπει να συμμορφώνονται με τα κανονιστικά όρια για την ισχύ και την ακτινοβολία μετάδοσης. Ωστόσο, επειδή η ζώνη είναι μη αδειοδοτημένη, οι συσκευές υπόκεινται σε παρεμβολές από άλλους χρήστες που μοιράζονται το φάσμα.

2.3.2 Φάσμα Διασποράς Μεταπήδησης Συχνότητας (FHSS)

Το FH PHY χρησιμοποιεί γρήγορες αλλαγές συχνότητας κατά τη μετάδοση, ακολουθώντας μια προκαθορισμένη ψευδοτυχαία ακολουθία μεταπήδησης. Το διαθέσιμο φάσμα διαιρείται σε κανάλια πλάτους 1 MHz και ο χρόνος διαιρείται ομοίως σε θυρίδες. Για κάθε χρονική θυρίδα, ο πομπός επιλέγει ένα κανάλι συχνότητας με βάση το μοτίβο μεταπήδησης. Η επιτυχής επικοινωνία επιτυγχάνεται μόνο όταν τόσο ο πομπός όσο και ο δέκτης είναι συγχρονισμένοι στην ίδια ακολουθία μεταπήδησης.

Λόγω της πιθανότητας πολλαπλών ταυτόχρονων μεταδόσεων, ορίζονται πολλαπλά ορθογώνια σύνολα μεταπήδησης (πάνω από 20, ανάλογα με την περιοχή) για την αποφυγή παρεμβολών. Για να ενταχθεί σε ένα δίκτυο FH, ένας σταθμός πρέπει να συγχρονιστεί με την περιοχή, τον αριθμό ακολουθίας και τον δείκτη μεταπήδησης του δικτύου.

Το FH PHY χρησιμοποιεί Κλειδοποίηση Μετατόπισης Συχνότητας Γκαουσιανής (GFSK) για τη διαμόρφωση δεδομένων μέσω αλλαγών στη συχνότητα του φορέα. Το GFSK είναι ανθεκτικό στον θόρυβο, καθώς κωδικοποιεί πληροφορίες σε συχνότητα και όχι σε πλάτος.

Το GFSK 2 επιπέδων αντιπροσωπεύει δυαδικά δεδομένα χρησιμοποιώντας δύο μετατοπίσεις συχνότητας, παρέχοντας απλότητα αλλά χαμηλότερους ρυθμούς μετάδοσης συμβόλων.

Το GFSK 4 επιπέδων αυξάνει τον ρυθμό μετάδοσης συμβόλων κωδικοποιώντας περισσότερα bit ανά σύμβολο, αν και με κόστος την πρόσθετη πολυπλοκότητα του συστήματος (D. Chen, 2017; Sharma et al., 2013; Sharma & Singh, 2016).

2.3.3 Άμεση Διασπορά Φάσματος Ακολουθίας (DSSS)

Το DSSS PHY εισήχθη στο αρχικό πρότυπο IEEE 802.11 ως εναλλακτική λύση υψηλότερης ταχύτητας στο FHSS. Αν και το DSSS καταναλώνει περισσότερη ενέργεια, παρέχει σημαντικά υψηλότερους ρυθμούς μετάδοσης δεδομένων.

Το DSSS λειτουργεί διαδίδοντας το σήμα σε μια ευρύτερη ζώνη συχνοτήτων χρησιμοποιώντας μια ακολουθία chipping. Αυτή η προσέγγιση διαμορφώνει τα δεδομένα εφαρμόζοντας τον κώδικα chipping στο αρχικό σήμα, το οποίο στη συνέχεια μεταδίδεται σε ένα ευρύ φάσμα. Ο δέκτης χρησιμοποιεί τεχνικές συσχέτισης για την ανάκτηση του σήματος, επιτρέποντας στο DSSS να αποδίδει καλύτερα παρουσία παρεμβολών στενής ζώνης σε σύγκριση με το FHSS.

Η διαμόρφωση DSSS βασίζεται στην Διαφορική Κλειδοποίηση Μετατόπισης Φάσης (DPSK) (D. Chen, 2017; Sharma et al., 2013; Sharma & Singh, 2016):

Η Διαφορική Δυαδική Κλειδοποίηση Μετατόπισης Φάσης (DBPSK) αντιπροσωπεύει δυαδικά δεδομένα με μετατοπίσεις φάσης: το 0 αντιπροσωπεύεται από μηδενική αλλαγή φάσης και το 1 από μετατόπιση φάσης π .

Η Διαφορική Τετραγωνική Κλειδοποίηση Μετατόπισης Φάσης (DQPSK) μπορεί να κωδικοποιήσει δύο bit ανά σύμβολο, βελτιώνοντας τη φασματική απόδοση με πιο προηγμένους πομποδέκτες.

2.4. IEEE 802.11a

Κυκλοφόρησε το 1999, το IEEE 802.11a εισήγαγε σημαντικά υψηλότερους ρυθμούς μετάδοσης δεδομένων σε σύγκριση με το αρχικό πρότυπο 802.11. Ωστόσο, παρά τα τεχνικά του πλεονεκτήματα, το 802.11a δυσκολεύτηκε να αποκτήσει ευρεία υιοθέτηση στην αγορά. Πολλές σύγχρονες συσκευές δεν υποστηρίζουν άμεσα αυτό το πρότυπο, αν και έθεσε τις βάσεις για μεταγενέστερα πρότυπα πολλαπλών ζωνών όπως το 802.11n, το οποίο έγινε μια ευρέως υιοθετημένη λύση WLAN.

2.4.1 Προδιαγραφές

Το 802.11a διατηρεί την βασική αρχιτεκτονική πρωτοκόλλου του αρχικού προτύπου, αλλά λειτουργεί στη ζώνη των 5 GHz, επιτρέποντας μέγιστο ρυθμό ακατέργαστων δεδομένων 54 Mbps. Η πιο αξιοσημείωτη καινοτομία που εισήχθη σε αυτήν την τροποποίηση είναι η χρήση της Ορθογώνιας Πολυπλεξίας Διαίρεσης Συχνότητων (OFDM).

2.4.2 Ορθογώνια Πολυπλεξία Διαίρεσης Συχνότητας (OFDM)

Η OFDM βασίζεται στην Πολυπλεξία Διαίρεσης Συχνότητας (FDM), μια τεχνική που διαιρεί τη ζώνη συχνοτήτων σε πολλά υποκανάλια, καθένα από τα οποία χωρίζεται από ζώνες προστασίας για την αποφυγή παρεμβολών. Στην FDM, σε κάθε χρήστη έχει εκχωρηθεί μια συγκεκριμένη συχνότητα φέροντος για μετάδοση. Αν και αποτελεσματική, η FDM μπορεί να είναι αναποτελεσματική λόγω του εύρους ζώνης που σπαταλιέται σε αυτές τις ζώνες προστασίας (D. Chen, 2017; Sharma et al., 2013; Sharma & Singh, 2016).

Η OFDM βελτιώνει τη φασματική απόδοση εξαλείφοντας τις ζώνες προστασίας μέσω της χρήσης προσεκτικά σχεδιασμένων ορθογώνιων υποφέροντων. Αυτές οι υποφέροντες είναι τοποθετημένες σε απόσταση έτσι ώστε η κορυφή μιας υποφέρουσας να συμπίπτει με τα μηδενικά των γειτονικών, επιτρέποντάς τους να επικαλύπτονται σε συχνότητα χωρίς να προκαλούν παρεμβολές. Αυτό επιτρέπει την παράλληλη μετάδοση ροών δεδομένων χρησιμοποιώντας έναν μεγάλο αριθμό στενά τοποθετημένων υποφέροντων.

Τα βασικά πλεονεκτήματα της OFDM περιλαμβάνουν (D. Chen, 2017):

- Υψηλή φασματική απόδοση
- Ανθεκτικότητα έναντι παρεμβολών στενής ζώνης και παρεμβολών μεταξύ συμβόλων (ISI)
- Αποτελεσματική υλοποίηση χρησιμοποιώντας αλγόριθμους Γρήγορου Μετασχηματισμού Fourier (FFT)

Ωστόσο, η OFDM έχει τους περιορισμούς της. Είναι ευαίσθητο στις μετατοπίσεις Doppler και στα σφάλματα συγχρονισμού συχνότητας, και η απόδοσή του μπορεί να επηρεαστεί από τη διαμόρφωση του κυκλικού προθέματος και των διαστημάτων προστασίας.

2.5 IEEE 802.11b/g

Το IEEE 802.11b, που κυκλοφόρησε την ίδια χρονιά με το 802.11a, ακολούθησε διαφορετική κατεύθυνση. Διατήρησε τη συμβατότητά του με την αρχική ζώνη των 2,4 GHz και, σε αντίθεση με το 802.11a, πέτυχε ευρεία υιοθέτηση και παρέμεινε σε χρήση για πάνω από μια δεκαετία. Παρόλο που εισήγαγε μόνο μικρές τεχνικές αλλαγές στο αρχικό 802.11, ο αντίκτυπός του ήταν σημαντικός στη διαμόρφωση των πρώτων ασύρματων δικτύων.

Το IEEE 802.11g, που κυκλοφόρησε το 2003, βασίστηκε στο 802.11b αυξάνοντας δραματικά τον ρυθμό δεδομένων ώστε να ταιριάζει με αυτόν του 802.11a (54 Mbps), ενώ εξακολουθούσε να λειτουργεί στη ζώνη των 2,4 GHz. Η δημοτικότητά του οφειλόταν εν μέρει στην συμβατότητα με το 802.11b, επιτρέποντας τη συνεχή υποστήριξη για παλαιότερες συσκευές (Sharma et al., 2013; Sharma & Singh, 2016; SHEN, 2008).

Σημείωση: Παρόλο που τα 802.11g και 802.11b είναι συμβατά σε επίπεδο υλικού, αυτό δεν συνεπάγεται απρόσκοπτη διαλειτουργικότητα μεταξύ συσκευών που χρησιμοποιούν διαφορετικά πρωτόκολλα.

2.5.1 Προδιαγραφές

IEEE 802.11b: Λειτουργεί στη ζώνη των 2,4 GHz με μέγιστο ρυθμό ακατέργαστων δεδομένων 11 Mbps, χρησιμοποιώντας Πολλαπλή Πρόσβαση με Ανίχνευση Φέροντος με Αποφυγή Συγκρούσεων (CSMA/CA) ως μέθοδο πρόσβασης πολυμέσων.

IEEE 802.11g: Λειτουργεί επίσης στη ζώνη των 2,4 GHz, αλλά υποστηρίζει πολύ υψηλότερο ρυθμό δεδομένων 54 Mbps.

2.5.2 Συμπληρωματική Κλειδοποίηση Κώδικα (CCK)

Το CCK, που εισήχθη στο 802.11b, είναι μια νέα τεχνική διαμόρφωσης που έχει σχεδιαστεί για να βελτιώσει την αποτελεσματικότητα της κωδικοποίησης δεδομένων. Όπως και η Διαφορική Κλειδοποίηση Μετατόπισης Φάσης (DPSK), το CCK χρησιμοποιεί μετατοπίσεις φάσης για την κωδικοποίηση πληροφοριών. Ωστόσο, σε αντίθεση με το DPSK, όπου κάθε σύμβολο αντιπροσωπεύει άμεσα ένα bit δεδομένων, το CCK κωδικοποιεί 4 ή 8 bit σε κωδικές λέξεις 8 τσιπ, παρέχοντας μεγαλύτερη ευελιξία και αποτελεσματικότητα.

Αυτό το σχήμα κωδικοποίησης είναι μια μορφή του γενικευμένου μετασχηματισμού Hadamard, όπου κάθε τσιπ στη κωδική λέξη τροποποιείται με βάση ένα σύνολο μετατοπίσεων φάσης:

ϕ_1 εφαρμόζεται σε όλα τα τσιπ

ϕ_2 σε όλα τα τσιπ με μονό αριθμό

ϕ_3 σε όλα τα μονά ζεύγη

ϕ_4 σε όλα τα μονά τετράγωνα

Αυτές οι μετατοπίσεις φάσης καθορίζονται από τα bit δεδομένων εισόδου.

Τα πλεονεκτήματα του CCK περιλαμβάνουν:

Βελτιωμένη αντίσταση σε θόρυβο και παρεμβολές πολλαπλών διαδρομών

Συμβατότητα με συστήματα WLAN 1 Mbps και 2 Mbps

Το CCK επιλέχθηκε τελικά για το 802.11b έναντι άλλων υποψηφίων όπως το OFDM, η Ορθογώνια Πολυπλεξία Διαίρεσης Κώδικα (OCDM) και η Πολλαπλή Ορθογώνια Κλειδοποίηση (MOK). Το OFDM, αν και δεν υιοθετήθηκε στο 802.11b, αργότερα έγινε κεντρικό στο 802.11a και σε άλλα πρότυπα υψηλότερης ταχύτητας που λειτουργούν στη ζώνη των 5 GHz (Sharma et al., 2013; Sharma & Singh, 2016; SHEN, 2008).

2.6. Βελτιώσεις στο IEEE 802.11g

Το IEEE 802.11g προσφέρει σημαντικά βελτιωμένο ρυθμό δεδομένων 54 Mbps, σχεδόν πέντε φορές ταχύτερο από τον προκάτοχό του, 802.11b. Αυτή η αξιοσημείωτη αύξηση οφείλεται κυρίως στην υιοθέτηση της Ορθογώνιας Πολυπλεξίας Διαίρεσης Συχνότητας (OFDM) εντός της ζώνης των 2,4 GHz. Η χρήση παράλληλων υποφορέων στο OFDM βελτιώνει σημαντικά τη φασματική απόδοση, επιτρέποντας τη μετάδοση περισσότερων δεδομένων στην ίδια περιοχή συχνοτήτων.

Εκτός από τα κέρδη απόδοσης, η ασφάλεια σημείωσε σημαντικές βελτιώσεις στο 802.11g. Το προηγούμενο πρότυπο 802.11b υποστήριζε μόνο φιλτράρισμα διευθύνσεων MAC και απόκρυψη SSID για βασικό έλεγχο πρόσβασης, μαζί με το Wired Equivalent Privacy (WEP) για κρυπτογράφηση. Ωστόσο, το WEP διαπιστώθηκε γρήγορα ότι ήταν ευάλωτο λόγω σοβαρών ελαττωμάτων σχεδιασμού. Μέσω εκτεταμένων δοκιμών, οι ερευνητές απέδειξαν ότι τα κλειδιά κρυπτογράφησης μπορούσαν να ανακατασκευαστούν με παθητική παρακολούθηση της κυκλοφορίας δικτύου και καταγραφή πακέτων. Αυτό έκανε το WEP εξαιρετικά ανασφαλές και εύκολα παραβιαζόμενο.

Για την αντιμετώπιση αυτών των ευπαθειών, το Wi-Fi Protected Access (WPA) και ο διάδοχός του, WPA2, εισήχθησαν ως ασφαλέστερες εναλλακτικές λύσεις. Ενώ το WPA/WPA2 απαιτεί περισσότερη υπολογιστική προσπάθεια για κρυπτογράφηση και έλεγχο ταυτότητας, τα οφέλη ασφαλείας υπερτερούν κατά πολύ της επιβάρυνσης. Η πολυπλοκότητα της παραβίασης του WPA/WPA2 είναι σημαντικά μεγαλύτερη από το WEP, καθιστώντας τις επιθέσεις μη πρακτικές για τους περισσότερους αντιπάλους (Anjali & Singh, 2012; Sharma et al., 2013; SHEN, 2008).

2.7 IEEE 802.11n και 802.11ac

Το IEEE 802.11n, που κυκλοφόρησε τον Μάιο του 2009, έγινε ένα από τα πιο ευρέως υιοθετημένα πρότυπα στην αγορά WLAN. Εισήγαγε μια σειρά από βελτιώσεις στο φυσικό επίπεδο και βελτιώσεις στην ασφάλεια, με αποτέλεσμα σημαντικά υψηλότερους ρυθμούς δεδομένων και καλύτερη συνολική απόδοση. Βασιζόμενο στα θεμέλια που έθεσαν τα 802.11n και 802.11a, το IEEE 802.11ac αύξησε περαιτέρω την ασύρματη απόδοση και την αποδοτικότητα, καθιστώντας το βασικό πρότυπο για ασύρματα δίκτυα υψηλής απόδοσης (Sharma et al., 2013; SHEN, 2008).

2.7.1 Προδιαγραφές

Το IEEE 802.11n υποστηρίζει λειτουργία τόσο στις ζώνες συχνοτήτων 2,4 GHz όσο και 5 GHz. Προσφέρει θεωρητικό μέγιστο ρυθμό δεδομένων 600 Mbps, αν και η πρακτική απόδοση συνήθως φτάνει περίπου τα 300 Mbps - μια εξαπλάσια βελτίωση σε σχέση με το όριο των 54 Mbps του 802.11g.

Αντίθετα, το IEEE 802.11ac λειτουργεί αποκλειστικά στη ζώνη των 5 GHz και αυξάνει σημαντικά τους ρυθμούς δεδομένων. Παρέχει ελάχιστο ρυθμό ακατέργαστων δεδομένων 1 Gbps, με απόδοση μονής ζεύξης τουλάχιστον 500 Mbps, ανάλογα με τον αριθμό των χωρικών ροών και το εύρος ζώνης καναλιού που χρησιμοποιείται.

Αυτές οι βελτιώσεις επιτυγχάνονται μέσω ενός συνδυασμού τεχνικών, συμπεριλαμβανομένων ευρύτερων εύρους ζώνης καναλιών, σχημάτων διαμόρφωσης υψηλότερης τάξης και τεχνολογίας πολλαπλής εισόδου/εξόδου (MIMO), καθιστώντας τα 802.11n και 802.11ac ιδανικά για σύγχρονες ασύρματες εφαρμογές υψηλής ταχύτητας (Sharma et al., 2013; Sharma & Singh, 2016).

2.8 Σύγκριση Προτύπων IEEE 802.11

Ο παρακάτω πίνακας συνοψίζει τις βασικές διαφορές μεταξύ διαφόρων προτύπων IEEE 802.11 και των αντίστοιχων επεκτάσεών τους. Αυτά τα πρότυπα χρησιμοποιούνται ευρέως σε περιβάλλοντα τοπικών δικτύων (LAN), συμπεριλαμβανομένων οικιακών και δημόσιων δικτύων. Η σύγκριση βασίζεται σε διάφορες σημαντικές παραμέτρους: ημερομηνία επικύρωσης, μέγιστο ρυθμό μετάδοσης δεδομένων, ζώνη συχνότητας RF, τεχνικές διαμόρφωσης, εύρος ζώνης καναλιού και τυπικό εύρος (Sharma et al., 2013; Sharma & Singh, 2016).

Η εξέλιξη του Wi-Fi καθοδηγείται από μια συνεχή ώθηση για την αντιμετώπιση των αυξανόμενων απαιτήσεων των χρηστών για υψηλότερη απόδοση, χαμηλότερη καθυστέρηση και πιο αξιόπιστη συνδεσιμότητα. Κάθε νέα γενιά έχει εισαγάγει κρίσιμες βελτιώσεις στα φυσικά (PHY) και στα επίπεδα ελέγχου πρόσβασης μέσου (MAC). Ταυτόχρονα, οι περιορισμοί των προηγούμενων προτύπων - όπως η ανεπαρκής υποστήριξη

για περιβάλλοντα υψηλής πυκνότητας, η ενεργειακή απόδοση ή οι εφαρμογές που είναι ευαίσθητες στην καθυστέρηση - έχουν παρακινήσει περαιτέρω ανάπτυξη.

Το Wi-Fi 4 αποτέλεσε ορόσημο με την εισαγωγή κεραιών πολλαπλής εισόδου πολλαπλής εξόδου (MIMO) και σύνδεσης καναλιών, τα οποία επέκτειναν το εύρος ζώνης καναλιών από 20 MHz σε 40 MHz. Αυτά τα χαρακτηριστικά επέτρεψαν μέγιστο ρυθμό δεδομένων έως και 600 Mbps (Sharma et al., 2013; Khorov et al., 2019).

Ωστόσο, το Wi-Fi 4 βελτιστοποιήθηκε κυρίως για γενική περιήγηση στο διαδίκτυο και ροή βίντεο, όχι για περιβάλλοντα υψηλής ζήτησης ή πυκνότητας. Η απόδοση καθυστέρησης ήταν ανεπαρκής για εφαρμογές πραγματικού χρόνου, όπως τα πρώιμα διαδικτυακά παιχνίδια ή το VoIP, και η περιορισμένη υποστήριξη φάσματος το καθιστούσε ακατάλληλο για αναδυόμενες συσκευές Διαδικτύου των Πραγμάτων (IoT) που απαιτούσαν αποτελεσματική επικοινωνία χαμηλής ισχύος (Guimarães et al., 2013).

Το Wi-Fi 5 επικεντρώθηκε σε μεγαλύτερες ταχύτητες αξιοποιώντας ευρύτερα κανάλια (έως 160 MHz), διαμόρφωση 256-QAM και διαμορφώσεις MIMO έως 8×8 . Με αυτές τις βελτιώσεις, το Wi-Fi 5 θα μπορούσε θεωρητικά να φτάσει ταχύτητες έως και 7 Gbps (Lopez-Perez et al., 2019).

Παρά αυτό το άλμα, το Wi-Fi 5 εξακολουθούσε να περιορίζεται από υψηλό φόρτο σε σενάρια πολλαπλών χρηστών. Δεν διέθετε Πολλαπλή Πρόσβαση Ορθογώνιας Διαίρεσης Συχνοτήτων (OFDMA), η οποία περιόριζε την απόδοση σε περιβάλλοντα όπως στάδια, αεροδρόμια ή γραφεία με εκατοντάδες συσκευές. Εφαρμογές όπως η ροή βίντεο 4K ή τα παιχνίδια για πολλούς παίκτες θα μπορούσαν να παρουσιάσουν τρέμουλο και συμφόρηση, ειδικά σε πυκνά δημόσια δίκτυα Wi-Fi (Mozaffariahrar et al., 2022).

Το Wi-Fi 6 και η επέκτασή του Wi-Fi 6E στη ζώνη των 6 GHz τυποποιήθηκαν το 2019–2020. Εισήγαγαν μετασχηματιστικά χαρακτηριστικά όπως το OFDMA, το βελτιωμένο Multi-User MIMO (MU-MIMO) και το Target Wake Time (TWT), με αποτέλεσμα βελτιωμένη απόδοση, χαμηλότερη καθυστέρηση και καλύτερη διάρκεια ζωής μπαταρίας για τις συνδεδεμένες συσκευές. Με αυτές τις βελτιώσεις, το Wi-Fi 6 έφτασε έως και τα 9,6 Gbps θεωρητική απόδοση και αντιμετώπισε τη συμφόρηση σε περιβάλλοντα υψηλής πυκνότητας, όπως έξυπνες πανεπιστημιούπολεις και γραφεία επιχειρήσεων (Alsharif & Nordin, 2017).

Ωστόσο, οι περιορισμοί παρέμειναν. Η καθυστέρηση θα μπορούσε να κυμαίνεται σε εύρος αρκετών χιλιοστών του δευτερολέπτου, κάτι που ήταν ανεπαρκές για αναδυόμενες περιπτώσεις χρήσης όπως το AR/VR ή ο ρομποτικός έλεγχος σε πραγματικό χρόνο. Επιπλέον, η απόδοση του Wi-Fi 6 σε εξωτερικούς χώρους και σενάρια υψηλής κινητικότητας ήταν ασυνεπής, και η ενεργειακή απόδοση για τεράστια δίκτυα IoT εξακολουθούσε να υπολείπεται των προσδοκιών (Forge & Vu, 2020).

Το Wi-Fi 7, το οποίο βρίσκεται υπό ολοκλήρωση, προχωρά περαιτέρω προσφέροντας εξαιρετικά υψηλή απόδοση (EHT). Εισάγει εύρος ζώνης καναλιού 320 MHz, διαμόρφωση 4096-QAM, λειτουργία πολλαπλών συνδέσμων (MLO) και βελτιωμένους μηχανισμούς ποιότητας υπηρεσίας (QoS), στοχεύοντας σε μέγιστες ταχύτητες άνω των 40 Gbps (IEEE P802.11be, 2023). Αυτές οι καινοτομίες καθιστούν το Wi-Fi 7 ικανό να υποστηρίζει ασύρματη απόδοση παρόμοια με οπτική ίνα για streaming βίντεο εξαιρετικά υψηλής ευκρίνειας, cloud gaming και εφαρμογές που απαιτούν καθυλωτική εμπειρία (D. Chen, 2017; Bellalta et al., 2023).

Ωστόσο, το Wi-Fi 7 εξακολουθεί να αντιμετωπίζει προκλήσεις. Οι βελτιώσεις στην καθυστέρηση είναι σημαντικές αλλά όχι πλήρως ντετερμινιστικές, καθιστώντας τις ανεπαρκείς για κρίσιμες εργασίες όπως ο βιομηχανικός αυτοματισμός, τα αυτόνομα ρομπότ ή η τηλεχειρουργική. Επιπλέον, η εξάρτηση από ευρύτερα συνεχόμενα τμήματα φάσματος (320 MHz) ενδέχεται να μην είναι εφικτή σε όλες τις περιοχές λόγω κανονιστικών περιορισμών, οδηγώντας σε άνιση ανάπτυξη παγκοσμίως (Navío-Marco et al., 2019).

Πίνακας 2.1 Βασικές διαφορές μεταξύ διαφόρων προτύπων IEEE 802.11 και των αντίστοιχων επεκτάσεών τους.

Γενιά	Πρότυπο	Μέγιστη ταχύτητα	Ζώνες φάσματος	Καθυστέρηση	Βασικά Χαρακτηριστικά	Κύριοι Περιορισμοί	Παραδείγματα Περιορισμών Χρήσης
Wi-Fi 4	802.11n	600 Mbps	2.4 / 5 GHz	~20–30 ms	MIMO, κανάλια 40 MHz, συσσωμάτωση καρέ	Δεν έχει βελτιστοποιηθεί για πυκνά δίκτυα· χαμηλή καθυστέρηση για εφαρμογές πραγματικού χρόνου	Διαδικτυακά παιχνίδια, κλήσεις VoIP με jitter
Wi-Fi 5	802.11ac	7 Gbps	5 GHz	~10–20 ms	κανάλια 160 MHz, 256-QAM, 8×8 MIMO	Ανεπαρκής απόδοση πολλαπλών χρηστών· καθόλου OFDMA	Συνομόρφηση σε στάδια/αεροδρόμια
Wi-Fi 6/6E	802.11ax	9.6 Gbps	2.4 / 5 / 6 GHz	~5–10 ms	OFDMA, MU-MIMO, TWT, ζώνη 6 GHz	Εξακολουθεί να υπάρχει μεταβλητή καθυστέρηση· περιορισμένη απόδοση σε εξωτερικούς χώρους/κινητά	Ακουστικά AR/VR, επεκτασιμότητα IoT
Wi-Fi 7	802.11be	>40 Gbps	2.4 / 5 / 6 GHz	<5 ms (non-deterministic)	320 MHz, 4K-QAM, MLO, προηγμένο QoS	Δεν είναι πλήρως αξιόπιστο για εφαρμογές κρίσιμης σημασίας· προβλήματα έλλειψης φάσματος	Βιομηχανικός αυτοματισμός, τηλεχειρουργική

3 Wi-Fi 6 and Wi-Fi 6E

3.1 Wi-Fi 6

Δύο κύριοι οργανισμοί του κλάδου έχουν διαδραματίσει καθοριστικό ρόλο στην ανάπτυξη του Wi-Fi. Πρώτον, το IEEE Project 802 χρησιμεύει ως ο φορέας τυποποίησης που είναι υπεύθυνος για ένα ευρύ φάσμα τεχνολογιών δικτύωσης, συμπεριλαμβανομένου ολόκληρου του φάσματος πρωτοκόλλων Wi-Fi. Δεύτερον, η Wi-Fi Alliance, μια μη κερδοσκοπική κοινοπραξία παγκόσμιων εταιρειών, διασφαλίζει τη διαλειτουργικότητα μεταξύ συσκευών και πιστοποιεί προϊόντα Wi-Fi. Προωθεί επίσης φιλικές προς το χρήστη συμβάσεις ονοματοδοσίας όπως Wi-Fi 4, 5 και 6 (Navío-Marco et al., 2019). Η Συμμαχία συμμετέχει τόσο σε τεχνικές δραστηριότητες, όπως ο καθορισμός προτύπων για δίκτυα mesh, όσο και σε προσπάθειες που σχετίζονται με την πολιτική, συμπεριλαμβανομένης της υπεράσπισης για την κατάλληλη κατανομή φάσματος.

Το IEEE 802.11ax, ευρύτερα γνωστό ως Wi-Fi 6, είναι το πρώτο πρότυπο Wi-Fi που σχεδιάστηκε με την ικανότητα να υποστηρίξει μεγάλης κλίμακας εξωτερικά περιβάλλοντα εκτός από τις παραδοσιακές εσωτερικές ρυθμίσεις. Αν και αυξάνει τον ονομαστικό ρυθμό δεδομένων κατά μόλις 37% σε σχέση με το Wi-Fi 5, ο κύριος στόχος του είναι να προσφέρει έως και τέσσερις φορές την απόδοση και τη φασματική απόδοση σε περιβάλλοντα υψηλής πυκνότητας. Αυτό επιτυγχάνεται χρησιμοποιώντας αρκετές βασικές τεχνολογίες, όπως η Πολλαπλή Πρόσβαση Ορθογώνιας Διαίρεσης Συχνοτήτων (OFDMA), το MIMO Πολλαπλών Χρηστών (MU-MIMO) και οι μηχανισμοί χωρικής επαναχρησιμοποίησης. Μια άλλη σημαντική πρόοδος είναι η μείωση της κατανάλωσης ενέργειας ανά συσκευή. Ενώ οι προηγούμενες γενιές Wi-Fi λειτουργούσαν στις ζώνες συχνοτήτων 2,4 GHz και 5 GHz, το Wi-Fi 6E επεκτείνει τις λειτουργίες στη ζώνη των 6 GHz—η οποία έχει ήδη κατανεμηθεί σε κορυφαίες αγορές όπως οι ΗΠΑ, η Νότια Κορέα και το Ηνωμένο Βασίλειο, με παρόμοιες κατανομές να αναμένονται και σε άλλες περιοχές, συμπεριλαμβανομένης της Ευρώπης (Lopez-Perez et al., 2019; Murti & Yun, 2022; E. J. Oughton et al., 2021).

Ο Πίνακας 2 περιγράφει τις τεχνικές προδιαγραφές για τις πρόσφατες γενιές Wi-Fi.

Πίνακας 3.1 Τεχνικές προδιαγραφές για τις πρόσφατες γενιές Wi-Fi.

Χαρακτηριστικό	Wi-Fi 4 (802.11n)	Wi-Fi 5 (802.11ac)	Wi-Fi 6 / Wi-Fi 6E (802.11ax)
Μέγιστος ρυθμός δεδομένων	Up to 600 Mbps	Up to 7 Gbps	Up to 9.6 Gbps
Συχνότητα φορέα (GHz)	2.4, 5	5	2.4, 5, 6
Εύρος ζώνης καναλιού (MHz)	20, 40	20, 40, 80, 80+80, 160	20, 40, 80, 80+80, 160
Πολυπλεξία συχνότητας	OFDM	OFDM	OFDM and OFDMA
Χρόνος συμβόλου OFDM (μs)	3.2	3.2	12.8
Διάστημα προστασίας (μs)	0.4, 0.8	0.4, 0.8	0.8, 1.6, 3.2
Συνολικός χρόνος συμβόλου (μs)	3.6, 4.0	3.6, 4.0	13.6, 14.4, 16.0
Σχήματα διαμόρφωσης	BPSK, QPSK, 16-QAM, 64-QAM	+256-QAM	+1024-QAM
Υποστήριξη MU-MIMO	Μη διαθέσιμο	Downlink Only	Downlink and Uplink
Υποστήριξη OFDMA	Μη διαθέσιμο	Μη διαθέσιμο	Downlink and Uplink
Διαμόρφωση ραδιοσυχνοτήτων	MIMO (4x4)	MU-MIMO (DL) (8x8)	MU-MIMO (DL & UL) (8x8)

Τα σενάρια ανάπτυξης του Wi-Fi 6 περιλαμβάνουν τέσσερις βασικές περιπτώσεις χρήσης (Murti & Yun, 2022):

- Οικιακά περιβάλλοντα, όπου η ανάπτυξη σημείων πρόσβασης (AP) δεν διαχειρίζεται, οδηγώντας συχνά σε σημαντικές παρεμβολές.
- Επιχειρηματικά περιβάλλοντα, όπου τα AP διαχειρίζονται κεντρικά για την ελαχιστοποίηση των παρεμβολών.
- Πυκνές εσωτερικές εγκαταστάσεις, όπως στάδια ή αμφιθέατρα, όπου τα επίπεδα παρεμβολών είναι υψηλά λόγω της εγγύτητας και της πυκνότητας χρήσης.
- Δίκτυα μεγάλης επιφάνειας σε εξωτερικούς χώρους, που προορίζονται για την αξιολόγηση της απόδοσης σε δημόσια σημεία πρόσβασης Wi-Fi.

Παραδοσιακά, η ανάπτυξη σημείων πρόσβασης (AP) ακολουθούσε ένα απλό μοντέλο "plug-and-play" χρησιμοποιώντας μία μόνο συσκευή. Ωστόσο, η αυξανόμενη υιοθέτηση συστημάτων Wi-Fi mesh - τα οποία αποτελούνται από έναν κύριο κόμβο και αρκετούς διασυνδεδεμένους κόμβους σε όλο το κτίριο - έχει βελτιώσει σημαντικά την κατανομή και την αξιοπιστία του σήματος (Navío-Marco et al., 2019). Αυτή η φιλική προς το χρήστη ρύθμιση έρχεται σε αντίθεση με την πολύπλοκη υποδομή που απαιτείται για την ανάπτυξη δικτύων 5G (Forge & Vu, 2020).

Το Wi-Fi 6 ενσωματώνει πολλές τεχνικές βελτιώσεις για την αντιμετώπιση της πρόκλησης της διατήρησης αξιόπιστης συνδεσιμότητας σε περιβάλλοντα με συμφόρηση. Αυτές οι βελτιώσεις επικεντρώνονται κυρίως στη βελτίωση της φασματικής απόδοσης και της απόδοσης, διατηρώντας παράλληλα τη συμβατότητα με παλαιότερα πρότυπα. Βασικά χαρακτηριστικά περιλαμβάνουν:

- OFDMA
- 1024-QAM (Διαμόρφωση Πλάτους Τετραγωνικής Ζώνης)
- Uplink MU-MIMO
- Διαμόρφωση Διπλού Υποφέροντος
- Επαναχρησιμοποίηση Χωρικού (μέσω χρωματισμού BSS)
- Χαρακτηριστικά εξοικονόμησης ενέργειας

Μια σημαντική εξέλιξη στο Wi-Fi 6 είναι η υποχρεωτική εφαρμογή του OFDMA τόσο για μεταδόσεις downlink (DL) όσο και για μεταδόσεις uplink (UL). Ενώ το OFDMA είναι στάνταρ στα κυψελοειδή δίκτυα, αυτό σηματοδοτεί την πρώτη του εμφάνιση στο Wi-Fi. Το OFDMA διαιρεί το συνολικό εύρος ζώνης σε μικρότερες μονάδες που ονομάζονται Μονάδες Πόρων (RU), οι οποίες μπορούν να εκχωρηθούν ανεξάρτητα στους χρήστες με βάση τις ανάγκες τους σε δεδομένα και την ποιότητα σήματος (Khoron et al., 2019). Αυτό επιτρέπει έως και τέσσερις φορές μεγαλύτερη απόδοση από το παραδοσιακό OFDM, επιτρέποντας ταυτόχρονες ανταλλαγές δεδομένων για πολλαπλούς χρήστες.

Η δεύτερη σημαντική βελτίωση του MU είναι η υποστήριξη MU-MIMO τόσο για DL όσο και για UL. Ενώ τα προηγούμενα πρότυπα Wi-Fi περιελάμβαναν βασικό MIMO, το Wi-Fi 6 επιτρέπει σε ένα σημείο πρόσβασης να μεταδίδει σε πολλαπλούς χρήστες ταυτόχρονα χρησιμοποιώντας έως και 8 χωρικές ροές. Αυτό βελτιώνει δραματικά την απόδοση, ιδιαίτερα σε πυκνά περιβάλλοντα. Επιπλέον, το Wi-Fi 6 υποστηρίζει σχήματα διαμόρφωσης εξαιρετικά υψηλής χωρητικότητας, όπως το 1024-QAM, τα οποία ενισχύουν τη φασματική απόδοση συσκευάζοντας περισσότερα bit σε κάθε Hz εύρους ζώνης.

Για να μειώσει περαιτέρω την κατανάλωση ενέργειας, το Wi-Fi 6 χρησιμοποιεί μια λειτουργία διαχείρισης ενέργειας από το IEEE 802.11ah που ονομάζεται Target Wake Time (TWT). Σε αντίθεση με προηγούμενους μηχανισμούς, το TWT επιτρέπει στις συσκευές να παραμένουν σε κατάσταση αναστολής λειτουργίας για μεγαλύτερο χρονικό διάστημα και να αφυπνίζονται μόνο σε προκαθορισμένα χρονικά διαστήματα για μετάδοση δεδομένων.

Σε περιβάλλοντα υψηλής πυκνότητας όπου πολλά Βασικά Σύνολα Υπηρεσιών (BSS) μπορούν να λειτουργούν στο ίδιο κανάλι, εφαρμόζεται η Χωρική Επαναχρησιμοποίηση (SR) για τη βελτιστοποίηση της χρήσης του καναλιού. Ο μηχανισμός βασίζεται στον χρωματισμό BSS, ένα αναγνωριστικό 6 bit στην κεφαλίδα πλαισίου που διακρίνει μεταξύ μεταδόσεων μεταξύ BSS και ενδο-BSS. Αυτό επιτρέπει στις συσκευές να αποφασίζουν νωρίς εάν θα απορρίψουν τα παρεμβαλλόμενα πλαίσια και θα ξεκινήσουν τις δικές τους μεταδόσεις, βελτιώνοντας ενδεχομένως την απόδοση κατά 30% σε πολυσύχναστα εξωτερικά δίκτυα (Selinis et al., 2016).

Κοιτώντας μπροστά, τα μελλοντικά πρότυπα Wi-Fi, και ιδιαίτερα το IEEE 802.11be (Wi-Fi 7), στοχεύουν στην υποστήριξη πιο απαιτητικών εφαρμογών, όπως η ροή βίντεο 8K και οι ολογραφικές επικοινωνίες (Lopez-Perez et al., 2019). Το Wi-Fi 7 αναμένεται να επιτύχει 3–

4 φορές υψηλότερη απόδοση από το Wi-Fi 6, διατηρώντας παράλληλα συμβατότητα με παλαιότερες εκδόσεις. Τα νέα χαρακτηριστικά περιλαμβάνουν:

- Ευρύτερα κανάλια (έως 320 MHz)
- 16 χωρικές ροές
- Συγκέντρωση πολλαπλών ζωνών για ταυτόχρονη χρήση πολλαπλών ζωνών συχνοτήτων

Σε αντίθεση με τις τρέχουσες τεχνολογίες Wi-Fi ημιαμφίδρομης μετάδοσης, το Wi-Fi 7 στοχεύει στην εισαγωγή της λειτουργίας πλήρους αμφίδρομης μετάδοσης, επιτρέποντας την ταυτόχρονη μετάδοση και λήψη στο ίδιο κανάλι. Επιπλέον, εξετάζονται τα εξής χαρακτηριστικά:

- Συντονισμός σημείων πρόσβασης για καλύτερη διαχείριση πόρων
- Διαχωρισμός επιπέδων ελέγχου και δεδομένων, όπως παρατηρείται στα κυψελωτά συστήματα
- Υβριδικό Αυτόματο Επαναλαμβανόμενο Αίτημα (HARQ) για πιο αξιόπιστη μετάδοση χαμηλής καθυστέρησης
- Χρονικά Ευαίσθητη Δικτύωση (TSN) για διασφάλιση περιορισμένου χρονισμού και χαμηλού jitter για εφαρμογές πραγματικού χρόνου (Forge & Vu, 2020; Khoron et al., 2019)

Με αυτήν την λεπτομερή επισκόπηση του Wi-Fi 6 και των διαδόχων του, η σύγκριση με το 5G όσον αφορά τις δυνατότητες ασύρματης ευρυζωνικής σύνδεσης καθίσταται τόσο σχετική όσο και επίκαιρη.

3.2 Παραδείγματα Σεναρίων για την Ανάπτυξη Wi-Fi 6 (Merlin, 2015)

Οικιακή Χρήση: Χαρακτηρίζεται από μη διαχειριζόμενη και τυχαία τοποθέτηση Σημείων Πρόσβασης (AP), που οδηγεί σε υψηλά επίπεδα παρεμβολών μεταξύ συσκευών και AP στην ίδια περιοχή.

Επιχειρηματικά Περιβάλλοντα: Οι αναπτύξεις διαχειρίζονται κεντρικά και σχεδιάζονται προσεκτικά, με αποτέλεσμα τη μείωση των παρεμβολών και τη βελτιστοποιημένη απόδοση.

Πυκνοί Εσωτερικοί Χώροι: Αντιπροσωπεύονται από συμπαγείς εξαγωνικές διατάξεις (π.χ. στάδια, αίθουσες συναυλιών), όπου η εγγύτητα πολλαπλών AP οδηγεί σε σημαντικές παρεμβολές και απαιτεί εξελιγμένες τεχνικές μετριασμού των παρεμβολών.

Μεγάλες Εξωτερικές Αναπτύξεις: Χρησιμοποιούνται σε εκτεταμένα εξωτερικά hotspots ή αστικά περιβάλλοντα, όπου ο έλεγχος απόδοσης του Wi-Fi 6 είναι κρίσιμος σε απαιτητικά περιβάλλοντα διάδοσης.

Παραδοσιακά, η ανάπτυξη AP Wi-Fi σε τέτοια σενάρια ακολουθούσε ένα απλό μοντέλο «plug-and-play» χρησιμοποιώντας μεμονωμένες αυτόνομες μονάδες. Ωστόσο, οι σύγχρονες τάσεις έχουν μετατοπιστεί προς τα δίκτυα πλέγματος Wi-Fi, όπου ένας κύριος κόμβος υποστηρίζεται από διάφορους δορυφορικούς κόμβους που βρίσκονται σε όλο το σπίτι ή το κτίριο. Αυτοί οι κόμβοι είναι ικανοί να αναμεταδίδουν σήματα, εξαλείφοντας έτσι τα κενά κάλυψης και ενισχύοντας την ταχύτητα και την αξιοπιστία (Navío-Marco et al., 2019). Αυτή η ευκολία ανάπτυξης έρχεται σε έντονη αντίθεση με τις πολύπλοκες απαιτήσεις σχεδιασμού και υποδομής που σχετίζονται με το 5G (Forge & Vu, 2020).

Το Wi-Fi 6 εισάγει μια σειρά από τεχνικές βελτιώσεις που στοχεύουν στη βελτίωση της απόδοσης σε πυκνά περιβάλλοντα, διασφαλίζοντας παράλληλα συμβατότητα με παλαιότερες τεχνολογίες. Βασικές καινοτομίες περιλαμβάνουν την Ορθογώνια Πολλαπλή Πρόσβαση Διαίρεσης Συχνοτήτων (OFDMA), το 1024-QAM, το MU-MIMO ανερχόμενης ζεύξης, τη διαμόρφωση διπλού υποφέροντος, την επαναχρησιμοποίηση χώρου μέσω χρωματισμού BSS και προηγμένους μηχανισμούς εξοικονόμησης ενέργειας.

Μία από τις βασικές αναβαθμίσεις είναι η υποχρεωτική εφαρμογή του OFDMA τόσο στα κανάλια κατερχόμενης όσο και στα κανάλια ανερχόμενης ζεύξης. Σε αντίθεση με τα

προηγούμενα συστήματα που βασίζονται σε OFDM, το OFDMA επιτρέπει σε πολλούς χρήστες να μοιράζονται φάσμα ταυτόχρονα, κατανέμοντας διακριτές Μονάδες Πόρων (RU). Κάθε RU μπορεί να διαμορφωθεί ανεξάρτητα, ενισχύοντας τη φασματική απόδοση και παρέχοντας έως και τέσσερις φορές μεγαλύτερη απόδοση σε σύγκριση με τα παραδοσιακά συστήματα OFDM (Khorov et al., 2019).

Μια άλλη σημαντική εξέλιξη είναι το MU-MIMO (MIMO πολλαπλών χρηστών), το οποίο υποστηρίζεται πλέον τόσο σε uplink όσο και σε downlink. Ενώ το MIMO υπήρχε σε παλαιότερες εκδόσεις Wi-Fi, το Wi-Fi 6 αυξάνει τη χωρητικότητα υποστηρίζοντας έως και οκτώ χωρικές ροές, επιτρέποντας ταυτόχρονες συνδέσεις σε πολλές συσκευές. Όταν ο λόγος σήματος προς παρεμβολή συν θόρυβο (SINR) είναι υψηλός, χρησιμοποιείται 1024-QAM για τη μεγιστοποίηση της απόδοσης κωδικοποίησης δεδομένων, ενισχύοντας τη φασματική απόδοση.

Για να μειώσει την κατανάλωση ενέργειας της συσκευής, το Wi-Fi 6 υιοθετεί το Target Wake Time (TWT) - μια μέθοδο που εισήχθη για πρώτη φορά στο IEEE 802.11ah. Το TWT επιτρέπει στις συσκευές να παραμένουν σε κατάσταση αναστολής λειτουργίας για μεγάλα χρονικά διαστήματα, αφυπνιζόμενες μόνο σε προκαθορισμένα χρονικά διαστήματα για ανταλλαγή δεδομένων, με αποτέλεσμα βελτιωμένη διάρκεια ζωής μπαταρίας για συσκευές IoT και κινητές συσκευές.

Τα σενάρια πυκνής ανάπτυξης συχνά οδηγούν σε επικαλυπτόμενα Βασικά Σύνολα Υπηρεσιών (BSS). Για να αντιμετωπίσει αυτό το πρόβλημα, το Wi-Fi 6 εισάγει μια λειτουργία Spatial Reuse (SR) χρησιμοποιώντας BSS Coloring, ένα αναγνωριστικό 6-bit ενσωματωμένο σε κάθε μετάδοση. Αυτό επιτρέπει στις συσκευές να διακρίνουν μεταξύ ενδο- και δια-BSS μεταδόσεων, βοηθώντας στην αποφυγή περιττής λήψης παρεμβαλλόμενων σημάτων και επιτρέποντας ταυτόχρονες μεταδόσεις, βελτιώνοντας έτσι την απόδοση έως και 30% σε πολυσύχναστα εξωτερικά περιβάλλοντα (Selinis et al., 2016).

Κοιτάζοντας μπροστά, το Wi-Fi 7 (IEEE 802.11be) στοχεύει στην υποστήριξη ολοένα και πιο απαιτητικών εφαρμογών, όπως η ροή βίντεο 8K και οι ολογραφικές επικοινωνίες. Αναμένεται να προσφέρει βελτίωση 3-4 φορές στην απόδοση σε σχέση με το Wi-Fi 6, διατηρώντας παράλληλα συμβατότητα με παλαιότερες εκδόσεις (Lopez-Perez et al., 2019). Τα χαρακτηριστικά που βρίσκονται υπό ανάπτυξη περιλαμβάνουν υποστήριξη καναλιών 320 MHz, έως και 16 χωρικές ροές, συσσωμάτωση πολλαπλών ζωνών και επικοινωνία

πλήρους αμφίδρομης επικοινωνίας - ένα άλμα από την τρέχουσα προσέγγιση ημι-αμφίδρομης επικοινωνίας.

Επιπλέον, το Wi-Fi 7 μπορεί να περιλαμβάνει κεντρικό συντονισμό AP, διαχωρισμό επιπέδων δεδομένων/ελέγχου, Υβριδικό ARQ (HARQ) για βελτιωμένη αξιοπιστία και Χρονικά Ευαίσθητη Δικτύωση (TSN) για μείωση του jitter και ενίσχυση του συγχρονισμού - κάτι κρίσιμο για εφαρμογές ροής σε πραγματικό χρόνο (Alsharif & Nordin, 2017).

Με τις βασικές τεχνολογίες των Wi-Fi 6 και 7 πλέον ορισμένες, η επόμενη ενότητα θα διερευνήσει την ευθυγράμμιση και την απόκλισή τους από τις ασύρματες τεχνολογίες ευρυζωνικής σύνδεσης 5G (E. J. Oughton et al., 2021).

3.3 Επισκόπηση Βασικών Βελτιώσεων στο Wi-Fi 6

Αυτή η ενότητα περιγράφει τις κύριες καινοτομίες που εισήχθησαν με το Wi-Fi 6, με μια σύνοψη των πλεονεκτημάτων τους στην απόδοση που παρέχεται στον Πίνακα 3.

Πίνακας 3.2 Καινοτομίες στο Wi-Fi 6

Χαρακτηριστικό	Πλεονεκτήματα
MU OFDMA	- Υψηλότερη απόδοση - Μείωση overhead - Υψηλή φασματική απόδοση
Longer OFDM Symbol	- Υψηλότερη απόδοση για εσωτερικούς χώρους - Μεγαλύτερη ανθεκτικότητα για εξωτερικές εφαρμογές
Spatial Reuse	- Βελτιωμένη φασματική απόδοση - Αυξημένη χωρητικότητα δικτύου - Υψηλότερη απόδοση
TWT (Target Wake Time)	- Βελτιωμένη αξιοπιστία - Χαμηλότερη καθυστέρηση - Εξοικονόμηση ενέργειας - Μειωμένο jitter
MU-MIMO	- Έως 8 φορές αύξηση χωρητικότητας (uplink) - Έως 2 φορές αύξηση χωρητικότητας (downlink)

1024-QAM	- Έως 25% υψηλότερος ρυθμός δεδομένων σε σύγκριση με το 256-QAM
-----------------	---

Σημείωση: Οι συσκευές που λειτουργούν με το πρότυπο IEEE 802.11ax αναφέρονται ως σταθμοί και σημεία πρόσβασης υψηλής απόδοσης (HE). Για συντομία, χρησιμοποιούμε τους όρους σταθμός και σημείο πρόσβασης (AP) για να αντιπροσωπεύσουμε τον σταθμό HE και το HE AP, αντίστοιχα. Σε όλο αυτό το έγγραφο, αναφερόμαστε στο Wi-Fi 6 ως τον εκπρόσωπο του IEEE 802.11ax και χρησιμοποιούμε το Wi-Fi 5 (IEEE 802.11ac) ως το παλαιότερο πρότυπο αναφοράς.

3.3.1. Ορθογώνια Πολλαπλή Πρόσβαση Διαίρεσης Συχνοτήτων (OFDMA)

Τα παραδοσιακά συστήματα OFDM απαιτούν το πλήρες φάσμα για μία μόνο μετάδοση, προκαλώντας υψηλή σύγκρουση και αυξημένα ποσοστά συγκρούσεων σε πυκνά δίκτυα. Το Wi-Fi 6 εισάγει το OFDMA για να αντιμετωπίσει αυτό το πρόβλημα, επιτρέποντας σε πολλούς χρήστες να μεταδίδουν ταυτόχρονα διαιρώντας το φάσμα σε μικρότερες μονάδες. Αυτό μειώνει σημαντικά την ένταση και την επιβάρυνση του επιπέδου MAC, βελτιώνοντας την απόδοση και μειώνοντας την καθυστέρηση σε περιβάλλοντα με μεγάλο όγκο δεδομένων. Σε αντίθεση με το LTE, το οποίο χρησιμοποιούσε OFDMA μόνο για κατερχόμενη ζεύξη, το Wi-Fi 6 υποστηρίζει μεταδόσεις πολλαπλών χρηστών τόσο σε ανοδική όσο και σε κατερχόμενη ζεύξη, διατηρώντας παράλληλα συμβατότητα με παλαιότερα πρότυπα που βασίζονται σε OFDM (Khoron et al., 2019).

3.3.2. Χωρική Επαναχρησιμοποίηση (SR)

Τα δίκτυα Wi-Fi έχουν περιορισμούς στα διαθέσιμα κανάλια, οδηγώντας σε επικαλυπτόμενα Βασικά Σύνολα Υπηρεσιών (BSS) και αναποτελεσματική επαναχρησιμοποίηση συχνότητας. Το Wi-Fi 6 βελτιώνει αυτό με το BSS Coloring, μια τεχνική προσαρμοσμένη από το IEEE 802.11ah, η οποία επισημαίνει κάθε μετάδοση με έναν χρωματικό κώδικα για να διακρίνει μεταξύ πλαισίων εντός και μεταξύ BSS. Οι συσκευές μπορούν στη συνέχεια να λαμβάνουν πιο έξυπνες αποφάσεις μετάδοσης, επιτρέποντας

περισσότερες ταυτόχρονες μεταδόσεις στο ίδιο κανάλι, ενισχύοντας την φασματική απόδοση (Selinis et al., 2016).

3.3.3. Χρόνος Αφύπνισης Στόχου (TWT)

Οι παλαιοί μηχανισμοί Λειτουργίας Εξοικονόμησης Ενέργειας (PSM) συχνά οδήγησαν σε αυξημένες συγκρούσεις και μεγαλύτερες ενεργές διάρκειες. Το Wi-Fi 6 υιοθετεί και επεκτείνει το TWT —που εισήχθη για πρώτη φορά στο IEEE 802.11ah— προγραμματίζοντας εκ των προτέρων τους χρόνους αφύπνισης των συσκευών. Αυτό εξαλείφει τις αιχμές της κυκλοφορίας και επιτρέπει σημαντικά μεγαλύτερες περιόδους ύπνου, μειώνοντας έτσι την κατανάλωση ενέργειας και βελτιώνοντας την απόδοση, ιδιαίτερα για τις συσκευές IoT (Alsharif & Nordin, 2017).

3.3.4. MIMO Πολλαπλών Χρηστών (MU-MIMO)

Το Wi-Fi 6 υποστηρίζει MU-MIMO τόσο για κατερχόμενη όσο και για ανερχόμενη σύνδεση, επεκτείνοντας τις προηγούμενες υλοποιήσεις στο Wi-Fi 5 που ήταν μόνο για κατερχόμενη σύνδεση. Με υποστήριξη έως και οκτώ χωρικών ροών και τη δυνατότητα εφαρμογής MU-MIMO σε μερικά εύρη ζώνης (επιτρέποντας τον συνδυασμό με OFDMA), το Wi-Fi 6 βελτιώνει τη χωρητικότητα και την αποδοτικότητα του δικτύου σε σενάρια πολλαπλών χρηστών.

3.3.5. Βελτιώσεις Διαμόρφωσης

Το Wi-Fi 6 εισάγει 1024-QAM, επιτρέποντας τη μετάδοση 10 bit ανά σύμβολο—25% περισσότερο από τα 256-QAM στο Wi-Fi 5. Αυτή η διαμόρφωση υψηλότερης τάξης αυξάνει τους ρυθμούς δεδομένων, αλλά απαιτεί υψηλούς λόγους σήματος προς θόρυβο (SNR) για να λειτουργήσει αποτελεσματικά. Για να υποστηρίζει μεταδόσεις μεγάλης εμβέλειας και ανθεκτικότητα σε παρεμβολές, το Wi-Fi 6 περιλαμβάνει επίσης ένα προαιρετικό σχήμα Διαμόρφωσης Διπλού Φορέα (DCM) (Lopez-Perez et al., 2019).

3.4 Wi-Fi 6E: Εκτεταμένη Ζώνη Συχνοτήτων

Το Wi-Fi 6E επεκτείνει το πρότυπο στη ζώνη των 6 GHz (5,925–7,125 GHz), προσφέροντας επτά επιπλέον κανάλια 160 MHz. Αυτά τα ευρύτερα κανάλια μειώνουν τη συμφόρηση και την καθυστέρηση, ιδανικά για εφαρμογές που απαιτούν μεγάλο εύρος ζώνης, όπως AR/VR και βίντεο UHD. Επειδή οι προηγούμενες γενιές Wi-Fi δεν λειτουργούν σε αυτήν τη ζώνη, το Wi-Fi 6E λειτουργεί χωρίς προβλήματα συμβατότητας με παλαιότερες εκδόσεις, ελαχιστοποιώντας τις παρεμβολές και βελτιώνοντας την απόδοση (Forge & Vu, 2020).

3.4.1. Πυκνές Αναπτύξεις

Το Wi-Fi 6 έχει βελτιστοποιηθεί για πυκνά σενάρια όπως στάδια, πολυκατοικίες και πανεπιστημιούπολεις, όπου συνυπάρχουν πολλαπλά επικαλυπτόμενα BSS. Καινοτομίες όπως το SR, το OFDMA και το MU-MIMO βοηθούν στη βελτίωση της επαναχρησιμοποίησης καναλιών, στη μείωση των συγκρούσεων και στην αύξηση της χωρητικότητας, επιτρέποντας καλύτερη απόδοση σε περιβάλλοντα συμφόρησης.

3.4.2. Διαδίκτυο των Πραγμάτων (IoT)

Με τον πολλαπλασιασμό των συσκευών IoT, οι οποίες συνήθως απαιτούν χαμηλή ισχύ και μπορούν να δημιουργήσουν μεγάλους όγκους μικρών πακέτων δεδομένων, το Wi-Fi 6 προσφέρει σημαντικά πλεονεκτήματα. Το TWT μειώνει την κατανάλωση ενέργειας, ενώ το OFDMA εξασφαλίζει αποτελεσματική πρόσβαση στα κανάλια για πολλές συσκευές που μεταδίδουν ταυτόχρονα.

3.4.3. Εφαρμογές Πολυμέσων

Εφαρμογές όπως βίντεο 4K/8K, διαδικτυακά παιχνίδια και AR/VR απαιτούν υψηλή απόδοση και χαμηλή καθυστέρηση. Το Wi-Fi 6 υποστηρίζει αυτές τις ανάγκες μέσω της συνδυασμένης χρήσης διαμόρφωσης υψηλότερης τάξης (1024-QAM), OFDMA και MU-MIMO, εξασφαλίζοντας μια ομαλότερη εμπειρία χρήστη ακόμη και υπό βαρύ φόρτο δικτύου (E. J. Oughton et al., 2021).

3.5 OFDMA στο Wi-Fi 6

Αυτή η ενότητα περιγράφει τις βελτιώσεις που εισήγαγε το Wi-Fi 6 σχετικά με το OFDMA, εστιάζοντας στον αντίκτυπό τους στο επίπεδο MAC. Ολοκληρώνεται με μια ανασκόπηση της τρέχουσας έρευνας στον τομέα.

3.5.1 Βελτιώσεις στο Φυσικό Επίπεδο

Ξεκινάμε συζητώντας πώς το Wi-Fi 6 αξιοποιεί τις Μονάδες Πόρων (RU) για πιο ευέλικτη χρήση του φάσματος και πώς η εκτεταμένη διάρκεια συμβόλων συμβάλλει στη βελτιωμένη απόδοση. Περιγράφουμε επίσης την ενημερωμένη δομή πλαισίου.

3.5.2 Ευέλικτη Κατανομή Φάσματος

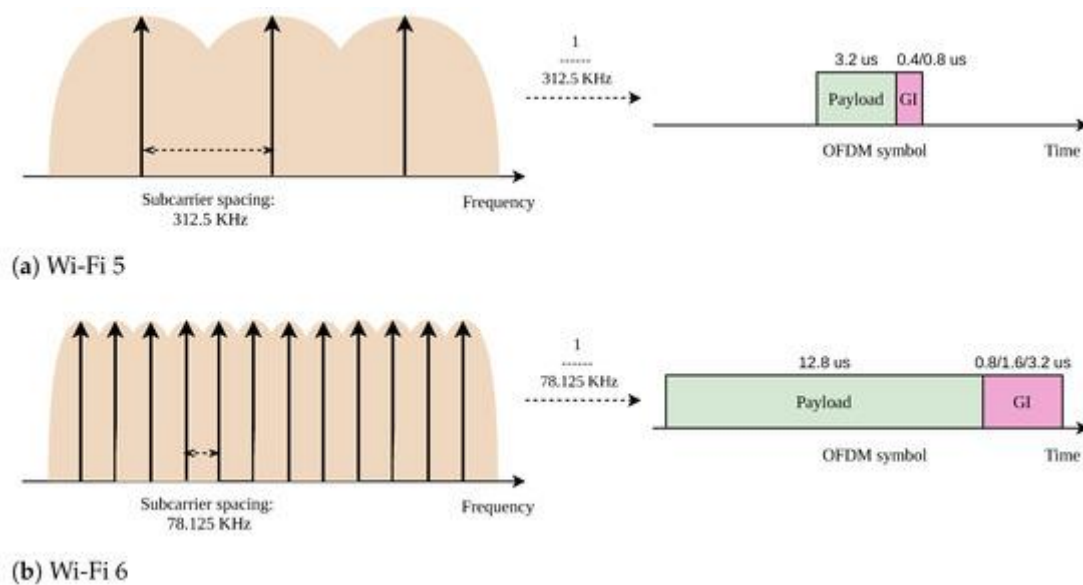
Ένας βασικός περιορισμός του παραδοσιακού OFDM σε προηγούμενα πρότυπα Wi-Fi είναι ότι μόνο ένας χρήστης μπορεί να μεταδίδει κάθε φορά, προκαλώντας σημαντική επιβάρυνση λόγω της διεκδίκησης καναλιών, ιδιαίτερα με μικρά πακέτα.

Το Wi-Fi 6 αντιμετωπίζει αυτό το πρόβλημα μέσω της εισαγωγής Μονάδων Πόρων (RU), οι οποίες διαιρούν το εύρος ζώνης του καναλιού σε μπλοκ χρόνου-συχνότητας. Τα σημεία πρόσβασης κατανέμουν αυτά τα μπλοκ στους χρήστες για μεταδόσεις uplink. Το τμήμα συχνότητας ονομάζεται RU και η διάρκεια χρήσης αναφέρεται ως TXOP (Ευκαιρία Μετάδοσης). Κάθε TXOP έχει αρκετό μήκος για να φιλοξενήσει ένα ή περισσότερα πακέτα και τις επιβεβαιώσεις τους. Για την αποφυγή παρεμβολών, οι RU που έχουν εκχωρηθεί σε διαφορετικούς χρήστες πρέπει να μην επικαλύπτονται (Adame et al., 2021; Ertürk et al., 2019; Mozaffariahrar et al., 2022).

Αυτές οι εκχωρήσεις σχηματίζουν έναν πίνακα χρόνου-συχνότητας που υποστηρίζει ταυτόχρονες μεταδόσεις μεταξύ πολλαπλών σταθμών και του σημείου πρόσβασης. Οι σταθμοί μπορούν να χρησιμοποιούν ευρύτερες ή στενότερες RU και μικρότερες ή μεγαλύτερες TXOP ανάλογα με τις ανάγκες κυκλοφορίας. Αυτό επιτρέπει πολλαπλές παράλληλες μεταδόσεις εντός ενός μόνο καναλιού, βελτιώνοντας σημαντικά την αποδοτικότητα του εύρους ζώνης.

3.5.3 Μονάδες Πόρων στο Wi-Fi 6

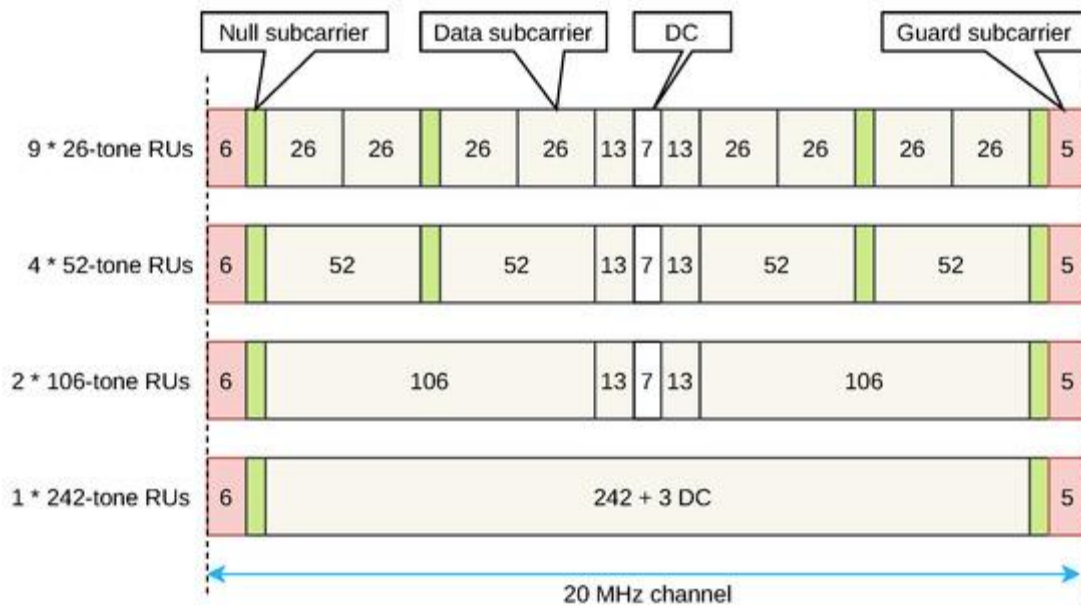
Για να υποστηρίξει λεπτότερη λεπτομέρεια εύρους ζώνης, το Wi-Fi 6 μειώνει την απόσταση των υποφορέων κατά τέσσερις φορές σε σύγκριση με το Wi-Fi 5 (από 312,5 kHz έως 78,125 kHz), όπως φαίνεται στην Εικόνα 3β. Αυτό επιτρέπει στενότερες RU, οι οποίες βελτιώνουν την ανθεκτικότητα σε φαινόμενα πολλαπλών διαδρομών αλλά αυξάνουν και την ευαισθησία στον θόρυβο.



Εικόνα 3.1 Σύγκριση Wi-Fi 5 και Wi-Fi 6 όσον αφορά την απόσταση μεταξύ υποφορέων και τη διάρκεια συμβόλων OFDM. Η διάρκεια συμβόλων ωφέλιμου φορτίου είναι αντίστροφη με την απόσταση μεταξύ υποφορέων.

Ο αριθμός και το μέγεθος των RU ποικίλλουν ανάλογα με το πλάτος του καναλιού. Για παράδειγμα, ένα κανάλι 80 MHz μπορεί να υποστηρίξει είτε μία RU 996 τόνων είτε έως 16 ορθογώνιες RU 52 τόνων. Ο Πίνακας 6 παρέχει μια λεπτομερή επισκόπηση των μεγεθών RU και τον μέγιστο αριθμό τους ανά πλάτος καναλιού.

Η Εικόνα 4 απεικονίζει τα υποστηριζόμενα μεγέθη RU σε ένα κανάλι 20 MHz, δείχνοντας:



Εικόνα 3.2 Μεγέθη RU σε κανάλι 20 MHz.

Data subcarriers: Χρησιμοποιούνται για μετάδοση δεδομένων.

Guard subcarriers: Αποτελούνται από 11 τόνους τοποθετημένους στις άκρες του καναλιού για τη μείωση των παρεμβολών.

Null subcarriers: Διαχωρίζουν τις ενεργές υποφέρουσες και μετριάζουν περαιτέρω τις παρεμβολές σε γειτονικά κανάλια.

DC subcarriers: Υποδεικνύουν το κέντρο του καναλιού και ποικίλλουν ανάλογα με το μέγεθος της RU.

3.5.4 Διάρκεια συμβόλων και διαστήματα προστασίας

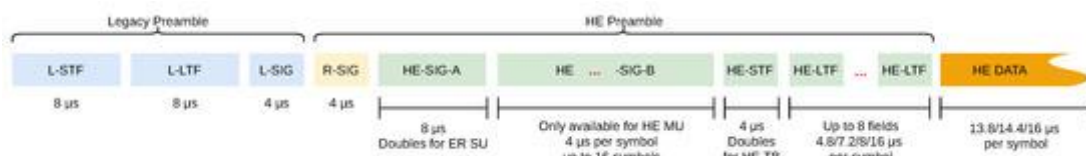
Το Wi-Fi 6 χρησιμοποιεί μεγαλύτερες διάρκειες συμβόλων λόγω της στενότερης απόστασης μεταξύ των υποφερόντων και παρέχει πολλαπλές επιλογές Διαστήματος Προστασίας (GI) (βλ. Σχήμα 3). Τα μεγαλύτερα GI αυξάνουν την ανοχή στις διακυμάνσεις χρονισμού μεταξύ των χρηστών, βελτιώνοντας την απόδοση του OFDMA ανοδικής ζεύξης. Μειώνουν επίσης τη σχετική επιβάρυνση, βελτιώνοντας την απόδοση. Τα μεγαλύτερα GI είναι ιδιαίτερα

ωφέλιμα σε εξωτερικά περιβάλλοντα όπου οι ανακλάσεις σήματος προκαλούν εξάπλωση καθυστέρησης.

Ενημερωμένη Δομή Πλαισίου

Το Wi-Fi 6 εισάγει τέσσερις νέες μορφές πλαισίων και δομές προοιμίου, διατηρώντας παράλληλα την συμβατότητα με παλαιότερες εκδόσεις. Το προοίμιο περιλαμβάνει πλέον τόσο πεδία παλαιού τύπου (μη-HE) όσο και πεδία υψηλής απόδοσης (HE), με το πρώτο να είναι αναγνώσιμο από παλαιότερες συσκευές και το δεύτερο να προορίζεται για λειτουργίες Wi-Fi 6.

Η Εικόνα 5 δείχνει αυτές τις νέες μορφές πλαισίων. Οι τέσσερις τύποι Μονάδων Δεδομένων Πρωτοκόλλου Φυσικού Επιπέδου HE (PPDU) περιλαμβάνουν (Adame et al., 2021; Ertürk et al., 2019; Mozaffariahrar et al., 2022):



Εικόνα 3.3 Η μορφή προοιμίου στο Wi-Fi 6 εξαρτάται από τον τύπο πλαισίου.

- HE PPDU ενός χρήστη (SU): Για μεταδόσεις ενός χρήστη.
- HE PPDU εκτεταμένης εμβέλειας HE: Παρόμοια με το SU PPDU αλλά βελτιστοποιημένη για χρήση σε εξωτερικούς χώρους μεγάλης εμβέλειας.
- HE PPDU πολλαπλών χρηστών (MU): Για μεταδόσεις κατερχόμενης ζεύξης σε πολλαπλούς χρήστες· περιλαμβάνει το πεδίο HE-SIG-B.
- HE PPDU βασισμένο σε ενεργοποίηση (TB): Για συντονισμένες μεταδόσεις ανοδικής ζεύξης μετά από ένα Πλαίσιο ενεργοποίησης (TF) από το AP.

Τα νέα πεδία εισαγωγής περιλαμβάνουν (Ertürk et al., 2019; Mozaffariahrar et al., 2022):

- Επαναλαμβανόμενο Παλαιότερο Σήμα (RL-SIG): Σηματοδοτεί την έναρξη ενός πλαισίου HE.
- HE-SIG-A: Κοινό σε όλες τις μορφές HE, μεταφέρει παραμέτρους μετάδοσης όπως τύπο σύνδεσης, διάρκεια TXOP, εύρος ζώνης καναλιού, χωρικές ροές και άλλα. Σε λειτουργία εκτεταμένου εύρους, επαναλαμβάνεται για την ενίσχυση της ανθεκτικότητας.
- HE-SIG-B: Ειδικό για μεταδόσεις MU κατερχόμενης ζεύξης. Περιέχει κατανομή RU και ρυθμίσεις ειδικές για τον χρήστη όπως MCS, χωρικό αριθμό ροών και αναγνωριστικό σταθμού.
- HE-STF και HE-LTF: Υποστηρίζει συγχρονισμό και λειτουργίες MIMO. Στα πλαίσια TB, η διάρκεια HE-STF διπλασιάζεται.

3.6 Βελτιώσεις επιπέδου MAC

Το Wi-Fi 6 εισάγει OFDMA στο επίπεδο MAC για την υποστήριξη ταυτόχρονων μεταδόσεων σε πολλαπλές RU. Το πρωτόκολλο MAC είναι προσαρμοσμένο ώστε να επιτρέπει παράλληλη επικοινωνία, διασφαλίζοντας παράλληλα τη συμβατότητα με παλαιότερες συσκευές. Οι βελτιώσεις περιλαμβάνουν ενημερώσεις στον μηχανισμό RTS/CTS και νέες διαδικασίες για μεταδόσεις κατερχόμενης και ανερχόμενης ζεύξης, συμπεριλαμβανομένης της ενσωμάτωσης με EDCA.

3.6.1 Handshake RTS/CTS Πολλαπλών Χρηστών

Η παραδοσιακή handshake RTS/CTS επεκτείνεται για να υποστηρίζει σενάρια πολλαπλών χρηστών. Δεδομένου ότι πολλοί σταθμοί μπορούν να μεταδίδουν ταυτόχρονα σε διαφορετικές RU, το RTS/CTS πρέπει να ειδοποιεί όλες τις κοντινές συσκευές σχετικά με τις προγραμματισμένες RU και TXOP.

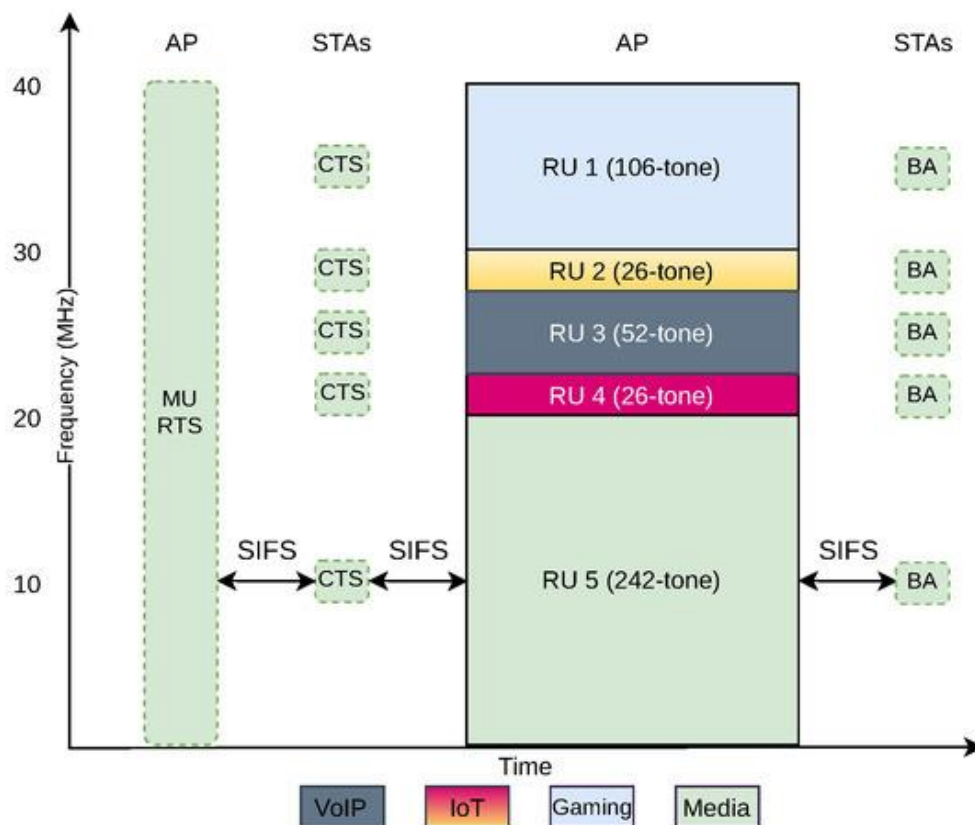
Τα πλαίσια RTS/CTS χρησιμοποιούν τον χαμηλότερο ρυθμό διαμόρφωσης για ευρεία συμβατότητα και πρέπει να χειρίζονται πολλαπλούς πομπούς και δέκτες. Για να προσαρμοστεί σε μεταβαλλόμενους ρυθμούς μετάδοσης, το Wi-Fi 6 χρησιμοποιεί ένα όριο που βασίζεται στη διάρκεια για να ενεργοποιήσει το RTS/CTS, καθώς ο χρόνος μετάδοσης αντιπροσωπεύει καλύτερα τη χρήση του καναλιού παρά το μέγεθος του πακέτου. Το σημείο

πρόσβασης παραμένει πλήρως ενεργό για την παρακολούθηση της χρήσης του καναλιού, ακόμη και αν ορισμένες συσκευές-πελάτες εισέλθουν σε λειτουργίες εξοικονόμησης ενέργειας.

3.6.2 Μετάδοση Downlink

Η Εικόνα 6 περιγράφει τη διαδικασία MU-OFDMA downlink:

1. Το σημείο πρόσβασης προγραμματίζει RU για κάθε σταθμό λήψης με βάση τα δεδομένα που έχουν αποθηκευτεί στο buffer.
2. Στέλνει ένα πλαίσιο RTS πολλαπλών χρηστών.
3. Οι σταθμοί απαντούν με CTS χρησιμοποιώντας τις RU που τους έχουν ανατεθεί.
4. Το σημείο πρόσβασης (AP) μεταδίδει δεδομένα ταυτόχρονα σε όλους τους σταθμούς.
5. Κάθε σταθμός στέλνει μια Επιβεβαίωση Μπλοκ (BA) μετά τη μεταφορά δεδομένων.



Εικόνα 3.4 Μετάδοση DL MU OFDMA μέσω διαφορετικών RU και απαιτήσεων κυκλοφορίας εντός ενός καναλιού 40 MHz.

Αυτός ο μηχανισμός επιτρέπει την αποτελεσματική παράδοση δεδομένων σε πολλαπλούς χρήστες εντός ενός μόνο καναλιού.

3.6.3 Μετάδοση Ανοδικής Ζεύξης

Το Uplink MU-OFDMA είναι πιο πολύπλοκο επειδή το σημείο πρόσβασης πρέπει να ανακαλύψει τις απαιτήσεις του σταθμού και να αντιστοιχίσει τις RU ανάλογα. Υπάρχουν δύο κύριες μέθοδοι πρόσβασης: Προγραμματισμένη Πρόσβαση και Τυχαία Πρόσβαση Ανοδικής Ζεύξης OFDMA (UORA).

Προγραμματισμένη Πρόσβαση:

Όπως φαίνεται στην Εικόνα 7α (Mozaffariahrar et al., 2022):

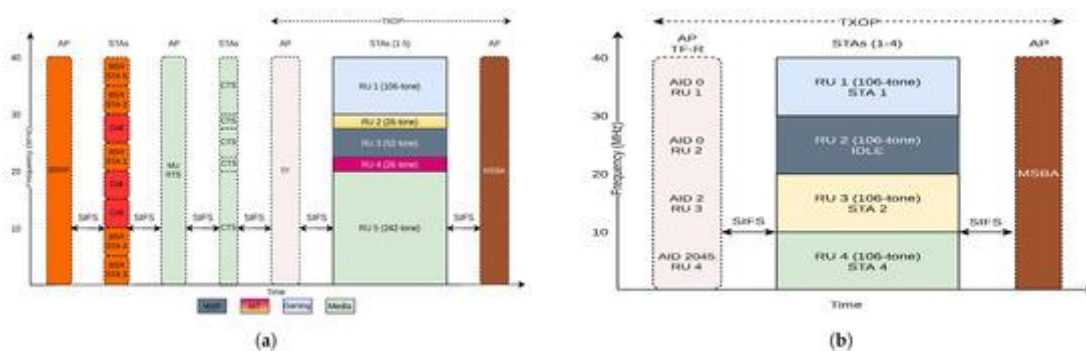
1. Το AP ζητά από τους σταθμούς να λάβουν Αναφορές Κατάστασης Buffer (BSR) χρησιμοποιώντας μια Δημοσκόπηση Αναφοράς Κατάστασης Buffer (BSRP).
2. Οι σταθμοί απαντούν χρησιμοποιώντας τυχαία επιλεγμένες RU από τη Δημοσκόπηση.
3. Με βάση τα ληφθέντα BSR, το AP προγραμματίζει τις RU για το επόμενο TXOP και ειδοποιεί τους σταθμούς μέσω ενός RTS/CTS πολλαπλών χρηστών.
4. Ένα Πλαίσιο Ενεργοποίησης (TF) μεταδίδει το τελικό πρόγραμμα και τις παραμέτρους μετάδοσης.
5. Οι σταθμοί μεταδίδουν δεδομένα στις RU που τους έχουν αντιστοιχιστεί.
6. Μια Επιβεβαίωση Μπλοκ Πολλαπλών Σταθμών (MSBA) επιβεβαιώνει τα ληφθέντα δεδομένα.

Τυχαία Πρόσβαση (UORA):

Η Εικόνα 7β απεικονίζει αυτήν τη μέθοδο (Mozaffariahrar et al., 2022):

1. Το AP στέλνει ένα Πλαίσιο Ενεργοποίησης για Τυχαία Πρόσβαση (TF-R), καθορίζοντας τις διαθέσιμες RU.

2. Το TF-R ορίζει το Διάνυσμα Κατανομής Δικτύου (NAV), αντικαθιστώντας την επιβάρυνση RTS/CTS.
3. Οι σταθμοί με AID 0 (συσχετισμένο) ή 2045 (μη συσχετισμένο) ανταγωνίζονται για RU χρησιμοποιώντας CSMA/CA, μειώνοντας τους μετρητές οπισθοδρόμησης ανά RU.
4. Οι σταθμοί που κερδίζουν μεταδίδουν και το AP απαντά με μια Επιβεβαίωση Μπλοκ Πολλαπλών Σταθμών (MSBA).



Εικόνα 3.5 Προγραμματισμένη και τυχαία πρόσβαση UL MU OFDMA εντός καναλιού 40 MHz. (α) Μετάδοση προγραμματισμένης πρόσβασης UL MU OFDMA μέσω διαφορετικών RU και απαιτήσεων κυκλοφορίας. (β) Μετάδοση τυχαίας πρόσβασης UL OFDMA (UORA) μέσω διαφορετικών RU (οι σταθμοί 1, 2 και 3 έχουν τα Αναγνωριστικά Συσχέτισης (AIDs) 1, 2 και 3, αντίστοιχα. Ο σταθμός 4 δεν είναι συσχετισμένος).

Αυτή η προσέγγιση επιτρέπει την αποτελεσματική χρήση μη εκχωρημένων RU χωρίς κεντρικό προγραμματισμό, επιτρέποντας σε μη συσχετισμένους ή χαμηλής προτεραιότητας σταθμούς να έχουν πρόσβαση στο κανάλι.

3.7 Ανοιχτές Προκλήσεις στο Wi-Fi 6

Αυτή η ενότητα περιγράφει τις βασικές ανοιχτές προκλήσεις που σχετίζονται με το Wi-Fi 6 και παρουσιάζει τις αναδυόμενες δυνατότητες του Wi-Fi 7.

Προκλήσεις

Παρά τις εξελίξεις του, το Wi-Fi 6 εξακολουθεί να αντιμετωπίζει αρκετές ανεπίλυτες προκλήσεις, κυρίως στη διαχείριση σύνθετων αναπτύξεων, στη διασφάλιση της Ποιότητας Υπηρεσίας (QoS) και στην επίτευξη διαλειτουργικότητας.

3.7.1 Διαχείριση Σύνθετων Αναπτύξεων Wi-Fi 6

Το Wi-Fi 6 εισάγει πολλές παραμέτρους που επηρεάζουν σημαντικά την απόδοση του δικτύου. Όπως συζητήθηκε σε προηγούμενες ενότητες, έχουν προταθεί διάφοροι αλγόριθμοι για τη βελτιστοποίηση αυτών των παραμέτρων με βάση περιβαλλοντικούς παράγοντες, όπως το φορτίο κίνησης, η ποιότητα σήματος και η πυκνότητα συσκευών. Μια κεντρική προσέγγιση που βασίζεται σε ελεγκτή προσφέρει δυνατότητες για τη συλλογή στατιστικών δικτύου σε πραγματικό χρόνο και τη δυναμική προσαρμογή των παραμέτρων διαμόρφωσης.

Ένας ελεγκτής WLAN (Ertürk et al., 2019) μπορεί να επιβλέπει μια ομάδα σημείων πρόσβασης (AP), παρακολουθώντας την ποιότητα του καναλιού και διαμορφώνοντας τις ρυθμίσεις μετάδοσης ανάλογα. Αυτό περιλαμβάνει την ανάθεση καναλιών για την ελαχιστοποίηση των παρεμβολών, τη χρήση σύνδεσης καναλιών για υπερφορτωμένα AP για τη μείωση της διένεξης και την εξισορρόπηση του φορτίου των πελατών μεταξύ των AP. Για παράδειγμα, η μείωση της ισχύος μετάδοσης ενός συμφορημένου σημείου πρόσβασης (AP) μπορεί να ωθήσει τις συσκευές-πελάτες να συνδεθούν με γειτονικά AP, κατανέμοντας έτσι το φορτίο πιο ομοιόμορφα. Ο ελεγκτής πρέπει επίσης να διασφαλίζει τη συνολική κάλυψη δικτύου.

Επιπλέον, η βελτιστοποίηση παραμέτρων όπως το OBSS_PDlevel μπορεί να δώσει προτεραιότητα στα AP με μεγάλο φορτίο, ενισχύοντας τη χωρητικότητά τους σε σχέση με τα γειτονικά Βασικά Σύνολα Υπηρεσιών (BSS). Οι ελεγκτές παίζουν επίσης ρόλο στη βελτιστοποίηση της ενεργειακής απόδοσης και της δικαιοσύνης και μπορούν ενδεχομένως να υλοποιηθούν ως λύσεις που βασίζονται στο cloud.

Οι Gallo et al. (2018) βελτίωσαν προηγούμενη εργασία για να προτείνουν μια κεντρική αρχιτεκτονική ελέγχου προσαρμοσμένη για πυκνά περιβάλλοντα Wi-Fi, δίνοντας έμφαση στην ευελιξία (μέσω SDN), την επεκτασιμότητα (μέσω ενός πλαισίου βελτιστοποίησης) και την επεκτασιμότητα (με μια ενοποιημένη διεπαφή ελέγχου).

Κάθε AP πρέπει επίσης να καθορίσει το βέλτιστο Σχήμα Διαμόρφωσης και Κωδικοποίησης (MCS) για κάθε συσχετισμένη συσκευή. Ενώ τα παλαιότερα συστήματα Wi-Fi χρησιμοποιούσαν τεχνικές προσαρμογής ρυθμού βασισμένες σε ρυθμούς απώλειας πακέτων, το Wi-Fi 6 εισάγει μεγαλύτερη πολυπλοκότητα με ένα διευρυμένο σύνολο MCS και πρόσθετους παράγοντες όπως το MU-MIMO και η ισχύς μετάδοσης. Κατά συνέπεια, οι πραγματικές αναπτύξεις πρέπει να εξερευνήσουν πιο εξελιγμένες στρατηγικές για την προσαρμοστική επιλογή MCS, ιδανικά με υποστήριξη ελεγκτή.

Τελικά, ο έλεγχος ενός δικτύου Wi-Fi 6 γίνεται ένα πρόβλημα βελτιστοποίησης πολλαπλών στόχων, το οποίο περιπλέκεται περαιτέρω από το δυναμικό περιβάλλον. Για παράδειγμα, τα οφέλη της επαναχρησιμοποίησης φάσματος εξαρτώνται από την χωρική κατανομή των παρεμβαλλόμενων συσκευών. Η αποτελεσματική περιβαλλοντική μοντελοποίηση και η πειραματική επικύρωση μεγάλης κλίμακας είναι κρίσιμες για την ανάπτυξη προηγμένων αλγορίθμων ελέγχου για μεγάλες αναπτύξεις.

3.7.2 Υποστήριξη Ποιότητας Υπηρεσίας (QoS)

Η αποτελεσματική υποστήριξη QoS στο Wi-Fi 6 βασίζεται σε μεγάλο βαθμό σε μηχανισμούς κατανομής πόρων όπως OFDMA και TWT, παράλληλα με βελτιώσεις όπως το MU-MIMO, η χωρική επαναχρησιμοποίηση και η λειτουργία στη ζώνη των 6 GHz.

Σε βιομηχανικά πλαίσια, χαρακτηριστικά όπως η ιεράρχηση της κυκλοφορίας και ο τεμαχισμός δικτύου αποκτούν ολοένα και μεγαλύτερη σημασία. Ενώ το Wi-Fi υποστηρίζει ήδη την ιεράρχηση προτεραιοτήτων μέσω της Βελτιωμένης Κατανεμημένης Πρόσβασης Καναλιών (EDCA), τεχνολογίες όπως η Χρονικά Ευαίσθητη Δικτύωση (TSN) — η οποία βασίζεται στο Ethernet — προσφέρουν πιο ισχυρές εγγυήσεις QoS, δεσμεύοντας πόρους για συγκεκριμένες ροές. Αυτό επιτρέπει την απόδοση σε πραγματικό χρόνο, συμπεριλαμβανομένης της πιθανότητας μηδενικής καθυστέρησης στην ουρά όταν οι πόροι έχουν κατανεμηθεί με ακρίβεια (Adame et al., 2021; Cavalcanti et al., 2019).

Η έννοια του τεμαχισμού δικτύου, που εφαρμόζεται ευρέως στο 5G, ορίζει εικονικά δίκτυα με αποκλειστικούς πόρους. Το Wi-Fi 6 μπορεί να μιμηθεί αυτήν τη συμπεριφορά δεσμεύοντας RU ή ορίζοντας συμφωνίες TWT για επιλεγμένους κόμβους. Ωστόσο, η διασφάλιση της απομόνωσης των τεμαχίων καθίσταται δύσκολη σε περιβάλλοντα με επικαλυπτόμενα BSS που ελέγχονται από διαφορετικά AP (Adame et al., 2021). Ο

ανταγωνισμός μεταξύ των AP για πρόσβαση σε κανάλια μπορεί να θέσει σε κίνδυνο την ικανότητα διατήρησης αυτών των εγγυήσεων. Ο κεντρικός συντονισμός μπορεί να βοηθήσει, αλλά η παρουσία μη διαχειριζόμενων AP εξακολουθεί να αποτελεί σημαντικό εμπόδιο.

Ο συγχρονισμός χρόνου είναι επίσης απαραίτητος σε συστήματα πραγματικού χρόνου όπως το TSN. Οι τροποποιήσεις των προτύπων IEEE 802.11n και 802.11mc παρέχουν ήδη μηχανισμούς για συγχρονισμό ώρας στο Wi-Fi [208]. Το Wi-Fi 7 σχεδιάζεται για να αντιμετωπίσει καλύτερα αυτές τις προκλήσεις και να βελτιώσει τη συμβατότητα με τις απαιτήσεις TSN.

Η ομάδα εργασίας "Reliable and Available Wireless" (RAW) του IETF μελετά ενεργά ασύρματες λύσεις για βιομηχανικές εφαρμογές σε πραγματικό χρόνο, όπως η Βιομηχανία 4.0. Αυτές οι εφαρμογές, οι οποίες βασίζονται επί του παρόντος σε TSN μέσω ενσύρματων δικτύων, απαιτούν ασύρματες εναλλακτικές λύσεις που προσφέρουν εγγυήσεις πραγματικού χρόνου τόσο σε μαλακό όσο και σε σκληρό επίπεδο (Cavalcanti et al., 2019). Το Wi-Fi 6 είναι μία από τις ασύρματες τεχνολογίες που εξετάζονται.

3.7.3 Διαλειτουργικότητα

Το οικοσύστημα Wi-Fi περιλαμβάνει μια μεγάλη ποικιλία από σημεία πρόσβασης (AP) και κάρτες διασύνδεσης δικτύου (NIC). Ενώ οι δοκιμές διαλειτουργικότητας στοχεύουν στη διασφάλιση της συμμόρφωσης με τα πρότυπα, οι προμηθευτές συχνά εφαρμόζουν ιδιόκτητες βελτιώσεις - για παράδειγμα, στον συγχρονισμό χρόνου ή στους μηχανισμούς παραθύρων ανταγωνισμού - καθιστώντας δύσκολη την πρόβλεψη ή τη βελτιστοποίηση των αναπτύξεων πολλαπλών προμηθευτών.

Επιπλέον, το μεγαλύτερο μέρος του εμπορικού firmware είναι κλειστού κώδικα, περιορίζοντας την πρόσβαση σε κρίσιμες λειτουργίες όπως ο προγραμματισμός, η επιλογή MCS και η διαμόρφωση MU-MIMO. Για τους ερευνητές και τους προγραμματιστές, αυτό αποτελεί εμπόδιο στη διάγνωση προβλημάτων και την ανάπτυξη βελτιωμένων αλγορίθμων. Ο συντονισμός μιας μεγάλης κλίμακας ανάπτυξης πολλαπλών προμηθευτών παραμένει περίπλοκος και συχνά οδηγεί σε μη βέλτιστη απόδοση.

Ένα τυποποιημένο API για τον έλεγχο AP είναι απαραίτητο. Ιδανικά, η αρχιτεκτονική θα πρέπει να είναι αρθρωτή και επεκτάσιμη για να φιλοξενήσει νέες λειτουργίες και αλγόριθμους. Οι Guimaraes et al. (2013) πρότειναν το OpenRoads, μια αρχιτεκτονική βασισμένη σε SDN με επίπεδα για διαχείριση ροής, τεμαχισμό δικτύου και κεντρικό έλεγχο. Ενώ αρχικά επικεντρώθηκε στο SDN, παρόμοιες αρχές σχεδιασμού θα μπορούσαν να ενισχύσουν την ευελιξία του Wi-Fi 6.

Η συμβατότητα με παλαιότερες εκδόσεις εισάγει επίσης μοναδικές προκλήσεις. Για παράδειγμα, επειδή το Wi-Fi 6 εξακολουθεί να χρησιμοποιεί CSMA/CA, πρέπει να μοιράζεται τον χρόνο ροής δίκαια με παλαιότερες συσκευές. Αυτό συχνά έχει ως αποτέλεσμα τα σημεία πρόσβασης Wi-Fi 6 να λαμβάνουν την ίδια ευκαιρία μετάδοσης με τους παλαιότερους κόμβους, οδηγώντας σε μειωμένη απόδοση και ζητήματα δικαιοσύνης - παρόμοια με το γνωστό πρόβλημα ανωμαλίας απόδοσης. Αυτό μπορεί επίσης να αυξήσει τις συγκρούσεις και την καθυστέρηση (Shahin et al., 2019).

Ενώ το Wi-Fi είναι δημοφιλές λόγω του χαμηλού κόστους και της ευκολίας ανάπτυξής του, οι νεότερες γενιές όπως το Wi-Fi 6 και το Wi-Fi 7 γίνονται ολοένα και πιο περίπλοκες, πλησιάζοντας την πολυπλοκότητα και το κόστος των δικτύων LTE.

3.8 Συγκεντρωτικά Χαρακτηριστικά του Wi-Fi 6

Πολλαπλή Πρόσβαση Ορθογώνιας Διαίρεσης Συχνοτήτων (OFDMA).

Το Wi-Fi 6 εισήγαγε το OFDMA, το οποίο επιτρέπει σε πολλούς χρήστες να μοιράζονται ένα κανάλι διαιρώντας το σε μικρότερα υποφέροντα. Αυτό βελτιώνει την απόδοση σε περιβάλλοντα με συμφόρηση, όπως αεροδρόμια ή στάδια. Για παράδειγμα, το OFDMA επιτρέπει σε δεκάδες αισθητήρες IoT σε ένα έξυπνο εργοστάσιο να μεταδίδουν δεδομένα ταυτόχρονα χωρίς να περιμένουν πρόσβαση σε μεμονωμένα κανάλια, μειώνοντας την καθυστέρηση και τις συγκρούσεις (Forge & Vu, 2020).

Στόχος Χρόνου Αφύπνισης (TWT).

Το TWT προγραμματίζει πότε οι συσκευές αφυπνίζονται για να μεταδώσουν ή να λάβουν δεδομένα, μειώνοντας σημαντικά την κατανάλωση ενέργειας. Αυτή η λειτουργία είναι ιδιαίτερα ωφέλιμη για συσκευές IoT, όπως έξυπνους μετρητές ή περιβαλλοντικούς αισθητήρες, οι οποίες μπορούν να παραμείνουν σε κατάσταση αναστολής λειτουργίας για μεγάλα χρονικά διαστήματα και να αφυπνίζονται μόνο σε προγραμματισμένα χρονικά διαστήματα, παρατείνοντας τη διάρκεια ζωής της μπαταρίας κατά χρόνια (Sharma & Singh, 2016).

Ενισχυμένο MIMO Πολλαπλών Χρηστών (MU-MIMO).

Βασιζόμενο σε προηγούμενα συστήματα MIMO, το Wi-Fi 6 επέκτεινε το MU-MIMO για να υποστηρίξει ταυτόχρονες μεταδόσεις uplink και downlink. Στην πράξη, αυτό σημαίνει ότι πολλαπλοί φορητοί υπολογιστές σε μια τάξη μπορούν να ανεβάζουν και να κατεβάζουν περιεχόμενο ταυτόχρονα χωρίς σημαντική υποβάθμιση της απόδοσης (Khoron et al., 2019).

Διαμόρφωση Ανώτερης Τάξης (1024-QAM).

Το Wi-Fi 6 υιοθέτησε το 1024-QAM, επιτρέποντας τη μετάδοση περισσότερων δεδομένων ανά σύμβολο, αυξάνοντας έτσι την μέγιστη απόδοση στα 9,6 Gbps υπό ιδανικές συνθήκες. Ωστόσο, αυτή η λειτουργία απαιτεί υψηλούς λόγους σήματος προς θόρυβο, περιορίζοντας την αποτελεσματικότητά της σε εξωτερικούς χώρους ή σενάρια με έντονες παρεμβολές (Guimaraes et al., 2013).

3.9 Wi-Fi 6E: Επέκταση στα 6 GHz

Το Wi-Fi 6E, που εισήχθη το 2020, επέκτεινε τις δυνατότητες του Wi-Fi 6 στο νεοαποκτηθέν φάσμα των 6 GHz. Αυτό παρείχε έως και 1,2 GHz επιπλέον φάσματος, υποστηρίζοντας περισσότερα κανάλια 80 MHz και 160 MHz, κάτι που είναι ιδιαίτερα πολύτιμο σε αστικές αναπτύξεις υψηλής πυκνότητας (Bellalta, 2021).

Ωστόσο, το Wi-Fi 6E αντιμετωπίζει αξιοσημείωτες προκλήσεις. Τα σήματα στη ζώνη των 6 GHz παρουσιάζουν μεγαλύτερη εξασθένηση σε σύγκριση με τα 2,4 και 5 GHz, μειώνοντας την αποτελεσματική εμβέλειά τους και καθιστώντας τα λιγότερο κατάλληλα για μεγάλες κατοικίες ή εξωτερικούς χώρους (Forge & Vu, 2020). Επιπλέον, η πρόωμη υιοθέτησή τους έχει επιβραδυνθεί λόγω της περιορισμένης συμβατότητας συσκευών και της άνισης κανονιστικής έγκρισης μεταξύ των περιοχών, πράγμα που σημαίνει ότι το Wi-Fi 6E δεν είναι ακόμη καθολικά διαθέσιμο (Navío-Marco et al., 2019).

Πίνακας 3.3 Σύγκριση Wi-Fi 6 και Wi-Fi 6E

Χαρακτηριστικό	Wi-Fi 6 (802.11ax)	Wi-Fi 6E (802.11ax in 6 GHz)
Ζώνες φάσματος	2.4 GHz, 5 GHz	2.4 GHz, 5 GHz, 6 GHz
Μέγιστος ρυθμός δεδομένων	9.6 Gbps	9.6 Gbps
Εύρος ζώνης καναλιού	Έως 160 MHz	Έως 160 MHz (περισσότερα κανάλια στα 6 GHz)
Λανθάνων χρόνος	~5–10 ms	~5–10 ms
Βασικά χαρακτηριστικά	OFDMA, TWT, MU-MIMO	Ίδιο, με πρόσθετο φάσμα 6 GHz
Πλεονεκτήματα	Υψηλή απόδοση, χαμηλότερη κατανάλωση ενέργειας, καλύτερη απόδοση πυκνού δικτύου	Περισσότερο φάσμα, μειωμένη συμφόρηση
Περιορισμοί	Η καθυστέρηση εξακολουθεί να είναι μεταβλητή, περιορισμένη χρήση σε εξωτερικούς χώρους	Ισχυρή εξασθένηση στα 6 GHz, περιορισμένη υποστήριξη συσκευής/κανονισμών

3.10 Wi-Fi 7

Το Wi-Fi 7 αναπτύσσεται βάσει της τροποποίησης IEEE 802.11be, γνωστής και ως Εξαιρετικά Υψηλή Απόδοση (EHT). Η ομάδα εργασίας ξεκίνησε τις εργασίες της τον Μάιο του 2019 και στοχεύει στην οριστικοποίηση του προτύπου έως το 2024. Δεδομένου ότι η προδιαγραφή βρίσκεται ακόμη υπό ανάπτυξη, το πλήρες σύνολο χαρακτηριστικών της δεν έχει ακόμη οριστικοποιηθεί.

Σε αντίθεση με το Wi-Fi 6, το οποίο λειτουργεί στις ζώνες των 2,4 GHz, 5 GHz ή 6 GHz ξεχωριστά, το Wi-Fi 7 θα είναι σε θέση να χρησιμοποιεί και τις τρεις ζώνες συχνοτήτων ταυτόχρονα (Deng et al., 2020). Ο Πίνακας 5 συνοψίζει τις τρέχουσες προδιαγραφές του Wi-Fi 7.

Πίνακας 3.4 Προδιαγραφές επιπέδων PHY και MAC για Wi-Fi 4 έως Wi-Fi 7.

Χαρακτηριστικό	802.11n (Wi-Fi 4)	802.11ac (Wi-Fi 5)	802.11ax (Wi-Fi 6)	802.11be (Wi-Fi 7)
Ζώνη Συχνοτήτων (GHz)	2.4 / 5	5	2.4 / 5 / 6	2.4 / 5 / 6
Τεχνολογία PHY	OFDM	OFDM	OFDM, OFDMA	OFDM, OFDMA
Πλάτος Καναλιού (MHz)	20 / 40	20 / 40 / 80 / 160	20 / 40 / 80 / 80+80 / 160	20 / 40 / 80 / 80+80 / 160 / 160+80 / 240 / 160+160 / 320
Μέγεθος Μονάδας Πόρων (τόνοι)	Πλήρες εύρος ζώνης καναλιού	Πλήρες εύρος ζώνης καναλιού	26, 52, 106, 242, 484, 996, 2×996	26, 52, 106, 242, 484, 996, 2×996, 3×996
Μέγιστη Διαμόρφωση	64-QAM	256-QAM	1024-QAM	4096-QAM

Υποφέροντος Δεδομένων				
Subcarrier Spacing (kHz)	312.5	312.5	78.125	78.125
Διάρκεια Συμβόλου (μs)	3.2	3.2	12.8	12.8
Διάστημα Προστασίας (μs)	0.4, 0.8	0.4, 0.8	0.8, 1.6, 3.2	0.8, 1.6, 3.2
Τεχνολογία MIMO	MIMO	MU-MIMO: DL, 4 users	MU-MIMO: UL & DL, 8 usersOFDMA: UL & DL	MU-MIMO: UL & DL, 16 usersOFDMA: UL & DL
Εξοικονόμηση ενέργειας	PSM	PSM	TWT	TWT
Κωδικοποίηση	BCC (mandatory)L DPC (optional)	BCC (mandatory)L DPC (optional)	BCC (mandatory)L DPC (mandatory)	BCC (mandatory)L DPC (mandatory)
Ονομαστικός ρυθμός δεδομένων (Gb/s)	0.6	6.93	9.6	40

4 Wi-Fi 8: Μελλοντικές Κατευθύνσεις στο Ασύρματο

Ευρυζωνικό Δίκτυο

Από σήμερα, οι τεχνολογίες Wi-Fi 6 και 5G αναπτύσσονται ενεργά σε όλο τον κόσμο, παρέχοντας στους καταναλωτές σημαντικά βελτιωμένες δυνατότητες ασύρματης ευρυζωνικής σύνδεσης (Zhou et al., 2022). Αυτές οι εξελίξεις έχουν αναζωπυρώσει τις συζητήσεις σε ολόκληρο τον κλάδο και την κυβέρνηση σχετικά με βασικά ζητήματα, ιδίως στη διαχείριση του φάσματος - συζήτηση για την αδειοδοτημένη έναντι της μη αδειοδοτημένης χρήσης - και την ευρύτερη οικονομική δυναμική του τομέα των τηλεπικοινωνιών (Oh et al., 2022).

Ενώ τα δίκτυα κινητής τηλεφωνίας στοχεύουν κυρίως στην παροχή ασύρματης ευρυζωνικής σύνδεσης απευθείας σε μεμονωμένες συσκευές, οι τεχνολογίες Wi-Fi, όπως το Wi-Fi 6, συνεχίζουν να αποτελούν την κυρίαρχη λύση πρόσβασης τελευταίου μιλίου για σταθερές ευρυζωνικές συνδέσεις σε σπίτια, γραφεία και δημόσιους χώρους. Παρά τις πρώτες εικασίες ότι το 5G θα εκτοπίσει το Wi-Fi, το Wi-Fi παρέμεινε ανθεκτικό. Στην πραγματικότητα, μετέφερε περίπου τα δύο τρίτα της παγκόσμιας κίνησης στο Διαδίκτυο το 2020, με τις συσκευές με δυνατότητα Wi-Fi να υπερδιπλασιάζονται σε αριθμό από τον παγκόσμιο πληθυσμό, και οι προβλέψεις εκτιμούν ότι αυτός ο αριθμός θα τριπλασιαστεί έως το 2024 (E. Oughton et al., 2024).

Δεδομένου αυτού του πλαισίου, η εμφάνιση ασύρματων τεχνολογιών επόμενης γενιάς (Next-G) απαιτεί ανανεωμένη αξιολόγηση από ερευνητές, ενδιαφερόμενους φορείς του κλάδου και υπεύθυνους χάραξης πολιτικής. Προσπάθειες ανάπτυξης βρίσκονται ήδη σε εξέλιξη τόσο για την έκτη γενιά δικτύων κινητής τηλεφωνίας (6G) όσο και για τα επερχόμενα πρότυπα Wi-Fi, δηλαδή το IEEE 802.11be (Wi-Fi 7) και το επερχόμενο IEEE 802.11bn (Wi-Fi 8). Αν και αυτοί δεν είναι οι μόνοι υποψήφιοι για μελλοντική ασύρματη ευρυζωνική σύνδεση - υπάρχουν επίσης εναλλακτικές λύσεις όπως η δορυφορική επικοινωνία, οι ζεύξεις μικροκυμάτων, τα LPWAN και το Bluetooth - παραμένουν οι δύο κυρίαρχες τεχνολογικές οδοί με την ευρύτερη δυνατότητα εφαρμογής και ανάπτυξης.

Καθώς το Wi-Fi 7 πλησιάζει στην τυποποίηση και εισάγει πρωτοποριακά χαρακτηριστικά όπως πλάτη καναλιού 320 MHz, λειτουργία πολλαπλών συνδέσεων (MLO) και βελτιωμένο MU-MIMO, η εστίαση αρχίζει να μετατοπίζεται προς αυτό που θα μπορούσε να προσφέρει

το Wi-Fi 8 τα επόμενα χρόνια. Ενώ τα πρότυπα για το Wi-Fi 8 (IEEE 802.11bn) βρίσκονται ακόμη σε πρώιμο στάδιο, είναι σημαντικό να ξεκινήσουν συγκριτικές αναλύσεις και σχεδιασμός πρόβλεψης. Αυτό ισχύει ιδιαίτερα στο πλαίσιο της αυξανόμενης ζήτησης εύρους ζώνης, των εξελισσόμενων κανονισμών φάσματος και της τεχνολογικής σύγκλισης των τομέων κινητής τηλεφωνίας και Wi-Fi.

Αυτό το κεφάλαιο στοχεύει να διερευνήσει αυτές τις αναδυόμενες τάσεις εξετάζοντας τα ακόλουθα ερευνητικά ερωτήματα (E. Oughton et al., 2024; Zhou et al., 2022):

1. Τι υποδηλώνουν οι τρέχουσες και οι προβλεπόμενες τάσεις ζήτησης για το μέλλον του ασύρματου ευρυζωνικού δικτύου;
2. Με ποιους τρόπους τα προτεινόμενα πρότυπα Wi-Fi 7 και Wi-Fi 8 επικαλύπτονται ή αποκλίνουν από τις εξελισσόμενες τεχνολογίες 6G και πώς συγκρίνονται με προηγούμενα πρότυπα;
3. Ποιες πολιτικές παραμέτρους θα διαμορφώσουν την εξέλιξη και τη συνύπαρξη αυτών των δύο μεγάλων οικογενειών ασύρματης τεχνολογίας κατά την επόμενη δεκαετία;

4.1 Σενάρια για τη μελλοντική ζήτηση Wi-Fi και ο ρόλος του Wi-Fi 8

Η κατανόηση της πορείας της μελλοντικής ζήτησης Wi-Fi είναι ζωτικής σημασίας για να διασφαλιστεί ότι οι υπεύθυνοι χάραξης πολιτικής και οι ηγέτες του κλάδου είναι εξοπλισμένοι για να προβλέψουν και να ανταποκριθούν σε σημαντικές μεταβάσεις ασύρματης ευρυζωνικής σύνδεσης. Ενώ οι προβλέψεις για την κίνηση κινητής τηλεφωνίας έχουν παραδοσιακά λάβει μεγαλύτερη προσοχή, ο ραγδαίος πολλαπλασιασμός των συσκευών που είναι συνδεδεμένες με Wi-Fi και ο αυξανόμενος ρόλος της σταθερής ευρυζωνικής πρόσβασης απαιτούν μια βαθύτερη ανάλυση των προτύπων χρήσης Wi-Fi (Kalem et al., 2021; Kanellos et al., 2023).

Σε αντίθεση με τα δίκτυα κινητής τηλεφωνίας, τα οποία βασίζονται σε μεγάλο βαθμό σε υποδομές που αναπτύσσονται από τον πάροχο, τα δίκτυα Wi-Fi διαχειρίζονται γενικά από τους τελικούς χρήστες και αποτελούν το τελικό επίπεδο πρόσβασης σε σταθερές ευρυζωνικές συνδέσεις σε σπίτια, επιχειρήσεις και δημόσιους χώρους. Αυτό τα καθιστά όχι μόνο πιο πανταχού παρόντα αλλά και πιο προσαρμόσιμα. Πράγματι, οι πρόσφατες τάσεις στη συνδεσιμότητα συσκευών δείχνουν μια επιταχυνόμενη στροφή προς συσκευές Internet

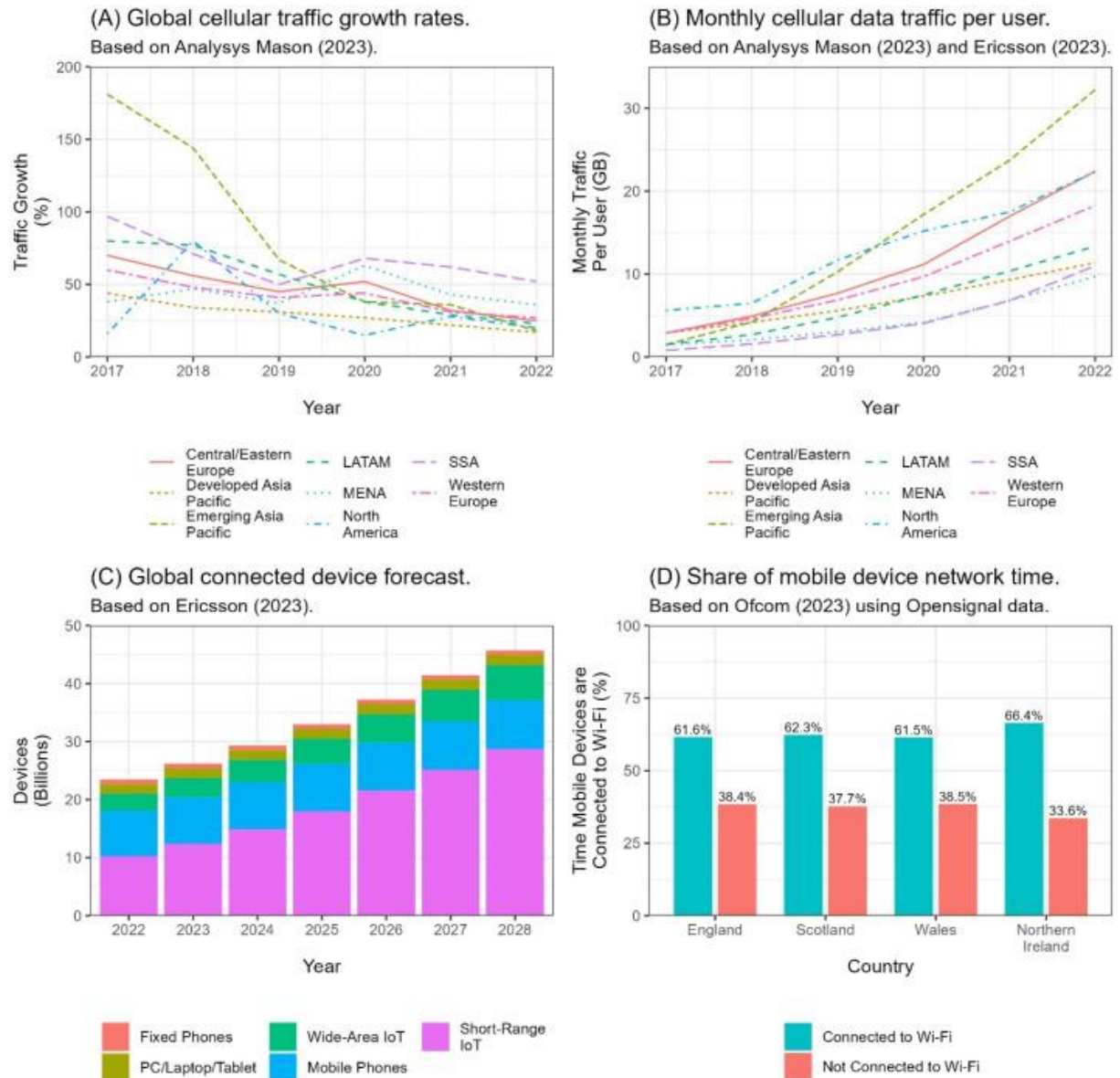
of Things (IoT) μικρής εμβέλειας, που εξαρτώνται από Wi-Fi - συμπεριλαμβανομένων των τεχνολογιών έξυπνου σπιτιού, των συσκευών και των πλατφορμών AR/VR - οι οποίες αναμένεται να κυριαρχήσουν στην αγορά την επόμενη δεκαετία.

Τα εμπειρικά δεδομένα υποδηλώνουν ότι ο αριθμός των συνδεδεμένων συσκευών παγκοσμίως εκτιμάται ότι θα αυξηθεί από περίπου 26 δισεκατομμύρια σήμερα σε πάνω από 46 δισεκατομμύρια έως το 2028, με τη συντριπτική πλειοψηφία αυτών να είναι συμβατές με Wi-Fi. Στο πλαίσιο αυτής της επέκτασης, οι συσκευές IoT μικρής εμβέλειας προβλέπεται να αυξηθούν από 43,6% όλων των συνδεδεμένων συσκευών το 2022 σε 62,8% το 2028, κυρίως εις βάρος των κινητών συσκευών, των οποίων το μερίδιο μειώνεται από 33,5% σε 18,5% την ίδια περίοδο. Αυτή η μετάβαση στις συσκευές έχει σημαντικές επιπτώσεις στην ασύρματη ευρυζωνική σύνδεση, ιδίως σε εσωτερικούς χώρους, όπου το Wi-Fi αναμένεται να μεταφέρει το μεγαλύτερο μέρος της κίνησης δεδομένων χρηστών (E. Oughton et al., 2024).

Σε αυτό το πλαίσιο, το Wi-Fi 7 (IEEE 802.11be) έχει εισαγάγει μετασχηματιστικά χαρακτηριστικά όπως η Λειτουργία Πολλαπλών Συνδέσεων (MLO), τα κανάλια 320 MHz και το MU-MIMO 16 ροών, τα οποία επιτρέπουν υψηλότερη απόδοση και χαμηλότερη καθυστέρηση σε πολλαπλές ζώνες συχνοτήτων. Ωστόσο, καθώς κοιτάμε πέρα από το Wi-Fi 7, το επερχόμενο Wi-Fi 8 (IEEE 802.11bn) σχεδιάζεται για να καλύψει την επόμενη φάση της ζήτησης ευρυζωνικής σύνδεσης, η οποία καθοδηγείται από αναδυόμενες περιπτώσεις χρήσης όπως η εκτεταμένη πραγματικότητα σε πραγματικό χρόνο (XR), ο βιομηχανικός αυτοματισμός και τα περιβάλλοντα δικτύου βελτιστοποιημένα με τεχνητή νοημοσύνη (E. J. Oughton & Lehr, 2022).

Ενώ το Wi-Fi 8 βρίσκεται ακόμη σε πρώιμο στάδιο τυποποίησης, αναμένεται να βασιστεί στα θεμέλια του Wi-Fi 7, ενσωματώνοντας πιο έξυπνο προγραμματισμό, βελτιωμένη φασματική επαναχρησιμοποίηση και ακόμη μεγαλύτερη υποστήριξη για ντετερμινιστική καθυστέρηση και εξαιρετική αξιοπιστία. Αυτές οι βελτιώσεις είναι ιδιαίτερα σημαντικές για την αναμενόμενη έκρηξη της εσωτερικής κίνησης, όπου ήδη λαμβάνει χώρα έως και το 70% της παγκόσμιας κίνησης μέσω κινητού. Επιπλέον, λαμβάνοντας υπόψη ότι οι άνθρωποι περνούν σχεδόν το 87% του χρόνου τους σε εσωτερικούς χώρους, με το 62% του χρόνου τους στο Διαδίκτυο να είναι συνδεδεμένοι σε Wi-Fi, οι βελτιώσεις στην απόδοση του Wi-Fi θα είναι κεντρικής σημασίας για την εμπειρία χρήστη των υπηρεσιών ευρυζωνικής

σύνδεσης επόμενης γενιάς (Εικόνα 8) (Kanellos et al., 2023; E. Oughton et al., 2024; E. J. Oughton & Lehr, 2022).



Εικόνα 4.1 Βασικές τάσεις ζήτησης ασύρματης ευρυζωνικής πρόσβασης.

Είναι σημαντικό ότι το παραδοσιακό μοντέλο της συνεχώς αυξανόμενης κατανάλωσης δεδομένων ανά χρήστη φαίνεται να επιβραδύνεται, ένα φαινόμενο που πλέον αναφέρεται ευρέως ως «κορυφαίο smartphone». Ενώ αυτό έχει επηρεάσει την ανάπτυξη της κινητής ευρυζωνικής σύνδεσης, η κίνηση Wi-Fi συνεχίζει να αυξάνεται, όχι απαραίτητα λόγω των

smartphone, αλλά μάλλον λόγω νέων κατηγοριών συσκευών και εφαρμογών που απαιτούν μεγάλο εύρος ζώνης και βασίζονται κυρίως στη συνδεσιμότητα Wi-Fi. Για παράδειγμα, οι έξυπνες τηλεοράσεις, τα ακουστικά XR και οι πλατφόρμες cloud gaming δημιουργούν όλες υψηλή ζήτηση εύρους ζώνης σε εσωτερικούς χώρους, αλλά σπάνια εξαρτώνται από δίκτυα κινητής τηλεφωνίας.

Η στροφή προς τη σύγκλιση σταθερών-ασύρματων δικτύων και η αυξανόμενη σημασία των ιδιωτικών εγκαταστάσεων Wi-Fi σε βιομηχανικά περιβάλλοντα - όπως έξυπνα εργοστάσια και εγκαταστάσεις υγειονομικής περίθαλψης - υπογραμμίζει περαιτέρω την ανάγκη το Wi-Fi 8 να παρέχει αξιοπιστία και απόδοση εταιρικού επιπέδου. Αυτά τα περιβάλλοντα απαιτούν ολόένα και περισσότερο ντετερμινιστική Ποιότητα Υπηρεσίας (QoS), κάτι που το Wi-Fi 7 έχει αρχίσει να αντιμετωπίζει, αλλά το Wi-Fi 8 στοχεύει να βελτιώσει σημαντικά.

Ως εκ τούτου, ενώ το Wi-Fi 7 αναμένεται να κυριαρχήσει στις εγκαταστάσεις μέχρι τα τέλη της δεκαετίας του 2020, το Wi-Fi 8 αναδεικνύεται ως το πρότυπο που είναι έτοιμο να αντιμετωπίσει το τοπίο ζήτησης μετά το 2030. Αυτό περιλαμβάνει την υποστήριξη εφαρμογών μεγάλης κλίμακας, ευαίσθητων στην καθυστέρηση και κρίσιμων για την αποστολή εφαρμογών - πολλές από τις οποίες θα συμπληρώσουν ή θα ανταγωνιστούν τις αναδυόμενες υπηρεσίες 6G (Kanellos et al., 2023; Oh et al., 2022; E. Oughton et al., 2024; E. J. Oughton & Lehr, 2022).

Επομένως, η πορεία της ανάπτυξης του Wi-Fi δεν πρέπει να θεωρείται μεμονωμένα, αλλά μάλλον ως μέρος μιας ευρύτερης εξέλιξης του οικοσυστήματος που απαιτεί πολιτική με προσανατολισμό στο μέλλον, κατανομή φάσματος και τεχνολογικό συντονισμό. Καθώς τα περιβάλλοντα χρήσης γίνονται πιο ετερογενή και με υψηλά διακυβεύματα, ο στρατηγικός σχεδιασμός για το Wi-Fi 8 θα πρέπει να ξεκινήσει τώρα.

4.2 Περιπτώσεις Χρήσης Wi-Fi 8 και Αναδυόμενα Τεχνικά Χαρακτηριστικά

Το Wi-Fi έχει εξελιχθεί σημαντικά τις τελευταίες δύο δεκαετίες, μετατρέποντας το από μια λύση συνδεσιμότητας για καταναλωτές με την καλύτερη δυνατή προσπάθεια σε μια πλατφόρμα υψηλής χωρητικότητας, πολλαπλών gigabit που υποστηρίζει ένα ευρύ φάσμα συσκευών και υπηρεσιών. Από τα πρώτα πρότυπα IEEE 802.11b/g έως τις βελτιώσεις

υψηλής απόδοσης που εισήχθησαν στο Wi-Fi 5 (802.11ac) και το Wi-Fi 6/6E (802.11ax), κάθε γενιά έχει ανταποκριθεί στις αυξανόμενες απαιτήσεις σε ταχύτητα, φασματική απόδοση και πυκνότητα συσκευών. Πιο πρόσφατα, το Wi-Fi 7 (802.11be) εισήγαγε δυνατότητες όπως Λειτουργία Πολλαπλών Συνδέσεων (MLO), κανάλια 320 MHz και 16 χωρικές ροές, προσφέροντας ένα σημαντικό άλμα στην απόδοση και την καθυστέρηση (Bellalta et al., 2023; Bonati et al., 2023).

Ενώ το Wi-Fi 7 μόλις αρχίζει να εισέρχεται στην αγορά σε μεγάλη κλίμακα, οι συζητήσεις σχετικά με την επόμενη γενιά - Wi-Fi 8 (802.11 δισεκατομμύρια) - βρίσκονται ήδη σε εξέλιξη στο πλαίσιο της Ομάδας Εργασίας IEEE 802.11 Εξαιρετικά Υψηλής Απόδοσης (EHT). Αν και βρίσκεται ακόμη στο αρχικό στάδιο της πρότασης, το Wi-Fi 8 αναμένεται να υποστηρίξει βασικές μελλοντικές εφαρμογές, όπως XR/VR εξαιρετικά χαμηλής καθυστέρησης, βιομηχανικό αυτοματισμό, υπηρεσίες edge που βασίζονται στην τεχνητή νοημοσύνη και συνεργατικά περιβάλλοντα σε πραγματικό χρόνο. Όπως και με το 6G στον κυψελοειδή τομέα, η προβολή στο Wi-Fi 8 συνεπάγεται ένα βαθμό εικασιών. Ωστόσο, οι πρόσφατες εξελίξεις υποδηλώνουν μια σαφή πορεία όσον αφορά τόσο τα τεχνικά χαρακτηριστικά όσο και τις περιπτώσεις κοινωνικής χρήσης (Shafie et al., 2023; Zhang et al., 2024).

Στον πυρήνα του, το Wi-Fi 8 θα βασιστεί στα θεμέλια πολλαπλών ζωνών και υψηλής απόδοσης του Wi-Fi 7, με βελτιώσεις στον ντετερμινισμό της καθυστέρησης, την αξιοπιστία του δικτύου και την ενεργειακή απόδοση. Αυτές οι βελτιώσεις είναι ιδιαίτερα σημαντικές για εφαρμογές που απαιτούν χρόνο και περιβάλλοντα κρίσιμης σημασίας, όπως ο ρομποτικός έλεγχος, η απομακρυσμένη υγειονομική περίθαλψη και η εμβυθιστική ψηφιακή εκπαίδευση. Αυτές οι περιπτώσεις χρήσης ευθυγραμμίζονται με παγκόσμιες προτεραιότητες, όπως οι Στόχοι Βιώσιμης Ανάπτυξης (SDGs) των Ηνωμένων Εθνών, οι οποίοι δίνουν έμφαση στην ενταξιακή συνδεσιμότητα και την ψηφιακή υποδομή για όλους (Bonati et al., 2023; E. Oughton et al., 2024; Shafie et al., 2023).

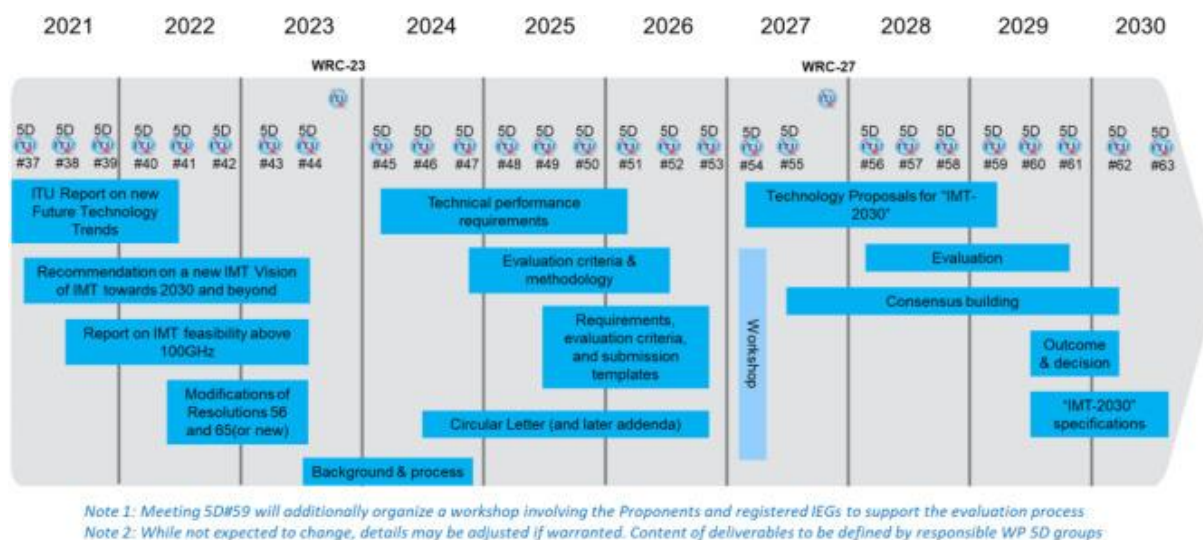
Βασικοί τεχνικοί τομείς που εξετάζονται για το Wi-Fi 8 περιλαμβάνουν:

(i) Βελτιστοποιήσεις επιπέδου MAC εγγενούς τεχνητής νοημοσύνης, όπου οι αλγόριθμοι μηχανικής μάθησης διαχειρίζονται δυναμικά την πρόσβαση στα κανάλια, τις παρεμβολές και τη συμπεριφορά των χρηστών σε πραγματικό χρόνο.

- (ii) Βελτιωμένη επαναχρησιμοποίηση συχνότητας και χωρική πολυπλεξία, ενδεχομένως ενσωματώνοντας στρατηγικές συντονισμού πολλαπλών σημείων πρόσβασης χωρίς κυψέλες.
- (iii) Εγγυήσεις ντετερμινιστικής καθυστέρησης και αξιοπιστίας, για την υποστήριξη βιομηχανικών και απτικών εφαρμογών διαδικτύου.
- (iv) Τρόποι μετάδοσης με επίγνωση ισχύος για την υποστήριξη συσκευών εξαιρετικά χαμηλής ενέργειας και παθητικών ετικετών IoT και
- (v) Πρωτόγονα ασφαλείας ενσωματωμένα σε επίπεδο PHY/MAC, επιτρέποντας την ανίχνευση ανωμαλιών σε πραγματικό χρόνο και προσαρμοστικά κρυπτογραφικά πρωτόκολλα (Shen et al., 2023).

Παρόλο που οι Βασικοί Δείκτες Απόδοσης (KPI) για το Wi-Fi 8 εξακολουθούν να αναδύονται, οι προκαταρκτικοί στόχοι περιλαμβάνουν απόδοση single link άνω των 100 Gbps, καθυστέρηση κάτω του 1 ms και βελτιώσεις ενέργειας ανά bit τουλάχιστον 3 φορές σε σχέση με το Wi-Fi 7. Το Wi-Fi 8 μπορεί επίσης να αυξήσει το εύρος λειτουργικών συχνοτήτων του περαιτέρω στην άνω ζώνη των 6 GHz ή ενδεχομένως σε ζώνες κάτω των terahertz, ανάλογα με τις κανονιστικές εξελίξεις και τη διαθεσιμότητα του φάσματος (E. Oughton et al., 2024; Shen et al., 2023).

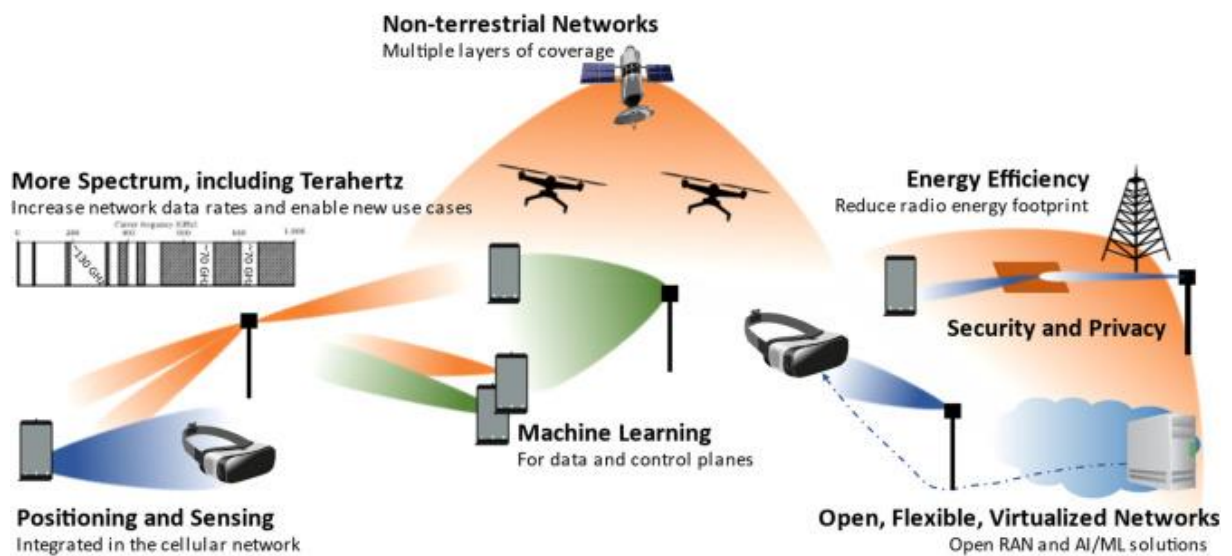
Το Wi-Fi 8 αναδύεται ως ένα εννοιολογικό πλαίσιο και όχι ως ένα οριστικοποιημένο πρότυπο, αλλά οι πρώτες συζητήσεις εντός των κοινοτήτων του IEEE και της έρευνας αναδεικνύουν διάφορους τομείς καινοτομίας. Αυτές περιλαμβάνουν βελτιώσεις στη συσσωμάτωση καναλιών, τη Λειτουργία Πολλαπλών Συνδέσμων (MLO), την ντετερμινιστική καθυστέρηση, την ενσωμάτωση τεχνητής νοημοσύνης και τις προηγμένες τεχνικές διαμόρφωσης. Οι ακόλουθες ενότητες συζητούν αυτές τις τεχνολογίες όχι μόνο όσον αφορά τα πιθανά οφέλη αλλά και με μια κριτική προοπτική σχετικά με τους περιορισμούς και τη σκοπιμότητά τους.



Εικόνα 4.2 Χρονοδιάγραμμα της IMT προς το 2030 και μετά (τυποποίηση 6G) (E. Oughton et al., 2024; Shen et al., 2023)

Η ευρύτερη αρχιτεκτονική δικτύου θα αλλάξει επίσης με το Wi-Fi 8. Είναι πιθανό να υιοθετήσει περαιτέρω την έννοια του "Wi-Fi ως υποδομή", ενσωματώνοντας πιο στενά τα δίκτυα σταθερής πρόσβασης, τους ελεγκτές δικτύου που ορίζονται από λογισμικό και την ενορχήστρωση που βασίζεται στο cloud. Αυτή η αλλαγή παραδείγματος θα είναι ιδιαίτερα ωφέλιμη για τις αναπτύξεις σε επιχειρήσεις, πανεπιστημιούπολεις και δημόσιους χώρους, όπου η ποιότητα υπηρεσίας (QoS) και η αξιοπιστία του δικτύου είναι κρίσιμες για τις επιχειρήσεις. Επιπλέον, με την κίνηση Wi-Fi να αποτελεί πλέον την πλειονότητα της χρήσης ευρυζωνικής σύνδεσης σε εσωτερικούς χώρους —και τα εσωτερικά περιβάλλοντα να αντιπροσωπεύουν έως και το 87% της ανθρώπινης δραστηριότητας— ο ρόλος του Wi-Fi 8 στην παροχή απρόσκοπτης, υψηλής χωρητικότητας συνδεσιμότητας σε εσωτερικούς χώρους καθίσταται ολοένα και πιο στρατηγικός (Kalem et al., 2021; E. J. Oughton & Lehr, 2022).

Όπως πολλά από τα βασικά αρχιτεκτονικά χαρακτηριστικά του 5G μπορεί να φτάσουν στην πλήρη ωριμότητά τους μόνο εντός δικτύων 6G, αναμένεται ότι αρκετές από τις φιλοδοξίες που έχουν τεθεί για το Wi-Fi 7 θα τελειοποιηθούν και θα επεκταθούν στο Wi-Fi 8. Αυτές περιλαμβάνουν τον συντονισμό πολλαπλών συνδέσεων, τη βελτιστοποίηση διαστρωματικών επιπέδων και τα προγραμματιζόμενα ραδιόφωνα, πολλά από τα οποία απαιτούν μια πιο ενοποιημένη και έξυπνη αρχιτεκτονική MAC για να λειτουργούν αποτελεσματικά υπό πραγματικούς περιορισμούς.



Εικόνα 4.3 Βασικές πτυχές του δικτύου 6G.

Τελικά, η ανάπτυξη του Wi-Fi 8 θα διαμορφωθεί όχι μόνο από τις απαιτήσεις των χρηστών και των εφαρμογών, αλλά και από κανονιστικές παραμέτρους, οικονομικές επιταγές και τη σύγκλιση των σταθερών και κινητών οικοσυστημάτων. Τα βασικά ζητήματα πολιτικής που προχωρούν περιλαμβάνουν την αποτελεσματική διακυβέρνηση του κοινού φάσματος, τη διαλειτουργικότητα με ιδιωτικά και εταιρικά δίκτυα και την εγγύηση της βασικής απόδοσης σε μη αδειοδοτημένα περιβάλλοντα. Αυτές οι προκλήσεις θα απαιτήσουν στενό συντονισμό μεταξύ των φορέων τυποποίησης (π.χ., IEEE, Wi-Fi Alliance), των εθνικών ρυθμιστικών αρχών και των ενδιαφερόμενων μερών του κλάδου, ώστε να διασφαλιστεί ότι το Wi-Fi 8 ανταποκρίνεται στις ανάγκες συνδεσιμότητας της δεκαετίας του 2030 (Kalem et al., 2021; E. Oughton et al., 2024; Shen et al., 2023).

4.2.1. Μηχανική Μάθηση (ML) για τη Διαχείριση Δικτύου Wi-Fi

Η ενσωμάτωση της μηχανικής μάθησης (ML) σε δίκτυα Wi-Fi αναδεικνύεται ως βασικός παράγοντας για την έξυπνη βελτιστοποίηση και αυτοματοποίηση δικτύων στην εποχή του Wi-Fi 8. Ενώ οι τεχνικές ML έχουν υιοθετηθεί ευρέως σε καταναλωτικές και εταιρικές εφαρμογές, η χρήση τους στη διαχείριση ασύρματων δικτύων είναι ακόμη σε αρχικό στάδιο, ειδικά σε περιβάλλοντα υψηλής πυκνότητας χωρίς άδεια. Το Wi-Fi 8 αναμένεται να

προχωρήσει περαιτέρω αυτήν την ενσωμάτωση ενσωματώνοντας μηχανισμούς με τη βοήθεια ML στο επίπεδο Ελέγχου Πρόσβασης Μέσου (MAC) για τη δυναμική βελτιστοποίηση της χρήσης του φάσματος, της αποφυγής παρεμβολών, της διαχείρισης ενέργειας και της ποιότητας υπηρεσίας (QoS) (Nguyen et al., 2021).

Οι αρχιτεκτονικές Wi-Fi 8 με δυνατότητα ML μπορούν να αξιοποιήσουν μηχανισμούς συμπερασμάτων ακμών που έχουν εκπαιδευτεί σε τοπικά πρότυπα κυκλοφορίας για την προληπτική αντιμετώπιση της συμφόρησης, της καθυστέρησης πρόσβασης καναλιών, ακόμη και των βλαβών του φυσικού επιπέδου. Αυτά τα μοντέλα θα μπορούσαν να προβλέψουν την πυκνότητα χρηστών, να προβλέψουν την πληρότητα του φάσματος σε όλες τις ζώνες ή να κάνουν αυτόνομη εναλλαγή μεταξύ πολλαπλών σημείων πρόσβασης (AP) ή συνδέσμων (π.χ., μέσω λειτουργίας πολλαπλών συνδέσμων). Παρά την πολλά υποσχόμενη πρόοδο, παραμένουν σημαντικά εμπόδια, όπως (i) η εξηγησιμότητα και η αξιοπιστία των μοντέλων ML σε ασύρματα περιβάλλοντα πραγματικού χρόνου, (ii) η έλλειψη σχολιασμένων συνόλων δεδομένων μεγάλης κλίμακας για εκπαίδευση, (iii) η πρόκληση της γενίκευσης σε ετερογενείς αναπτύξεις και (iv) οι περιορισμοί πόρων σε επίπεδο συσκευής και σημείου πρόσβασης (Nguyen et al., 2021; Shen et al., 2023; Tataria et al., 2022)

Μια ιδιαίτερα σημαντική εξέλιξη είναι η δυνατότητα για ομόσπονδη μάθηση σε όλα τα σημεία πρόσβασης, επιτρέποντας την κατανεμημένη μάθηση χωρίς κεντρική συγκέντρωση δεδομένων - μια κρίσιμη παράμετρος για την προστασία της ιδιωτικής ζωής και το εύρος ζώνης. Ωστόσο, αυτές οι καινοτομίες θα εγείρουν νέες πολιτικές και ηθικές ανησυχίες, συμπεριλαμβανομένου του τρόπου διασφάλισης ότι οι αποφάσεις δικτύου που βασίζονται στην μηχανική μάθηση είναι διαφανείς, δίκαιες και υπεύθυνες, ιδιαίτερα σε δημόσιες αναπτύξεις Wi-Fi (E. Oughton et al., 2024).

4.2.2 Μη Επίγεια Συνδεσιμότητα και Επέκταση Wi-Fi

Ενώ το Wi-Fi παραδοσιακά περιοριζόταν σε επίγεια εσωτερικά περιβάλλοντα, αυξάνεται το ενδιαφέρον για την επέκταση των δυνατοτήτων Wi-Fi σε μη επίγειες πλατφόρμες, όπως δορυφόρους χαμηλής τροχιάς, UAV και πλατφόρμες μεγάλου υψομέτρου (HAP). Αυτό είναι ιδιαίτερα σημαντικό για το Wi-Fi 8, το οποίο μπορεί να εξελιχθεί για να υποστηρίξει περιορισμένες μορφές λειτουργικότητας εναέριων και διαστημικών hotspot σε σενάρια έκτακτης ανάγκης, αγροτικά ή θαλάσσια. Τέτοιες εξελίξεις ευθυγραμμίζονται με το

αυξανόμενο όραμα της παγκόσμιας απρόσκοπτης πρόσβασης στο ευρυζωνικό δίκτυο, ειδικά καθώς τα υβριδικά μοντέλα χρήσης φάσματος (με άδεια, χωρίς άδεια και κοινόχρηστα) εξετάζονται ολοένα και περισσότερο σε όλους τους κάθετους τομείς (Zhou et al., 2022).

Οι βασικές προκλήσεις περιλαμβάνουν την προσαρμογή των πρωτοκόλλων Wi-Fi ώστε να ανέχονται υψηλή καθυστέρηση, μετατοπίσεις Doppler και υποβάθμιση σήματος που είναι τυπική για τα εναέρια περιβάλλοντα. Επιπλέον, ο ρυθμιστικός συντονισμός σχετικά με τη χρήση φάσματος χωρίς άδεια στον αέρα και το διάστημα παραμένει ένα ανεπίλυτο ζήτημα πολιτικής. Όπως και με το 6G, η ενσωμάτωση με μη επίγειες πλατφόρμες εισάγει πολυπλοκότητα στη διαχείριση του φάσματος, τον μετριάσμό των παρεμβολών και τον διατομεακό συντονισμό, εγείροντας νέα ερωτήματα σχετικά με τη διακυβέρνηση, τη συνύπαρξη και την επιβολή του φάσματος (E. J. Oughton & Lehr, 2022).

4.2.3 Ραδιοφωνική Εντοπισμός και Αισθητήρας στο Wi-Fi 8

Οι δυνατότητες ανίχνευσης και εντοπισμού μέσω ραδιοσυχνοτήτων έχουν πρόσφατα αναδειχθεί ως μια νέα περίπτωση χρήσης για δίκτυα Wi-Fi, ιδιαίτερα με την τυποποίηση IEEE 802.11bf που βρίσκεται σε εξέλιξη για την ανίχνευση Wi-Fi. Το Wi-Fi 8 αναμένεται να ενισχύσει περαιτέρω αυτό το γεγονός αξιοποιώντας εξαιρετικά ευρύ εύρος ζώνης, μετρήσεις χρόνου πτήσης (ToF) υψηλής ανάλυσης και εκτιμήσεις γωνίας άφιξης (AoA) με βάση το MIMO, για να επιτρέψει την ανίχνευση χωρίς συσκευές, την αναγνώριση δραστηριότητας και τον ακριβή εντοπισμό (E. J. Oughton & Lehr, 2022; Shafie et al., 2023).

Αυτό ανοίγει μια ποικιλία εφαρμογών, όπως η παρακολούθηση ηλικιωμένων, η εκτίμηση πληρότητας, η αναγνώριση χειρονομιών και η πλοήγηση εντός κτιρίου, όλα χρησιμοποιώντας υπάρχουσες υποδομές. Ωστόσο, η ενσωμάτωση λειτουργιών ανίχνευσης σε καθημερινά συστήματα συνδεσιμότητας εισάγει σημαντικούς κινδύνους για την ιδιωτικότητα και τη διακυβέρνηση δεδομένων. Δεδομένου ότι τα σήματα RF μπορούν να αντανakλούν προσωπικά δεδομένα συμπεριφοράς, απαιτείται ιδιαίτερη προσοχή στην πολιτική για τον προσδιορισμό της νομιμότητας, της ασφάλειας και της ηθικής χρήσης τέτοιων πληροφοριών, ειδικά όταν μπορούν να συναχθούν έμμεσα προσωπικά αναγνωρίσιμα στοιχεία.

4.2.4 Επέκταση Φάσματος: Άνω 6 GHz και Υπο-Τεραχέρτζ για Wi-Fi 8

Το φάσμα παραμένει ο θεμελιώδης πόρος για κάθε ασύρματη καινοτομία και το Wi-Fi 8 δεν αποτελεί εξαίρεση. Μετά τις πρόσφατες κατανομές στη ζώνη των 6 GHz (5,925–7,125 GHz) για Wi-Fi 6E και Wi-Fi 7, η βιομηχανία στρέφεται προς περαιτέρω επέκταση στην άνω μεσαία ζώνη (7–15 GHz) και μάλιστα διερευνά συχνότητες υπο-τεραχέρτζ (100–300 GHz) για τον μακροπρόθεσμο χάρτη πορείας του IEEE 802.11 (Bellalta et al., 2023).

Η άνω μεσαία ζώνη (συχνά αναφέρεται ως FR3) παρέχει μια ελκυστική ανταλλαγή μεταξύ κάλυψης και εύρους ζώνης και εξετάζεται για τη συνύπαρξη τόσο της κινητής τηλεφωνίας όσο και του Wi-Fi. Ωστόσο, οι προκλήσεις συνύπαρξης με τους κατεστημένους φορείς — όπως οι σταθερές δορυφορικές υπηρεσίες — πρέπει να αντιμετωπιστούν μέσω δυναμικής κοινής χρήσης φάσματος, ανίχνευσης παρεμβολών και μηχανισμών γεωγραφικής περίφραξης. Εν τω μεταξύ, το Wi-Fi sub-THz, αν και σε μεγάλο βαθμό πειραματικό, έχει επιδείξει μέγιστη απόδοση που υπερβαίνει τα 100 Gbps, καθιστώντας το βιώσιμο για εφαρμογές εξαιρετικά μικρής εμβέλειας, όπως επικοινωνία chip-to-chip, ροή επαυξημένης πραγματικότητας ή ασύρματους σταθμούς σύνδεσης (Shafie et al., 2023; Testolina et al., 2024).

Όπως και με το 6G, η επέκταση του Wi-Fi 8 σε αυτές τις υψηλότερες ζώνες θα απαιτήσει ιδιαίτερη προσοχή στις πολιτικές ανακατανομής φάσματος, τη διεθνή εναρμόνιση και την αντίληψη του δημόσιου κινδύνου, ιδίως όσον αφορά την περιβαλλοντική υγεία και την ηλεκτρομαγνητική έκθεση.

4.2.5 Ενεργειακή απόδοση

Η ενεργειακή απόδοση γίνεται ολοένα και πιο σημαντική ανησυχία στην εξέλιξη των τεχνολογιών Wi-Fi, με το Wi-Fi 8 να αναμένεται να διαδραματίσει κεντρικό ρόλο στη μείωση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων των ασύρματων δικτύων μικρής εμβέλειας. Ο αυξανόμενος αριθμός συνδεδεμένων συσκευών που είναι πάντα σε λειτουργία — που εκτείνεται σε καταναλωτικά ηλεκτρονικά είδη, εφαρμογές IoT και εταιρικά δίκτυα — έχει αυξήσει την επείγουσα ανάγκη για πιο βιώσιμες προσεγγίσεις στον σχεδιασμό τεχνολογίας πρόσβασης ραδιοσυχνοτήτων (RAT). Το Wi-Fi 8 εισάγει προηγμένες λειτουργίες ύπνου, έξυπνο προγραμματισμό και στρατηγικές χωρικής επαναχρησιμοποίησης που στοχεύουν

στην ελαχιστοποίηση της κατανάλωσης ενέργειας ανά μεταδιδόμενο bit, ακόμη και σε πυκνά περιβάλλοντα (Bellalta et al., 2023; Zhou et al., 2022)

Πέρα από τις καινοτομίες στο επίπεδο PHY/MAC, το Wi-Fi 8 αναμένεται επίσης να υιοθετήσει στρατηγικές σε επίπεδο δικτύου, όπως η πράσινη λειτουργία πολλαπλών συνδέσμων, η εξισορρόπηση φορτίου με τη βοήθεια της τεχνητής νοημοσύνης και ο προσαρμοστικός έλεγχος ισχύος μετάδοσης για την περαιτέρω μείωση της χρήσης ενέργειας σε λειτουργικό επίπεδο. Αυτές οι τεχνικές στοχεύουν στη βελτιστοποίηση της χρήσης ενέργειας ολιστικά, όχι μόνο σε επίπεδο σημείου πρόσβασης ή συσκευής, αλλά σε ολόκληρο το ασύρματο οικοσύστημα. Επιπλέον, καθώς τα χαρακτηριστικά που καταναλώνουν ενέργεια, όπως η εξαιρετικά υψηλή απόδοση (UHT) και οι λειτουργίες ανίχνευσης, καθίστανται στάνταρ, θα πρέπει να αξιολογηθούν οι συμβιβασμοί για την εξισορρόπηση της απόδοσης και της βιωσιμότητας (Bonati et al., 2023; Testolina et al., 2024).

Από άποψη πολιτικής, προκύπτουν αρκετές προκλήσεις. Σε αντίθεση με τους παρόχους δικτύων κινητής τηλεφωνίας (MNO), οι περισσότερες αναπτύξεις Wi-Fi διαχειρίζονται από χρήστες ή ανήκουν σε επιχειρήσεις, γεγονός που περιορίζει τα κεντρικά κίνητρα για τη μείωση των εκπομπών. Επομένως, οι κυβερνήσεις και οι φορείς τυποποίησης ενδέχεται να χρειαστεί να εφαρμόσουν συστήματα επισημάνσης ενεργειακής απόδοσης για τα σημεία πρόσβασης και κανονιστικά όρια για την κατανάλωση σε κατάσταση αναμονής (Zhang et al., 2024). Οι μηχανισμοί που βασίζονται στην αγορά, όπως τα προγράμματα πιστοποίησης ενεργειακής απόδοσης, θα μπορούσαν επίσης να αξιοποιηθούν για την ενθάρρυνση της υιοθέτησης πιο οικολογικού υλικού Wi-Fi. Μακροπρόθεσμα, πιθανότατα θα απαιτηθεί διεθνής συντονισμός για την ευθυγράμμιση των προτύπων ενεργειακής απόδοσης μεταξύ προμηθευτών και συσκευών.

4.2.6 Ασφάλεια και ιδιωτικότητα

Η ασφάλεια και το ιδιωτικό απόρρητο εξακολουθούν να αποτελούν κρίσιμες ανησυχίες για τα δίκτυα Wi-Fi, ιδίως καθώς το εύρος των περιπτώσεων χρήσης επεκτείνεται στο πλαίσιο του Wi-Fi 8. Ιστορικά, τα πρωτόκολλα Wi-Fi έχουν αντιμετωπίσει σημαντικές προκλήσεις, όπως η πλαστογράφηση, τα παραπλανητικά σημεία πρόσβασης (AP), τα αδύναμα σχήματα κρυπτογράφησης και διάφορες μορφές επιθέσεων επιπέδου MAC. Το Wi-Fi 8 στοχεύει στην ενίσχυση αυτής της βάσης μέσω της εισαγωγής προηγμένων μηχανισμών κρυπτογράφησης,

βελτιωμένων πρωτοκόλλων ελέγχου ταυτότητας συσκευών και βελτιωμένων προστασιών από επιθέσεις άρνησης υπηρεσίας και man-in-the-middle (Sun et al., 2020).

Συγκεκριμένα, η χρήση λειτουργίας πολλαπλών συνδέσμων, beamforming και cross-band coordination εισάγει νέους φορείς επίθεσης που απαιτούν πιο εξελιγμένα μοντέλα απειλών και προληπτικές άμυνες. Ομοίως, καθώς το Wi-Fi 8 επιτρέπει περισσότερες δυνατότητες παθητικής ανίχνευσης και περιβαλλοντικής ευαισθητοποίησης (π.χ. ανίχνευση κίνησης, παρακολούθηση τοποθεσίας), τα τρωτά σημεία της ιδιωτικότητας ενδέχεται να προκύψουν από ακούσια διαρροή δεδομένων ή μη εξουσιοδοτημένη εξαγωγή συμπερασμάτων για προσωπικές συμπεριφορές. Αυτές οι ανησυχίες επιδεινώνονται από την αυξανόμενη ενσωμάτωση του Wi-Fi σε τομείς έξυπνου σπιτιού, υγειονομικής περίθαλψης και βιομηχανικού IoT, όπου τα ευαίσθητα δεδομένα ρέουν μέσω μη διαχειριζόμενων και συχνά μη ασφαλών τοπικών δικτύων (Kanellos et al., 2023; E. Oughton et al., 2024; Shen et al., 2023).

Ως αποτέλεσμα, η μελλοντική ανάπτυξη πολιτικής πρέπει να επικεντρωθεί στη διασφάλιση αρχών ασφαλούς σχεδιασμού για το υλικό και το υλικολογισμικό του Wi-Fi 8, καθώς και στις διαμορφώσεις απορρήτου εξ ορισμού για τους τελικούς χρήστες. Μια πιθανή κατεύθυνση είναι η επιβολή υποχρεωτικών πιστοποιήσεων ασφαλείας για συσκευές Wi-Fi, ειδικά εκείνες που λειτουργούν σε περιβάλλοντα υψηλού κινδύνου, όπως δημόσιες υποδομές ή κρίσιμες υπηρεσίες. Επιπλέον, υπάρχει αυξανόμενη ανάγκη ευθυγράμμισης των προτύπων Wi-Fi με τους ευρύτερους εθνικούς και περιφερειακούς κανονισμούς κυβερνοασφάλειας και τους νόμους περί προστασίας δεδομένων (π.χ., GDPR, CCPA), ιδίως όταν οι συσκευές είναι ικανές να συνάγουν ή να μεταδίδουν προσωπικά αναγνωρίσιμες πληροφορίες (Bellalta et al., 2023; Tataria et al., 2022).

Βασικά συμπεράσματα

Το MLO επιτρέπει στις συσκευές να χρησιμοποιούν ταυτόχρονα πολλαπλές ζώνες συχνοτήτων (2,4, 5, 6 GHz και ενδεχομένως mmWave στο Wi-Fi 8). Αυτό βελτιώνει την απόδοση και την αξιοπιστία, καθώς η κίνηση μπορεί να δρομολογηθεί δυναμικά μέσω συνδέσμων. Θεωρητικά, αυτό θα μπορούσε να κάνει τις συνδέσεις Wi-Fi πιο ανθεκτικές στις παρεμβολές. Ωστόσο, το κατά πόσον το MLO είναι ώριμο για μαζική υιοθέτηση παραμένει αμφισβητήσιμο. Η απόδοσή του εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από την υποστήριξη

υλικού, την εναρμόνιση των κανονισμών και τους αποτελεσματικούς αλγόριθμους προγραμματισμού. Χωρίς αυτά, το MLO κινδυνεύει να γίνει ένα υποχρησιμοποιημένο χαρακτηριστικό, όπως και οι πρώιμες εφαρμογές MU-MIMO στο Wi-Fi 5.

Το Wi-Fi 8 φιλοδοξεί να φέρει την καθυστέρηση κάτω από 1 ms για να ανταγωνιστεί τις υποσχέσεις του 6G για ντετερμινιστική δικτύωση. Αυτό θα ήταν μετασχηματιστικό για την καθηλωτική AR/VR ή τον βιομηχανικό αυτοματισμό. Ωστόσο, δεδομένης της κοινόχρηστης και μη αδειοδοτημένης φύσης του φάσματος Wi-Fi, η επίτευξη ντετερμινιστικής καθυστέρησης μπορεί να παραμείνει ασαφής σε σύγκριση με τα αδειοδοτημένα, κεντρικά διαχειριζόμενα δίκτυα 6G.

Η βελτιστοποίηση δικτύου που βασίζεται στην Τεχνητή Νοημοσύνη - όπως η προσαρμοστική κατανομή πόρων, η ανίχνευση ανωμαλιών και ο προγνωστικός έλεγχος συμφόρησης - έχει επισημανθεί ως ακρογωνιαίος λίθος του Wi-Fi 8. Ενώ η Τεχνητή Νοημοσύνη υπόσχεται πιο έξυπνα δίκτυα, εισάγει επίσης νέους κινδύνους. Η αλγοριθμική μεροληψία θα μπορούσε να δώσει άδικη προτεραιότητα σε ορισμένες ροές κίνησης, ενώ η καθυστέρηση που εισάγεται από τη λήψη αποφάσεων σε πραγματικό χρόνο μπορεί να θέσει σε κίνδυνο εφαρμογές που είναι ευαίσθητες στον χρόνο. Επιπλέον, οι ανησυχίες για την προστασία της ιδιωτικής ζωής και την ασφάλεια των δεδομένων θα αυξηθούν εάν η διαχείριση του δικτύου εξαρτάται ολοένα και περισσότερο από μοντέλα τεχνητής νοημοσύνης που βασίζονται σε δεδομένα.

Οι εικασίες για το Wi-Fi 8 περιλαμβάνουν σχήματα διαμόρφωσης πέρα από το 4096-QAM, με στόχο την ακόμη υψηλότερη φασματική απόδοση. Ωστόσο, όπως και με προηγούμενες μεταβάσεις (π.χ., 64-QAM → 256-QAM), η ανάπτυξη στον πραγματικό κόσμο περιορίζεται από τις απαιτήσεις σήματος προς θόρυβο. Αυτό σημαίνει ότι αυτές οι τεχνικές μπορεί να ωφεληθούν μόνο τους χρήστες που βρίσκονται πολύ κοντά σε σημεία πρόσβασης, περιορίζοντας τη χρησιμότητά τους για ευρεία υιοθέτηση.

4.3 Αναδυόμενα Τεχνικά Χαρακτηριστικά των Wi-Fi 7 και Wi-Fi 8

Το Wi-Fi εξακολουθεί να χρησιμεύει ως βασικός παράγοντας για οικονομικά προσιτή και ευρεία πρόσβαση στο Διαδίκτυο. Σε οικιακά περιβάλλοντα, για παράδειγμα, οι χρήστες συνήθως βασίζονται σε ασύρματη συνδεσιμότητα που παρέχεται μέσω σταθερής ευρυζωνικής υποδομής - κυρίως Fiber-To-The-Premises (FTTP) - για πρόσβαση στο

Διαδίκτυο. Ενώ οι φορητοί και οι επιτραπέζιοι υπολογιστές ήταν κάποτε οι κύριες πηγές δεδομένων, τα σημερινά δίκτυα Wi-Fi υποστηρίζουν ένα ευρύ οικοσύστημα συνδεδεμένων έξυπνων συσκευών, όπως τηλεοράσεις, κουδούνια βίντεο, θερμοστάτες και συστήματα ασφαλείας. Σε δημόσιους χώρους όπως γραφεία και καφετέριες, το Wi-Fi παραμένει μια ζωτική μέθοδος για γρήγορη και απρόσκοπτη πρόσβαση στο Διαδίκτυο. Ο πολλαπλασιασμός των συσκευών με δυνατότητα Wi-Fi είναι εντυπωσιακός, με εκτιμήσεις που δείχνουν μια παγκόσμια αναλογία συσκευής προς άτομο 3:1, υπογραμμίζοντας την εκτεταμένη διείσδυση και χρησιμότητα της τεχνολογίας. Μόνο το 2022, αποστάλθηκαν περίπου 3,8 δισεκατομμύρια προϊόντα με δυνατότητα Wi-Fi (International Data Corporation, 2023) και οι εγκαταστάσεις δημόσιων σημείων πρόσβασης Wi-Fi προβλέπεται να αυξηθούν σε 628 εκατομμύρια το 2023, από 169 εκατομμύρια το 2018 (Cisco, 2020).

Το οικονομικό αποτύπωμα του Wi-Fi είναι εξίσου σημαντικό. Μια πρόσφατη μελέτη εκτίμησε την παγκόσμια οικονομική αξία του Wi-Fi σε 3,3 τρισεκατομμύρια δολάρια το 2021, με τις προσδοκίες να φτάσουν τα 4,9 τρισεκατομμύρια δολάρια έως το 2025. Αυτά τα στοιχεία λαμβάνουν υπόψη μια σειρά παραγόντων, όπως οι ανάγκες συνδεσιμότητας, οι προσπάθειες Έρευνας και Ανάπτυξης, η διαθεσιμότητα φάσματος και οι ευρύτερες μακροοικονομικές συνεισφορές (Wi-Fi Alliance and Telecom Advisory Services, 2021). Η πρόταση αξίας του Wi-Fi έχει αυξηθεί παράλληλα με σημαντικές βελτιώσεις στην απόδοση δεδομένων. Από την αρχή τους με μέγιστες ταχύτητες μόλις 1 Mbps, οι τεχνολογίες Wi-Fi υποστηρίζουν πλέον θεωρητικούς μέγιστους ρυθμούς που πλησιάζουν τα 30 Gbps, αντιπροσωπεύοντας μια αύξηση σχεδόν τεσσάρων τάξεων μεγέθους σε διάστημα δύομισι δεκαετιών (Galati-Giordano et al., 2024), η οποία επιτεύχθηκε χρησιμοποιώντας μη αδειοδοτημένο φάσμα.

Η ανάπτυξη της τεχνολογίας Wi-Fi καθοδηγείται κυρίως από δύο βασικούς οργανισμούς. Η Επιτροπή IEEE 802 είναι υπεύθυνη για τον ορισμό προτύπων που επικεντρώνονται στα πρωτόκολλα MAC και Physical Layer (PHY) για ασύρματα τοπικά δίκτυα (WLAN) (IEEE 802 LMSC, 2023; IEEE 802.11, 2023). Συμπληρώνοντας αυτό, η Wi-Fi Alliance πιστοποιεί τη διαλειτουργικότητα, την ασφάλεια και την απόδοση των προϊόντων, ενώ παράλληλα προωθεί την υιοθέτησή τους μέσω της υπεράσπισης της πολιτικής για το φάσμα και της συνεργασίας του κλάδου (Wi-Fi Alliance, 2023).

Το Wi-Fi 7, γνωστό και ως τροποποίηση Εξαιρετικά Υψηλής Απόδοσης (EHT), βρίσκεται επί του παρόντος σε τελική τυποποίηση, με αναμενόμενη ολοκλήρωση έως το 2024. Η

εμπορική κυκλοφορία αναμένεται να ακολουθήσει σύντομα μετά, αξιοποιώντας μη αδειοδοτημένες ζώνες φάσματος. Το Wi-Fi 7 εισάγει αρκετές βασικές βελτιώσεις που στοχεύουν στη δραματική αύξηση των ρυθμών δεδομένων και στη μείωση της καθυστέρησης. Αυτές περιλαμβάνουν: (i) ευρύτερα εύρη ζώνης καναλιών έως 320 MHz· (ii) σχήματα διαμόρφωσης και κωδικοποίησης υψηλότερης τάξης· (iii) αποτελεσματική χρήση κατακερματισμένου φάσματος μέσω κατανομής πολλαπλών μονάδων πόρων· (iv) υποστήριξη για λειτουργία πολλαπλών ζωνών και πολλαπλών καναλιών· και (v) βελτιωμένα χαρακτηριστικά ποιότητας υπηρεσίας (QoS), όπως περιορισμένος χρόνος αφύπνισης (C. Chen et al., 2022). Με μέγιστο ρυθμό δεδομένων που υπερβαίνει τα 40 Gbps - πάνω από τέσσερις φορές μεγαλύτερο από το Wi-Fi 6 - το Wi-Fi 7 σηματοδοτεί ένα σημαντικό άλμα προς τα εμπρός στην ασύρματη απόδοση.

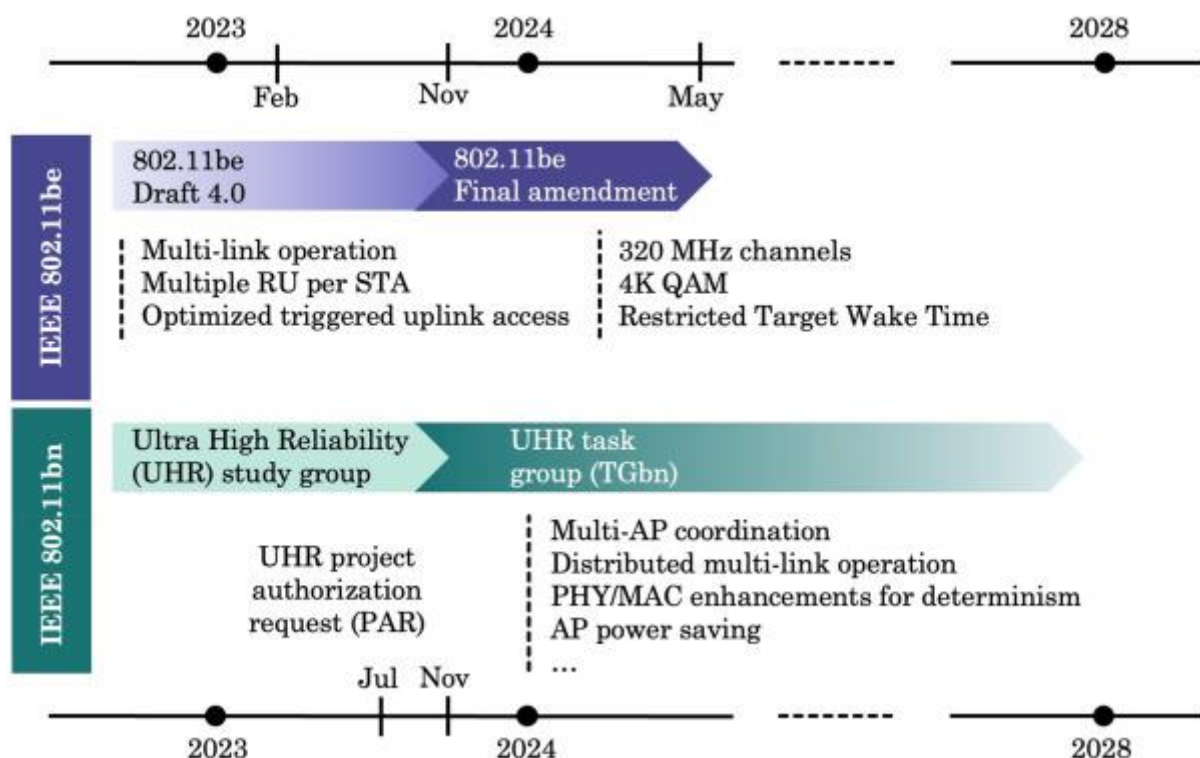
Πίνακας 4.1 Τεχνικές δυνατότητες σε όλα τα παλαιότερα και τα τρέχοντα ασύρματα πρότυπα.

Χαρακτηριστικό	Wi-Fi 4(802.11n)	Wi-Fi 5(802.11ac)	Wi-Fi 6/6E(802.11ax)	Wi-Fi 7(802.11be)	Wi-Fi 8(speculative)
Μέγιστος ρυθμός δεδομένων	600 Mbps	7 Gbps	9.6 Gbps	≤46.4 Gbps	>46.4 Gbps
Συχνότητα φορέα (GHz)	2.4, 5	5	2.4, 5, 6	2.4, 5, 6	2.4, 5, 6 (minimum)
Εύρος ζώνης καναλιού (MHz)	20, 40	20, 40, 80, 160	20, 40, 80, 160	Up to 320	>320
Πολυπλεξία συχνότητας	OFDM	OFDM	OFDM and OFDMA	OFDM and OFDMA	OFDM and OFDMA
Χρόνος συμβόλου OFDM (μs)	3.2	3.2	12.8	12.8	≥12.8
Διάστημα προστασίας (μs)	0.4, 0.08	0.4, 0.8	0.8, 1.6, or 3.2	0.8, 1.6, or 3.2	0.8, 1.6, or 3.2
Συνολικός χρόνος συμβόλου (μs)	3.6, 4.0	3.6, 4.0	13.6, 14.4, 16.0	13.6, 14.4, 16.0	13.6, 14.4, 16.0

Διαμόρφωση	≤64-QAM	≤256-QAM	≤1024-QAM	≤4096-QAM	>4096-QAM
MU-MIMO	N/A	DL	DL and UL	DL and UL	DL and UL
OFDMA	N/A	N/A	DL and UL	DL and UL	DL and UL
MIMO	4×4	8×8	8×8	8×8	16×16

Βασιζόμενο στην πρωτοποριακή χρήση της ζώνης των 6 GHz από το Wi-Fi 6, το Wi-Fi 7 βελτιώνει σημαντικά τις δυνατότητες με τεχνολογίες όπως η διαμόρφωση πλάτους τετραγωνικής διατομής 4K (QAM) και τα διευρυμένα πλάτη καναλιών (Au, 2023). Διατηρεί την υποστήριξη για ορθογώνια πολυπλεξία διαίρεσης συχνότητας (OFDM), ορθογώνια πολλαπλή πρόσβαση διαίρεσης συχνότητας (OFDMA) και MIMO πολλαπλών χρηστών (MU-MIMO) τόσο σε διαδρομές ανοδικής όσο και σε κατερχόμενης ζεύξης (IEEE P802.11be, 2023). Ένα μετασχηματιστικό χαρακτηριστικό στο Wi-Fi 7 είναι η λειτουργία πολλαπλών συνδέσμων (MLO), η οποία επιτρέπει στις συσκευές να διατηρούν ταυτόχρονες συνδέσεις σε πολλαπλά κανάλια. Το MLO είναι ιδιαίτερα ωφέλιμο σε περιβάλλοντα υψηλής πυκνότητας όπου μπορεί να αξιοποιήσει τα διαλείποντα παράθυρα μετάδοσης σε όλα τα κανάλια, βελτιώνοντας τόσο την απόδοση όσο και την καθυστέρηση σε σύγκριση με την παραδοσιακή λειτουργία μονής ζεύξης (Bellalta et al., 2023).

Όπως περιγράφεται στην Εικόνα 11, η ολοκλήρωση του Wi-Fi 7 προβλέπεται για το 2024, ευθυγραμμίζοντας την εμπορική του ωρίμανση με το ευρύτερο χρονοδιάγραμμα ανάπτυξης του 6G. Εν τω μεταξύ, η προσοχή μετατοπίζεται προς την επόμενη γενιά: το Wi-Fi 8, γνωστό και ως τροποποίηση εξαιρετικά υψηλής αξιοπιστίας (UHR). Προγραμματισμένη για τυποποίηση έως το 2028, το Wi-Fi 8 μετατοπίζει την έμφαση από τη μέγιστη απόδοση σε εξαιρετικά αξιόπιστη απόδοση χαμηλής καθυστέρησης (Galati-Giordano et al., 2024). Οι βασικοί τομείς ανάπτυξης περιλαμβάνουν: (i) διατηρήσιμη υψηλή απόδοση σε χαμηλότερες αναλογίες σήματος προς θόρυβο· (ii) μειώσεις στην καθυστέρηση και το jitter στην ουρά· (iii) βελτιωμένη φασματική επαναχρησιμοποίηση και μετριάσμο των παρεμβολών· και (iv) βελτιωμένη ενεργειακή απόδοση, συμπεριλαμβανομένης καλύτερης υποστήριξης για λειτουργίες peer-to-peer.



Εικόνα 4.4 Χρονοδιάγραμμα για Wi-Fi 7 και 8 (Galati-Giordano et al., 2024).

Παράλληλα με αυτές τις τεχνικές βελτιώσεις, η μηχανική μάθηση (ML) γίνεται αναπόσπαστο μέρος της τυποποίησης Wi-Fi. Μια ειδική ομάδα ενδιαφέροντος IEEE 802.11 ML διερευνά περιπτώσεις χρήσης όπως: (i) συμπίεση της ανατροφοδότησης κατάστασης καναλιού· (ii) κατανομημένη κοινή χρήση μοντέλου ML· και (iii) έξυπνες στρατηγικές πρόσβασης καναλιών (IEEE 802.11 AIML Topic Interest Group, 2023). Η ML θεωρείται επίσης ως πιθανός παράγοντας για σύνθετα χαρακτηριστικά όπως ο συντονισμός σημείων πολλαπλών προσβάσεων στο Wi-Fi 8.

Στο εμπορικό μέτωπο, αναδύονται επίσης νέα επιχειρηματικά μοντέλα. Η πρωτοβουλία OpenRoaming της Wireless Broadband Alliance προσφέρει μια ομόσπονδη προσέγγιση στην πρόσβαση Wi-Fi, επιτρέποντας την απρόσκοπτη και ασφαλή περιαγωγή σε δίκτυα που λειτουργούν από διαφορετικούς παρόχους - παρόμοια με το πλαίσιο Eduroam που χρησιμοποιείται σε ακαδημαϊκά περιβάλλοντα (Wireless Broadband Alliance, 2023). Αυτό το μοντέλο διευκολύνει την αυτόματη μεταβίβαση μεταξύ εξωτερικών κινητών και εσωτερικών συνδέσεων Wi-Fi, λύνοντας ενδεχομένως μια μακροχρόνια πρόκληση στην εξασφάλιση αδιάλειπτης συνδεσιμότητας σε εσωτερικούς χώρους, όπου τα κυψελοειδή σήματα συχνά έχουν κακή απόδοση.

Τέλος, ένα βασικό ζήτημα πολιτικής έγκειται στη διαθεσιμότητα του φάσματος, ιδίως όσον αφορά την πρόσβαση σε μη αδειοδοτημένες ζώνες στην περιοχή των 6 GHz. Οι παλαιές ζώνες των 2,4 και 5 GHz αντιμετωπίζουν σημαντική συμφόρηση, η οποία επηρεάζει την ποιότητα των υπηρεσιών για εφαρμογές όπως η ροή βίντεο και τα διαδικτυακά παιχνίδια. Η διασφάλιση επαρκούς κατανομής συνεχούς φάσματος των 6 GHz είναι κρίσιμη για την πλήρη αξιοποίηση των δυνατοτήτων του Wi-Fi 7 και πέραν αυτού. Χωρίς επαρκές εύρος ζώνης (π.χ., για κανάλια πλάτους 320 MHz), οι προσδοκίες απόδοσης για τις υπηρεσίες επόμενης γενιάς, συμπεριλαμβανομένων των καθηλωτικών εμπειριών AR/VR, ενδέχεται να μην είναι επαρκείς (Galati-Giordano et al., 2024; E. J. Oughton & Lehr, 2022).

4.4 Προώθηση Τεχνολογιών Wi-Fi: Wi-Fi 7 και Wi-Fi 8

Το Wi-Fi παραμένει μια θεμελιώδης τεχνολογία για οικονομικά αποδοτική πρόσβαση στο Διαδίκτυο, ιδιαίτερα σε εσωτερικούς χώρους όπως σπίτια, χώρους εργασίας και δημόσιους χώρους. Ενώ κάποτε χρησιμοποιούνταν κυρίως για τη σύνδεση φορητών και επιτραπέζιων υπολογιστών σε σταθερές ευρυζωνικές συνδέσεις - που τώρα παρέχονται όλο και περισσότερο μέσω οπτικών ινών (FTTP) - το Wi-Fi σήμερα υποστηρίζει ένα ευρύ οικοσύστημα έξυπνων συσκευών, όπως τηλεοράσεις, θερμοστάτες, κάμερες και άλλα. Σύμφωνα με πρόσφατες εκτιμήσεις, αναμένεται να υπάρχουν περίπου τρεις συσκευές με δυνατότητα Wi-Fi ανά άτομο παγκοσμίως, υπογραμμίζοντας τον κρίσιμο ρόλο που διαδραματίζει το Wi-Fi στην ψηφιακή συνδεσιμότητα (Cisco, 2020). Μόνο το 2022, 3,8 δισεκατομμύρια συσκευές Wi-Fi αποστάλθηκαν παγκοσμίως και τα δημόσια σημεία πρόσβασης Wi-Fi προβλέπεται να φτάσουν τα 628 εκατομμύρια έως το 2023, από 169 εκατομμύρια το 2018.

Οι οικονομικές αποτιμήσεις υπογραμμίζουν περαιτέρω τη σημασία του Wi-Fi. Μία εκτίμηση τοποθετεί την παγκόσμια οικονομική συνεισφορά της τεχνολογίας στα 3,3 τρισεκατομμύρια δολάρια το 2021, φτάνοντας τα προβλεπόμενα 4,9 τρισεκατομμύρια δολάρια έως το 2025, λαμβάνοντας υπόψη τόσο τις άμεσες όσο και τις έμμεσες επιπτώσεις (Wi-Fi Alliance & Telecom Advisory Services, 2021). Αυτά τα στοιχεία αντικατοπτρίζουν την αυξανόμενη χρησιμότητα, την προστιθέτιμη και την απόδοσή της. Από την έναρξή της, οι ταχύτητες δεδομένων Wi-Fi έχουν αυξηθεί από μόλις 1 Mbps σε σχεδόν 30 Gbps, αξιοποιώντας το μη αδειοδοτημένο φάσμα για την παροχή ασύρματων υπηρεσιών υψηλής ταχύτητας με σχετικά χαμηλό κόστος (Galati Giordano et al., 2023).

Δύο κύριοι οργανισμοί καθοδηγούν την εξέλιξη του Wi-Fi. Η Επιτροπή IEEE 802 είναι υπεύθυνη για τον καθορισμό προτύπων γύρω από τα επίπεδα MAC και PHY των Ασύρματων Τοπικών Δικτύων (WLAN), ενώ η Wi-Fi Alliance επικεντρώνεται στην πιστοποίηση προϊόντων, την ασφάλεια, τη διαλειτουργικότητα και την υιοθέτηση από την αγορά (IEEE 802 LMSC, 2023).

Το Wi-Fi 7, το οποίο βρίσκεται επί του παρόντος στην τελική φάση τυποποίησής του (αναμένεται έως το 2024), εισάγει μια σειρά από τεχνικές βελτιώσεις στο πλαίσιο της εξαιρετικά υψηλής απόδοσης (EHT). Αυτές περιλαμβάνουν ευρύτερα εύρη ζώνης καναλιών έως και 320 MHz, πιο προηγμένα σχήματα διαμόρφωσης (π.χ., 4K QAM), συσσωμάτωση πολλαπλών ζωνών και βελτιωμένους μηχανισμούς ποιότητας υπηρεσίας (QoS), όπως περιορισμένο χρόνο αφύπνισης Target (C. Chen et al., 2022). Το Wi-Fi 7 αναμένεται να προσφέρει θεωρητικές μέγιστες ταχύτητες άνω των 40 Gbps - περισσότερες από τέσσερις φορές υψηλότερες από το Wi-Fi 6. Βασικά χαρακτηριστικά όπως η λειτουργία πολλαπλών συνδέσμων (MLO) επιτρέπουν στις συσκευές να χρησιμοποιούν πολλαπλά κανάλια ταυτόχρονα, παρέχοντας σημαντικές μειώσεις καθυστέρησης και βελτιώσεις στην απόδοση σε περιβάλλοντα με συμφόρηση (Bellalta et al., 2023).

Το Wi-Fi 8, το οποίο αναμένεται να κυκλοφορήσει αργότερα αυτή τη δεκαετία με στόχο την ολοκλήρωσή του έως το 2028, αναπτύσσεται στο πλαίσιο της πρωτοβουλίας Ultra High Reliability (UHR). Σε αντίθεση με τις προηγούμενες γενιές που επικεντρώνονταν κυρίως στην αύξηση των μέγιστων ρυθμών δεδομένων, το Wi-Fi 8 στοχεύει στην παροχή εξαιρετικά χαμηλής καθυστέρησης με ντετερμινιστική απόδοση. Οι βασικές τεχνικές προτεραιότητες περιλαμβάνουν βελτιωμένη απόδοση υπό χαμηλούς λόγους σήματος προς παρεμβολή συν θόρυβο (SINR), μειωμένο jitter και ουρές καθυστέρησης, βελτιωμένη φασματική επαναχρησιμοποίηση και μεγαλύτερη ενεργειακή απόδοση (Galati Giordano et al., 2023). Το IEEE έχει ήδη ξεκινήσει μια Ολοκληρωμένη Ομάδα Μελέτης mmWave για να διερευνήσει τη σκοπιμότητα χρήσης υψηλότερων ζωνών φάσματος, όπως τα 45 GHz και 60 GHz.

Μια άλλη καινοτομία στο Wi-Fi 8 είναι ο στενότερος συντονισμός σημείων πρόσβασης (AP), που ενδεχομένως υποστηρίζεται από Μηχανική Μάθηση (ML). Η ομάδα εργασίας IEEE 802.11 έχει δημιουργήσει μια ειδική ομάδα ενδιαφέροντος AI/ML που διερευνά περιπτώσεις χρήσης όπως η συμπίεση πληροφοριών κατάστασης καναλιού (CSI), η διανομή

μοντέλων μάθησης και η ενεργοποίηση κατανεμημένων καναλιών που βασίζονται σε ML (IEEE 802.11 AIML, 2023).

Πέρα από την τεχνική εξέλιξη, αναδύονται νέα επιχειρηματικά μοντέλα. Για παράδειγμα, η πρωτοβουλία OpenRoaming της Wireless Broadband Alliance επιδιώκει να επιτρέψει απρόσκοπτες και ασφαλείς μεταβάσεις μεταξύ δικτύων που λειτουργούν από διαφορετικούς παρόχους, μειώνοντας την τριβή για τους χρήστες και ενδεχομένως μειώνοντας το βάρος στα δίκτυα κινητής τηλεφωνίας σε εσωτερικούς χώρους - ειδικά σε τοποθεσίες υψηλής πυκνότητας.

Μια κρίσιμη πολιτική ανησυχία στο μέλλον είναι η κατανομή φάσματος, ιδιαίτερα γύρω από τη ζώνη των 6 GHz. Με τη μεγάλη συμφόρηση στις περιοχές των 2,4 και 5 GHz, οι εφαρμογές υψηλού εύρους ζώνης, όπως η ροή βίντεο και η εικονική πραγματικότητα (VR), εξαρτώνται όλο και περισσότερο από ευρύτερα, καθαρότερα κανάλια. Ωστόσο, η μερική κατανομή φάσματος των 6 GHz μπορεί να υποστηρίζει μόνο έναν περιορισμένο αριθμό καναλιών 320 MHz ή 160 MHz - ανεπαρκής για τις μελλοντικές απαιτήσεις των καταναλωτών. Η διασφάλιση επαρκούς μη αδειοδοτημένου φάσματος είναι απαραίτητη για την πλήρη αξιοποίηση των δυνατοτήτων του Wi-Fi 7 και του Wi-Fi 8 (Galati-Giordano et al., 2024; E. J. Oughton et al., 2021).

Στη συνέχεια παρουσιάζονται στον Πίνακα 7 οι διαφορετικές τεχνολογίες κινητής τηλεφωνίας και Wi-Fi, οι οποίες συγκρίνονται με βάση τις βασικές μηχανικές και οικονομικές πτυχές, λαμβάνοντας υπόψη σημαντικά ζητήματα πολιτικής.

Πίνακας 4.2 Προοπτική σύγκριση των πιθανών χαρακτηριστικών του 6G και του Wi-Fi 7/8.

Κατηγορία	Μεταβλητή	6G	Wi-Fi 7	Wi-Fi 8 (speculative)
Τεχνικό	Μέγιστος ρυθμός δεδομένων	Στόχος 1 Tbps	Έως 46,4 Gbps	>46,4 Gbps
	MU-MIMO	Υπερ-μαζικό MIMO	8×8	16×16
	Εύρος κάλυψης	<50 m (Terahertz), 100–300 m (mmWave), >10 km (macro), παγκόσμια δορυφορική κάλυψη	<50 m σε εσωτερικούς χώρους, έως 300 m σε εξωτερικούς χώρους	<50 m σε εσωτερικό χώρο, έως 300 m σε εξωτερικό χώρο
	Συγκέντρωση φορέα	Ναι	Ναι, μέσω λειτουργίας πολλαπλών συνδέσεων	Ναι, μέσω κατανεμημένης λειτουργίας πολλαπλών συνδέσεων
	Παρεμβολές μεταξύ κυψελών	Ελεγχόμενο	Ελεγχόμενο σε απομονωμένα δίκτυα	Ελέγχεται σε πυκνά περιβάλλοντα μέσω συντονισμού AP
	Σχήμα πρόσβασης καναλιών	OFDMA	OFDMA	OFDMA
Φάσμα	Τύπος άδειας	Κυρίως αδειοδοτημένο	Μη αδειοδοτημένο	Μη αδειοδοτημένο
	Γενικές ζώνες	Χαμηλή, μεσαία, υψηλή, πολύ υψηλή	Χαμηλή και μεσαία	Χαμηλή και μεσαία ζώνη· υψηλή ζώνη που στοχεύει η Ολοκληρωμένη Ομάδα Μελέτης mmWave (IMG) 802.11

Επιχειρηματικό μοντέλο και κόστος	Ειδικές συχνότητες	<6 GHz, 24–30 GHz, 100 GHz έως 10 THz	2,4 GHz, 5 GHz, 6 GHz	2,4 GHz, 5 GHz, 6 GHz· 45 και 60 GHz που στοχεύει η IMG
	Μέγιστο εύρος ζώνης καναλιού	400 MHz (<6 GHz), 10–100 GHz (>100 GHz)	Έως 320 MHz	≥320 MHz
	Μοντέλο εσόδων	Δωρεάν/προσωρινή (μέσω eSIM) ή προπληρωμή/μεταπληρωμή για υπηρεσίες δεδομένων	Δωρεάν, συσκευές για ανέσεις ή WLAN χωρίς εξωτερική σύνδεση	Δωρεάν, για χρήση σε χώρους αναψυχής ή WLAN χωρίς εξωτερική σύνδεση
	Τιμή εξοπλισμού χρήστη	Υψηλότερη (π.χ., premium smartphones >\$550)	Χαμηλότερη (π.χ., συσκευές μόνο με Wi-Fi από >\$100)	Χαμηλότερη (π.χ., συσκευές μόνο με Wi-Fi από >\$100)
	Δημόσια έναντι ιδιωτικής παροχής	Παρέχεται δημόσια από MNO/MVNO	Ιδιωτική σταθερή ευρυζωνική σύνδεση ή διαχειριζόμενη από επιχείρηση	Ιδιωτική σταθερή ευρυζωνική σύνδεση ή διαχειριζόμενη από επιχείρηση
	Κόστος τσιπ/μόντεμ	Υψηλότερη (π.χ., >\$100 για 5G SoC κατά την κυκλοφορία)	Χαμηλότερη (~\$10–20 για chipset Wi-Fi 6 κατά την κυκλοφορία)	Χαμηλότερη (~\$10–20 για chipset Wi-Fi 6 κατά την κυκλοφορία)
	Κόστος δεδομένων	Η eSIM επιτρέπει ευέλικτα μοντέλα (δωρεάν μεταπληρωμή)	Δωρεάν (χρησιμοποιεί σταθερή ευρυζωνική σύνδεση)	Δωρεάν (χρησιμοποιεί σταθερή ευρυζωνική σύνδεση)
	Κατανάλωση ενέργειας	Υψηλότερη (>2–3× κατανάλωση ενέργειας 4G)	Χαμηλότερη (≥50% πιο ενεργειακά)	Χαμηλότερη (≥50% πιο ενεργειακά αποδοτική από την κινητή τηλεφωνία)

			αποδοτική από την κινητή τηλεφωνία)	
Εγκατάσταση και δεξιότητες	Προσέγγιση ανάπτυξης	Ελεγχόμενη και κεντρικά διαχειριζόμενη	Μη ελεγχόμενη και ως επί το πλείστον μη διαχειριζόμενη	Μη ελεγχόμενη και ως επί το πλείστον μη διαχειριζόμενη

4.5 Wi-Fi 8 στο ευρύτερο τοπίο της συνδεσιμότητας

Η συζήτηση γύρω από το Wi-Fi 8 δεν μπορεί να διαχωριστεί από τις παράλληλες εξελίξεις στο 6G κινητής τηλεφωνίας. Ενώ το 6G δίνει έμφαση στην παγκόσμια κάλυψη, την εξαιρετικά αξιόπιστη επικοινωνία χαμηλής καθυστέρησης και την ενσωμάτωση δορυφορικών-επίγειων δικτύων, το Wi-Fi 8 παραμένει κυρίως επικεντρωμένο στην τοπική δικτύωση, την προσιτή τιμή και την προσβασιμότητα.

Η δύναμη του Wi-Fi έγκειται στο μη αδειοδοτημένο μοντέλο φάσματος και στον ρόλο του ως ένα χαμηλού κόστους, αποκεντρωμένο συμπλήρωμα των δικτύων κινητής τηλεφωνίας. Ωστόσο, καθώς εμφανίζονται εφαρμογές που απαιτούν περισσότερο εύρος ζώνης και είναι ευαίσθητες στην καθυστέρηση, το Wi-Fi 8 θα βρίσκεται υπό πίεση για να κλείσει το χάσμα απόδοσης με την κινητή τηλεφωνία.

Πίνακας 4.3 Wi-Fi 8 vs. 6G: Τεχνική σύγκριση και σύγκριση εφαρμογών

Κατηγορία	Wi-Fi 8 (Ευκαστικό)	6G (Προγραμματισμένο)
Μέγιστος Ρυθμός Δεδομένων	>46,4 Gbps	~1 Tbps
Ζώνες Φάσματος	2,4, 5, 6 GHz· εξερευνητικό mmWave (45–60 GHz)	Υπό-6 GHz, mmWave, Terahertz (100 GHz–10 THz)
Λανθάνων Χρόνος	Στόχος <1 ms (βέλτιστη προσπάθεια)	Ντετερμινιστική υπο-ms (ελεγχόμενη από το δίκτυο)
Διαμόρφωση	Πέρα από το 4096-QAM	Προσαρμοστική κωδικοποίηση με τεχνητή νοημοσύνη
Εύρος Κάλυψης	<50 m σε εσωτερικούς χώρους, έως 300 m σε εξωτερικούς χώρους	Μικρά κελιά (~300 m) σε παγκόσμιο δορυφόρο
Πρόσβαση Καναλιού	OFDMA + MLO	OFDMA + Τεμαχισμός δικτύου
Εφαρμογές	AR/VR, παιχνίδια, IoT, έξυπνα σπίτια, βιομηχανική ρομποτική	Αυτόνομα οχήματα, απομακρυσμένη χειρουργική

		επέμβαση, ολογραφικές επικοινωνίες
Μοντέλο Ανάπτυξης	Μη συντονισμένες, ιδιωτικές αναπτύξεις	Κεντρικά διαχειριζόμενο, αδειοδοτημένο φάσμα
Πλεονεκτήματα	Χαμηλό κόστος, ευκολία ανάπτυξης, ευρύ οικοσύστημα συσκευών	Εγγυημένο QoS, παγκόσμια κάλυψη
Περιορισμοί	Κατακερματισμός φάσματος, έλλειψη ντετερμινισμού	Υψηλό κόστος, ένταση ενέργειας, κανονιστικά εμπόδια

Οι προοπτικές για το Wi-Fi 8 αναδεικνύουν τόσο ευκαιρίες όσο και προκλήσεις. Ενώ το πρότυπο μπορεί να ωθήσει τα ασύρματα LAN πιο κοντά σε απόδοση παρόμοια με αυτή των οπτικών ινών, η σκοπιμότητά του εξαρτάται από την επίλυση επίμονων ζητημάτων όπως η καθυστέρηση, η δικαιοσύνη και η διαχείριση του φάσματος. Αυτές οι εντάσεις δημιουργούν ένα υπόβαθρο για την αξιολόγηση του μελλοντικού ρόλου του Wi-Fi 8, ο οποίος αναπτύσσεται περαιτέρω στα συμπεράσματα αυτής της εργασίας.

Συμπεράσματα

Το Wi-Fi 8 αναμένεται να προωθήσει σημαντικά την ασύρματη συνδεσιμότητα προσφέροντας μέγιστες ταχύτητες δεδομένων που υπερβαίνουν τα 46,4 Gbps, οι οποίες επιτυγχάνονται μέσω ευρύτερου εύρους ζώνης καναλιών, βελτιωμένων τεχνικών διαμόρφωσης και βελτιωμένων δυνατοτήτων πολλαπλών χρηστών όπως το MU-MIMO και το OFDMA. Αυτή η εξέλιξη θα ενισχύσει τη θέση του Wi-Fi ως κρίσιμης τεχνολογίας για εσωτερικά και τοπικά ασύρματα δίκτυα, όπου ήδη ξεπερνά τα κυψελοειδή συστήματα όσον αφορά την απόδοση, την καθυστέρηση και την ενεργειακή απόδοση. Το αποκεντρωμένο μοντέλο ανάπτυξης του Wi-Fi, σε συνδυασμό με τη χρήση μη αδειοδοτημένου φάσματος, θα συνεχίσει να το καθιστά μια προσιτή και προσβάσιμη επιλογή τόσο για τους καταναλωτές όσο και για τις επιχειρήσεις.

Σε σύγκριση με τα αναδυόμενα κυψελοειδή δίκτυα 6G, το Wi-Fi 8 επικεντρώνεται στην παροχή εξαιρετικά υψηλής απόδοσης σε περιορισμένες περιοχές κάλυψης, συνήθως σε εσωτερικούς ή σε τοπικές εξωτερικές συνθήκες. Ενώ το 6G στοχεύει σε ευρύτερη παγκόσμια κάλυψη και μαζική συνδεσιμότητα με δορυφορικές και terahertz ζώνες, το Wi-Fi 8 δίνει προτεραιότητα σε πυκνά περιβάλλοντα υψηλής χωρητικότητας με ανάπτυξη και διαχείριση χαμηλού κόστους. Αυτή η συμπληρωματική σχέση μεταξύ του Wi-Fi 8 και των τεχνολογιών κινητής τηλεφωνίας είναι πιθανό να συνεχιστεί, παρέχοντας στους χρήστες ένα ευέλικτο οικοσύστημα που εξισορροπεί την κάλυψη, τη χωρητικότητα και το κόστος.

Η κατανάλωση ενέργειας και η προσιτή τιμή των συσκευών παραμένουν σημαντικά πλεονεκτήματα για το Wi-Fi 8. Καθώς οι νεότερες γενιές κινητής τηλεφωνίας τείνουν να αυξάνουν τις απαιτήσεις ενέργειας, ο ενεργειακά αποδοτικός σχεδιασμός του Wi-Fi 8 βοηθά στη μείωση του λειτουργικού κόστους και των περιβαλλοντικών επιπτώσεων. Η χαμηλότερη τιμή των συσκευών με δυνατότητα Wi-Fi βοηθά επίσης στη γεφύρωση του ψηφιακού χάσματος, καθιστώντας την ασύρματη πρόσβαση υψηλής ταχύτητας πιο εφικτή για ένα ευρύτερο πληθυσμό, ειδικά όταν συνδυάζεται με την υπάρχουσα σταθερή ευρυζωνική υποδομή.

Κοιτάζοντας μπροστά, η καινοτομία στο φάσμα θα είναι το κλειδί για την επιτυχία του Wi-Fi 8. Η επέκταση σε ζώνες υψηλότερων συχνοτήτων, συμπεριλαμβανομένων των συχνοτήτων mmWave όπως 45 GHz και 60 GHz, υπόσχεται να απελευθερώσει ακόμη μεγαλύτερα εύρη ζώνης και ρυθμούς δεδομένων. Ωστόσο, αυτό θα απαιτήσει συντονισμένες ρυθμιστικές προσπάθειες για την αποτελεσματική κατανομή του φάσματος και την

ελαχιστοποίηση των παρεμβολών. Επιπλέον, προηγμένα χαρακτηριστικά όπως οι κατανεμημένες λειτουργίες πολλαπλών συνδέσμων και ο βελτιωμένος συντονισμός σημείων πρόσβασης θα βελτιώσουν την απόδοση σε πολύπλοκα, πυκνά περιβάλλοντα.

Η μελλοντική έρευνα και ανάπτυξη θα επικεντρωθεί επίσης στην ενσωμάτωση του Wi-Fi 8 με αναδυόμενες τεχνολογίες όπως οι συσκευές του Διαδικτύου των Πραγμάτων (IoT), η τεχνητή νοημοσύνη για βελτιστοποίηση δικτύου και τα δίκτυα ιδιωτικών επιχειρήσεων. Αυτές οι ενσωματώσεις θα διευρύνουν το πεδίο εφαρμογής του Wi-Fi 8 και θα διασφαλίσουν ότι θα παραμείνει μια ευέλικτη λύση για ποικίλες ανάγκες ασύρματης συνδεσιμότητας. Τέλος, οι υπεύθυνοι χάραξης πολιτικής και οι ενδιαφερόμενοι φορείς του κλάδου πρέπει να δώσουν προτεραιότητα στην ψηφιακή ένταξη, διασφαλίζοντας ότι οι προσιτές συσκευές και η ολοκληρωμένη κάλυψη είναι διαθέσιμες σε υποεξυπηρετούμενες κοινότητες, συμβάλλοντας στη μείωση των ανισοτήτων συνδεσιμότητας.

Συμπερασματικά, το Wi-Fi 8 αντιπροσωπεύει μια πολλά υποσχόμενη κατεύθυνση για το μελλοντικό ασύρματο ευρυζωνικό δίκτυο, συνδυάζοντας την κορυφαία απόδοση με την πρακτικότητα και την προσβασιμότητα. Η ανάπτυξή του θα εξαρτηθεί όχι μόνο από τεχνολογικές καινοτομίες αλλά και από μελλοντικές πολιτικές φάσματος και στρατηγικές ανάπτυξης χωρίς αποκλεισμούς. Καθώς η ζήτηση για ασύρματα δίκτυα συνεχίζει να αυξάνεται, το Wi-Fi 8 βρίσκεται σε καλή θέση για να διαδραματίσει κεντρικό ρόλο στη διαμόρφωση της επόμενης γενιάς τοπικών ασύρματων δικτύων.

Βιβλιογραφία

- Adame, T., Carrascosa-Zamacois, M., & Bellalta, B. (2021). Time-Sensitive Networking in IEEE 802.11be: On the Way to Low-Latency WiFi 7. *Sensors*, 21(15), 4954. <https://doi.org/10.3390/s21154954>
- Akhmetov, D., Das, D., Cavalcanti, D., Ramirez-Perez, J., & Cariou, L. (2022). Scheduled Time-Sensitive Transmission Opportunities over Wi-Fi. *GLOBECOM 2022 - 2022 IEEE Global Communications Conference*, 1807–1812. <https://doi.org/10.1109/GLOBECOM48099.2022.10001702>
- Alsharif, M. H., & Nordin, R. (2017). Evolution towards fifth generation (5G) wireless networks: Current trends and challenges in the deployment of millimetre wave, massive MIMO, and small cells. *Telecommunication Systems*, 64(4), 617–637. <https://doi.org/10.1007/s11235-016-0195-x>
- Anjali, A., & Singh, M. (2012). Performance Analysis of Proactive, Reactive and Hybrid MANET Routing Protocols on IEEE 802. 11 Standard. *International Journal of Computer Applications*, 54(12), 1–8. <https://doi.org/10.5120/8615-2476>
- Bellalta, B., Carrascosa, M., Galati-Giordano, L., & Geraci, G. (2023). Delay Analysis of IEEE 802.11be Multi-Link Operation Under Finite Load. *IEEE Wireless Communications Letters*, 12(4), 595–599. <https://doi.org/10.1109/LWC.2023.3235001>
- Bonati, L., Polese, M., D'Oro, S., Basagni, S., & Melodia, T. (2023). OpenRAN Gym: AI/ML development, data collection, and testing for O-RAN on PAWR platforms. *Computer Networks*, 220, 109502. <https://doi.org/10.1016/j.comnet.2022.109502>
- Cavalcanti, D., Perez-Ramirez, J., Rashid, M. M., Fang, J., Galeev, M., & Stanton, K. B. (2019). Extending Accurate Time Distribution and Timeliness Capabilities Over the Air to Enable Future Wireless Industrial Automation Systems. *Proceedings of the IEEE*, 107(6), 1132–1152. <https://doi.org/10.1109/JPROC.2019.2903414>
- Chen, C., Chen, X., Das, D., Akhmetov, D., & Cordeiro, C. (2022). Overview and Performance Evaluation of Wi-Fi 7. *IEEE Communications Standards Magazine*, 6(2), 12–18. <https://doi.org/10.1109/MCOMSTD.0001.2100082>

- Chen, D. (2017). *A survey of IEEE 802.11 protocols: Comparison and prospective. In 2017 5th international conference on mechatronics, materials, chemistry and computer engineering (ICMMCCE 2017) (pp. 569-578). Atlantis Press.*
- Deng, C., Fang, X., Han, X., Wang, X., Yan, L., He, R., Long, Y., & Guo, Y. (2020). IEEE 802.11be Wi-Fi 7: New Challenges and Opportunities. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 22(4), 2136–2166.
<https://doi.org/10.1109/COMST.2020.3012715>
- Dixon, B. J., Pollard, R. D., & Iezekiel, S. (2002). *Orthogonal frequency-division multiplexing in wireless communication systems with multimode fiber feeds. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 49(8), 1404-1409.
- Ertürk, M. A., Vollero, L., & Aydın, M. A. (2019). Development of software-based vendor independent WLAN controller. *International Journal of Mobile Communications*, 17(5), 537. <https://doi.org/10.1504/IJMC.2019.102083>
- Forge, S., & Vu, K. (2020). Forming a 5G strategy for developing countries: A note for policy makers. *Telecommunications Policy*, 44(7), 101975.
<https://doi.org/10.1016/j.telpol.2020.101975>
- Galati-Giordano, L., Geraci, G., Carrascosa, M., & Bellalta, B. (2024). What will Wi-Fi 8 Be? A Primer on IEEE 802.11bn Ultra High Reliability. *IEEE Communications Magazine*, 62(8), 126–132. <https://doi.org/10.1109/MCOM.001.2300728>
- Gallo, P., Kosek-Szott, K., Szott, S., & Tinnirello, I. (2018). CADWAN: A Control Architecture for Dense WiFi Access Networks. *IEEE Communications Magazine*, 56(1), 194–201. <https://doi.org/10.1109/MCOM.2017.1601097>
- Guimaraes, C., Corujo, D., Aguiar, R. L., Silva, F., & Frosi, P. (2013). Empowering software defined wireless Networks through Media Independent Handover management. *2013 IEEE Global Communications Conference (GLOBECOM)*, 2204–2209. <https://doi.org/10.1109/GLOCOM.2013.6831402>
- Kalem, G., Vayvay, O., Sennaroglu, B., & Tozan, H. (2021). Technology Forecasting in the Mobile Telecommunication Industry: A Case Study Towards the 5G Era. *Engineering Management Journal*, 33(1), 15–29.

<https://doi.org/10.1080/10429247.2020.1764833>

- Kanellos, N., Katsianis, D., & Varoutas, D. (2023). Assessing the Impact of Emerging Vertical Markets on 5G Diffusion Forecasting. *IEEE Communications Magazine*, 61(2), 38–43. <https://doi.org/10.1109/MCOM.001.2200342>
- Khorov, E., Kiryanov, A., Lyakhov, A., & Bianchi, G. (2019). A Tutorial on IEEE 802.11ax High Efficiency WLANs. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 21(1), 197–216. <https://doi.org/10.1109/COMST.2018.2871099>
- Lopez-Perez, D., Garcia-Rodriguez, A., Galati-Giordano, L., Kasslin, M., & Doppler, K. (2019). IEEE 802.11be Extremely High Throughput: The Next Generation of Wi-Fi Technology Beyond 802.11ax. *IEEE Communications Magazine*, 57(9), 113–119. <https://doi.org/10.1109/MCOM.001.1900338>
- Mozaffariahrar, E., Theoleyre, F., & Menth, M. (2022). A Survey of Wi-Fi 6: Technologies, Advances, and Challenges. *Future Internet*, 14(10), 293. <https://doi.org/10.3390/fi14100293>
- Murti, W., & Yun, J.-H. (2022). Multilink Operation in IEEE 802.11be Wireless LANs: Backoff Overflow Problem and Solutions. *Sensors*, 22(9), 3501. <https://doi.org/10.3390/s22093501>
- Navío-Marco, J., Arévalo-Aguirre, A., & Pérez-Leal, R. (2019). WiFi4EU: Techno-economic analysis of a key European Commission initiative for public connectivity. *Telecommunications Policy*, 43(6), 520–530. <https://doi.org/10.1016/j.telpol.2018.12.008>
- Nguyen, V.-L., Lin, P.-C., Cheng, B.-C., Hwang, R.-H., & Lin, Y.-D. (2021). Security and Privacy for 6G: A Survey on Prospective Technologies and Challenges. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 23(4), 2384–2428. <https://doi.org/10.1109/COMST.2021.3108618>
- Oh, M., Kim, J., & Shin, J. (2022). Does the improvement of public Wi-Fi technology undermine mobile network operators' profits? Evidence from consumer preferences. *Telematics and Informatics*, 69, 101786. <https://doi.org/10.1016/j.tele.2022.101786>

- Oughton, E., Geraci, G., Polese, M., Shah, V., Bubley, D., & Blue, S. (2024). Reviewing wireless broadband technologies in the peak smartphone era: 6G versus Wi-Fi 7 and 8. *Telecommunications Policy*, 48(6), 102766.
<https://doi.org/10.1016/j.telpol.2024.102766>
- Oughton, E. J., & Lehr, W. (2022). Surveying 5G Techno-Economic Research to Inform the Evaluation of 6G Wireless Technologies. *IEEE Access*, 10, 25237–25257.
<https://doi.org/10.1109/ACCESS.2022.3153046>
- Oughton, E. J., Lehr, W., Katsaros, K., Selinis, I., Bubley, D., & Kusuma, J. (2021). Revisiting Wireless Internet Connectivity: 5G vs Wi-Fi 6. *Telecommunications Policy*, 45(5), 102127. <https://doi.org/10.1016/j.telpol.2021.102127>
- Selinis, I., Filo, M., Vahid, S., Rodriguez, J., & Tafazolli, R. (2016). Evaluation of the DSC algorithm and the BSS color scheme in dense cellular-like IEEE 802.11ax deployments. *2016 IEEE 27th Annual International Symposium on Personal, Indoor, and Mobile Radio Communications (PIMRC)*, 1–7.
<https://doi.org/10.1109/PIMRC.2016.7794832>
- Shafie, A., Yang, N., Han, C., Jornet, J. M., Juntti, M., & Kürner, T. (2023). Terahertz Communications for 6G and Beyond Wireless Networks: Challenges, Key Advancements, and Opportunities. *IEEE Network*, 37(3), 162–169.
<https://doi.org/10.1109/MNET.118.2200057>
- Shahin, N., Ali, R., Kim, S. W., & Kim, Y.-T. (2019). Cognitive backoff mechanism for IEEE802.11ax high-efficiency WLANs. *Journal of Communications and Networks*, 21(2), 158–167. <https://doi.org/10.1109/JCN.2019.000022>
- Sharma, P., Chaurasiya, R. K., & Saxena, A. (2013). Comparison analysis between IEEE 802.11 a/b/g/n. *International Journal of Scientific & Engineering Research*, 4(5), 988-993.
- Sharma, P., & Singh, G. (2016). Comparison of Wi-Fi IEEE 802.11 standards relating to media access control protocols. *International Journal of Computer Science and Information Security*, 14(10), 856.
- SHEN, H. (2008). Performance Study of a Cross-Layer Based Multipath Routing Protocol

- for IEEE 802.11e Mobile Ad Hoc Networks. *Int'l J. of Communications, Network and System Sciences*, 01(04), 329–338. <https://doi.org/10.4236/ijcns.2008.14041>
- Shen, L.-H., Feng, K.-T., & Hanzo, L. (2023). Five Facets of 6G: Research Challenges and Opportunities. *ACM Computing Surveys*, 55(11), 1–39. <https://doi.org/10.1145/3571072>
- Sun, Y., Liu, J., Wang, J., Cao, Y., & Kato, N. (2020). When Machine Learning Meets Privacy in 6G: A Survey. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 22(4), 2694–2724. <https://doi.org/10.1109/COMST.2020.3011561>
- Tataria, H., Shafi, M., Dohler, M., & Sun, S. (2022). Six Critical Challenges for 6G Wireless Systems: A Summary and Some Solutions. *IEEE Vehicular Technology Magazine*, 17(1), 16–26. <https://doi.org/10.1109/MVT.2021.3136506>
- Testolina, P., Polese, M., & Melodia, T. (2024). Sharing Spectrum and Services in the 7–24 GHz Upper Midband. *IEEE Communications Magazine*, 62(8), 170–177. <https://doi.org/10.1109/MCOM.001.2400086>
- Zhang, P., Xiao, Y., Li, Y., Ge, X., Shi, G., & Yang, Y. (2024). Toward Net-Zero Carbon Emissions in Network AI for 6G and Beyond. *IEEE Communications Magazine*, 62(4), 58–64. <https://doi.org/10.1109/MCOM.003.2300175>
- Zhou, F., Feng, L., Kadoch, M., Yu, P., Li, W., & Wang, Z. (2022). Multiagent RL Aided Task Offloading and Resource Management in Wi-Fi 6 and 5G Coexisting Industrial Wireless Environment. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 18(5), 2923–2933. <https://doi.org/10.1109/TII.2021.3106973>

