ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΑΙΓΑΙΟΥ
ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΚΗ ΣΧΟΛΗ

ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΑΚΩΝ ΚΑΙ ΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΑΚΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ

Η Εξέλιξη των Ασύρματων Δικτύων IEEE 802.11

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Κασσελούρης Ευάγγελος, Λάλλος Σπύρος

Επιβλέπων: Αν. Καθηγητής Σκούτας Δημήτριος

Μέλη εξεταστικής επιτροπής:
Αν. Καθηγητής Σκούτας Δημήτριος,
Καθηγητής Σκιάνης Χαράλαμπος,
Καθηγητής Κορμέντζας Γεώργιος

Σάμος, Ιούνιος 2026

ΔΗΛΩΣΗ ΜΗ ΛΟΓΟΚΛΟΠΗΣ
ΚΑΙ ΑΝΑΛΗΨΗΣ ΠΡΟΣΩΠΙΚΗΣ ΕΥΘΥΝΗΣ

Είμαστε οι συγγραφείς αυτής της διπλωματικής εργασίας και δηλώνουμε ότι κάθε βοήθεια την οποία είχαμε για την προετοιμασία της είναι πλήρως αναγνωρισμένη και αναφέρεται στην εργασία. Επίσης, έχουμε αναφέρει τις πηγές από τις οποίες κάναμε χρήση δεδομένων, ιδεών ή λέξεων, είτε αυτές αναφέρονται ακριβώς είτε παραφρασμένες. Επίσης βεβαιώνουμε ότι αυτή η εργασία προετοιμάστηκε από εμάς προσωπικά ειδικά για τη συγκεκριμένη προπτυχιακή διπλωματική εργασία.

ΟΝΟΜΑΤΕΠΩΝΥΜΟ: Κασσελούρης Ευάγγελος, Λάλλος Σπύρος

2026

των

Κασσελούρης Ευάγγελος, Λάλλος Σπύρος

Τμήμα Μηχανικών Πληροφοριακών και Επικοινωνιακών Συστημάτων

ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΑΙΓΑΙΟΥ

Η σελίδα αυτή είναι σκόπιμα λευκή.

Περίληψη

Η παρούσα εργασία μελετά την εξέλιξη των ασύρματων τοπικών δικτύων IEEE 802.11, με έμφαση στα πρότυπα IEEE 802.11ax (Wi-Fi 6), IEEE 802.11be (Wi-Fi 7) και IEEE 802.11bn (Wi-Fi 8). Μέσα από συστηματική ανασκόπηση των προδιαγραφών IEEE και της σχετικής βιβλιογραφίας, παρουσιάζεται η ιστορική πορεία των προτύπων και αναλύονται τα βασικά τεχνικά χαρακτηριστικά, τα πλεονεκτήματα και οι περιορισμοί κάθε γενιάς. Ιδιαίτερη έμφαση δίνεται σε τεχνολογίες διαχείρισης πόρων και πρόσβασης στο μέσο, όπως το OFDMA, το MU-MIMO και το Multi-Link Operation, και στον τρόπο με τον οποίο επηρεάζουν την απόδοση και την ποιότητα εξυπηρέτησης (QoS) σε συνθήκες υψηλής πυκνότητας χρηστών, καθώς η αύξηση της ονομαστικής ταχύτητας από μόνη της δεν εγγυάται αντίστοιχη βελτίωση σε πραγματικές συνθήκες. Μέσω συγκριτικής αποτίμησης αναδεικνύονται οι προοπτικές χρήσης των προτύπων σε διαφορετικά σενάρια, ενώ γίνεται και αναφορά στο υπό ανάπτυξη Wi-Fi 8, το οποίο εστιάζει στην αξιοπιστία και στη διασύνδεση με τεχνολογίες όπως το 6G. Η εργασία προσφέρει μια συνθετική επισκόπηση της τρέχουσας κατάστασης και προτείνει κατευθύνσεις για μελλοντική έρευνα.

Λέξεις κλειδιά: IEEE 802.11ax, IEEE 802.11be, IEEE 802.11bn, Wi-Fi 6, Wi-Fi 7, Wi-Fi 8, OFDMA, MU-MIMO, Multi-Link Operation, χρονοδρομολόγηση, ποιότητα υπηρεσίας (QoS), δίκτυα υψηλής πυκνότητας

Πίνακας περιεχομένων

Περίληψη 5

Πίνακας περιεχομένων 6

Κατάλογος Εικόνων 9

Κατάλογος Πινάκων 10

Ακρωνύμια 11

1 Εισαγωγή 15

1.1 Σκοπός και στόχοι της μελέτης 15

1.2 Σύγχρονες Προκλήσεις στα Δίκτυα Wi-Fi 17

1.3 Δομή της εργασίας 19

2 Θεωρητικό Πλαίσιο - Ιστορική Αναδρομή 20

2.1 Το πρότυπο IEEE 802.11: Γενική Επισκόπηση 20

2.2 Πρώιμες εκδόσεις: 802.11, 802.11a/b/g 23

2.2.1 802.11 legacy 23

2.2.2 802.11a 24

2.2.3 802.11b 24

2.2.4 802.11g 27

2.3 Ενδιάμεσες εκδόσεις: 802.11n και 802.11ac 28

2.3.1 802.11n 28

2.3.2 802.11ac 30

2.4 Βασικές απαιτήσεις σύγχρονων ασύρματων επικοινωνιών 31

2.4.1 Υψηλή ταχύτητα μετάδοσης δεδομένων 31

2.4.2 Χαμηλή καθυστέρηση (Low Latency) 31

2.4.3 Υψηλή αξιοπιστία και ανθεκτικότητα 32

2.4.4 Υποστήριξη μεγάλης πυκνότητας χρηστών και συσκευών 32

2.4.5 Ενεργειακή αποδοτικότητα 32
2.4.6 Ασφάλεια και προστασία απορρήτου 32
2.4.7 Ευελιξία και επεκτασιμότητα 33
3 Πρότυπο IEEE 802.11ax (Wi-Fi 6) 34
3.1 Στόχοι σχεδίασης και βασικές αλλαγές 34
3.2 Τεχνολογίες: OFDMA, MU-MIMO, BSS Coloring 35
3.2.1 OFDMA 36
3.2.2 MU-MIMO 41
3.2.3 BSS Coloring 42
3.3 Χρονοδρομολόγηση και κατανομή πόρων στο 802.11ax 43
4 Πρότυπο IEEE 802.11be (Wi-Fi 7) 47
4.1 Τεχνικοί στόχοι και καινοτομίες 47
4.1.1 Βελτιώσεις σε φυσικό επίπεδο 49
4.1.2 Βελτιώσεις του Επιπέδου MAC 51
4.2 Multi-Link Operation (MLO), 4096-QAM, Ευρυζωνικά κανάλια 320 MHz 52
4.2.1 Multi-Link Operation (MLO) 53
4.2.2 4096-QAM (Quadrature Amplitude Modulation) 55
4.2.3 Ευρυζωνικά κανάλια 320 MHz 55
4.3 Υποστήριξη QoS και χαμηλής καθυστέρησης 56
4.4 Χρήσεις σε προηγμένα περιβάλλοντα 58
4.4.1 Εταιρικά Δίκτυα και Δίκτυα Υψηλής Πυκνότητας 58
4.4.2 Προηγμένα Βιομηχανικά και Επιχειρησιακά Δίκτυα (IIoT) 59
4.4.3 Ευρυζωνικά Οικιακά Δίκτυα και Δίκτυα Διασκέδασης 59
4.4.4 Κινητές Εφαρμογές και Δίκτυα Εν κινήσει 60
4.5 Παραδείγματα Εφαρμογών Wi-Fi 7 σε Πραγματικά Περιβάλλοντα 61
5 Πρότυπο IEEE 802.11bn (Wi-Fi 8 - Υπό Ανάπτυξη) 63
5.1 Διασύνδεση με 6G, IoT και edge computing 66

5.2 Ενεργειακή αποδοτικότητα και περιβαλλοντικές προσεγγίσεις 68

5.3 Ερευνητικές κατευθύνσεις και πιθανές εφαρμογές του Wi-Fi 8 68

5.4 Αναδυόμενες ερευνητικές κατευθύνσεις: χρονοδρομολόγηση με χρήση τεχνητής νοημοσύνης και υψηλότερες ζώνες συχνοτήτων 70

5.4.1 Χρονοδρομολόγηση με χρήση τεχνητής νοημοσύνης (AI-assisted scheduling) 70

5.4.2 Υψηλότερες Ζώνες Συχνοτήτων 72

6 Συγκριτική Ανάλυση Προτύπων IEEE 802.11ax, 802.11be και 802.11bn 73

6.1 Σύγκριση βασικών τεχνικών χαρακτηριστικών 73

6.1.1 Συχνότητες & Κανάλια 73

6.1.2 Διαμόρφωση & QAM 74

6.2 Πλεονεκτήματα και αδυναμίες κάθε έκδοσης 79

6.3 Προοπτικές χρήσης σε διαφορετικά σενάρια 80

6.3.1 Wi-Fi 6 (IEEE 802.11ax / 6E) – ιδανικό για υψηλή πυκνότητα και IoT εφαρμογές 81

6.3.2 Wi-Fi 7 (IEEE 802.11be) – για υψηλό εύρος ζώνης, πολύ χαμηλή καθυστέρηση και καθηλωτικές εμπειρίες 81

6.3.3 Wi-Fi 8 (IEEE 802.11bn – Υπερ-υψηλή Αξιοπιστία) – για βιομηχανικές εφαρμογές και δίκτυα κρίσιμα ως προς την κινητικότητα 81

7 Συμπεράσματα και Προτάσεις 83

7.1 Συμπεράσματα εργασίας 83

7.2 Μελλοντική εργασία 84

Βιβλιογραφία 86

Κατάλογος Εικόνων

Εικόνα 1 Βήματα εκπόνησης της εργασίας 17

Εικόνα 2 Ιστορική εξέλιξη του προτύπου 802.11 [43] 24

Εικόνα 3 Σύγκριση χρήσης της ζώνης 2,4 GHz από τα πρότυπα 802.11b και 802.15.4 [56] 26

Εικόνα 4 Μοντέλο προσομοίωσης (Simulink) φυσικού επιπέδου 802.11g [97] 28

Εικόνα 5 Σύγκριση της λειτουργίας OFDM και OFDMA [98] 37

Εικόνα 6 Κέρδος OFDMA στο σενάριο επικαλυπτόμενου δικτύου [92] 38

Εικόνα 7 Αριθμός RUs για κάθε εύρος [92] 39

Εικόνα 8 Μετάδοση με συγχρονισμό [92] 40

Εικόνα 9 Διαφορές μεταξύ MIMO και MU-MIMO [99] 41

Εικόνα 10 Πεδία τιμών BSS Coloring [100] 43

Εικόνα 11 Ρυθμαπόδοση ανερχόμενης ζεύξης για διάφορες διαμορφώσεις RU [92] 45

Εικόνα 12 Ενδεικτική απεικόνιση λειτουργίας Wi-Fi 7 εν κινήσει 60

Εικόνα 13 Smart Logistics [95] 69

Εικόνα 14 Βασικά στοιχεία του Wi-Fi 8 [93] 70

Εικόνα 15 Multi-Link Operation [94] 74

Εικόνα 16 Σύγκριση μέσης ρυθμαπόδοσης (throughput) ανά αριθμό χρηστών 78

Εικόνα 17 Μέρη ενός αυτόνομου οχήματος [96] 82

Κατάλογος Πινάκων

Πίνακας 1 Σύγκριση χαρακτηριστικών Wi-Fi 6 (802.11ax) και Wi-Fi 7 (802.11be) (το Wi-Fi 7 αναλύεται διεξοδικά στο Κεφάλαιο 4) 35

Πίνακας 2 Τρόποι προγραμματισμού μετάδοσης στο 802.11ax 46

Πίνακας 3 Σύγκριση βασικών τεχνικών χαρακτηριστικών ως προς συχνότητες και κανάλια 74

Πίνακας 4 Συγκριτική αποτύπωση κύριων τεχνικών χαρακτηριστικών 76

Πίνακας 5 Απόδοση και καταλληλότητα ανά εφαρμογή 77

Πίνακας 6 Συνοπτική κριτική αποτίμηση – πλεονεκτήματα και περιορισμοί 77

Ακρωνύμια

ACK	Acknowledgement
AES-CCMP	Advanced Encryption Standard – Counter Mode CBC-MAC Protocol
AGV	Automated Guided Vehicle
AI	Artificial Intelligence
A-MPDU	Aggregated MAC Protocol Data Unit
A-MSDU	Aggregated MAC Service Data Unit
AP	Access Point
AR	Augmented Reality
AWGN	Additive White Gaussian Noise
BCC	Binary Convolutional Code
BSR	Buffer Status Report
BSS	Basic Service Set
CBRS	Citizens Broadband Radio Service
CCA	Clear Channel Assessment
CP	Cyclic Prefix
CSMA/CA	Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance
DCF	Distributed Coordination Function
DL	Down Link
DSSS	Direct Sequence Spread Spectrum
EDCA	Enhanced Distributed Channel Access
FCC	Federal Communications Commission
FEC	Forward Error Correction
FHSS	Frequency Hopping Spread Spectrum
HCCA	Hybrid Controlled Channel Access
HD	High Definition

HE	High Efficiency
HE-SIG-B	HE Signal B Field
IoT	Internet Of Things
IR	Infrared
ISM	Industrial, Scientific and Medical
LPI	Low Power Indoor
LTE	Long Term Evolution
MAC	Medium Access Control
MAPC	Multi-AP Coordination
MCS	Modulation and Coding Scheme
MIMO	Multiple Input, Multiple Output
ML	Machine Learning
MLD	Multi-Link Device
MLO	Multi-Link Operation
MPDU	MAC Protocol Data Unit
MSDU	MAC Service Data Unit
MU	Multiuser
MU-MIMO	Multi-User Multiple Input Multiple Output
NPCA	Non-Primary Channel Access
NSTS	Number of Space-Time Streams
OBO	OFDMA Back-off
OBSS	Overlapping Basic Service Set
OFDM	Orthogonal frequency-division multiplexing
OFDMA	Orthogonal frequency-division multiple access
PHY	Physical Layer
PPDU	PHY Protocol Data Unit
QAM	Quadrature Amplitude Modulation

QoE	Quality of Experience
QoS	Quality of Service
RA	Random Access
RAN	Radio Access Network
RF	Radio Frequency
RL	Reinforcement Learning
RU	Resource Unit
SAE	Simultaneous Authentication of Equals
SDN	Software-Defined Networking
SIFS	Short Inter-Frame Space
SINR	Signal to Interference plus Noise Ratio
SNR	Signal-to-Noise Ratio
STA	Station
SU	Single user
SU-MIMO	Single-User Multiple Input Multiple Output
TGax	Task Group AX
TID	Traffic Identifier
TSN	Time-Sensitive Networking
TWT	Target Wake Time
TXOP	Transmission Opportunity
UHR	Ultra-High Reliability
UL	Uplink
V2X	Vehicle-to-Everything
VR	Virtual Reality
WECA	Wireless Ethernet Compatibility Alliance
WEP	Wired Equivalent Privacy
WLAN	Wireless Local Area Network
WPA	Wi-Fi Protected Access

WUR	Wake-Up Radio
XR	Extended Reality

1 *Εισαγωγή*

1.1 Σκοπός και στόχοι της μελέτης

Η ανάπτυξη της τεχνολογίας Wi-Fi και η συνεχής αύξηση των απαιτήσεων για γρήγορη και αξιόπιστη ασύρματη σύνδεση έχουν οδηγήσει στην εξέλιξη των προτύπων ασύρματων δικτύων, με τα πιο πρόσφατα να είναι τα IEEE 802.11ax (Wi-Fi 6) και IEEE 802.11be (Wi-Fi 7). Τα δίκτυα αυτά προσφέρουν βελτιωμένη απόδοση, μεγαλύτερη χωρητικότητα, και δυνατότητες για πιο αποδοτική διαχείριση πακέτων δεδομένων, καλύπτοντας τις αυξανόμενες ανάγκες των χρηστών και των εφαρμογών. Ωστόσο, η αυξημένη πολυπλοκότητα των σύγχρονων δικτύων απαιτεί τη διερεύνηση νέων μηχανισμών χρονοδρομολόγησης, ώστε να εξασφαλιστεί η βέλτιστη εκμετάλλευση των πόρων του δικτύου, καθώς και η παροχή αξιόπιστης και ποιοτικής υπηρεσίας (QoS) σε πραγματικό χρόνο.

Η παρούσα εργασία επικεντρώνεται στη μελέτη των μηχανισμών διαχείρισης πόρων και πρόσβασης στο μέσο —όπως το OFDMA, το MU-MIMO και το Multi-Link Operation— καθώς και της χρονοδρομολόγησης όπως αυτή ορίζεται στα πρότυπα Wi-Fi 6 και Wi-Fi 7. Μέσα από τη μελέτη αυτή αποσαφηνίζεται πώς οι διαφορετικοί μηχανισμοί επηρεάζουν την απόδοση του δικτύου και την εμπειρία των χρηστών. Εξετάζοντας συγκεκριμένα χαρακτηριστικά, όπως ο προγραμματισμός της κίνησης και η κατανομή των πακέτων σε πολλαπλά κανάλια, η μελέτη αυτή συμβάλλει στην κατανόηση των πλεονεκτημάτων και των αδυναμιών των τρεχουσών τεχνολογιών, και συνεισφέρει στη διαμόρφωση προτάσεων για τη βελτίωση της αποδοτικότητας των μελλοντικών ασύρματων δικτύων.

Τα πρότυπα για την υλοποίηση των δικτύων Wi-Fi επόμενης γενιάς έχουν ήδη αναπτυχθεί. Η χρονοδρομολόγηση ροών δεδομένων αναμένεται να έχει ένα σημαντικό ρόλο στην διατήρηση της ζητούμενης ποιότητας εξυπηρέτησης των χρηστών, και παράλληλα στην υψηλή αξιοποίηση της χωρητικότητας του δικτύου.

Όταν, το 1990, πραγματοποιήθηκε η πρώτη συνάντηση εργασίας του έργου 802.11, ήταν αδύνατο να φανταστεί κανείς τον βαθμό στον οποίο αυτή η πρώιμη πρωτοβουλία για την «ανάπτυξη ενός μέσου ελέγχου πρόσβασης (MAC) και η προδιαγραφή φυσικού επιπέδου (PHY) για ασύρματη

συνδεσιμότητα για σταθερούς, φορητούς και κινούμενους σταθμούς σε μια τοπική περιοχή» [92], θα επηρέαζε τον τρόπο σύνδεσης στο διαδίκτυο.

Τις τελευταίες δεκαετίες, το δίκτυο Wi-Fi, το οποίο βασίζεται στα πρότυπα IEEE 802.11, έχει γίνει ευρέως διαδεδομένο και πλέον σχεδόν κάθε συσκευή (smartphone, laptop, desktop) διαθέτει δυνατότητα συνδεσιμότητας Wi-Fi. Ωστόσο, η ραγδαία αύξηση της χρήσης των δικτύων Wi-Fi δημιουργεί νέες προκλήσεις για τη μελλοντική τους ανάπτυξη. Οι απαιτήσεις των χρηστών αυξάνονται, η πυκνότητα των δικτύων μεγαλώνει, ο αριθμός των χρηστών και των συσκευών τους αυξάνεται εκθετικά, με αποτέλεσμα να προβλέπεται ότι τα δίκτυα δεν θα μπορούν να εξυπηρετήσουν όλους τους χρήστες.

Η εξέλιξη των προτύπων Wi-Fi τα τελευταία χρόνια καταδεικνύει μια εντυπωσιακή αύξηση των ονομαστικών ρυθμών μετάδοσης δεδομένων, από τα λίγα Mbit/s των πρώτων εκδόσεων έως τα πολλαπλά Gbit/s που υποστηρίζονται σήμερα. Οι τεχνολογίες πολλαπλών εισόδων/εξόδων (MIMO), η ορθογωνική πολλαπλή πρόσβαση με διαίρεση συχνότητας (OFDMA) και οι τεχνικές διαμόρφωσης υψηλής τάξης (1024-QAM και 4096-QAM) συνέβαλαν καθοριστικά στη βελτίωση της αποδοτικότητας φάσματος. Ωστόσο, όπως επισημαίνουν οι πρόσφατες μελέτες, η αύξηση του θεωρητικού ρυθμού μετάδοσης δεν αρκεί από μόνη της για τη βελτίωση της συνολικής εμπειρίας των χρηστών. Παράγοντες όπως οι παρεμβολές, η μη σταθερή διαθεσιμότητα καναλιών, και τα ποικίλα σενάρια διαμόρφωσης επηρεάζουν ουσιαστικά την πραγματική απόδοση. Έτσι, οι νεότερες προσεγγίσεις στα δίκτυα Wi-Fi 7 και Wi-Fi 8 επικεντρώνονται στη βελτιστοποίηση της αποδοτικότητας καναλιού και της καθυστέρησης, παρά αποκλειστικά στην αύξηση του ονομαστικού ρυθμού δεδομένων [1], [2].

Η συγκεκριμένη διπλωματική εργασία καταγράφει την παρούσα κατάσταση στην περιοχή των δικτύων IEEE 802.11, και ειδικότερα των προτύπων IEEE 802.11ax, 802.11be και 802.11bn, με έμφαση στους μηχανισμούς διαχείρισης πόρων και χρονοδρομολόγησης ροών δεδομένων. Η μελέτη πραγματοποιείται τόσο από την πλευρά των προτύπων (IEEE), όσο και από την πλευρά των ερευνητικών προτάσεων της επιστημονικής κοινότητας. Η εργασία βασίζεται σε μια συστηματική ανασκόπηση των προτύπων IEEE και της σχετικής βιβλιογραφίας, με στόχο τη συγκριτική αξιολόγηση των τεχνικών χαρακτηριστικών και των μηχανισμών των προτύπων Wi-Fi 6, Wi-Fi 7 και Wi-Fi 8.

Η διεξαγωγή μιας τέτοιας μελέτης είναι απαραίτητη, καθώς οι απαιτήσεις των σύγχρονων εφαρμογών σε ταχύτητα και αξιοπιστία συνεχώς αυξάνονται, ιδιαίτερα σε περιβάλλοντα υψηλής πυκνότητας χρηστών, όπως τα έξυπνα σπίτια, οι επιχειρήσεις και οι δημόσιοι χώροι. Μέσα από τη βαθύτερη κατανόηση των μηχανισμών χρονοδρομολόγησης, μπορούμε να αναπτύξουμε

αποδοτικότερες λύσεις που ενισχύουν την ποιότητα των υπηρεσιών και την απόδοση του δικτύου. Συνεπώς, η εργασία αυτή όχι μόνο προσφέρει χρήσιμα συμπεράσματα για την ακαδημαϊκή κοινότητα, αλλά και ουσιαστικές βελτιώσεις για την πραγματική εφαρμογή των τεχνολογιών Wi-Fi, ενισχύοντας την αποδοτικότητα και την αξιοπιστία των μελλοντικών ασύρματων δικτύων.

Μεθοδολογικά, η εργασία βασίζεται σε συστηματική ανασκόπηση δύο κατηγοριών πηγών: αφενός των επίσημων προδιαγραφών της IEEE (802.11ax-2021, 802.11be-2024 και των τρεχόντων σχεδίων του 802.11bn), αφετέρου της πρόσφατης επιστημονικής βιβλιογραφίας και των τεχνικών αναφορών της βιομηχανίας. Η σύγκριση των τριών προτύπων γίνεται ως προς το φάσμα, τη διαμόρφωση, τους μηχανισμούς πολλαπλής πρόσβασης και την ποιότητα υπηρεσίας. Τα βήματα εκπόνησης της εργασίας συνοψίζονται στην Εικόνα 1.

Εικόνα 1 Βήματα εκπόνησης της εργασίας

1.2 Σύγχρονες Προκλήσεις στα Δίκτυα Wi-Fi

Η μεγαλύτερη πρόκληση σχετικά με την ανάπτυξη και το σχεδιασμό του 802.11ax είναι η παραδοχή ότι, σήμερα, οι συσκευές ασύρματων τοπικών δικτύων (Wireless Local Area Network – WLAN) εγκαθίστανται και λειτουργούν σε πολύ διαφορετικά περιβάλλοντα, που έχουν ως κύριο χαρακτηριστικό την παρουσία μεγάλου αριθμού τερματικών συγκεντρωμένων σε περιορισμένες γεωγραφικές περιοχές.

Σύγχρονα περιβάλλοντα υψηλής πυκνότητας, όπως εταιρικά γραφεία, αίθουσες συνεδριάσεων, πανεπιστημιακές εγκαταστάσεις, εμπορικά κέντρα, αεροδρόμια, οικιστικά συγκροτήματα και αθλητικά στάδια, αποτελούν χαρακτηριστικά παραδείγματα ultra-dense δικτύων στα οποία συνυπάρχει μεγάλος αριθμός χρηστών και σημείων πρόσβασης (Access Points – APs). Σε τέτοιες εγκαταστάσεις, η απαίτηση για σταθερή, αξιόπιστη και ταυτόχρονα αποδοτική ασύρματη σύνδεση οδηγεί στην ανάγκη υιοθέτησης μηχανισμών πολλαπλής πρόσβασης και συνεργασίας μεταξύ των APs, καθώς ένα μόνο σημείο πρόσβασης δεν επαρκεί για να εξυπηρετήσει τη συνολική χωρητικότητα του χώρου [10].

Η αυξανόμενη χωρική πυκνότητα οδηγεί σε επικάλυψη καναλιών και συνεπώς σε αύξηση των παρεμβολών. Σε τέτοια σενάρια, η μέγιστη συνολική απόδοση του δικτύου δεν αποτελεί πλέον το κύριο μέτρο αξιολόγησης· ο βασικός στόχος είναι η βελτίωση της φασματικής αποδοτικότητας ανά

περιοχή (Area Spectral Efficiency), δηλαδή η αναλογία του ρυθμού μετάδοσης προς την επιφάνεια κάλυψης. Οι πιο πρόσφατες προδιαγραφές του προτύπου IEEE 802.11bn (Wi-Fi 8) δίνουν ιδιαίτερη έμφαση σε αυτόν τον δείκτη, καθώς η διαχείριση φάσματος και πόρων σε πυκνά περιβάλλοντα καθορίζει τη συνολική ποιότητα υπηρεσίας (QoS) [12].

Για την αντιμετώπιση αυτών των προκλήσεων, τα νεότερα πρότυπα Wi-Fi 7 (802.11be) και Wi-Fi 8 (802.11bn) εισάγουν βελτιωμένες τεχνικές συντονισμού πολλαπλών σημείων (Multi-AP Coordination), χωρικής επαναχρησιμοποίησης (Spatial Reuse) και δυναμικής κατανομής καναλιών, με στόχο τη βελτίωση της φασματικής αποδοτικότητας ανά περιοχή και τη μείωση των παρεμβολών [12], [13]. Σημαντικό ρόλο σε αυτήν την εξέλιξη παίζει και η βελτίωση του μηχανισμού BSS Coloring, ο οποίος επιτρέπει στους σταθμούς να αναγνωρίζουν γειτονικά Basic Service Sets και να ρυθμίζουν την ένταση εκπομπής και το κατώφλι ανίχνευσης (CCA Threshold). Με αυτόν τον τρόπο, αυξάνεται η πιθανότητα ταυτόχρονων μεταδόσεων χωρίς σύγκρουση, βελτιώνοντας ουσιαστικά την απόδοση του δικτύου σε πυκνά περιβάλλοντα [11].

Συνολικά, οι σύγχρονες κατευθύνσεις στην τυποποίηση Wi-Fi στοχεύουν στη μετάβαση από στατικές, ανεξάρτητες αρχιτεκτονικές AP σε συνεργατικά, ευφυή δίκτυα, ικανά να αυτοπροσαρμόζονται σε πραγματικό χρόνο ανάλογα με τη φόρτωση του καναλιού και τη χωρική πυκνότητα των χρηστών. Αυτή η προσέγγιση επιτρέπει τη σημαντική αύξηση της αποδοτικότητας φάσματος, της ποιότητας εμπειρίας χρήστη (QoE) και της αξιοπιστίας σε πυκνά και δυναμικά περιβάλλοντα ασύρματης πρόσβασης [10], [12], [13]. Σε πραγματικές συνθήκες, οι συσκευές δικτύωσης σπάνια λειτουργούν σε συνθήκες κορεσμού, δηλαδή με την ουρά τους διαρκώς γεμάτη πακέτα. Ανεξάρτητα από το μέγεθος που κατέχει ένα πακέτο έτοιμο προς αποστολή, υπάρχει ένα σταθερό χρονικό διάστημα για την απόκτηση πρόσβασης στο κανάλι, για τον διαχωρισμό των πλαισίων και την αποστολή μιας επιβεβαίωσης. Έτσι, για την αποστολή μικρών φορτίων δεδομένων η αρχική χρονική επιβάρυνση σε σχέση με το χρόνο μετάδοσης σε κανάλι είναι σημαντική, υποβαθμίζοντας σημαντικά την απόδοση επιπέδου εφαρμογής [9].

Μια άλλη πρόκληση προέρχεται από την αλλαγή των μοτίβων κίνησης δεδομένων λόγω τεχνολογικών εξελίξεων. Η ταχεία εξάπλωση των κοινωνικών δικτύων καθώς και των εφαρμογών Web οι οποίες είναι πλούσιες σε πολυμεσικό περιεχόμενο, η ανάπτυξη εφαρμογών που απαιτούν αλληλεπίδραση με κεντρικούς διακομιστές (π.χ. διακομιστές νέφους) έχουν ως αποτέλεσμα την αύξηση του φορτίου όχι μόνο στην κατερχόμενη ζεύξη (DL) μετάδοσης, αλλά και στην ανερχόμενη ζεύξη (UL). Για την κατερχόμενη ροή (DL) στο 802.11ac εφαρμόστηκε το DL MIMO πολλαπλών χρηστών (MU) το οποίο απέδωσε ιδιαίτερα καλά αποτελέσματα. Για την ανερχόμενη ροή, μια

τεχνική πολλαπλών χρηστών απαιτεί πολύπλοκο συγχρονισμό και εξακολουθεί να είναι μία πρόκληση.

1.3 Δομή της εργασίας

Στο δεύτερο κεφάλαιο γίνεται μία ιστορική αναδρομή του προτύπου 802.11 από το 1997 που πρωτοεμφανίστηκε έως το σήμερα. Πιο αναλυτικά, περιγράφεται ο κύκλος ανάπτυξης ενός προτύπου και τα πρότυπα 802.11, 802.11a, 802.11b, 802.11g, 802.11n και 802.11ac.

Στο τρίτο κεφάλαιο παρουσιάζεται το πρότυπο 802.11ax, η διαμόρφωση και η μορφή του πλαισίου στο φυσικό επίπεδο καθώς και η μετάδοση πολλαπλών χρηστών και η πολλαπλή πρόσβαση στα κανάλια.

Στο τέταρτο κεφάλαιο παρουσιάζεται το πρότυπο IEEE 802.11be (Wi-Fi 7): οι τεχνικοί στόχοι, οι καινοτομίες (MLO, 4096-QAM, κανάλια 320 MHz), η υποστήριξη QoS και τα σενάρια εφαρμογής [1], [25]. Στο πέμπτο κεφάλαιο εξετάζεται το υπό ανάπτυξη πρότυπο IEEE 802.11bn (Wi-Fi 8): η τρέχουσα ερευνητική κατάσταση, οι προβλεπόμενες τεχνολογίες (AI-assisted scheduling), η σύνδεσή του με 6G και IoT, καθώς και η ενεργειακή αποδοτικότητα. Στο έκτο κεφάλαιο πραγματοποιείται συγκριτική ανάλυση των τριών προτύπων (802.11ax, 802.11be, 802.11bn) ως προς τα βασικά τεχνικά χαρακτηριστικά, τα πλεονεκτήματα, τις αδυναμίες και τις προοπτικές χρήσης σε διαφορετικά σενάρια. Στο έβδομο κεφάλαιο παρουσιάζονται τα συμπεράσματα της εργασίας και οι προτάσεις για μελλοντική έρευνα.

2 *Θεωρητικό Πλαίσιο - Ιστορική Αναδρομή*

Η ιστορία του Wi-Fi, μιας τεχνολογίας που έφερε επανάσταση στον τρόπο με τον οποίο συνδεόμαστε στο Διαδίκτυο, ξεκινά από τις αρχές του 20ου αιώνα με το πρωτοποριακό έργο για την ασύρματη επικοινωνία. Το 1942, η Αμερικανίδα ηθοποιός και εφευρέτης Hedy Lamarr, μαζί με τον συνθέτη George Antheil, ανέπτυξαν μια τεχνική εξάπλωσης φάσματος με μεταπήδηση συχνότητας (FHSS). Αν και προοριζόταν για ασφαλείς στρατιωτικές επικοινωνίες κατά τη διάρκεια του Β' Παγκοσμίου Πολέμου, το FHSS έθεσε τις βάσεις για μεταγενέστερες ασύρματες καινοτομίες, συμπεριλαμβανομένου του Wi-Fi. Οι αρχές της μεταπήδησης συχνότητας επέτρεψαν στις συσκευές επικοινωνίας να εναλλάσσουν συχνότητες, μειώνοντας τις παρεμβολές και αυξάνοντας την ασφάλεια, μια έννοια ζωτικής σημασίας για τα σύγχρονα ασύρματα πρότυπα [48], [49].

Η πορεία προς το Wi-Fi ξεκίνησε τη δεκαετία του 1970 όταν ο Norman Abramson και η ομάδα του στο Πανεπιστήμιο της Χαβάης ανέπτυξαν το ALOHAnet. Το ALOHAnet, που κυκλοφόρησε το 1971, ήταν το πρώτο ασύρματο δίκτυο μεταγωγής πακέτων, που επέτρεπε στους υπολογιστές να επικοινωνούν μέσω ραδιοσυχνοτήτων. Αν και πρωτόγονο με τα σημερινά δεδομένα, το ALOHAnet απέδειξε τη σκοπιμότητα της ασύρματης επικοινωνίας δεδομένων και επηρέασε σημαντικά τον σχεδιασμό του Ethernet και μετέπειτα πρωτοκόλλων ασύρματης δικτύωσης. Αυτή η καινοτομία άνοιξε το δρόμο για την επιδίωξη υψηλότερου εύρους ζώνης και πιο αξιόπιστων ασύρματων συστημάτων [49].

2.1 Το πρότυπο IEEE 802.11: Γενική Επισκόπηση

Το πρότυπο IEEE 802.11 ορίζει τις προδιαγραφές για τα ασύρματα τοπικά δίκτυα (Wireless Local Area Networks – WLAN), επιτρέποντας τη μετάδοση δεδομένων σε συχνότητες 2,4 GHz, 5 GHz και πλέον και σε 6 GHz. Καθορίζει τον τρόπο επικοινωνίας μεταξύ των συσκευών μέσω RF (Radio Frequency), καθώς και τους μηχανισμούς ελέγχου πρόσβασης (MAC layer). Στην Εικόνα 2 παρουσιάζεται η χρονική εξέλιξη των εκδόσεων του προτύπου IEEE 802.11, από την αρχική έκδοση του 1997 έως το 802.11be [15].

Το 1985, σημειώθηκε μια σημαντική εξέλιξη, όταν η Ομοσπονδιακή Επιτροπή Επικοινωνιών (FCC) στις Ηνωμένες Πολιτείες ενέκρινε τη χρήση των βιομηχανικών, επιστημονικών και ιατρικών ζωνών ραδιοσυχνοτήτων (Industrial, Scientific and Medical – ISM) για επικοινωνία χωρίς άδεια. Αυτή η απόφαση παρείχε ένα κανονιστικό πλαίσιο για την ανάπτυξη τεχνολογιών ασύρματης επικοινωνίας, συμπεριλαμβανομένου του Wi-Fi. Οι ζώνες ISM πρόσφεραν μια οικονομικά αποδοτική λύση για επικοινωνία μικρής εμβέλειας, επιτρέποντας στους καινοτόμους να πειραματιστούν και να αναπτύξουν ασύρματα συστήματα χωρίς να απαιτούν ακριβές συμφωνίες αδειοδότησης [15].

Ο άμεσος προκάτοχος του σύγχρονου Wi-Fi εμφανίστηκε στα τέλη της δεκαετίας του 1980, όταν η NCR Corporation και η AT&T ανέπτυξαν το WaveLAN. Επρόκειτο για μια τεχνολογία ασύρματου τοπικού δικτύου (WLAN) σχεδιασμένη για καταστήματα λιανικής, η οποία κυκλοφόρησε εμπορικά στις αρχές της δεκαετίας του 1990. Το WaveLAN υποστήριζε ρυθμούς μεταφοράς δεδομένων μεταξύ 1 και 2 Mbit/s, ταχύτητες ελάχιστες σε σχέση με τις σημερινές, αλλά επαναστατικές για την εποχή τους. Η ανάπτυξη του WaveLAN κατέδειξε τη δυνατότητα για ασύρματα δίκτυα σε εμπορικά και προσωπικά περιβάλλοντα υπολογιστών, εμπνέοντας περαιτέρω προσπάθειες καινοτομίας και τυποποίησης [39].

Η πρώτη έκδοση του IEEE 802.11 κυκλοφόρησε το 1997 και παρείχε θεωρητικές ταχύτητες μετάδοσης έως και 2 Mbit/s, χρησιμοποιώντας τη ζώνη συχνοτήτων των 2,4 GHz. Αν και η απόδοση ήταν περιορισμένη σε σχέση με τα ενσύρματα δίκτυα της εποχής, αποτέλεσε μια καινοτόμο λύση για ασύρματη συνδεσιμότητα σε μικρές αποστάσεις. Ωστόσο, οι περιορισμοί στην ταχύτητα και την εμβέλεια οδήγησαν γρήγορα στην ανάπτυξη βελτιωμένων εκδόσεων του προτύπου [40].

Ο ίδιος ο όρος "Wi-Fi" επινοήθηκε το 1999 όταν δημιουργήθηκε η Συμμαχία Συμβατότητας Ασύρματου Ethernet (WECA), σήμερα Wi-Fi Alliance, για την προώθηση της διαλειτουργικότητας μεταξύ ασύρματων συσκευών. Το 1999, δημοσιεύτηκαν δύο σημαντικές επεκτάσεις του προτύπου: το IEEE 802.11b και το IEEE 802.11a. Το 802.11b βελτίωσε σημαντικά την ταχύτητα μετάδοσης φτάνοντας έως τα 11 Mbit/s, διατηρώντας τη χρήση της ζώνης των 2,4 GHz, ενώ παρέμεινε συμβατό με την αρχική έκδοση. Αντίθετα, το 802.11a λειτούργησε στη συχνότητα των 5 GHz, χρησιμοποιώντας τη μέθοδο διαμόρφωσης OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing), πετυχαίνοντας θεωρητικές ταχύτητες έως 54 Mbit/s, αλλά με μειωμένη εμβέλεια και υψηλότερο κόστος υλοποίησης. Το 802.11a δεν υιοθετήθηκε τόσο ευρέως όσο το 802.11b, κυρίως λόγω του περιορισμένου εύρους κάλυψης και των αυξημένων απαιτήσεων του εξοπλισμού [40]. Σημειώνεται ακόμη ότι το 802.11a είχε νέο φυσικό επίπεδο (OFDM)· ίδια έμεινε μόνο η μορφή του πλαισίου (MAC).

Από την αρχική του κυκλοφορία, το Wi-Fi έχει υποστεί σημαντικές προόδους, με τα νεότερα πρότυπα IEEE να αυξάνουν την ταχύτητα, την εμβέλεια και την αξιοπιστία. Το 2003, το πρότυπο 802.11g βελτιώθηκε σε σχέση με τον προκάτοχό του, προσφέροντας ταχύτητες έως και 54 Mbit/s, ενώ παρέμεινε συμβατό με το 802.11b. Το 2009, το πρότυπο IEEE 802.11n έφερε σημαντικές καινοτομίες, όπως η χρήση τεχνολογίας MIMO (Multiple Input, Multiple Output), η οποία επέτρεπε την ταυτόχρονη μετάδοση δεδομένων μέσω πολλαπλών κεραιών, αυξάνοντας δραματικά την απόδοση και την αξιοπιστία του δικτύου. Το 802.11n μπορούσε να λειτουργεί και στις δύο ζώνες συχνοτήτων – 2,4 και 5 GHz – και προσέφερε θεωρητικές ταχύτητες έως και 600 Mbit/s, καθιστώντας το ιδανικό για εφαρμογές πολυμέσων και μεταφοράς μεγάλων αρχείων. Παράλληλα, εισήγαγε ευρύτερα κανάλια (έως 40 MHz), βελτιώνοντας την ταχύτητα μετάδοσης σε σχέση με τα προηγούμενα πρότυπα [15], [36].

Η μετάβαση σε ακόμα υψηλότερες αποδόσεις επιτεύχθηκε με το πρότυπο IEEE 802.11ac (Wi-Fi 5), το οποίο εισήχθη το 2013 και λειτούργησε αποκλειστικά στη ζώνη των 5 GHz. Το 802.11ac παρουσίασε τεχνολογίες όπως MU-MIMO (Multi-User MIMO) και κανάλια πλάτους έως 160 MHz, με θεωρητικές ταχύτητες που ξεπερνούσαν το 1 Gbit/s. Τα χαρακτηριστικά αυτά έθεσαν τις βάσεις για δίκτυα Wi-Fi υψηλής απόδοσης με έμφαση στην ταχύτητα και στην εξυπηρέτηση πολλαπλών χρηστών ταυτόχρονα.

Το επόμενο ευρέως υιοθετημένο πρότυπο είναι το IEEE 802.11ax (Wi-Fi 6), το οποίο εγκρίθηκε το 2019/2021. Το Wi-Fi 6 βελτιώνει τη λειτουργία των WLAN σε περιβάλλοντα με υψηλή πυκνότητα χρηστών (πανεπιστήμια, αεροδρόμια, μεγάλα γραφεία), εισάγοντας τεχνολογίες όπως OFDMA (Orthogonal Frequency Division Multiple Access), Uplink και Downlink MU-MIMO, καθώς και μηχανισμούς εξοικονόμησης ενέργειας όπως το Target Wake Time (TWT). Με αυτές τις δυνατότητες, το Wi-Fi 6 προσφέρει θεωρητικές ταχύτητες έως ~9,6 Gbit/s [41].

Το επόμενο βήμα στην εξέλιξη των WLAN είναι το πρότυπο IEEE 802.11be (Wi-Fi 7). Το πρότυπο αυτό εισάγει σημαντικές βελτιώσεις, όπως εύρος καναλιών έως 320 MHz, θεωρητικούς ρυθμούς μετάδοσης που, στα αρχικά σχέδια με 16 χωρικές ροές (spatial streams), έφταναν περίπου τα 46 Gbit/s· στο τελικό IEEE 802.11be-2024 ο μέγιστος αριθμός χωρικών ροών περιορίστηκε σε 8 και ο μέγιστος ρυθμός μετάδοσης σε περίπου 23 Gbit/s. Οι δυνατότητες αυτές επιτρέπουν την υποστήριξη απαιτητικών εφαρμογών, όπως η επαυξημένη και η εικονική πραγματικότητα (AR/VR), το cloud gaming και οι βιομηχανικές εφαρμογές με ιδιαίτερα χαμηλές απαιτήσεις καθυστέρησης.

Η ασφάλεια των ασύρματων δικτύων αποτέλεσε επίσης κρίσιμο ζήτημα στην εξέλιξη των προτύπων. Από το αρχικό πρωτόκολλο WEP (Wired Equivalent Privacy), το οποίο αποδείχθηκε

ανασφαλές, η κοινότητα προχώρησε στην υιοθέτηση των WPA (Wi-Fi Protected Access) και WPA2, με το WPA2 να χρησιμοποιεί ισχυρούς αλγορίθμους όπως AES-CCMP. Πιο πρόσφατα, το WPA3 (2018) ενίσχυσε την προστασία έναντι επιθέσεων λεξικού, εισήγαγε την αυθεντικοποίηση SAE (Simultaneous Authentication of Equals) και υιοθέτησε καλύτερη ασφάλεια για δημόσια και ιδιωτικά δίκτυα [42].

2.2 Πρώιμες εκδόσεις: 802.11, 802.11a/b/g

Η ενότητα αυτή παρουσιάζει κάποια από τα χαρακτηριστικά των παραπάνω εκδόσεων.

2.2.1 802.11 legacy

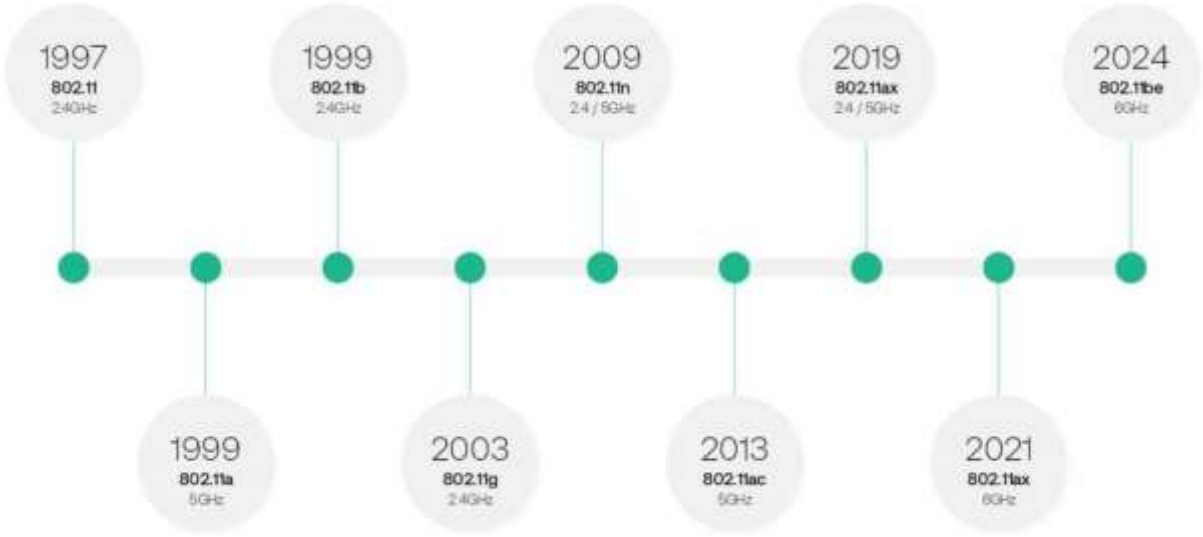
Η αρχική έκδοση του προτύπου IEEE 802.11, γνωστή και ως legacy 802.11, δημοσιεύθηκε το 1997 και αποτέλεσε τη θεμελιώδη βάση για όλες τις επόμενες εκδόσεις των ασύρματων τοπικών δικτύων (WLAN). Το συγκεκριμένο πρότυπο καθόριζε δύο βασικούς ρυθμούς μετάδοσης δεδομένων, 1 Mbit/s και 2 Mbit/s, συμπεριλαμβανομένου μηχανισμού διόρθωσης σφαλμάτων προώθησης (Forward Error Correction – FEC) για την αύξηση της αξιοπιστίας των επικοινωνιών [44], [45].

Στο φυσικό επίπεδο (Physical Layer), το 802.11 του 1997 καθόριζε τρεις εναλλακτικές τεχνολογίες μετάδοσης:

- Διάχυτη υπέρυθρη λειτουργία (Diffuse Infrared – IR), η οποία χρησιμοποιούσε οπτική εκπομπή σε ταχύτητα 1 Mbit/s και απευθυνόταν κυρίως σε κλειστούς χώρους [46].
- Frequency Hopping Spread Spectrum (FHSS), όπου το σήμα μεταπηδούσε μεταξύ διαφορετικών συχνοτήτων εντός της ζώνης των 2,4 GHz, με στόχο τη μείωση των παρεμβολών και τη βελτίωση της ανθεκτικότητας της σύνδεσης [47].
- Direct Sequence Spread Spectrum (DSSS), το οποίο χρησιμοποιούσε κώδικες Barker 11 bits για την εξάπλωση του φάσματος και την αξιόπιστη μετάδοση δεδομένων σε ταχύτητες 1 ή 2 Mbit/s [47], [48].

Οι τεχνολογίες FHSS και DSSS αξιοποιούσαν τη ζώνη ISM (Industrial, Scientific and Medical) στα 2,4 GHz, η οποία είχε εγκριθεί από την FCC ως ελεύθερη ζώνη χωρίς ανάγκη αδειοδότησης. Αυτή η απόφαση υπήρξε καθοριστική για την ανάπτυξη των μετέπειτα τεχνολογιών Wi-Fi [49]. Παρά το γεγονός ότι το πρότυπο του 1997 δεν γνώρισε ευρεία εμπορική επιτυχία, αποτέλεσε το απαραίτητο πρώτο βήμα για την τυποποίηση ασύρματων δικτύων μικρής εμβέλειας. Εισήγαγε για πρώτη φορά τον μηχανισμό Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance (CSMA/CA) στο υποεπίπεδο MAC, ο οποίος παραμένει έως σήμερα η βασική μέθοδος ελέγχου πρόσβασης στο μέσο μετάδοσης [45], [50]. Η συμβολή του legacy 802.11 έγκειται στην καθιέρωση μιας κοινής

αρχιτεκτονικής επικοινωνίας για συσκευές διαφορετικών κατασκευαστών, κάτι που επέτρεψε τη δημιουργία ενός παγκόσμιου οικοσυστήματος Wi-Fi. Με βάση αυτό το θεμέλιο αναπτύχθηκαν οι επόμενες εκδόσεις — 802.11b, 802.11a, 802.11g — οι οποίες αύξησαν δραματικά τις ταχύτητες, βελτίωσαν την αποδοτικότητα φάσματος και οδήγησαν στις σύγχρονες υλοποιήσεις Wi-Fi 6 και Wi-Fi 7 [43], [44], [48].



Εικόνα 2 Ιστορική εξέλιξη του προτύπου 802.11 [43]

2.2.2 802.11a

Το 802.11a παρουσιάστηκε το 1999. Η μορφή πλαισίου ήταν ίδια με το 802.11 legacy, αλλά στο φυσικό επίπεδο (PHY) χρησιμοποιείται η τεχνική διαμόρφωσης OFDM για τη μετάδοση των δεδομένων. Η ζώνη λειτουργίας του είναι τα 5 GHz και ο ονομαστικός ρυθμός δεδομένων ανέρχεται στα 54 Mbit/s. Αν ληφθεί υπόψη η επιβάρυνση των πρωτοκόλλων, η πραγματική απόδοση περιορίζεται περίπου στα 20 Mbit/s [63].

2.2.3 802.11b

Το πρότυπο IEEE 802.11b αποτελεί την πρώτη σημαντική εμπορική εξέλιξη της οικογένειας ασύρματων τοπικών δικτύων (WLAN) βασισμένων στο IEEE 802.11-1997. Υπενθυμίζεται ότι, ενώ η αρχική έκδοση του 1997 υποστήριζε ρυθμούς μετάδοσης 1 ή 2 Mbit/s, το 802.11b αύξησε τον μέγιστο θεωρητικό ρυθμό σε 11 Mbit/s, εκμεταλλευόμενο τη ζώνη των 2,4 GHz [51], [52].

Η υιοθέτηση του 802.11b στα τέλη της δεκαετίας του 1990 και ιδίως στις αρχές της δεκαετίας του 2000, οφείλεται κυρίως σε τρεις παράγοντες:

- Η σημαντικά αυξημένη ταχύτητα σε σχέση με το legacy 802.11, γεγονός που το έκανε ελκυστικό για πρακτικές εφαρμογές.
- Το σχετικά χαμηλό κόστος των συσκευών, καθώς η τεχνολογία έγινε ευρύτατα διαθέσιμη.
- Η λειτουργία στην μη αδειοδοτούμενη ζώνη 2,4 GHz ISM (Industrial, Scientific and Medical), η οποία επέτρεπε χρήση χωρίς ειδική άδεια σε πολλές χώρες, διευκολύνοντας τη διάδοση δικτύων WLAN.

Το 802.11b χρησιμοποίησε τεχνικές διασποράς φάσματος (ιδίως DSSS — Direct Sequence Spread Spectrum) στο φυσικό επίπεδο (PHY), γεγονός που επέτρεπε ρυθμούς μετάδοσης έως 11 Mbit/s υπό ιδανικές συνθήκες. Η μέγιστη θεωρητική ταχύτητα των 11 Mbit/s όμως υπόκειται σε πολλούς περιορισμούς, όπως απόδοση του δικτύου, λόγος σήματος προς θόρυβο (Signal-to-Noise Ratio – SNR), αποστάσεις και παρεμβολές [53].

Ένας βασικός περιορισμός του IEEE 802.11b είναι η λειτουργία του στην ιδιαίτερα επιβαρυμένη ζώνη συχνοτήτων των 2,4 GHz. Η ζώνη αυτή χρησιμοποιείται από πλήθος συσκευών και τεχνολογιών, όπως φούρνοι μικροκυμάτων, συσκευές Bluetooth, ασύρματα πληκτρολόγια και άλλες συσκευές που λειτουργούν στη ζώνη ISM. Ως αποτέλεσμα, οι παρεμβολές είναι συχνές και μπορούν να επηρεάσουν αρνητικά την απόδοση και την αξιοπιστία του ασύρματου δικτύου. Συγκεκριμένα, πρόσφατες έρευνες έδειξαν ότι η χρήση της ζώνης των 2,4 GHz από τεχνολογίες όπως LoRa ή Bluetooth μπορεί να επηρεάσει σημαντικά την απόδοση WLAN δικτύων τύπου 802.11b/g/n λόγω κοινού φάσματος και αλληλεπίδρασης μεταξύ τεχνολογιών [54], [55].

Επιπλέον, η διάθεση περιορισμένου φάσματος στο 2,4 GHz οδηγεί σε υψηλή συγκέντρωση σημείων πρόσβασης (access points) και συσκευών — κατάσταση που μπορεί να προκαλέσει συμφόρηση και μείωση της πραγματικής ταχύτητας. Η απουσία υποστήριξης τεχνολογιών πολλαπλών ρευμάτων (MIMO) και η έλλειψη μεγαλύτερου φάσματος ή ευρύτερων καναλιών αποτέλεσαν τεχνικά όρια για το 802.11b απέναντι στις επόμενες εξελίξεις.

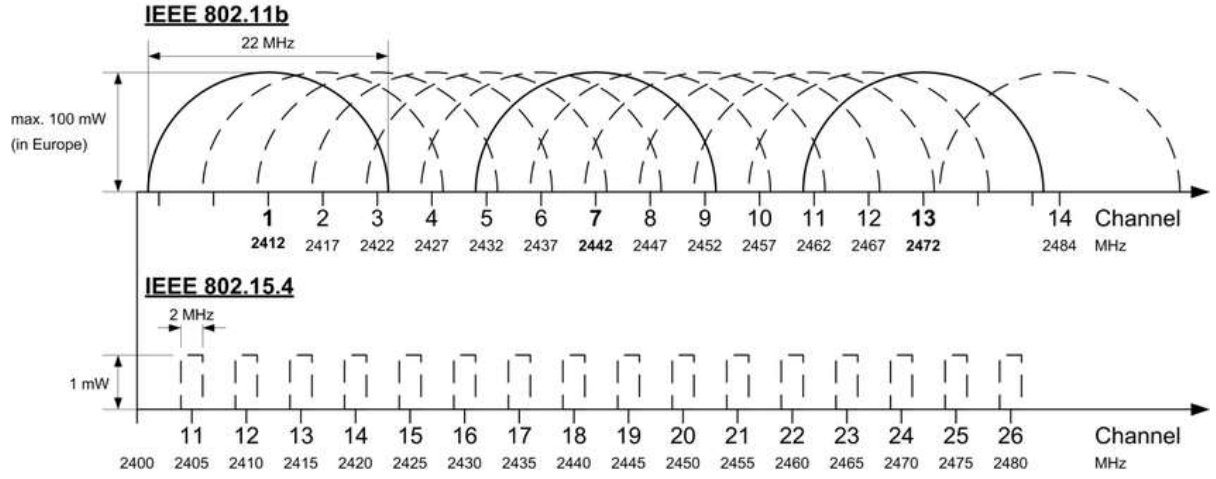
Παρότι το 802.11b πλέον έχει αντικατασταθεί σε πολλές εφαρμογές από πιο σύγχρονα πρότυπα, όπως τα IEEE 802.11g, 802.11n και 802.11ac, η συμβολή του παραμένει σημαντική:

- Ήταν η πρώτη ευρέως υιοθετημένη εκδοχή Wi-Fi, η οποία έδειξε τη βιωσιμότητα των ασύρματων τοπικών δικτύων σε καταναλωτικά και επιχειρησιακά περιβάλλοντα.
- Το 802.11b δημιούργησε το οικοσύστημα Wi-Fi — κατασκευαστές συσκευών, προγράμματα πιστοποίησης (Wi-Fi Alliance), και εφαρμογές — που επέτρεψε τις επόμενες τεχνολογικές αναβαθμίσεις.

- Τα προβλήματα που προέκυψαν (όπως οι παρεμβολές στο 2,4 GHz) αποτέλεσαν μάθημα για τον σχεδιασμό των επόμενων προτύπων: μεγαλύτερα φάσματα (π.χ. 5 GHz), τεχνολογίες MIMO, καλύτερη διαχείριση φάσματος, και τεχνικές μείωσης παρεμβολών.

Η Εικόνα 3 παρουσιάζει τη σχέση και την αλληλεπίδραση μεταξύ των καναλιών του προτύπου IEEE 802.11b και του IEEE 802.15.4 στη ζώνη συχνοτήτων των 2,4 GHz ISM (Industrial, Scientific and Medical). Το πρότυπο IEEE 802.11b, που χρησιμοποιείται ευρέως για δίκτυα Wi-Fi, διαθέτει έως 14 κανάλια εύρους 22 MHz το καθένα, ανάλογα με το κανονιστικό πλαίσιο κάθε χώρας (11 κανάλια στη Βόρεια Αμερική, 13 στην Ευρώπη, 14 στην Ιαπωνία), τα οποία επικαλύπτονται σημαντικά μεταξύ τους. Από αυτά, μόνο τρία κανάλια (1, 6 και 11) είναι αμοιβαία μη επικαλυπτόμενα και επομένως μπορούν να χρησιμοποιηθούν ταυτόχρονα χωρίς σημαντική παρεμβολή. Η ισχύς εκπομπής για το 802.11b μπορεί να φτάσει έως και 100 mW (στην Ευρώπη), κάτι που του προσδίδει σχετικά μεγάλο εύρος κάλυψης αλλά και αυξημένη πιθανότητα παρεμβολών με άλλες συσκευές που χρησιμοποιούν την ίδια ζώνη.

Αντίθετα, το πρότυπο IEEE 802.15.4, που αποτελεί τη βάση για τεχνολογίες χαμηλής ισχύος όπως ZigBee και Thread, χρησιμοποιεί την ίδια ζώνη των 2,4 GHz αλλά με κανάλια εύρους μόλις 2 MHz και ισχύ εκπομπής περίπου 1 mW. Τα κανάλια αυτά (11 – 26) τοποθετούνται με τρόπο που αποφεύγουν εν μέρει τα κεντρικά σημεία των καναλιών Wi-Fi, ωστόσο εξακολουθούν να επικαλύπτονται με αυτά, οδηγώντας σε πιθανές παρεμβολές όταν οι δύο τεχνολογίες συνυπάρχουν στον ίδιο χώρο. Η Εικόνα 3, επομένως, αποτυπώνει με σαφήνεια πώς η διαφορετική σχεδίαση εύρους ζώνης και ισχύος εκπομπής καθορίζει τη συμβατότητα και τη συνύπαρξη Wi-Fi (802.11b) και IoT (802.15.4) συσκευών σε κοινό φάσμα, ζήτημα που αποτελεί αντικείμενο ενεργής έρευνας τα τελευταία χρόνια.



Εικόνα 3 Σύγκριση χρήσης της ζώνης 2,4 GHz από τα πρότυπα 802.11b και 802.15.4 [56]

2.2.4 802.11g

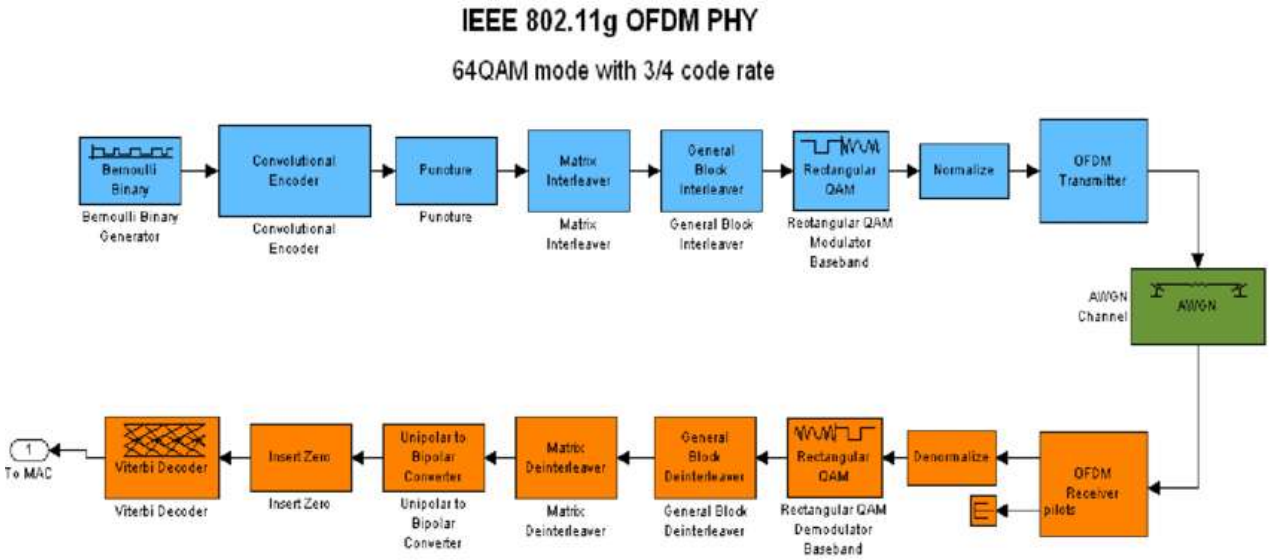
Το πρότυπο IEEE 802.11g, το οποίο εισήχθη στην αγορά τον Ιανουάριο του 2003 και τυποποιήθηκε τον Ιούνιο του ίδιου έτους, αποτελεί σημαντική εξέλιξη της οικογένειας WLAN στην ζώνη των 2,4 GHz. Αν και λειτουργεί στην ίδια συχνότητα με το IEEE 802.11b, το 802.11g υιοθέτησε το σχήμα διαμόρφωσης OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing) όπως αυτό που εισήγαγε το IEEE 802.11a στο πεδίο των 5 GHz, επιτρέποντας θεωρητικό μέγιστο ρυθμό μετάδοσης στο φυσικό επίπεδο (PHY) έως 54 Mbit/s [57], [58]. Αν αφαιρεθεί η επιβάρυνση (overhead) της κωδικοποίησης διόρθωσης σφαλμάτων και των υπόλοιπων μηχανισμών, σε πρακτικές συνθήκες η πραγματική μέση απόδοση φτάνει περίπου τα 22 Mbit/s [58]. Επιπλέον, το 802.11g ήταν πλήρως συμβατό προς τα πίσω (backward compatible) με συσκευές 802.11b, δίνοντας έτσι τη δυνατότητα σε παλαιότερες συσκευές να λειτουργούν παράλληλα σε ένα δίκτυο 802.11g, αλλά ταυτόχρονα εισήγαγε και κάποια προβλήματα απόδοσης: λόγω της συμβατότητας, όταν στο ίδιο δίκτυο υπήρχαν 802.11b συσκευές, η συνολική ταχύτητα του δικτύου 802.11g μειωνόταν κατά περίπου 20% σε σχέση με την ταχύτητα που θα επιτυγχανόταν χωρίς legacy χρήστες 802.11b [59].

Η λειτουργία στη ζώνη των 2,4 GHz παρέχει πλεονεκτήματα ως προς την εμβέλεια σε σχέση με τα 5 GHz (λόγω μικρότερης απορρόφησης από το υλικό και τοίχους) αλλά ταυτόχρονα συνεπάγεται και αυξημένα προβλήματα παρεμβολών (interference) και συμφόρησης δικτύου (congestion) από άλλες συσκευές που δραστηριοποιούνται στην ίδια ζώνη, όπως φούρνοι μικροκυμάτων, Bluetooth, ασύρματα πληκτρολόγια, συσκευές IoT είτε άλλες Wi-Fi συσκευές. Ειδικότερα, σύγχρονες ανασκοπήσεις (2024-2025) αναφέρουν ότι παρότι το 802.11g αποτέλεσε σημαντικό βήμα, οι απαιτήσεις για μεγαλύτερη απόδοση και καλύτερη συμπεριφορά έναντι των παρεμβολών έθεσαν ήδη τις βάσεις για μετάβαση σε πρότυπα όπως το IEEE 802.11n και πέρα [60].

Στην Εικόνα 4 παρουσιάζεται το μοντέλο προσομοίωσης (Simulink) της αλυσίδας πομπού – δέκτη για το φυσικό επίπεδο του προτύπου IEEE 802.11g (OFDM, 64-QAM, ρυθμός κωδικοποίησης 3/4), όπου φαίνεται η ροή επεξεργασίας του σήματος κατά την εκπομπή και τη λήψη. Στην αλυσίδα εκπομπής (πάνω τμήμα του διαγράμματος), τα δεδομένα παράγονται από έναν Bernoulli Binary Generator και ακολουθεί συνελικτική κωδικοποίηση (Convolutional Encoding) για την προσθήκη πλεονασμού, που αυξάνει την ανθεκτικότητα του σήματος σε θόρυβο. Ο Puncturer αφαιρεί επιλεγμένα bits ώστε να επιτευχθεί ο επιθυμητός ρυθμός κωδικοποίησης (εδώ 3/4). Τα δεδομένα κατόπιν διέρχονται από Matrix Interleaver και General Block Interleaver για να ελαχιστοποιηθούν οι επιπτώσεις συνεχόμενων λαθών (burst errors). Στη συνέχεια εφαρμόζεται η διαμόρφωση 64-QAM, όπου κάθε σύμβολο αντιπροσωπεύει 6 bits πληροφορίας μέσω διαφορετικών συνδυασμών πλάτους και φάσης. Το σήμα στη συνέχεια κανονικοποιείται και τροφοδοτείται στον OFDM

Transmitter, ο οποίος το χωρίζει σε 52 υποφέροντα (subcarriers) πριν αποσταλεί μέσω του καναλιού AWGN (Additive White Gaussian Noise), που προσομοιώνει το πραγματικό περιβάλλον μετάδοσης.

Στην αλυσίδα λήψης (κάτω τμήμα), η διαδικασία αντιστρέφεται. Το σήμα λαμβάνεται από τον OFDM Receiver, αποδιαμορφώνεται μέσω Rectangular QAM Demodulator, και υφίσταται αποδιεμπλοκή (deinterleaving), ώστε τα bits να επανέλθουν στη σωστή σειρά. Ο Unipolar-to-Bipolar Converter επαναφέρει την αρχική μορφή του σήματος, ενώ ο Viterbi Decoder πραγματοποιεί αποκωδικοποίηση με βάση τον αλγόριθμο Viterbi, ανακτώντας το αρχικό bitstream που προήλθε από το επίπεδο MAC [97].



Εικόνα 4 Μοντέλο προσομοίωσης (Simulink) φυσικού επιπέδου 802.11g [97]

2.3 Ενδιάμεσες εκδόσεις: 802.11n και 802.11ac

Η ενότητα αυτή παρουσιάζει τα βασικά χαρακτηριστικά των παραπάνω εκδόσεων.

2.3.1 802.11n

Το πρότυπο IEEE 802.11n, το οποίο το εμπορικό σήμα Wi-Fi Alliance αποκάλεσε Wi-Fi 4, σηματοδότησε ένα κρίσιμο βήμα στην εξέλιξη των ασύρματων τοπικών δικτύων (WLAN). Το αρχικό έργο για το 802.11n άρχισε το 2002 και η τελική τυποποίησή του συντελέστηκε το 2009 (ως IEEE 802.11n-2009) [62]. Το πρότυπο εισήγαγε πολλαπλές τεχνολογικές καινοτομίες, όπως τη χρήση πολυκεραίας μετάδοσης/λήψης (MIMO – Multiple Input Multiple Output), κανάλια διπλού

εύρους 20 / 40 MHz και τη λειτουργία στις δύο ζώνες συχνοτήτων 2,4 GHz και 5 GHz, ενώ η μέγιστη θεωρητική ταχύτητα μετάδοσης έφτανε τα 600 Mbit/s υπό βέλτιστες συνθήκες [63], [64].

Η αξιοποίηση της MIMO τεχνολογίας επέτρεψε στο 802.11n να μεταδίδει ταυτόχρονα πολλαπλές χωρικές ροές (spatial streams), αξιοποιώντας το φαινόμενο της πολυδιόδευσης (multipath) και επιτρέποντας σημαντική αύξηση της φασματικής αποδοτικότητας [65]. Επιπλέον, με τη χρήση καναλιών 40 MHz (στο πλαίσιο του channel-bonding) το πρότυπο ουσιαστικά διπλασίασε το εύρος ζώνης σε σχέση με τα προηγούμενα κανάλια των 20 MHz, χάρη στο οποίο επιτεύχθηκαν ρυθμοί έως 300 Mbit/s με δύο χωρικές ροές και έως 600 Mbit/s με 4×4 MIMO και guard interval 400 ns, ανεξαρτήτως ζώνης λειτουργίας [64], [65].

Το πρότυπο ήταν πλήρως συμβατό προς τα πίσω με τα 802.11b/g, διατηρώντας λειτουργία στην ίδια ζώνη 2,4 GHz, γεγονός που διευκόλυνε την υιοθέτησή του σε ήδη υπάρχουσες εγκαταστάσεις. Παρόλα αυτά, αυτή η συμβατότητα εισήγαγε και περιορισμούς: όταν στο ίδιο δίκτυο ενσωματώνονταν παλαιότερες συσκευές, η συνολική απόδοση μπορούσε να μειωθεί λόγω των χαμηλότερων ρυθμών και της αλληλεπίδρασης των συσκευών. Επιπλέον, η χρήση της ζώνης των 2,4 GHz, αν και ευνοούσε τη μεγαλύτερη εμβέλεια, εξακολουθούσε να υπόκειται σε προβλήματα παρεμβολών (π.χ. από Bluetooth, μικροκύματα, άλλες συσκευές) και κορεσμού, κυρίως σε πυκνά ή βιομηχανικά περιβάλλοντα [63], [66].

Τα τελευταία έτη (2023-2025) μελέτες που αξιολόγησαν διάφορες γενιές Wi-Fi (Wi-Fi 4, Wi-Fi 5, Wi-Fi 6) έδειξαν ότι παρότι το 802.11n/ Wi-Fi 4 εξακολουθεί να υποστηρίζεται ευρέως σε πολλές εγκαταστάσεις, η απόδοσή του είναι πλέον σημαντικά περιορισμένη σε σχέση με νεότερα πρότυπα — ειδικά σε περιβάλλοντα με υψηλή πυκνότητα χρηστών, παρεμβολές και απαιτήσεις για υψηλή ρυθμαπόδοση. Σε μία μελέτη δικτύων WLAN σε βιομηχανικά περιβάλλοντα δημοσιευμένη το 2025 επισημαίνεται ότι το Wi-Fi 4 παραμένει λειτουργικό, αλλά «υπολείπεται των σύγχρονων απαιτήσεων για χαμηλή καθυστέρηση και υψηλή σταθερότητα» [67].

Επιπλέον, έρευνα πάνω σε τεχνικές προσαρμογής του link-layer (adaptive modulation & coding) στο 802.11n ανέδειξε πως η αποτελεσματική χρήση των 4×4 MIMO ρευμάτων και του bonding των καναλιών απαιτεί βελτιστοποίηση του MAC/PHY, ειδικά σε περιβάλλοντα με δυναμική παρεμβολή [68], [69]. Αυτές οι εξελίξεις δείχνουν ότι το 802.11n, αν και γενιά «μεσαίας» ταχύτητας πλέον, συνεχίζει να αποτελεί σημείο αναφοράς για τεχνικές που υιοθετήθηκαν από επόμενες γενιές Wi-Fi.

Στην πορεία εξέλιξης των WLAN, το 802.11n αποτελεί το στάδιο όπου η τεχνολογία Wi-Fi μετεξελίχθηκε από «βασική πρόσβαση ασύρματης δικτύωσης» σε «ευρυζωνική πρόσβαση πολλαπλών ροών». Η μετέπειτα εξέλιξη προς το IEEE 802.11ac (Wi-Fi 5) και το IEEE 802.11ax (Wi-Fi 6) βασίστηκε ακριβώς στις τεχνικές του 802.11n (MIMO, channel bonding, dual-band

λειτουργία) και τις επέκτεινε με μεγαλύτερα εύρη καναλιών, περισσότερες χωρικές ροές, και υποστήριξη για πολλούς χρήστες ταυτόχρονα (MU-MIMO) [62], [67].

2.3.2 802.11ac

Το πρότυπο IEEE 802.11ac-2013, που στην αγορά αποκαλείται Wi-Fi 5 από τη Wi-Fi Alliance, εκδόθηκε τον Δεκέμβριο του 2013 και αποτελεί σημαντική αναβάθμιση σε σχέση με το προηγούμενο πρότυπο IEEE 802.11n (Wi-Fi 4) [59]. Η βασική καινοτομία έγκειται στο ότι πλέον το φυσικό επίπεδο (PHY) υποστηρίζει:

- ευρύτερα κανάλια στην ζώνη των 5 GHz — 80 MHz και 160 MHz (έναντι των έως 40 MHz του 802.11n) [59],
- αύξηση του αριθμού των χωρικών ροών (spatial streams) έως 8 (από έως 4 στο 802.11n) για Single-User MIMO [59],
- εισαγωγή της διαμόρφωσης υψηλότερης τάξης 256-QAM (έναντι 64-QAM στο 802.11n) για μεγαλύτερη απόδοση bits ανά σύμβολο [69],
- υλοποίηση της τεχνικής Multi-User MIMO (MU-MIMO), που επιτρέπει ταυτόχρονη μετάδοση σε πολλούς σταθμούς (STAs) από ένα σημείο πρόσβασης (AP), αυξάνοντας την αποδοτικότητα σε περιβάλλοντα πολλών χρηστών [70].

Χάρη στα παραπάνω χαρακτηριστικά, το 802.11ac κατάφερε να υπερβεί το όριο του gigabit στο φυσικό επίπεδο (PHY) σε ιδανικές συνθήκες, ανοίγοντας το δρόμο για εφαρμογές υψηλής ρυθμαπόδοσης όπως streaming 4K/8K, gaming και ασύρματη μεταφορά μεγάλων αρχείων [59].

Η μετάβαση σε ευρύτερα κανάλια των 80 και 160 MHz υπαγόρευσε αλλαγές στον σχεδιασμό: η ένωση (channel bonding) δύο ή τεσσάρων υποκαναλιών των 20 MHz απαιτεί πιο αυστηρό έλεγχο παρεμβολών και σχεδιασμό RF. Σε πρόσφατη μελέτη του 2023 αναφέρεται ότι «η επίδραση της σύζευξης καναλιών (multi-channel bonding) στο IEEE 802.11ac επιδρά σημαντικά στην απόδοση του WLAN, και η σωστή διαμόρφωση (channel alignment, interference avoidance) είναι κρίσιμη για τον πραγματικό ρυθμό δεδομένων» [70].

Η χρήση της 256-QAM απαιτεί υψηλότερο Signal-to-Noise Ratio (SNR) και πιο σταθερό κανάλι. Σε πρόσφατη δημοσίευση του 2025 αναφέρεται ότι «οι βελτιώσεις στο 802.11ac/ax σε modulation και spatial streams οδηγούν σε αύξηση της ρυθμαπόδοσης, αλλά η πραγματική απόδοση εξαρτάται κρίσιμα από την πηγή παρεμβολών, τη διαχείριση του φάσματος και την ποιότητα των ρευμάτων MIMO» [67].

Η τεχνολογία MU-MIMO, αν και υποστηρίζεται, στην πρακτική εφαρμογή αντιμετωπίζει προκλήσεις ως προς τον συγχρονισμό, το channel sounding και την κατανομή ρευμάτων σε πολλούς

χρήστες. Σύμφωνα με μελέτη του 2023 «ένα από τα βασικά σημεία βελτίωσης για εγκαταστάσεις 802.11ac ήταν η διαχείριση πολλαπλών χρηστών και η ενεργή διαμόρφωση σημείων πρόσβασης με κανάλια bonding για να επιτευχθεί η απαιτούμενη χωρητικότητα» [69].

2.4 Βασικές απαιτήσεις σύγχρονων ασύρματων επικοινωνιών

Η ραγδαία πρόοδος στις τεχνολογίες ασύρματων επικοινωνιών και δικτύωσης έχει οδηγήσει στη μετάβαση σε μια εποχή όπου η συνδεσιμότητα δεν αποτελεί απλώς υποστηρικτική υπηρεσία, αλλά θεμελιώδη υποδομή της ψηφιακής κοινωνίας. Η εξάπλωση των έξυπνων συσκευών, των εφαρμογών τεχνητής νοημοσύνης και του Διαδικτύου των Πραγμάτων (IoT) έχει αυξήσει δραστικά τη ζήτηση για υψηλότερους ρυθμούς μετάδοσης, μικρότερη καθυστέρηση και ενεργειακά αποδοτική επικοινωνία. Σύμφωνα με πρόσφατες μελέτες, το μέλλον των ασύρματων επικοινωνιών — με την έλευση του Wi-Fi 7, Wi-Fi 8 και των δικτύων 6G — στοχεύει στη δημιουργία ενός ολοκληρωμένου, ευφυούς και ενοποιημένου οικοσυστήματος συνδεσιμότητας, ικανού να υποστηρίξει τις ανάγκες της επερχόμενης "εποχής του υπερσυνδεδεμένου κόσμου" [3], [6], [7].

2.4.1 Υψηλή ταχύτητα μετάδοσης δεδομένων

Μία από τις πιο προφανείς απαιτήσεις των σύγχρονων ασύρματων επικοινωνιών είναι η υψηλή ταχύτητα μετάδοσης δεδομένων. Με την εκθετική αύξηση των υπηρεσιών streaming, των βιντεοκλήσεων, των online παιχνιδιών και της μεταφοράς αρχείων μεγάλου όγκου, η ανάγκη για δίκτυα που υποστηρίζουν ταχύτητες άνω του 1 Gbit/s έχει καταστεί κρίσιμη. Τα σύγχρονα πρότυπα όπως το IEEE 802.11ac και 802.11ax (Wi-Fi 6) σχεδιάστηκαν για να ανταποκριθούν σε αυτές τις απαιτήσεις μέσω της χρήσης τεχνολογιών όπως OFDM, MIMO, κανάλια ευρείας ζώνης (80/160 MHz) και πολυπλεξία πολλαπλών χρηστών (MU-MIMO).

2.4.2 Χαμηλή καθυστέρηση (Low Latency)

Η καθυστέρηση στη μετάδοση (latency) αποτελεί κρίσιμο παράγοντα για εφαρμογές σε πραγματικό χρόνο, όπως η τηλεϊατρική, τα διαδραστικά παιχνίδια, τα αυτόνομα οχήματα και οι εφαρμογές επαυξημένης ή εικονικής πραγματικότητας (AR/VR). Οι απαιτήσεις αυτών των εφαρμογών επιβάλλουν καθυστέρηση της τάξης των λίγων χιλιοστών του δευτερολέπτου (ms). Τα νέα πρότυπα επικεντρώνονται στη μείωση της καθυστέρησης μέσω πιο αποδοτικής διαχείρισης της πρόσβασης στο μέσο (MAC), τεχνολογιών όπως Target Wake Time (TWT), OFDMA, και καλύτερου συντονισμού του uplink και downlink.

2.4.3 Υψηλή αξιοπιστία και ανθεκτικότητα

Η αξιοπιστία αποτελεί αναπόσπαστο στοιχείο των ασύρματων συστημάτων, ειδικά σε περιβάλλοντα όπου οι αποτυχημένες μεταδόσεις μπορεί να έχουν σοβαρές συνέπειες – όπως στην υγειονομική περίθαλψη ή στη βιομηχανική αυτοματοποίηση. Οι σύγχρονες ασύρματες τεχνολογίες πρέπει να διασφαλίζουν αδιάλειπτη και ακριβή μετάδοση δεδομένων ακόμα και σε συνθήκες υψηλής παρεμβολής, πολλών ταυτόχρονων χρηστών και δυναμικών μεταβολών στο περιβάλλον. Για τον σκοπό αυτό χρησιμοποιούνται τεχνικές όπως beamforming, adaptive modulation and coding, καθώς και προηγμένοι αλγόριθμοι διόρθωσης σφαλμάτων (FEC).

2.4.4 Υποστήριξη μεγάλης πυκνότητας χρηστών και συσκευών

Η ραγδαία αύξηση του αριθμού των συνδεδεμένων συσκευών – από smartphones και laptops μέχρι αισθητήρες IoT και wearables – δημιουργεί την ανάγκη για διαχείριση μεγάλης πυκνότητας χρηστών και τερματικών σε περιορισμένους χώρους. Τα σύγχρονα δίκτυα πρέπει να υποστηρίζουν εκατοντάδες ταυτόχρονες συνδέσεις, εξασφαλίζοντας ταυτόχρονα σταθερότητα και ποιότητα υπηρεσίας. Το Wi-Fi 6, με τις τεχνικές BSS Coloring και Spatial Reuse, έχει σχεδιαστεί για να λειτουργεί αποτελεσματικά σε περιβάλλοντα υψηλής πυκνότητας, όπως γήπεδα, αεροδρόμια και σχολικά συγκροτήματα.

2.4.5 Ενεργειακή αποδοτικότητα

Με την επέκταση των ασύρματων επικοινωνιών σε φορητές και αυτόνομες συσκευές, η ενεργειακή αποδοτικότητα έχει καταστεί ζωτικής σημασίας. Οι συσκευές IoT, για παράδειγμα, απαιτούν συνδεσιμότητα που να διαρκεί για χρόνια με ελάχιστη κατανάλωση ενέργειας. Τα πρότυπα όπως το IEEE 802.11ah (Wi-Fi HaLow) και τα χαρακτηριστικά εξοικονόμησης ενέργειας του Wi-Fi 6, όπως το TWT, συμβάλλουν στη μείωση της κατανάλωσης ενέργειας επιτρέποντας στις συσκευές να "κοιμούνται" για μεγάλα χρονικά διαστήματα και να "ξυπνούν" μόνο όταν απαιτείται επικοινωνία.

2.4.6 Ασφάλεια και προστασία απορρήτου

Η προστασία των δεδομένων αποτελεί μία από τις πιο κρίσιμες απαιτήσεις των ασύρματων επικοινωνιών. Τα δίκτυα Wi-Fi συχνά μεταδίδουν ευαίσθητες πληροφορίες, και για τον λόγο αυτό είναι απαραίτητο να παρέχουν προηγμένους μηχανισμούς κρυπτογράφησης, πιστοποίησης και προστασίας από κακόβουλες επιθέσεις. Τα σύγχρονα πρότυπα ασφαλείας όπως WPA3 περιλαμβάνουν τεχνολογίες όπως SAE (Simultaneous Authentication of

Equals) και ισχυρότερη προστασία κατά των επιθέσεων dictionary και brute force. Επιπλέον, η υποστήριξη για διαχωρισμό του φορτίου δεδομένων (traffic segmentation) και διαχείριση προσβασιμότητας καθιστούν δυνατή τη δημιουργία ασφαλών και αξιόπιστων δικτύων.

2.4.7 Ευελιξία και επεκτασιμότητα

Τέλος, ένα σύγχρονο ασύρματο δίκτυο πρέπει να είναι ευέλικτο, δηλαδή ικανό να προσαρμόζεται δυναμικά σε νέες ανάγκες, καθώς και επεκτάσιμο ώστε να υποστηρίζει την αυξανόμενη κίνηση δεδομένων και τον αριθμό συσκευών στο μέλλον. Η ευελιξία αυτή περιλαμβάνει τόσο το υλικό (hardware) όσο και το λογισμικό (software), με δυνατότητες όπως δίκτυο καθοριζόμενο από λογισμικό (Software-Defined Networking – SDN), δυναμική εκχώρηση πόρων, και σύνθετη διαχείριση φάσματος για βελτιστοποίηση της συνολικής απόδοσης του δικτύου.

3 *Πρότυπο IEEE 802.11ax (Wi-Fi 6)*

Το IEEE 802.11ax, γνωστό και ως Wi-Fi 6, αποτέλεσε, κατά την εισαγωγή του, το πιο εξελιγμένο πρότυπο ασύρματης δικτύωσης για τοπικά δίκτυα WLAN (Wireless Local Area Network). Το Wi-Fi 6 σχεδιάστηκε για να ανταποκριθεί στις απαιτήσεις των σύγχρονων δικτύων που απαιτούν υψηλότερη ταχύτητα, καλύτερη απόδοση σε περιβάλλοντα με υψηλή πυκνότητα χρηστών, χαμηλότερη καθυστέρηση και μεγαλύτερη ενεργειακή αποδοτικότητα. Το πρότυπο εγκρίθηκε το 2019 και εισήγαγε μια σειρά καινοτόμων χαρακτηριστικών και τεχνολογιών που στοχεύουν στην ενίσχυση της εμπειρίας χρήστη και στην εξυπηρέτηση των αυξανόμενων απαιτήσεων για δεδομένα υψηλής ποιότητας, όπως το 4K/8K video streaming, το gaming, και το Internet of Things (IoT).

3.1 Στόχοι σχεδίασης και βασικές αλλαγές

Οι κύριοι στόχοι του Wi-Fi 6 περιλαμβάνουν τη βελτίωση της αποδοτικότητας, της χωρητικότητας και της ταχύτητας του ασύρματου δικτύου, με ιδιαίτερη έμφαση στην υποστήριξη μεγάλου αριθμού συνδεδεμένων συσκευών και εφαρμογών σε περιορισμένα γεωγραφικά όρια, όπως σε γήπεδα, αεροδρόμια, γραφεία, και σπίτια με πολλά smart devices [75], [76], [92]. Επιπλέον, οι βελτιώσεις στην ενεργειακή απόδοση είναι επίσης ένας κρίσιμος παράγοντας, καθώς οι συσκευές IoT απαιτούν μακράς διάρκειας σύνδεση με περιορισμένη κατανάλωση ενέργειας [77].

Ένα από τα βασικά χαρακτηριστικά του Wi-Fi 6 είναι η εισαγωγή της τεχνολογίας OFDMA (Orthogonal Frequency Division Multiple Access), η οποία επιτρέπει σε πολλούς χρήστες να μοιράζονται το ίδιο κανάλι μετάδοσης δεδομένων, αλλά με διαφορετικά τμήματα του καναλιού, αποφεύγοντας έτσι τις συγκρούσεις και τις καθυστερήσεις [78], [79]. Αυτή η τεχνολογία βοηθά σημαντικά στη βελτίωση της αποδοτικότητας του δικτύου σε περιοχές με μεγάλη πυκνότητα χρηστών, όπως σε αστικά κέντρα, γήπεδα ή αεροδρόμια [80].

Ακόμη, το Wi-Fi 6 εισάγει την τεχνολογία 1024-QAM (Quadrature Amplitude Modulation), η οποία επιτρέπει τη μεταφορά περισσότερων δεδομένων ανά κύκλο, αυξάνοντας έτσι τη συνολική ταχύτητα του δικτύου [79]. Σε σχέση με το προηγούμενο πρότυπο 802.11ac που υποστηρίζει 256-QAM, η μετάβαση σε 1024-QAM προσφέρει αυξημένες ταχύτητες, φτάνοντας μέχρι 9,6 Gbit/s θεωρητικά, κάτι που είναι ιδιαίτερα χρήσιμο για εφαρμογές που απαιτούν μεγάλο εύρος ζώνης, όπως το streaming υψηλής ανάλυσης και το cloud gaming [83].

Το Wi-Fi 6 επεκτείνει την τεχνολογία MU-MIMO (Multi-User, Multiple Input, Multiple Output), η οποία επιτρέπει τη συγχρονισμένη μετάδοση δεδομένων σε πολλαπλούς χρήστες, αντί για έναν χρήστη κάθε φορά [84]. Στο 802.11ac, το MU-MIMO υποστηρίζει μόνο την κατερχόμενη ζεύξη (downlink), δηλαδή τη μετάδοση από το σημείο πρόσβασης προς τις συσκευές, ενώ στο Wi-Fi 6 επεκτείνεται και στην ανερχόμενη ζεύξη (uplink), δηλαδή στη μετάδοση από τις συσκευές προς το σημείο πρόσβασης. Αυτή η βελτίωση συμβάλλει στη μείωση της καθυστέρησης και την ταχύτερη εξυπηρέτηση πολλών χρηστών ταυτόχρονα [85].

Η τεχνολογία Target Wake Time (TWT) του Wi-Fi 6 έχει σχεδιαστεί για να βελτιώσει την ενεργειακή αποδοτικότητα των συσκευών, ειδικά των συσκευών IoT που απαιτούν σύνδεση για μεγάλα χρονικά διαστήματα με περιορισμένη κατανάλωση ενέργειας [77], [81], [87], [88]. Με το TWT, οι συσκευές μπορούν να "ξυπνούν" μόνο όταν είναι απαραίτητο να ανταλλάξουν δεδομένα με το σημείο πρόσβασης, εξοικονομώντας ενέργεια και αυξάνοντας την αυτονομία της μπαταρίας των συσκευών. Το Wi-Fi 6 υιοθετεί το WPA3 (Wi-Fi Protected Access 3), το πιο πρόσφατο πρωτόκολλο ασφαλείας για ασύρματα δίκτυα. Το WPA3 προσφέρει βελτιωμένα χαρακτηριστικά προστασίας, όπως πιο ισχυρή κρυπτογράφηση και προστασία έναντι επιθέσεων brute force. Το WPA3 ενισχύει την ασφάλεια των δικτύων Wi-Fi, διασφαλίζοντας την ασφαλή και ιδιωτική μετάδοση δεδομένων ακόμα και σε δημόσια δίκτυα [82], [86].

3.2 Τεχνολογίες: OFDMA, MU-MIMO, BSS Coloring

Ο Πίνακας 1 συνοψίζει συγκριτικά τα βασικά χαρακτηριστικά των προτύπων Wi-Fi 6 (802.11ax) και Wi-Fi 7 (802.11be), τα οποία αναλύονται στις ενότητες που ακολουθούν.

Πίνακας 1 Σύγκριση χαρακτηριστικών Wi-Fi 6 (802.11ax) και Wi-Fi 7 (802.11be)
(το Wi-Fi 7 αναλύεται διεξοδικά στο Κεφάλαιο 4)

Κατηγορία	Wi-Fi 6 (802.11ax)	Wi-Fi 7 (802.11be)
Φάσμα λειτουργίας (Spectrum)	2,4 GHz, 5 GHz, 6 GHz (μέχρι 160 MHz)	2,4 GHz, 5 GHz, 6 GHz (μέχρι 320 MHz)
Τάξη διαμόρφωσης (Constellation Order)	1024-QAM	4096-QAM
Διάρκεια συμβόλου (Symbol Duration)	12,8 μs + CP	12,8 μs + ευέλικτο CP
MIMO / MU-MIMO	8 χωρικές ροές (MU-MIMO)	8 χωρικές ροές στο τελικό πρότυπο (16 στα αρχικά σχέδια)
Ονομαστικός Ρυθμός Δεδομένων	≈ 9,6 Gbit/s	≈ 23 Gbit/s (≈46 Gbit/s στα αρχικά σχέδια με 16 χωρικές ροές)

Τεχνολογία Πρόσβασης Καναλιού	OFDMA (UL/DL) πάνω από CSMA/CA	Multi-Link Operation (MLO), Enhanced OFDMA
Multi-AP Coordination	Υποστήριξη BSS Coloring και TWT	Προκαταρκτικοί μηχανισμοί συντονισμού και συνεργασίας APs
Fragmentation / Aggregation	A-MPDU, A-MSDU με κατακερματισμό	Βελτιωμένη Aggregation & Block Ack Mechanism
Κατανομή Πόρων (Resource Allocation)	Μία RU ανά STA ανά πλαίσιο (χωρίς multi-RU)	Dynamic Puncturing & Adaptive RU Allocation
Διαχείριση Ισχύος (Power Management)	Enhanced TWT & Microsleep	Coordinated TWT, Energy-Efficient MLO
Καθυστέρηση (Delay)	Χαμηλή	Πολύ χαμηλή (στοχεύει σε εφαρμογές που απαιτούν < 5 ms [1])
Κύριες Εφαρμογές	IoT, Smart Homes, Streaming HD Video	AR/VR, Cloud Gaming, 8K Streaming, Industrial IoT

Αν και κατά τη διαδικασία τυποποίησης του IEEE 802.11be εξετάστηκαν διάφορες μορφές συντονισμού πολλαπλών σημείων πρόσβασης, η έννοια του Multi-AP Coordination αναδεικνύεται κυρίως στο υπό ανάπτυξη IEEE 802.11bn ως βασικός μηχανισμός επίτευξης Ultra-High Reliability.

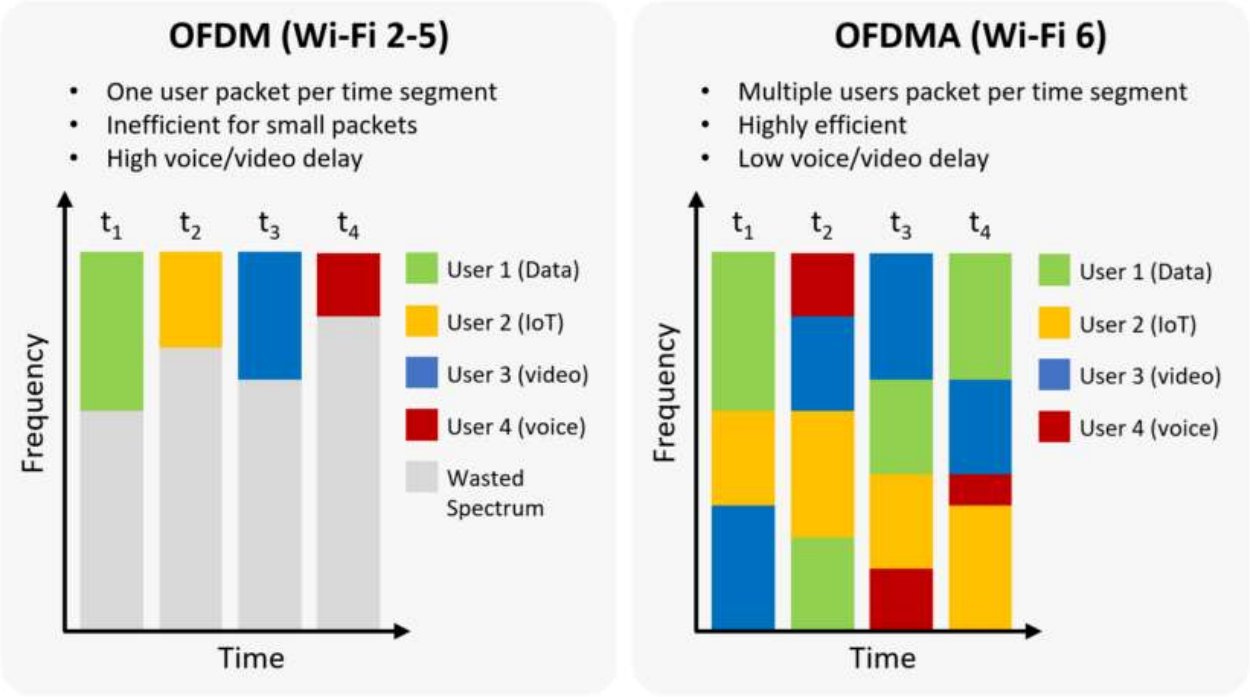
3.2.1 OFDMA

Σημαντικό χαρακτηριστικό του 802.11ax είναι η τεχνική πολλαπλής πρόσβασης OFDMA, η οποία έως τότε εφαρμοζόταν κυρίως σε κυψελωτά δίκτυα τελευταίας γενιάς. Το χαρακτηριστικό αυτό σχετίζεται με το γεγονός, ότι τα πολύ ευρεία κανάλια (80 MHz, 80 + 80 MHz και 160 MHz) παρουσιάζουν επιλεκτικές ως προς τη συχνότητα διαλείψεις, γεγονός που έχει ως αποτέλεσμα τη μείωση των καθαρών ρυθμών. Στο OFDMA μια μονάδα πόρων (RU) αντιστοιχεί σε γειτονικούς υποφορείς και ο πομπός έχει τη δυνατότητα να επιλέξει την καλύτερη RU για κάθε συγκεκριμένο δέκτη, με αποτέλεσμα υψηλότερο λόγο σήματος προς παρεμβολή συν θόρυβο (SINR), διαμόρφωσης, κωδικοποίησης (MCS) και απόδοσης [5].

Σύμφωνα με πρόσφατες μελέτες, το πρότυπο IEEE 802.11ax βελτιώνει σημαντικά την αποδοτικότητα μετάδοσης μέσω της χρήσης του OFDMA (Orthogonal Frequency Division Multiple Access), το οποίο επιτρέπει την ταυτόχρονη εξυπηρέτηση πολλών σταθμών (STAs) μέσα στο ίδιο χρονικό διάστημα. Με τον τρόπο αυτό μειώνεται δραστικά η ανάγκη για επαναλαμβανόμενη πρόσβαση στο κανάλι και αποστολή πακέτων αναγνώρισης (ACK), περιορίζοντας την καθυστέρηση και τον φόρτο σηματοδοσίας. Η τεχνική αυτή επιτυγχάνεται μέσω δυναμικής κατανομής πόρων (Resource Units – RUs), όπου σταθμοί με μικρά πακέτα δεδομένων μπορούν να εκμεταλλεύονται τμήματα του φάσματος προσαρμοσμένα στις ανάγκες τους,

βελτιστοποιώντας τη συνολική χρήση του καναλιού. Τα αποτελέσματα προσομοιώσεων δείχνουν ότι το OFDMA μπορεί να προσφέρει πολλαπλάσια απόδοση σε σχέση με το κλασικό DCF μοντέλο, ειδικά σε σενάρια υψηλής πυκνότητας και έντονης κίνησης δεδομένων [5].

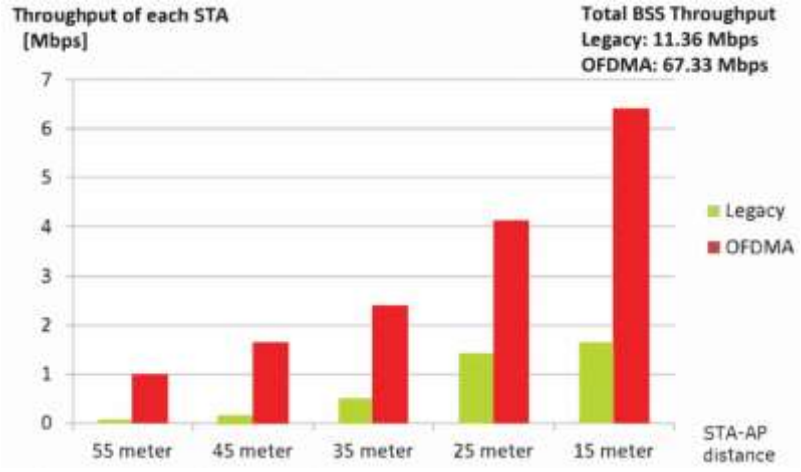
Παράλληλα, η Εικόνα 5 απεικονίζει συγκριτικά τη λειτουργία του OFDM (πρότυπα έως και το Wi-Fi 5) και του OFDMA (Wi-Fi 6), αναδεικνύοντας τα πλεονεκτήματα της νέας αρχιτεκτονικής. Στο OFDM, κάθε χρονικό τμήμα εξυπηρετεί μόνο έναν χρήστη, με αποτέλεσμα να δημιουργούνται ανεκμετάλλευτα τμήματα του φάσματος και αυξημένες καθυστερήσεις σε εφαρμογές φωνής και βίντεο. Αντίθετα, στο OFDMA, κάθε χρονική μονάδα μπορεί να κατανεμηθεί ταυτόχρονα σε πολλούς χρήστες, οι οποίοι αξιοποιούν διαφορετικά υποφέροντα (subcarriers). Η τεχνική αυτή επιτρέπει τη βέλτιστη αξιοποίηση του διαθέσιμου φάσματος, μειώνοντας τη σπατάλη εύρους ζώνης και εξασφαλίζοντας χαμηλότερη καθυστέρηση και υψηλότερη αποδοτικότητα μετάδοσης. Ως εκ τούτου, το OFDMA συνιστά μια ουσιαστική εξέλιξη στη διαχείριση των ασύρματων πόρων, επιτυγχάνοντας σημαντική βελτίωση της συνολικής απόδοσης και της εμπειρίας των χρηστών σε δίκτυα Wi-Fi 6 [5], [84].



Εικόνα 5 Σύγκριση της λειτουργίας OFDM και OFDMA [98]

Η αύξηση της ταχύτητας μετάδοσης δεδομένων είναι μία από τις κύριες βελτιώσεις που αναμένονται με κάθε νέο πρωτόκολλο μετάδοσης. Το Wi-Fi 6 προσφέρει θεωρητική μέγιστη ταχύτητα μετάδοσης 9,6 Gbit/s σε σύγκριση με 6,9 Gbit/s για το Wi-Fi 5, βελτίωση ~39%. Αυτό καθίσταται δυνατό με τη διαμόρφωση 1024-QAM, η οποία επιτρέπει την αποστολή περισσότερων

πληροφοριών για το ίδιο εύρος ζώνης από τα προηγούμενα πρωτόκολλα Wi-Fi. Αν και η αύξηση της ταχύτητας μετάδοσης είναι εντυπωσιακή, ένα από τα πιο σημαντικά πλεονεκτήματα που προσφέρει αυτή η νέα διαμόρφωση είναι η βελτίωση της απόδοσης σε δίκτυα με μεγάλο όγκο συνδεδεμένων συσκευών [5]. Το κέρδος του OFDMA σε σενάριο επικαλυπτόμενων δικτύων αποτυπώνεται στην Εικόνα 6.



Εικόνα 6 Κέρδος OFDMA στο σενάριο επικαλυπτόμενου δικτύου [92]

Όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, η βελτίωση στην ταχύτητα μετάδοσης είναι πάντα θετική, αλλά στην περίπτωση του Wi-Fi 6, το πιο αξιοσημείωτο πλεονέκτημα είναι η βελτιωμένη σύνδεση σε περιβάλλοντα με μεγάλο όγκο συσκευών. Οι βελτιώσεις στο Wi-Fi 6 στοχεύουν στην επίτευξη καλύτερης απόδοσης σε αυτό το σενάριο πολλών συσκευών. Αυτές οι βελτιώσεις είναι το αποτέλεσμα 3 τεχνολογιών: OFDMA, MU-MIMO και BSS Coloring [1].

Το OFDMA είναι ένα σύστημα που βελτιώνεται σε σχέση με το προηγούμενο OFDM των προηγούμενων εκδόσεων Wi-Fi. Το προηγούμενο σύστημα OFDM σήμαινε ότι η αποστολή δεδομένων από έναν δρομολογητή καταλάμβανε ολόκληρο το εύρος ζώνης, ανεξάρτητα από τον τύπο ή την ποσότητα των δεδομένων που μεταδίδονταν. Με τη σημερινή τεχνολογία OFDMA, τα κανάλια μπορούν να υποδιαιρεθούν για την αποστολή δεδομένων σε διαφορετικές συσκευές ταυτόχρονα χωρίς καθεμία από αυτές να καταναλώνει όλο το εύρος ζώνης. Αυτό μειώνει την καθυστέρηση και βελτιώνει την απόδοση όταν πολλές συσκευές συνδέονται ταυτόχρονα (π.χ. δίκτυα σταθμών, αεροδρόμια κ.λπ.) [5].

Καθώς το OFDMA δεν είχε αρχικά σχεδιαστεί για δίκτυα 802.11, έχει προταθεί ένα νέο πρωτόκολλο MAC βασισμένο σε OFDMA, το OMAX. Η TGax πρότεινε και εφάρμοσε ένα ισχυρό

πλαίσιο με κύριο χαρακτηριστικό του την ευελιξία, το οποίο επιτρέπει τόσο την ντετερμινιστική όσο και την τυχαία πρόσβαση [5].

Στο 802.11ax, η διαχείριση των πόρων πραγματοποιείται βάσει χρόνου και συχνότητας. Για την περαιτέρω απλοποίηση και τη συμβατότητα με παλαιότερα πρότυπα, η μετάδοση OFDMA προγραμματίζεται ανά πλαίσιο. Ως εκ τούτου ένα πλαίσιο έχει τη δυνατότητα μεταφοράς πληροφοριών μεταξύ των STA. Σε ένα τέτοιο τύπο πλαισίου, γίνεται εκχώρηση διαφόρων τόνων σε διαφορετικά STA αλλά η διάρκεια όλων των RU είναι ίδια ανά πλαίσιο [1], [5].

Μια RU διαθέτει 26, 52, 106, 242, 484, 996 ή 2 × 996 τόνους. Ολόκληρη η ζώνη 20 MHz, η ζώνη 40 MHz, η ζώνη 80 MHz και η ζώνη 80 + 80 (160) MHz αντιστοιχεί σε RU 242 τόνων, RU 484 τόνων, RU 996 τόνων και δύο RU 996 τόνων, αντίστοιχα. Κάθε ευρεία RU έχει τη δυνατότητα να χωριστεί σε δύο περίπου ίσες μικρότερες RU. Στη συνέχεια, κάθε RU διαιρείται στα δύο ξανά. Μόνη εξαίρεση αποτελεί η περίπτωση που μια RU 242 τόνων μπορεί να αντικατασταθεί από δύο RU 106 τόνων και μία RU 26 τόνων. Λόγω περιορισμών των δυαδικών συνελικτικών κωδίκων (Binary Convolutional Codes – BCC), δεν επιτρέπεται η εκχώρηση πολλαπλών RU σε ένα STA. Παρόλο που τα MU-MIMO και OFDMA μπορούν να χρησιμοποιηθούν ταυτόχρονα, τόσο το UL όσο και το DL MU-MIMO εκτελούνται μόνο σε RU των 106 τόνων και άνω. Ο μέγιστος αριθμός RU ανά εύρος ζώνης εμφανίζεται στην Εικόνα 7 [5], [92].

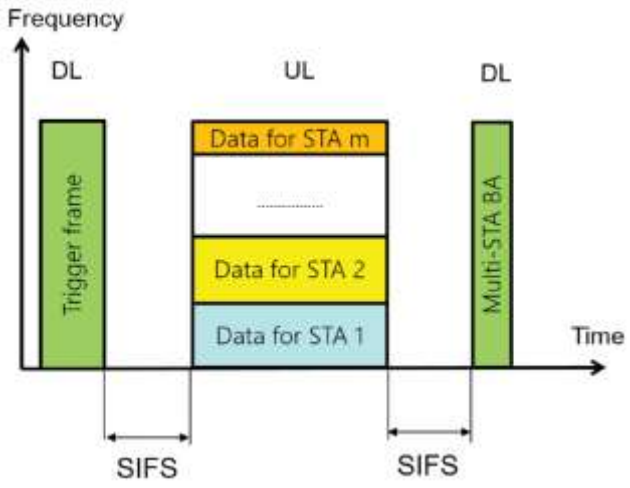
Χάρη στο MU-MIMO, εκχωρούνται έως και οκτώ χρήστες σε μια RU. Είναι επίσης δυνατό να εκχωρηθούν έως τέσσερις χωρικές ροές ανά χρήστη, εάν ο συνολικός αριθμός χωρικών ροών δεν υπερβαίνει τις οκτώ [1]. Στη μετάδοση DL OFDMA, το πεδίο HE-SIG-B του κοινού προοιμίου διαθέτει χάρτη κατανομής πόρων RU μαζί με πεδία περιεχομένου ανά χρήστη. Ο χάρτης αυτός περιέχει πληροφορίες σχετικά με τις RU και τις παραμέτρους μετάδοσης κάθε STA (NSTS, MCS, κωδικοποίηση, και άλλα σχετικά). Μία RU αναπαριστά είτε μια κατανομή SU ή MU-MIMO (η χωρική διαμόρφωση μπορεί να σηματοδοτηθεί από το STA) [1].

RU type	20 MHz	40 MHz	80 MHz	160 (80+80) MHz
26-tone	9	18	37	74
52-tone	4^{+1}	8^{+2}	16^{+5}	32^{+10}
106-tone	2^{+1}	4^{+2}	8^{+5}	16^{+10}
242-tone	1	2	4^{+1}	8^{+2}
484-tone	NA	1	2^{+1}	4^{+2}
996-tone	NA	NA	1	2

$*^{+n}$ means "plus n 26-tone RUs".

Εικόνα 7 Αριθμός RUs για κάθε εύρος [92]

Ο προγραμματισμός της μετάδοσης UL MU είναι μια πιο σύνθετη εργασία. Πιο συγκεκριμένα, οι μεταδόσεις MU στο Wi-Fi συγχρονίζονται στον χρόνο. Λόγω της ολίσθησης του ρολογιού, η διατήρηση του συγχρονισμού είναι πολύπλοκη. Συνήθως ένα AP διαχειρίζεται την μετάδοση UL MU ως εξής. Το AP μεταδίδει έναν νέο τύπο πλαισίου ελέγχου, το πλαίσιο Trigger, καθορίζοντας τις κοινές παραμέτρους της επερχόμενης μετάδοσης UL MU, και παράλληλα εκχωρεί RU για τα STA και καθορίζει τις παραμέτρους μετάδοσης για κάθε συγκεκριμένο STA (MCS, κωδικοποίηση κ.λπ.). Για την επίτευξη του συγχρονισμού, ένα SIFS αποστέλλεται απευθείας μετά το πλαίσιο Trigger, (Εικόνα 8). Επιπλέον, πέρα από τα SIFS για τη μετάδοση UL, το AP μπορεί να προσθέσει συμπλήρωμα (padding) στο πλαίσιο Trigger [92].



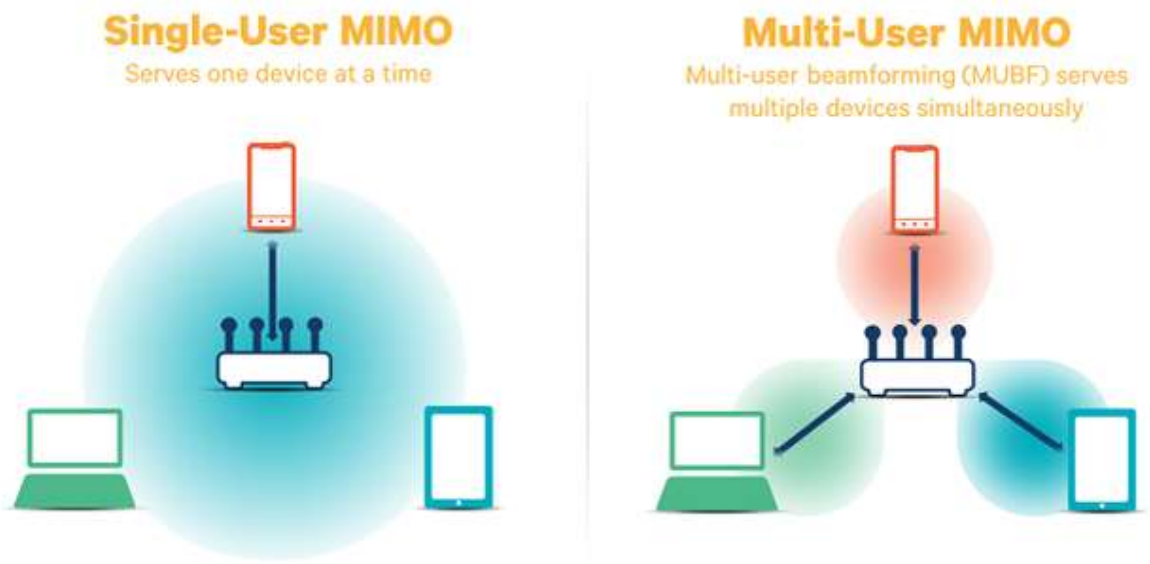
Εικόνα 8 Μετάδοση με συγχρονισμό [92]

Για τις μεταδόσεις UL MU OFDMA είναι επιθυμητό το σημείο πρόσβασης να λαμβάνει τα σήματα των διαφορετικών σταθμών σε παρόμοιο επίπεδο ισχύος, κάτι που δεν εξασφαλίζεται αυτόματα λόγω των άνισων αποστάσεων και απωλειών διαδρομής. Για την αντιμετώπιση του προβλήματος αυτού ορίζεται από το 802.11ax ένας μηχανισμός προ-διόρθωσης ισχύος. Σύμφωνα με τον μηχανισμό αυτό το AP γνωρίζει την ισχύ εκπομπής και την ισχύ σήματος στόχου, την οποία αναμένεται να λάβει από ένα STA κατά την επόμενη μετάδοση UL, οπότε την υποδεικνύει στο πλαίσιο Trigger. Έτσι, με αυτό τον τρόπο μπορεί να εκτιμηθεί από το STA η απώλεια διαδρομής προς το AP οπότε έχει τη δυνατότητα να υπολογίσει την κατάλληλη ισχύ εκπομπής για την ακόλουθη μετάδοση UL, αφού ήδη ξέρει την ισχύ του πλαισίου ενεργοποίησης που λαμβάνει, όπως και την ισχύ εκπομπής του AP [25].

3.2.2 MU-MIMO

Το Wi-Fi 6 επεκτείνει το MU-MIMO, το οποίο είχε εισαχθεί ήδη με το 802.11ac για την κατερχόμενη ζεύξη, και στην ανερχόμενη ζεύξη (UL MU-MIMO). Αυτό επιτρέπει στον δρομολογητή να διατηρεί τη ροή δεδομένων ταυτόχρονα με πολλές συσκευές, ενώ προηγουμένως το έκανε διαδοχικά. Με άλλα λόγια, οι δρομολογητές με δυνατότητα MU-MIMO θα μπορούν να στέλνουν και να λαμβάνουν δεδομένα ταυτόχρονα με πολλές συσκευές αντί για μία συσκευή τη φορά, μειώνοντας την καθυστέρηση καθώς δεν υπάρχει «ουρά» συσκευών [38].

Η Εικόνα 9 παρουσιάζει τη διαφορά μεταξύ των τεχνολογιών Single-User MIMO (SU-MIMO) και Multi-User MIMO (MU-MIMO), οι οποίες χρησιμοποιούνται στα σύγχρονα ασύρματα δίκτυα Wi-Fi. Στην αριστερή πλευρά, το Single-User MIMO εξυπηρετεί μία μόνο συσκευή τη φορά, χρησιμοποιώντας ταυτόχρονες ροές δεδομένων (spatial streams) προς έναν χρήστη. Αυτό σημαίνει ότι, ενώ αυξάνεται η ταχύτητα επικοινωνίας για τη συγκεκριμένη συσκευή, οι υπόλοιπες πρέπει να περιμένουν τη σειρά τους, γεγονός που περιορίζει τη συνολική απόδοση του δικτύου όταν υπάρχουν πολλοί συνδεδεμένοι χρήστες. Αντίθετα, στη δεξιά πλευρά της εικόνας, το Multi-User MIMO (και ειδικότερα το MU Beamforming - MU-BF) επιτρέπει στον δρομολογητή να επικοινωνεί ταυτόχρονα με πολλές συσκευές, κατανέμοντας διαφορετικές ροές δεδομένων προς κάθε μία. Με αυτόν τον τρόπο επιτυγχάνεται πολύ μεγαλύτερη αποδοτικότητα φάσματος, μείωση καθυστερήσεων και βελτιωμένη εμπειρία χρήσης, ιδιαίτερα σε περιβάλλοντα με πολλούς ενεργούς χρήστες, όπως οικιακά ή επιχειρησιακά δίκτυα Wi-Fi 6 [38].



Εικόνα 9 Διαφορές μεταξύ MIMO και MU-MIMO [99]

3.2.3 BSS Coloring

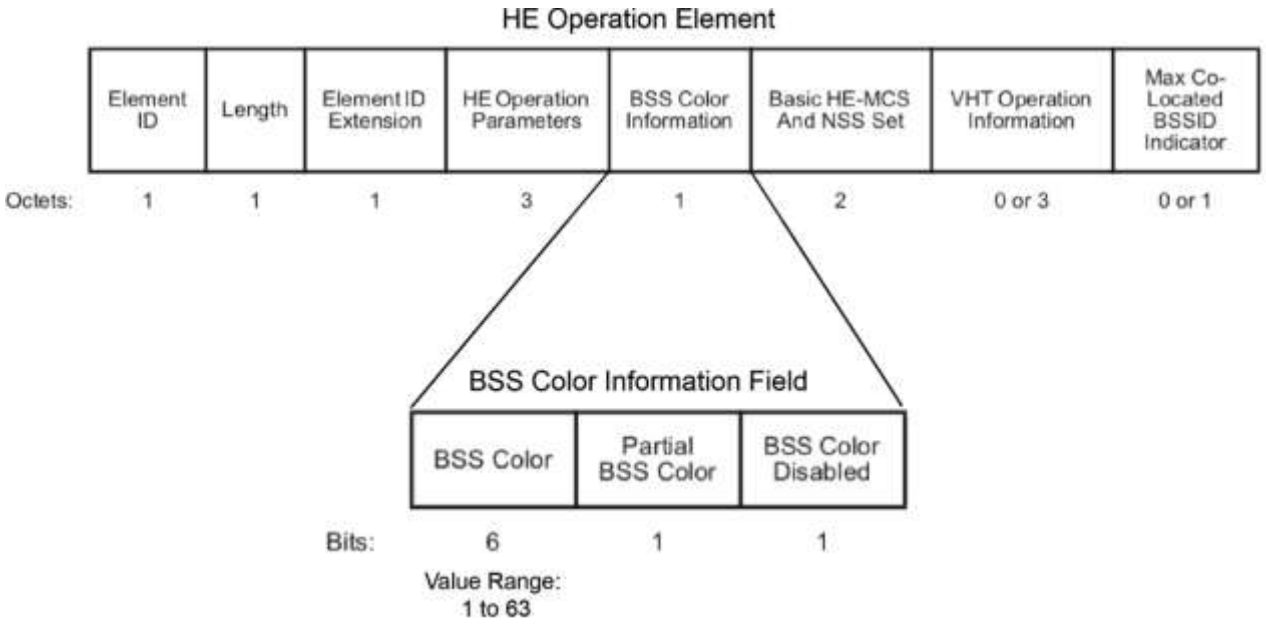
Το BSS Coloring είναι μια τεχνική χωρικής επαναχρησιμοποίησης που χρησιμοποιεί έναν χρωματικό δείκτη για την αναγνώριση κάθε δικτύου. Αυτό επιτρέπει στα σημεία πρόσβασης να ελέγχουν το χρωματικό bit BSS κατά τη λήψη αποφάσεων, μειώνοντας τις παρεμβολές όταν διαφορετικά δίκτυα χρησιμοποιούν το ίδιο κανάλι [5].

Ένα από τα πιο σημαντικά χαρακτηριστικά του 802.11ax είναι η λειτουργία πολλαπλών χρηστών που βασίζεται στο OFDMA. Πιο συγκεκριμένα, διαφορετικοί σταθμοί με ποικίλες ανάγκες εύρους ζώνης μεταδίδουν στο ασύρματο κανάλι σε σύγκριση με προηγούμενα πρότυπα όπου ένας μόνο σταθμός τη φορά μπορεί να χρησιμοποιήσει το κανάλι.

Ένας ακόμα τρόπος διαχείρισης πολλαπλών χρηστών είναι η χρήση του MU-MIMO, το οποίο παρουσιάστηκε αρχικά στο πρότυπο 802.11ac. Στο πρότυπο 802.11ax, πολλαπλοί σταθμοί (έως 8) έχουν τη δυνατότητα αποστολής/λήψης δεδομένων με χρήση χωρικής πολυπλεξίας. Αυτό επιτρέπει την ορθή διαχείριση μεγάλων πακέτων όπως ροή βίντεο HD, ενώ για τα μικρότερα πακέτα κρίνεται καταλληλότερη η χρήση του OFDMA π.χ. από συσκευές IoT.

Επιπλέον, ένα ακόμα σημαντικό χαρακτηριστικό του 802.11ax είναι το Target Wake Time (TWT) το οποίο σχετίζεται με τη προγραμματισμένη λειτουργία ενεργοποίησης/απενεργοποίησης των σταθμών. Το TWT συμβάλλει στην εξοικονόμηση ενέργειας. Με τη χρήση του, το AP δρομολογεί την αποστολή & λήψη των πακέτων με στόχο την ελαχιστοποίηση των συγκρούσεων (collisions). Επομένως, το TWT θεωρείται μία τεχνική εξισορρόπησης φορτίου για τη μείωση της συμφόρησης [79], [87].

Σε πυκνά δίκτυα, ένα γειτονικό AP μπορεί να προκαλέσει παρεμβολές στο κανάλι, με αποτέλεσμα οι σταθμοί στις επικαλυπτόμενες περιοχές να παύουν να μεταδίδουν. Αυτό μετριάζεται στο 802.11ax από ένα χαρακτηριστικό που ονομάζεται BSS Coloring. Αυτό βοηθά τους σταθμούς να αναγνωρίζουν εάν η μετάδοση προέρχεται από άλλο δίκτυο και να κρίνουν πότε να μεταδώσουν δεδομένα και πότε όχι. Το BSS Coloring δεν είναι μια νέα έννοια, καθώς έχει ήδη χρησιμοποιηθεί στο 802.11ah. Η προδιαγραφή 802.11ax συνδυάζει ένα σύνολο ώριμων τεχνολογιών. Το BSS Coloring επιτρέπει στις συσκευές να αναγνωρίζουν το δικό τους BSS έναντι του OBSS (Επικαλυπτόμενο BSS) με τη βοήθεια της κεφαλίδας MAC πλαισίου. Το BSS Coloring είναι ένα πεδίο 6 bit που μπορεί να έχει εύρος τιμών από 1 έως 63 [30], [79]. Η δομή και το εύρος τιμών των σχετικών πεδίων παρουσιάζονται στην Εικόνα 10.



Εικόνα 10 Πεδία τιμών BSS Coloring [100]

3.3 Χρονοδρομολόγηση και κατανομή πόρων στο 802.11ax

Το 802.11ax δίνει τη δυνατότητα μετάδοσης UL MU αμέσως μετά τη μετάδοση DL MU, η χρησιμότητα της οποίας έγκειται στην ταυτόχρονη αποστολή πλαισίων αναγνώρισης. Λόγω των παραπάνω, η μετάδοση DL MU διαθέτει επίσης το πλαίσιο Trigger που αναλύει τις κατανομές UL RU. Άλλη μέθοδος μετάδοσης UL MU είναι η αποθήκευση πληροφοριών στην κεφαλίδα DL PPDU MAC. Με τον ίδιο τρόπο, το AP έχει τη δυνατότητα αναγνώρισης μιας μετάδοσης UL MU, αποστέλλοντας επιβεβαιώσεις μέσω ενός DL MU PPDU. Ακολουθώντας τα παραπάνω, το 802.11ax υιοθετεί διαδοχικές μεταδόσεις MU, πράγμα που σημαίνει ότι μέσα σε μια ευκαιρία μετάδοσης (Transmission Opportunity – TXOP), DL MU και UL MU μπορούν να εναλλάσσονται. Στην περίπτωση των διαδοχικών μεταδόσεων MU, το AP έχει τη δυνατότητα να ανταλλάξει πλαίσια με τρόπο MU με διαφορετικά σύνολα STA [26].

Δεδομένου ότι η συσσωμάτωση πολλών πλαισίων είναι σύνθετη, η TGax όρισε αρκετά προαιρετικά επίπεδα κατακερματισμού HE. Στο πρώτο επίπεδο επιτρέπεται η αποστολή μόνο ενός τμήματος χωρίς συσσωμάτωση. Το δεύτερο επίπεδο δίνει τη δυνατότητα σε έναν σταθμό να συσσωματώνει το πολύ ένα θραύσμα ανά MSDU σε ένα A-MPDU. Τέλος, το τρίτο επίπεδο δίνει τη δυνατότητα συσσωμάτωσης περισσότερων του ενός θραυσμάτων ανά MSDU σε A-MPDU [92]. Με την εισαγωγή του OFDMA, το Wi-Fi προσομοιάζει με το LTE και, συνεπώς, αντιμετωπίζει ανάλογα

προβλήματα κατανομής καναλιών. Παρόλα αυτά, η εκχώρηση πόρων στο Wi-Fi είναι πολύ πιο σύνθετη από ό,τι στα δίκτυα LTE για τους παρακάτω λόγους [92].

- Η λειτουργία των δικτύων LTE βασίζεται σε αδειοδοτημένες ζώνες. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα ότι ο αρμόδιος μηχανικός δικτύου, για τον περιορισμό των παρεμβολών από γειτονικές κυψέλες, προσαρμόζει κατάλληλα τις παραμέτρους εκπομπής, ώστε να επιτευχθεί καλύτερη απόδοση. Από την άλλη, τα δίκτυα Wi-Fi λειτουργούν μεν σε μη αδειοδοτημένες ζώνες, χωρίς όμως εγγύηση του επιπέδου παρεμβολών. Ως εκ τούτου η εκτίμηση της ποιότητας του καναλιού είναι σύνθετη και επιβάλλεται η ανάπτυξη πολύπλοκων αλγορίθμων για τη μείωση των παρεμβολών.
- Επιπλέον, το κανάλι των δικτύων LTE διαιρείται σε ισομεγέθη μπλοκ πόρων. Στην περίπτωση της DL μετάδοσης δεδομένων, ο σταθμός βάσης εκχωρεί σε κάθε χρήστη ένα αυθαίρετο υποσύνολο μπλοκ πόρων. Για την UL μετάδοση, τα μπλοκ πόρων στο υποσύνολο πρέπει να είναι σε σειρά. Στο Wi-Fi, οι περιορισμοί σε RU είναι πιο σύνθετοι, γεγονός που καθιστά πιο σύνθετη την ανάπτυξη βέλτιστων πρακτικών (δηλαδή αλγορίθμων που εκχωρούν RU σε κάθε STA για τη μεγιστοποίηση κάποιας συνάρτησης χρησιμοποίησης).
- Για μεταδόσεις UL, το Wi-Fi δίνει τη δυνατότητα της αύξησης της πυκνότητας φασματικής ισχύος. Συγκεκριμένα, το STA έχει τη δυνατότητα μετάδοσης με την ίδια ισχύ ανεξαρτήτως είδους RU. Δεδομένου ότι οι STA βρίσκονται σε διαφορετικές τοποθεσίες, δεν παραβιάζονται οι κανόνες εκπομπής ενέργειας.

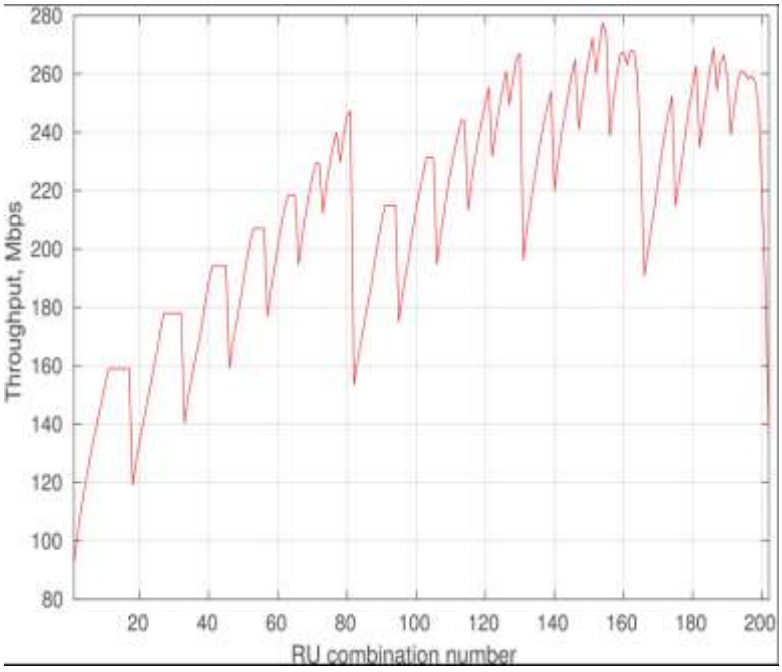
Στην Εικόνα 11 παρουσιάζεται η απόδοση της ανερχόμενης ζεύξης (UL) ενός δικτύου 802.11ax το οποίο λειτουργεί σε κανάλι 80 MHz, με δέκα STA, οι οποίοι είναι τοποθετημένοι ομοιόμορφα γύρω από το AP σε ένα κύκλο με ακτίνα 35 m. Οι πόροι έχουν εκχωρηθεί σύμφωνα με την βέλτιστη στατική διαίρεση του καναλιού σε RU. Ο οριζόντιος άξονας με τη χρήση λεξικογραφικής σειράς απεικονίζει όλους τους δυνατούς συνδυασμούς RUs. Ο συνδυασμός #1 είναι αντιπροσωπευτικός της περίπτωσης όπου δεν υπάρχει καμία RU 996 τόνων, καμία RU 484 τόνων, και 37 RU 26 τόνων. Ο συνδυασμός #2 αντιπροσωπεύει την περίπτωση με μία RU 52 τόνων και 35 RU 26 τόνων. Ο συνδυασμός #3 έχει δύο RU 52 τόνων και 33 RU 26 τόνων. Τέλος, ο τελευταίος συνδυασμός αντιπροσωπεύει την περίπτωση με μία μόνο RU 996 τόνων [92].

Από τη μελέτη των αποτελεσμάτων προκύπτει ότι η μέση απόδοση επηρεάζεται σημαντικά από την κατανομή πόρων ανά κανάλι. Ενώ η πολιτική εκχώρησης των RU πραγματοποιείται με δίκαιο και αναλογικό τρόπο, η αποδοτικότητα της χρήσης των πόρων του καναλιού διαφέρει κατά περισσότερο από δύο φορές. Επομένως, ακόμη και στην περίπτωση μιας βασικής συνάρτησης χρησιμότητας, η επιλογή του καλύτερου τρόπου κατανομής των RU είναι ιδιαίτερα σύνθετη [92].

Ένα τμήμα των RU διατίθεται για τυχαία πρόσβαση (Random Access – RA). Η χωρητικότητα και ο χρόνος αποστολής επηρεάζονται από το μέγεθος των RU κάθε RA. Ο αριθμός των πόρων RU σχετίζεται με τα μοτίβα κίνησης. Εάν είναι απαραίτητη η μετάδοση πακέτων στο UL, τότε το STA για την περίπτωση αυτή χρησιμοποιεί το παλαιό EDCA για να μεταδώσει είτε αυτά τα πακέτα είτε BSR. Ωστόσο, τέτοιες μεταδόσεις είναι λιγότερο αποτελεσματικές από τις OFDMA [92].

Για παράδειγμα, ένα δίκτυο Wi-Fi μπορεί να αποτελείται από ετερογενείς συσκευές (δηλαδή συσκευές διαφορετικών κατασκευαστών). Στα αρχικά πρότυπα του Wi-Fi, το AP θεωρούσε ότι όλοι οι σταθμοί είχαν την ίδια ικανότητα για πρόσβαση στο κανάλι. Όμως, στα ασύρματα δίκτυα 802.11ax, το AP ορίζει τον τρόπο κατανομής των πόρων. Έτσι, ένα AP με μη συνεργατική συμπεριφορά μπορεί να διαθέσει περισσότερο χρόνο καναλιού σε εκείνα τα STA που κατασκευάζονται από τον ίδιο κατασκευαστή [92].

Ένα ζήτημα προς βελτιστοποίηση είναι η ορθή επιλογή σχετικά με την διάρκεια ενός πλαισίου MU. Η διάρκεια αποστολής του πλαισίου επιδρά στην αποδοτικότητα του καναλιού, σε παραμέτρους QoS και στην γενικότερη δικαιοσύνη (fairness). Το AP είναι υπεύθυνο για τη σωστή χρονοδρομολόγηση τόσο των μεγάλων πλαισίων όσο και των μικρών πλαισίων αποτελεσματικών για τυχαία πρόσβαση και για BSR [92].



Εικόνα 11 Ρυθμαπόδοση ανερχόμενης ζεύξης για διάφορες διαμορφώσεις RU [92]

Συνοψίζοντας, σε σχέση με το παρελθόν, το 802.11ax χρησιμοποιεί παράλληλα τις ζώνες συχνοτήτων 2,4 GHz και 5 GHz (και 6 GHz στην επέκταση Wi-Fi 6E) πετυχαίνοντας κατά αυτόν τον τρόπο αυξημένες επιδόσεις αλλά και συμβατότητα με παλαιότερες συσκευές. Σε σύγκριση με το 802.11ac & 802.11ad, χρησιμοποιεί την διαμόρφωση 1024-QAM και υιοθετεί την τεχνολογία χωρικής επαναχρησιμοποίησης. Τέλος, στον Πίνακα 2 εμφανίζονται όλοι οι τρόποι προγραμματισμού μετάδοσης στο 802.11ax [92].

Πίνακας 2 Τρόποι προγραμματισμού μετάδοσης στο 802.11ax

Περιγραφή	Uplink	Downlink
802.11e παρουσιάζει το Enhanced Distributed Channel Access (EDCA) και HCCA το οποίο κατηγοριοποιεί τις ροές ανάλογα το είδος (voice, video, best effort and background traffic) και τις δρομολογεί διαφορετικά.	Ανάλογα τη ροή εκχωρείται διαφορετική προτεραιότητα	Ανάλογα τη ροή εκχωρείται διαφορετική προτεραιότητα
HCCA επιτρέπει σε ένα AP να προγραμματίζει τις μεταδόσεις βάσει QoS προδιαγραφών, όπως όριο καθυστέρησης, λόγος απώλειας πακέτου, ή το απαιτούμενο εύρος.	Παίζουν ρόλο οι προδιαγραφές QoS	Παίζουν ρόλο οι προδιαγραφές QoS
OFDMA transmission	Η δρομολόγηση καθορίζεται από ένα Trigger πλαίσιο, ένα πλαίσιο ελέγχου το οποίο εκχωρεί ένα κανάλι για την UL MU μετάδοση ένα πλαίσιο δεδομένων	Ένα αρχικό πακέτο PHY καθορίζει τη διάρκεια του πλαισίου και την αντιστοίχιση τόνων και STAs
OFDMA Random Access	Παρόμοια με multichannel slotted Aloha. Εφαρμόζεται όταν το AP δεν γνωρίζει ποιος σταθμός μπορεί να μεταδώσει. Ένα πλαίσιο Trigger μπορεί να εκχωρήσει RU για τυχαία πρόσβαση. Η εκκίνηση ή μη της αποστολής από τα STAs κρίνεται από την διαδικασία OFDMA Back-off (OBO). Η βάση των βελτιστοποιήσεων τις οποίες παρουσίασε η TGax σχετίζεται με το γεγονός ότι οι STAs ενεργοποιούνται (awake) μόνο όταν είναι η σειρά τους για μετάδοση δεδομένων. Πιο αναλυτικά, τα 802.11ax STAs έχουν τη δυνατότητα να εισέλθουν στη λειτουργία microsleep, δηλαδή, την απενεργοποίηση του καναλιού τους όταν δεν υπάρχει η δυνατότητα μετάδοσης.	

4 *Πρότυπο IEEE 802.11be (Wi-Fi 7)*

Το Wi-Fi 7 έχει φιλόδοξους στόχους και πρέπει να ανταποκρίνεται σε αυστηρές απαιτήσεις για να καλύψει τις αυξανόμενες ανάγκες μας σε συνδεσιμότητα. Το πρότυπο IEEE 802.11be-2024 έχει πλέον ολοκληρωθεί και δημοσιεύθηκε τον Ιούλιο του 2025 [71], ενώ το πρόγραμμα πιστοποίησης Wi-Fi CERTIFIED 7 της Wi-Fi Alliance ξεκίνησε τον Ιανουάριο του 2024 και εμπορικά προϊόντα είναι ήδη διαθέσιμα. Στην ενότητα που ακολουθεί παρουσιάζονται οι τεχνικοί στόχοι που τέθηκαν κατά τη διαδικασία τυποποίησης και ο τρόπος με τον οποίο αποτυπώθηκαν στο τελικό πρότυπο.

4.1 Τεχνικοί στόχοι και καινοτομίες

Το Wi-Fi 7 χρησιμοποιεί το OFDMA με πιο ευέλικτο και αποτελεσματικό τρόπο, και με την πρόσθετη επιλογή να χρησιμοποιεί 4096-QAM. Στα αρχικά σχέδια το MU-MIMO θα υποστήριζε 16 χωρικές ροές, έναντι 8 στο Wi-Fi 6· ωστόσο στο τελικό IEEE 802.11be-2024 ο μέγιστος αριθμός χωρικών ροών παρέμεινε στις 8. Το μέγιστο μέγεθος καναλιού (320 MHz) διπλασιάζεται και καθιστά το Wi-Fi 7 ιδανικό για να επωφεληθεί από την πρόσβαση στη ζώνη 6 GHz, την πιο πρόσφατη ζώνη που προστέθηκε για μη αδειοδοτημένη χρήση και υποστηρίζεται από το Wi-Fi 6E. Τα νέα αυτά χαρακτηριστικά επιφέρουν σημαντική αύξηση στο μέγιστο ρυθμό μεταφοράς δεδομένων, με το τελικό IEEE 802.11be-2024 να φτάνει περίπου τα 23 Gbit/s (με 8 χωρικές ροές σε κανάλι 320 MHz). Το Wi-Fi 7 προσφέρει επίσης χαμηλότερη καθυστέρηση (latency), καθώς και αυξημένη ευελιξία στη χρήση των πόρων του δικτύου και του φάσματος [1], [38].

Το Wi-Fi 7 (IEEE 802.11be) εισάγει σημαντικές καινοτομίες που το καθιστούν πιο αποδοτικό και αξιόπιστο σε απαιτητικά περιβάλλοντα. Εστιάζει στη χρήση της τεχνολογίας 4096-QAM (Quadrature Amplitude Modulation), που αυξάνει την πυκνότητα δεδομένων κατά 20% σε σχέση με το Wi-Fi 6E, επιτρέποντας την αποστολή περισσότερων δεδομένων. Επιπλέον, το εύρος καναλιού επεκτείνεται από 160 MHz στα 320 MHz, διπλασιάζοντας τη χωρητικότητα μεταφοράς δεδομένων, με θεωρητικές ταχύτητες που φτάνουν περίπου τα 23 Gbit/s στο τελικό πρότυπο (46 Gbit/s στα αρχικά σχέδια με 16 χωρικές ροές). Χρησιμοποιεί επίσης την τεχνολογία Multi-Link Operation (MLO), συνδυάζοντας ζώνες συχνοτήτων (2,4 GHz, 5 GHz, 6 GHz) για ταχύτερες και πιο σταθερές συνδέσεις [1], [5], [94].

Το MLO αλλάζει ριζικά τον τρόπο που διαχειρίζεται τις συνδέσεις, καθώς επιτρέπει σε μια συσκευή να χρησιμοποιεί πολλαπλές ζώνες ταυτόχρονα ή να εναλλάσσεται μεταξύ τους ανάλογα με τις συνθήκες. Αυτό είναι κρίσιμο για εφαρμογές όπως online gaming ή εικονική πραγματικότητα (VR), όπου η καθυστέρηση πρέπει να παραμένει εξαιρετικά χαμηλή. Επιπλέον, η ενσωμάτωση της τεχνικής OFDMA (Orthogonal Frequency-Division Multiple Access) βελτιστοποιεί τη μετάδοση πακέτων δεδομένων, μειώνοντας τον χρόνο αναμονής για κάθε συσκευή, καθιστώντας το Wi-Fi 7 ιδανικό για έξυπνα σπίτια και πολυσύχναστα δίκτυα [1].

Αξιοσημείωτο είναι ότι το Wi-Fi 7 υποστηρίζει περισσότερες χωρικές ροές μέσω της τεχνολογίας MU-MIMO (Multi-User, Multiple-Input, Multiple-Output), αυξάνοντας την απόδοση και τον αριθμό των ταυτόχρονα συνδεδεμένων συσκευών. Τα χαρακτηριστικά αυτά το καθιστούν απαραίτητο σε περιβάλλοντα που απαιτούν μεγάλη απόδοση, όπως εταιρικά δίκτυα και εφαρμογές IoT (Internet of Things), και αναμένεται να αποτελέσει πρότυπο για τις μελλοντικές τεχνολογίες ασύρματης επικοινωνίας. Αυτές οι τεχνολογίες ενισχύουν την ανθεκτικότητα και την αποδοτικότητα του Wi-Fi 7, εξυπηρετώντας παράλληλα την ανάγκη για αυξημένη χωρητικότητα και ταχύτητα στη δικτυακή υποδομή του μέλλοντος.

Μια από τις νέες δυνατότητες που εισάγονται στο Wi-Fi 7 (IEEE 802.11be), είναι η ταυτόχρονη χρήση πολλαπλών ζωνών συχνοτήτων (όπως 2,4 GHz, 5 GHz και 6 GHz) από μία συσκευή. Χάρη στη δυνατότητα αυτή, οι συσκευές μπορούν να μεταδίδουν δεδομένα ταυτόχρονα σε διαφορετικές ζώνες, αυξάνοντας σημαντικά την απόδοση, μειώνοντας τις καθυστερήσεις και βελτιώνοντας τη συνολική αξιοπιστία της σύνδεσης. Τα πλεονεκτήματα αυτής της δυνατότητας είναι τα ακόλουθα [25]:

- Αυξημένη απόδοση: Με την ταυτόχρονη χρήση πολλαπλών ζωνών, επιτρέπεται η συγκέντρωση εύρους ζώνης, η οποία μεταφράζεται σε ταχύτερη μεταφορά δεδομένων.
- Μειωμένη καθυστέρηση: επιτρέπεται η επιλογή της λιγότερο συμφορημένης ζώνης για κρίσιμα δεδομένα που απαιτούν χαμηλή καθυστέρηση, κάτι που είναι ζωτικής σημασίας για εφαρμογές όπως τα διαδικτυακά παιχνίδια ή η επικοινωνία σε πραγματικό χρόνο.
- Βελτιωμένη αξιοπιστία: Σε περίπτωση παρεμβολής σε μια ζώνη, μπορεί αυτόματα να ανακατευθύνει δεδομένα σε μια άλλη, λιγότερο συμφορημένη ζώνη, διασφαλίζοντας τη συνέχεια της σύνδεσης ακόμη και σε περιβάλλον με διαταραχή.
- Ευέλικτη διαχείριση πόρων: Χάρη στον έξυπνο διαχωρισμό της κίνησης δεδομένων σε διαφορετικές ζώνες, επιτρέπεται η πιο αποτελεσματική χρήση των διαθέσιμων πόρων φάσματος, κάτι που είναι ιδιαίτερα σημαντικό σε δίκτυα με μεγάλο αριθμό χρηστών.

Ακόμη, το Wi-Fi 7 ενισχύει τη διασύνδεσή του με το TSN (Time-Sensitive Networking). Το TSN δεν αποτελεί μέρος του IEEE 802.11· είναι σύνολο προτύπων της ομάδας εργασίας IEEE 802.1, σχεδιασμένων ώστε να διασφαλίζουν ακριβή και προβλέψιμη παράδοση δεδομένων. Το 802.11be υποστηρίζει τα πρότυπα αυτά μέσω κατάλληλων μηχανισμών προγραμματισμένης πρόσβασης στο μέσο. Το TSN είναι ιδιαίτερα σημαντικό σε εφαρμογές όπου οι καθυστερήσεις, το jitter (μεταβλητότητα καθυστέρησης) και η εγγύηση παράδοσης είναι κρίσιμες, όπως ο βιομηχανικός έλεγχος, ο ζωντανός ήχος και βίντεο και ο αυτοματισμός κτιρίων [73].

Το TSN επιτρέπει τον καθορισμό χρονοδιαγραμμάτων μετάδοσης για δεδομένα υψηλής προτεραιότητας, ελαχιστοποιώντας τον κίνδυνο συγκρούσεων και συμφόρησης δικτύου. Παρέχει μηχανισμούς για τον περιορισμό των μέγιστων καθυστερήσεων μετάδοσης, κάτι που είναι ζωτικής σημασίας για εφαρμογές που απαιτούν χαμηλή καθυστέρηση. Ακόμη, επιτρέπει την ιεράρχηση διαφορετικών ροών δεδομένων, διασφαλίζοντας ότι οι κρίσιμες εφαρμογές λαμβάνουν το απαιτούμενο εύρος ζώνης και ελάχιστες καθυστερήσεις. Χάρη στον συγχρονισμό χρόνου μεταξύ συσκευών, το TSN επιτρέπει τον ακριβή συντονισμό των ενεργειών με την πάροδο του χρόνου, κάτι που είναι απαραίτητο σε περιβάλλοντα όπου η ακρίβεια χρόνου είναι κρίσιμη [73].

4.1.1 Βελτιώσεις σε φυσικό επίπεδο

Οι βελτιώσεις σε φυσικό επίπεδο είναι οι ακόλουθες [73], [91]:

1) Παροχή διευρυμένου εύρους ζώνης άνω των 160 MHz: Τα υπάρχοντα WLAN 802.11 (π.χ. IEEE 802.11ax) παρέχουν χαμηλή ποιότητα υπηρεσίας όταν υποστηρίζουν νέες αναδυόμενες εφαρμογές, όπως VR/AR. Για την εκπλήρωση της υπόσχεσης για μέγιστη απόδοση τουλάχιστον 30 Gbit/s, στόχος που είχε τεθεί κατά την έναρξη της τυποποίησης, η ομάδα εργασίας πρόσθεσε νέες λειτουργίες εύρους ζώνης, συμπεριλαμβανομένων των συνεχόμενων 240 MHz, των μη συνεχόμενων 160+80 MHz, των συνεχόμενων 320 MHz και των μη συνεχόμενων 160+160 MHz.

Κατά τη διάρκεια της διαδικασίας τυποποίησης, η διαμόρφωση των καναλιών (channelization) και το σχέδιο κατανομής υποφερόντων (tone plan) για αυτές τις νέες λειτουργίες εύρους ζώνης αποτέλεσαν αντικείμενο έντονων συζητήσεων. Συγκεκριμένα, εξετάστηκε αν τα εύρη 240 MHz (ή 160+80 MHz) θα προέκυπταν μέσω διάτρησης φάσματος (preamble puncturing) στα 320 MHz (ή 160+160 MHz) με επανάληψη του σχεδίου κατανομής του IEEE 802.11ax, ή αν θα οριζόταν ένα νέο σχέδιο εξ ολοκλήρου για τα 160+160 MHz και 320 MHz. Παράλληλα, η ομάδα εργασίας σχεδίασε αποτελεσματικές μεθόδους για τη βελτιστοποίηση της χρήσης του φάσματος ευρείας ζώνης, καθώς και του μη συνεχούς εύρους ζώνης.

2) Υποστήριξη ανάθεσης πολλαπλών μονάδων πόρων σε έναν χρήστη: Στο IEEE 802.11ax, σε κάθε χρήστη εκχωρείται μόνο μια μονάδα πόρων για τη μετάδοση ή τη λήψη πλαισίων, γεγονός που περιορίζει σημαντικά την ευελιξία του προγραμματισμού πόρων φάσματος. Προκειμένου να επιλυθεί αυτό το πρόβλημα και να ενισχυθεί περαιτέρω η φασματική απόδοση, η πρόταση να επιτρέπεται η ανάθεση πολλαπλών μονάδων πόρων σε έναν χρήστη εγκρίθηκε από την ομάδα εργασίας. Οι σχετικές τεχνικές λεπτομέρειες, όπως οι αναθέσεις και ο σχεδιασμός πολλαπλών μονάδων πόρων (multi-RU), οριστικοποιήθηκαν στο τελικό IEEE 802.11be-2024.

3) Εισαγωγή του 4096-QAM για τη βελτίωση του μέγιστου ρυθμού δεδομένων: Το διαθέσιμο σχήμα διαμόρφωσης υψηλότερης τάξης του IEEE 802.11ax είναι το 1024-QAM, όπου ένα διαμορφωμένο σύμβολο μεταφέρει 10 bits. Για την περαιτέρω βελτίωση του μέγιστου ρυθμού, υιοθετήθηκε το 4096-QAM, ώστε ένα διαμορφωμένο σύμβολο να μεταφέρει 12 bits. Επομένως, με δεδομένο τον ίδιο ρυθμό κωδικοποίησης, μπορεί να σημειωθεί 20% αύξηση στο ρυθμό δεδομένων σε σύγκριση με το 1024-QAM. Ωστόσο, οι εφικτές διαμορφώσεις για το 4096-QAM, όπως οι στρατηγικές κωδικοποίησης, ο αριθμός των ροών, οι απαιτήσεις διανυσματικού μεγέθους σφάλματος και οι πολλαπλές κεραίες λήψης, καθορίστηκαν στο τελικό πρότυπο τόσο για τη μετάδοση μεμονωμένου χρήστη όσο και πολλαπλών χρηστών.

4) Παροχή αποτελεσματικών μορφοτύπων προοιμίου (preamble) και μηχανισμών διάτρησης προοιμίου (preamble puncturing): Αυτόματη αναγνώριση για τη διαφοροποίηση της έκδοσης μιας μονάδας δεδομένων φυσικού πρωτοκόλλου (PPDU) και της απαραίτητης σηματοδοσίας (π.χ. πληροφορίες κατανομής πόρων) κ.λπ. Ο σχεδιασμός του προοιμίου θα πρέπει να εξασφαλίζει την προς τα πίσω συμβατότητα και τη συνύπαρξη με τα παλαιά PPDU που μεταδίδονται στις ζώνες 2,4 GHz, 5 GHz και 6 GHz. Τα νέα χαρακτηριστικά, όπως το multi-RU και το MU-MIMO, καθώς και οι μορφές του προοιμίου για την υποστήριξη διαφορετικών τεχνολογιών και σεναρίων, καθορίστηκαν στο τελικό πρότυπο. Με τη σύνδεση των καναλιών με μη συνεχή τρόπο, η νέα διάτρηση προοιμίου (preamble puncturing) στο IEEE 802.11ax επιτρέπει σε μια συσκευή Wi-Fi να μεταδίδει το MU PPDU σε όλο το εύρος ζώνης (π.χ. 80 MHz, 80+80 MHz ή 160 MHz) εκτός από το διάτρητο τμήμα του προοιμίου. Ωστόσο, λόγω της απουσίας του πεδίου SIG-B και της σχετικής με τη διάτρηση σηματοδότησης στο προοίμιο, το SU PPDU δεν επιτρέπεται να χρησιμοποιεί διάτρηση προοιμίου και πρέπει να μεταδίδεται σε όλο το διαθέσιμο συνεχές εύρος ζώνης. Έτσι, μπορεί να υπάρχει ανάγκη βελτίωσης του σχεδιασμού διάτρησης για το MU PPDU και προσθήκης του σχεδιασμού διάτρησης για το SU PPDU.

4.1.2 Βελτιώσεις του Επιπέδου MAC

1) Λειτουργία πολλαπλών συνδέσεων σε αυξημένο εύρος ζώνης: Λόγω του περιορισμένου και γεμάτου μη αδειοδοτημένου φάσματος στα 2,4 GHz και 5 GHz, τα υπάρχοντα WLAN IEEE 802.11 (π.χ. IEEE 802.11ax) παρουσιάζουν χαμηλή ποιότητα εξυπηρέτησης νέων εφαρμογών, όπως VR/AR. Για την υλοποίηση της υπόσχεσης για μέγιστη απόδοση τουλάχιστον 30 Gbit/s, στόχος που είχε τεθεί κατά την έναρξη της τυποποίησης, η ομάδα εργασίας επεκτείνει το εύρος ζώνης του με συνάθροιση πολλαπλών ζωνών στις ζώνες 2,4 GHz, 5 GHz και 6 GHz, αποκτώντας εύρος ζώνης έως και 320 MHz.

Ωστόσο, μπορεί να προκύψουν προβλήματα, όπως η επιλεκτικότητα συχνότητας καναλιού σε ένα πολύ ευρύτερο και μη συνεχόμενο εύρος ζώνης, διαφορετικοί τύποι λειτουργίας πολλαπλών ζωνών, η συμβατότητα προς τα πίσω και η συνύπαρξη με τους υπάρχοντες παλαιούς σταθμούς στις ζώνες 2,4 GHz, 5 GHz και 6 GHz, όταν πραγματοποιείται συνάθροιση πολλαπλών ζωνών. Στις παλαιές λειτουργίες πολλαπλών ζωνών, υπάρχει ο περιορισμός ότι οι μονάδες δεδομένων ελέγχου πρόσβασης στο μέσο (MAC) που ανήκουν σε ένα μόνο αναγνωριστικό κίνησης (TID) μπορούν να χρησιμοποιήσουν μόνο μία ζώνη. Έτσι, για να βελτιωθεί η ευελιξία της μετάδοσης και να ελαχιστοποιηθεί η επιβάρυνση MAC, τα υπάρχοντα μοντέλα MAC μπορεί να χρειάζονται σημαντική βελτίωση, δηλαδή να υπάρχει ένας επιπλέον σταθμός ο οποίος θα μπορεί να μεταδίδει πλαίσια του ίδιου TID ή διαφορετικών TIDs σε πολλαπλές ζώνες ταυτόχρονα ή μη ταυτόχρονα [90].

2) Υποστήριξη αυξημένων χωρικών ροών και βελτιώσεων MIMO: Για να ανταποκριθούν στις αυξανόμενες απαιτήσεις κίνησης που δημιουργούνται από τον αυξανόμενο αριθμό συσκευών Wi-Fi, τα σημεία πρόσβασης συνέχισαν να αυξάνουν τον αριθμό των κεραιών και τις καλύτερες δυνατότητες χωρικής πολυπλεξίας τα τελευταία χρόνια. Επί του παρόντος, στο IEEE 802.11ax, ένα σημείο πρόσβασης εξοπλισμένο με 8 κεραίες μπορεί να εξυπηρετεί ταυτόχρονα έως και 8 χρήστες για μετάδοση uplink (UL)/downlink (DL), μέσω MU-MIMO. Συνεχίζοντας την τάση αναβάθμισης της χωρικής πολυπλεξίας των σημείων πρόσβασης, η ομάδα εργασίας εισηγήθηκε στα αρχικά σχέδια μέγιστο αριθμό 16 χωρικών ροών για την επίτευξη υψηλότερης χωρητικότητας δικτύου. Στο τελικό IEEE 802.11be-2024 ο μέγιστος αριθμός παρέμεινε στις 8 [71], [91].

3) Κατανεμημένες λειτουργίες μεταξύ γειτονικών σημείων πρόσβασης: Το IEEE 802.11ax υποστηρίζει μόνο μετάδοση προς/από ένα μόνο σημείο πρόσβασης και χωρική επαναχρησιμοποίηση μεταξύ σημείων πρόσβασης και σταθμών χωρίς συντονισμό μεταξύ γειτονικών σημείων πρόσβασης. Ως αποτέλεσμα, η ικανότητά του να αξιοποιεί την ευελιξία των χρονικών και χωρικών πόρων είναι σημαντικά περιορισμένη. Για να βελτιωθεί αυτό, η ομάδα

εργασίας επέκτεινε τη δυνατότητά του για την υποστήριξη της κοινής χρήσης δεδομένων και πληροφοριών ελέγχου μεταξύ σημείων πρόσβασης μέσω ενσύρματων ή ασύρματων συνδέσεων, βελτιώνοντας έτσι την αποδοτικότητα του φάσματος, αυξάνοντας τη μέγιστη απόδοση και μειώνοντας την καθυστέρηση.

Κατά τη διαδικασία τυποποίησης του Wi-Fi 7 (IEEE 802.11be) εξετάστηκαν διάφορες τεχνικές συντονισμού μεταξύ γειτονικών σημείων πρόσβασης με στόχο τη βελτίωση της φασματικής αποδοτικότητας και τη μείωση των παρεμβολών. Οι τεχνικές αυτές περιλαμβάνουν τη συντονισμένη χωρική επαναχρησιμοποίηση, τη συντονισμένη ορθογώνια πολλαπλή πρόσβαση με διαίρεση συχνότητας, τη συντονισμένη διαμόρφωση δέσμης και την κοινή μετάδοση, ανάλογα με τον βαθμό πολυπλοκότητας του απαιτούμενου συντονισμού. Οι έννοιες αυτές αποτέλεσαν τη βάση για τους μηχανισμούς Multi-AP Coordination που αναπτύσσονται περαιτέρω στο υπό εξέλιξη πρότυπο IEEE 802.11bn (Wi-Fi 8), όπου η συνεργασία πολλαπλών σημείων πρόσβασης αποτελεί βασικό άξονα για την επίτευξη υπερ-υψηλής αξιοπιστίας [5], [7], [17], [79], [90].

Σε μια σύγχρονη αρχιτεκτονική ασύρματου δικτύου με πολλαπλά σημεία πρόσβασης (Multi-AP networks), όπως συμβαίνει σε εταιρικά ή βιομηχανικά περιβάλλοντα, η απουσία ενός κεντρικού κόμβου συντονισμού καθιστά απαραίτητη την άμεση επικοινωνία κάθε σημείου πρόσβασης με τα γειτονικά του. Ωστόσο, η διαδικασία αυτή επιβαρύνει σημαντικά το δίκτυο με υψηλό σηματοδοτικό φόρτο και αυξημένη πολυπλοκότητα επεξεργασίας. Για τον λόγο αυτό, στο πλαίσιο της εξέλιξης των προτύπων Wi-Fi εξετάζονται και αναπτύσσονται μηχανισμοί συντονισμού πολλαπλών σημείων πρόσβασης (Multi-AP Coordination) και λειτουργίες χαμηλής καθυστέρησης, οι οποίοι αποκτούν ιδιαίτερη σημασία στο υπό ανάπτυξη πρότυπο IEEE 802.11bn (Wi-Fi 8). Οι μηχανισμοί αυτοί επιτρέπουν αποδοτικό συγχρονισμό φάσης και χρόνου, ελαχιστοποιώντας τις παρεμβολές μεταξύ γειτονικών APs. Ο ακριβής συγχρονισμός και η βελτιστοποιημένη κατανομή πόρων αποτελούν κρίσιμους παράγοντες για την αποφυγή υποβάθμισης της απόδοσης και τη διασφάλιση αξιόπιστης λειτουργίας σε περιβάλλοντα υψηλής πυκνότητας [1], [2].

4.2 Multi-Link Operation (MLO), 4096-QAM, Ευρυζωνικά κανάλια 320 MHz

Το IEEE 802.11be, γνωστό και ως Wi-Fi 7, είναι το επόμενο μεγάλο βήμα στην εξέλιξη των ασύρματων δικτύων Wi-Fi και αναμένεται να προσφέρει σημαντική αύξηση της απόδοσης, της ταχύτητας και της αξιοπιστίας σε σχέση με τα προηγούμενα πρότυπα, όπως το Wi-Fi 6 (IEEE 802.11ax). Στο Wi-Fi 7, έχουν εισαχθεί νέες τεχνολογίες και χαρακτηριστικά που ενισχύουν την αποδοτικότητα του δικτύου, αυξάνουν τη χωρητικότητα του φάσματος και βελτιώνουν την εμπειρία

των χρηστών σε πυκνές περιοχές και εφαρμογές υψηλών απαιτήσεων. Ορισμένα από τα πιο σημαντικά χαρακτηριστικά του Wi-Fi 7 περιλαμβάνουν την τεχνολογία Multi-Link Operation (MLO), τη 4096-QAM και τα ευρυζωνικά κανάλια 320 MHz, τα οποία περιγράφονται αναλυτικά παρακάτω [3].

4.2.1 Multi-Link Operation (MLO)

Το πρότυπο 802.11be (Wi-Fi 7) εισάγει ένα εξελιγμένο φυσικό επίπεδο (PHY) που βασίζεται στις αρχές του 802.11ax, επεκτείνοντας όμως σημαντικά τις δυνατότητές του. Συγκεκριμένα, υποστηρίζει υψηλότερες τάξεις διαμόρφωσης (4096-QAM), διευρυμένο εύρος καναλιού έως 320 MHz, καθώς και έως 8 χωρικές ροές MIMO στο τελικό πρότυπο (τα αρχικά σχέδια προέβλεπαν 16). Αυτές οι τεχνικές βελτιώσεις οδηγούν σε θεωρητική ονομαστική ταχύτητα μετάδοσης έως περίπου 23 Gbit/s (46 Gbit/s στα αρχικά σχέδια με 16 χωρικές ροές), αυξάνοντας δραστικά την αποδοτικότητα φάσματος σε σχέση με το 802.11ax. Επιπλέον, μέσω της λειτουργίας Multi-Link Operation (MLO), το Wi-Fi 7 επιτρέπει την ταυτόχρονη χρήση πολλαπλών συνδέσεων μεταξύ σημείων πρόσβασης και συσκευών, μειώνοντας την καθυστέρηση και αυξάνοντας τη συνολική απόδοση, ιδίως σε απαιτητικές εφαρμογές όπως η επαυξημένη πραγματικότητα (AR) και η εικονική πραγματικότητα (VR) [4].

Στο πρότυπο IEEE 802.11be (Wi-Fi 7), η αποδοτική αξιοποίηση των διαθέσιμων πόρων καναλιού κατά τη διάρκεια πολλαπλών ταυτόχρονων μεταδόσεων (MU transmissions) απαιτεί ευφυείς μηχανισμούς ελέγχου και κατακερματισμού των πλαισίων. Για τη βέλτιστη χρήση του χρόνου αέρα, το Access Point (AP) εκχωρεί Resource Units (RUs) μόνο στους σταθμούς (STAs) που έχουν ενεργά δεδομένα προς αποστολή, αποφεύγοντας άσκοπη κατοχή καναλιού. Οι STAs ενημερώνουν το AP για το μέγεθος του buffer τους ή για το διαθέσιμο φορτίο δεδομένων είτε κατόπιν αιτήματος είτε αυτόνομα, επιτρέποντας στο AP να προγραμματίζει τις ανερχόμενες μεταδόσεις (UL) με βάση πραγματικές ανάγκες [25].

Στο πλαίσιο των MU-OFDMA μεταδόσεων, το AP χρησιμοποιεί δυναμικά Trigger Frames για να καθορίσει πώς και πότε κάθε STA θα μεταδώσει. Παράλληλα, σε περιπτώσεις όπου οι χρόνοι εκπομπής διαφέρουν ή τα πλαίσια δεν μπορούν να συγκεντρωθούν πλήρως σε έναν κύκλο μετάδοσης, εφαρμόζεται ο κατακερματισμός πλαισίων (fragmentation), ώστε να αξιοποιηθεί αποδοτικά κάθε διαθέσιμη χρονοθυρίδα. Η τεχνική αυτή αποτρέπει την απώλεια εύρους καναλιού λόγω μη ευθυγραμμισμένων μεταδόσεων και επιτρέπει την παράλληλη μετάδοση δεδομένων διαφορετικού μεγέθους από πολλούς STAs [25].

Επιπλέον, το 802.11be εισάγει βελτιωμένους μηχανισμούς συντονισμού καναλιού για την αποφυγή αλληλεπικαλύψεων ή συγκρούσεων κατά τη διάρκεια των MU-UL μεταδόσεων. Το AP μπορεί να επιτρέπει ή να παραλείπει τον έλεγχο φορέα (CCA) ανάλογα με το είδος της μετάδοσης και την εκτιμώμενη κατάσταση του καναλιού, βελτιώνοντας έτσι την απόδοση και τη φασματική αποδοτικότητα. Σε συνθήκες υψηλής κίνησης, ο συνδυασμός αυτών των τεχνικών — δυναμική εκχώρηση RU, ευφυής κατακερματισμός και προσαρμοσμένος έλεγχος καναλιού — οδηγεί σε σημαντική αύξηση της συνολικής χωρητικότητας και στη μείωση των καθυστερήσεων στο ασύρματο μέσο [25].

Στα σύγχρονα πρότυπα ασύρματης πρόσβασης, όπως το IEEE 802.11be (Wi-Fi 7), οι πολλαπλές ταυτόχρονες μεταδόσεις (MU transmissions) πραγματοποιούνται μέσα από έναν δυναμικό μηχανισμό Multi-Link Operation (MLO), ο οποίος κατανέμει το φορτίο δεδομένων σε πολλαπλούς φυσικούς συνδέσμους (links). Σε αυτό το πλαίσιο, η παραδοσιακή προσέγγιση σειριοποίησης των μεταδόσεων, όπως ίσχυε στα 802.11ax STA, αντικαθίσταται από ένα ευφυές μοντέλο κατανομής πόρων, όπου η απόφαση για το ποιο πλαίσιο μεταδίδεται και σε ποιο κανάλι λαμβάνεται δυναμικά μέσω αλγορίθμων ενισχυτικής μάθησης (Reinforcement Learning – RL) [26]. Σημειώνεται ότι πρόκειται για ερευνητική πρόταση και όχι για χαρακτηριστικό που προβλέπεται από το πρότυπο.

Οι πρόσφατες μελέτες δείχνουν ότι η χρήση αλγορίθμων βαθιάς ενισχυτικής μάθησης πολλαπλών εξόδων (multi-headed recurrent deep RL), όπως ο Soft-Actor Critic (SAC), επιτρέπει στο δίκτυο να προσαρμόζεται σε πραγματικό χρόνο στις μεταβαλλόμενες συνθήκες καναλιού, ελαχιστοποιώντας την καθυστέρηση (latency) και αποφεύγοντας την ανάγκη για padding ή μη αποδοτικό aggregation. Αντί να βασίζεται σε στατικές στρατηγικές, το STA είναι σε θέση να προβλέπει τη βέλτιστη στιγμή και τον κατάλληλο σύνδεσμο για τη μετάδοση, επιτυγχάνοντας βελτιστοποιημένη χρήση του φάσματος και ενεργειακή αποδοτικότητα [26].

Η τεχνική αυτή υπερβαίνει τις κλασικές μεθόδους κατακερματισμού και συνάθροισης πλαισίων του 802.11ax, καθώς συνδυάζει προσαρμοστική πολιτική μετάδοσης και αυτόνομη διαχείριση πόρων. Μέσω αυτής της αρχιτεκτονικής, το 802.11be STA μπορεί να κατανέμει τα δεδομένα του μεταξύ πολλών συνδέσμων ανάλογα με το φορτίο και τη διαθεσιμότητα καναλιών, μειώνοντας τη σπατάλη πόρων καναλιού και αυξάνοντας τη συνολική απόδοση και αξιοπιστία των MU μεταδόσεων [26].

Η Multi-Link Operation (MLO) είναι μια από τις πιο σημαντικές καινοτομίες που εισάγει το Wi-Fi 7. Αυτή η τεχνολογία επιτρέπει τη χρήση πολλών καναλιών συχνότητας ταυτόχρονα για τη μετάδοση δεδομένων, βελτιώνοντας την απόδοση, την αξιοπιστία και την ανθεκτικότητα του δικτύου. Σε αντίθεση με τα προηγούμενα πρότυπα, τα οποία επιτρέπουν την εκμετάλλευση ενός μόνο καναλιού για την επικοινωνία, το Wi-Fi 7 μπορεί να αξιοποιεί πολλαπλά κανάλια (είτε εντός

του ίδιου φάσματος είτε σε διαφορετικά φάσματα), εξασφαλίζοντας υψηλότερη συνολική χωρητικότητα και μειωμένη καθυστέρηση.

Το πλεονέκτημα του MLO είναι ότι μπορεί να χρησιμοποιεί παράλληλα, για παράδειγμα, τα 2,4 GHz, 5 GHz και 6 GHz φάσματα για τη μετάδοση δεδομένων, καθιστώντας δυνατή τη μεγαλύτερη ταχύτητα και την αποδοτική χρήση του διαθέσιμου εύρους ζώνης. Η δυνατότητα σύνδεσης σε περισσότερα από ένα κανάλια δίνει τη δυνατότητα για πολλαπλασιασμό της χωρητικότητας του δικτύου, ιδιαίτερα σε περιβάλλοντα με υψηλή πυκνότητα συσκευών, όπως γήπεδα, αεροδρόμια και μεγάλα γραφεία.

Η τεχνολογία αυτή, επιπλέον, συμβάλλει στην βελτίωση της ανθεκτικότητας του δικτύου. Αν ένας από τους συνδεδεμένους σταθμούς αντιμετωπίσει παρεμβολές ή προβλήματα στην επικοινωνία, τα δεδομένα μπορούν να συνεχίσουν να μεταδίδονται μέσω των άλλων καναλιών χωρίς να διακόπτεται η σύνδεση, εξασφαλίζοντας μια πιο σταθερή και αξιόπιστη επικοινωνία.

4.2.2 4096-QAM (Quadrature Amplitude Modulation)

Η τεχνολογία 4096-QAM είναι μία από τις πιο εντυπωσιακές βελτιώσεις του Wi-Fi 7 και αναφέρεται στον τρόπο που κωδικοποιούνται τα δεδομένα για τη μετάδοσή τους. Το QAM (Quadrature Amplitude Modulation) είναι μια τεχνική που επιτρέπει την ταυτόχρονη μετάδοση περισσότερων bit ανά κύκλο του σήματος. Στο Wi-Fi 7, η 4096-QAM επιτρέπει την κωδικοποίηση 12 bit ανά σύμβολο, γεγονός που αυξάνει σημαντικά την χωρητικότητα του καναλιού και την ταχύτητα μετάδοσης δεδομένων σε σχέση με την 1024-QAM που χρησιμοποιείται στο Wi-Fi 6 [1], [73].

Η τεχνολογία αυτή συμβάλλει στην αύξηση του θεωρητικού μέγιστου ρυθμού μετάδοσης του Wi-Fi 7, ο οποίος μπορεί να φτάσει έως και περίπου τα 23 Gbit/s σε ιδανικές συνθήκες, σε συνδυασμό με άλλες βελτιώσεις του προτύπου, όπως τα ευρύτερα κανάλια των 320 MHz και η υποστήριξη πολλαπλών χωρικών ροών. Όμως, η εφαρμογή της 4096-QAM απαιτεί καλύτερη ποιότητα σύνδεσης και λιγότερες παρεμβολές στο σήμα, καθώς τα σύμβολα είναι πιο κοντά το ένα στο άλλο και η μετάδοση πρέπει να είναι πιο ακριβής. Επομένως, η τεχνολογία αυτή είναι πιο αποδοτική σε περιβάλλοντα με ισχυρό σήμα και μικρότερες παρεμβολές, όπως σε εσωτερικούς χώρους με χαμηλή πυκνότητα χρηστών ή σε μικρές αποστάσεις από το σημείο πρόσβασης.

4.2.3 Ευρυζωνικά κανάλια 320 MHz

Στο Wi-Fi 7, το εύρος του καναλιού επεκτείνεται σημαντικά με την υποστήριξη καναλιών πλάτους έως 320 MHz. Σε σύγκριση με τα 160 MHz που χρησιμοποιούνται στο Wi-Fi 6, το αυξημένο εύρος ζώνης επιτρέπει υψηλότερους ρυθμούς μετάδοσης δεδομένων και βελτιωμένη συνολική

χωρητικότητα του δικτύου. Ωστόσο, η επίτευξη των μέγιστων επιδόσεων εξαρτάται από τον συνδυασμό και άλλων τεχνολογιών του προτύπου, όπως η 4096-QAM, η υποστήριξη πολλαπλών χωρικών ροών και η τεχνολογία Multi-Link Operation (MLO). Υπό ιδανικές συνθήκες, το Wi-Fi 7 μπορεί να φτάσει θεωρητικούς ρυθμούς μετάδοσης της τάξης των 23 Gbit/s.

Η χρήση μεγάλων καναλιών συχνότητας προσφέρει αυξημένο εύρος ζώνης, μειώνοντας την ανάγκη για πολλαπλές συσκευές και σημεία πρόσβασης για την εξυπηρέτηση μεγάλου αριθμού χρηστών, κάτι που είναι ιδιαίτερα χρήσιμο σε πυκνοκατοικημένα αστικά περιβάλλοντα ή σε περιοχές υψηλής κίνησης. Ωστόσο, τα 320 MHz κανάλια απαιτούν καλή διαχείριση του φάσματος, καθώς η πιθανότητα παρεμβολών αυξάνεται με την επέκταση του εύρους ζώνης, κάτι που επιτυγχάνεται μέσω της τεχνολογίας MLO και της ευφυούς εκχώρησης πόρων στο δίκτυο [1], [73].

4.3 Υποστήριξη QoS και χαμηλής καθυστέρησης

Η ποιότητα υπηρεσιών (Quality of Service, QoS) και η χαμηλή καθυστέρηση αποτελούν βασικά χαρακτηριστικά για τη διασφάλιση μιας εξαιρετικής εμπειρίας χρήστη σε σύγχρονα ασύρματα δίκτυα, ιδιαίτερα με την αυξανόμενη ζήτηση για εφαρμογές που απαιτούν υψηλές ταχύτητες μεταφοράς δεδομένων, χαμηλή καθυστέρηση και αξιοπιστία. Το πρότυπο IEEE 802.11be (Wi-Fi 7), έχοντας σχεδιαστεί για να καλύψει τις απαιτήσεις των σύγχρονων δικτύων, ενσωματώνει βελτιωμένες τεχνολογίες για την υποστήριξη QoS και τη μείωση της καθυστέρησης, διευκολύνοντας τη μετάδοση κρίσιμων δεδομένων σε πραγματικό χρόνο [1], [25], [94].

Το Quality of Service (QoS) αναφέρεται στη δυνατότητα ενός δικτύου να διασφαλίσει ότι οι κρίσιμες υπηρεσίες και εφαρμογές θα απολαμβάνουν προτεραιότητα στην εκχώρηση πόρων, σε σχέση με λιγότερο κρίσιμες υπηρεσίες. Στο πλαίσιο του Wi-Fi 7, το QoS είναι εξαιρετικά σημαντικό, δεδομένου ότι τα δίκτυα πλέον εξυπηρετούν πληθώρα εφαρμογών, όπως:

- Streaming υψηλής ανάλυσης (π.χ., 4K/8K video)
- Gaming σε πραγματικό χρόνο (low-latency gaming)
- Εφαρμογές IoT (Internet of Things)
- Επαγγελματική τηλεδιάσκεψη και VoIP

Με το Wi-Fi 7, η ποιότητα υπηρεσίας (QoS) βελτιώνεται μέσω πιο ευέλικτης διαχείρισης της κίνησης δεδομένων και δυνατότητας προσαρμογής των προτεραιοτήτων ανάλογα με τις απαιτήσεις κάθε εφαρμογής. Το Wi-Fi 7 αξιοποιεί την τεχνολογία OFDMA (Orthogonal Frequency Division Multiple Access), σε συνδυασμό με την Multi-Link Operation (MLO), επιτρέποντας πιο αποδοτική

εκμετάλλευση των διαθέσιμων πόρων και βελτιωμένη κατανομή της κίνησης μεταξύ διαφορετικών ροών δεδομένων με βάση την προτεραιότητα και τις απαιτήσεις καθυστέρησης [25], [94].

Το Wi-Fi 7 εισάγει νέες δυνατότητες στην εκχώρηση προτεραιοτήτων για δεδομένα, όπου οι υψηλής προτεραιότητας εφαρμογές (π.χ., VoIP, video streaming) θα έχουν προτεραιότητα έναντι άλλων, όπως περιήγηση στο διαδίκτυο ή μεταφορά λιγότερο επείγοντος περιεχομένου. Αυτή η δυνατότητα εξασφαλίζει ότι οι κρίσιμες υπηρεσίες δεν θα υποστούν καθυστερήσεις, ακόμα και σε περιβάλλοντα με μεγάλο όγκο κίνησης δεδομένων.

Η προσαρμοστική πολιτική QoS του Wi-Fi 7 επιτρέπει την προσαρμογή της ποιότητας των υπηρεσιών ανάλογα με τις συνθήκες του δικτύου και την κίνηση δεδομένων. Εάν παρατηρηθούν αυξημένες καθυστερήσεις ή περιορισμένοι πόροι, το σύστημα μπορεί να προσαρμόσει δυναμικά την εκχώρηση των πόρων σε διαφορετικές εφαρμογές με σκοπό να διατηρηθεί η ποιότητα των υπηρεσιών. Αυτό είναι κρίσιμο για τις σύγχρονες εφαρμογές που απαιτούν εγγυημένη ποιότητα υπηρεσίας, όπως το video conferencing και το online gaming [57], [90].

Ακόμη, η χαμηλή καθυστέρηση είναι μία από τις πιο σημαντικές απαιτήσεις για εφαρμογές που απαιτούν άμεση ανταπόκριση και χωρίς καθυστερήσεις στη μετάδοση δεδομένων. Η καθυστέρηση σε ένα δίκτυο αναφέρεται στο χρονικό διάστημα που απαιτείται για να φτάσουν τα δεδομένα από την πηγή στον προορισμό τους. Οι εφαρμογές σε πραγματικό χρόνο, όπως οι κλήσεις VoIP, το gaming και οι βιντεοκλήσεις, απαιτούν πολύ χαμηλές καθυστερήσεις για να διασφαλιστεί η αδιάκοπη και φυσική ροή της επικοινωνίας [72], [94].

Για να καλύψει αυτή την ανάγκη, το Wi-Fi 7 προσφέρει διάφορες τεχνολογίες που στοχεύουν στη μείωση της καθυστέρησης [57], [72], [90]:

- Ευρυζωνικά κανάλια 320 MHz: Η μεγαλύτερη χωρητικότητα των καναλιών σημαίνει ότι τα δεδομένα μπορούν να μεταδίδονται πιο γρήγορα, μειώνοντας την καθυστέρηση και βελτιώνοντας τη συνολική απόδοση.
- Αξιοποίηση της τεχνολογίας MLO: Η Multi-Link Operation (MLO) επιτρέπει τη μετάδοση δεδομένων σε πολλαπλά κανάλια ταυτόχρονα, μειώνοντας τον κίνδυνο καθυστερήσεων που προκαλούνται από συμφόρηση σε ένα μεμονωμένο κανάλι.
- Βελτιώσεις στο QoS: Με την προτεραιοποίηση των δεδομένων σε πραγματικό χρόνο, οι εφαρμογές που απαιτούν χαμηλή καθυστέρηση (όπως VoIP και gaming) μπορούν να εξασφαλίσουν την αδιάκοπη μετάδοση, χωρίς καθυστερήσεις ή διακυμάνσεις της καθυστέρησης (jitter).

Το Wi-Fi 7 επιπλέον ενσωματώνει μηχανισμούς προτεραιοποίησης και βέλτιστη διαχείριση των πόρων για να μειώσει τις καθυστερήσεις, εξασφαλίζοντας τη διατήρηση της ποιότητας της υπηρεσίας σε δίκτυα με υψηλή πυκνότητα χρηστών ή σε καταστάσεις μεγάλης συμφόρησης.

4.4 Χρήσεις σε προηγμένα περιβάλλοντα

Το πρότυπο IEEE 802.11be (Wi-Fi 7) αναπτύχθηκε για να καλύψει τις αυξανόμενες απαιτήσεις απόδοσης των σύγχρονων ασύρματων δικτύων, επιτρέποντας τη λειτουργία σε προηγμένα περιβάλλοντα όπου η ζήτηση για υψηλές ταχύτητες, μεγάλη χωρητικότητα και εξαιρετική αξιοπιστία είναι καθοριστικής σημασίας. Οι εξελίξεις που εισάγονται με το Wi-Fi 7 επιτρέπουν την εξυπηρέτηση απαιτητικών εφαρμογών και υπηρεσιών σε ένα ευρύ φάσμα περιβαλλόντων, από εταιρικά δίκτυα μέχρι ευφυή εργοστάσια και οικιακά δίκτυα επόμενης γενιάς [8], [57], [73].

Το Wi-Fi 7 υποστηρίζει υψηλές ταχύτητες μεταφοράς δεδομένων, χαμηλή καθυστέρηση και μεγάλη χωρητικότητα σε περιοχές με πυκνή κίνηση δεδομένων και προσφέρει τη δυνατότητα αναβάθμισης των ασύρματων δικτύων σε περιοχές όπου οι παραδοσιακές τεχνολογίες Wi-Fi είχαν περιορισμούς. Παρακάτω περιγράφονται οι κύριες χρήσεις του Wi-Fi 7 σε προηγμένα περιβάλλοντα [57], [72], [90].

4.4.1 Εταιρικά Δίκτυα και Δίκτυα Υψηλής Πυκνότητας

Ένα από τα κύρια πλεονεκτήματα του Wi-Fi 7 είναι η ικανότητά του να εξυπηρετεί μεγάλες ομάδες χρηστών σε περιβάλλοντα υψηλής πυκνότητας συσκευών. Σε εταιρικά δίκτυα και χώρους γραφείων με μεγάλη συγκέντρωση εξοπλισμού (φορητοί υπολογιστές, smartphones και συσκευές IoT), το Wi-Fi 7 προσφέρει αποτελεσματικές λύσεις για την υποστήριξη του αυξημένου όγκου δεδομένων και τη διασφάλιση υψηλής ποιότητας υπηρεσιών (QoS) [2], [3], [7].

Η υποστήριξη της λειτουργίας Multi-Link Operation (MLO) και των ευρυζωνικών καναλιών 320 MHz επιτρέπει την καλύτερη εκμετάλλευση των διαθέσιμων πόρων και τη διαχείριση της κίνησης σε συνθήκες συμφόρησης. Έτσι, οι χρήστες σε μεγάλους οργανισμούς απολαμβάνουν υψηλές ταχύτητες και χαμηλή καθυστέρηση (latency), ακόμη και σε περιόδους αιχμής. Ειδικότερα, το MLO επιτρέπει σε μια συσκευή πολλαπλών ζεύξεων (non-AP Multi-Link Device – MLD) να διατηρεί ταυτόχρονες ζεύξεις σε διαφορετικές ζώνες συχνοτήτων με το ίδιο σημείο πρόσβασης (AP MLD), εξασφαλίζοντας απρόσκοπτη επικοινωνία και σταθερή ρυθμαπόδοση (throughput). Διευκρινίζεται ότι το MLO δεν αποτελεί μηχανισμό περιαγωγής (roaming) μεταξύ διαφορετικών σημείων πρόσβασης [32].

Παράλληλα, οι βελτιωμένες λειτουργίες QoS του Wi-Fi 7 επιτρέπουν την αποτελεσματική προτεραιοποίηση της κίνησης δεδομένων, διασφαλίζοντας ότι κρίσιμες εφαρμογές, όπως οι τηλεδιασκέψεις, η μεταφορά μεγάλων αρχείων και τα εργαλεία απομακρυσμένης εργασίας, λαμβάνουν τους απαιτούμενους πόρους για αδιάλειπτη λειτουργία χωρίς καθυστερήσεις [22], [38], [67].

4.4.2 Προηγμένα Βιομηχανικά και Επιχειρησιακά Δίκτυα (ΙΙoT)

Το Wi-Fi 7 είναι ιδανικό για χρήση σε βιομηχανικά περιβάλλοντα, όπως τα ευφυή εργοστάσια και τα δίκτυα Industrial IoT (IIoT), όπου απαιτείται η μετάδοση μεγάλου όγκου δεδομένων σε πραγματικό χρόνο με εξαιρετική αξιοπιστία και χαμηλή καθυστέρηση. Τα εργοστάσια και οι βιομηχανικές εγκαταστάσεις χαρακτηρίζονται από την παρουσία ενός τεράστιου αριθμού συσκευών που συνδέονται με το δίκτυο, όπως αισθητήρες, μηχανήματα, ρομποτικά συστήματα και άλλες έξυπνες συσκευές.

Με τη δυνατότητα υψηλών ταχυτήτων και ευρυζωνικών καναλιών 320 MHz, το Wi-Fi 7 μπορεί να υποστηρίξει τη συνεχή μετάδοση δεδομένων από αυτές τις συσκευές με μεγάλη ακρίβεια και αμεσότητα, εξασφαλίζοντας την παρακολούθηση και τη διαχείριση των βιομηχανικών διαδικασιών σε πραγματικό χρόνο. Η χρήση τεχνολογιών όπως το OFDMA και το MLO επιτρέπει την παράλληλη μετάδοση δεδομένων από πολλές συσκευές χωρίς να δημιουργούνται καθυστερήσεις ή συμφόρηση στο δίκτυο [19], [48].

Ακόμη, η υποστήριξη για χαμηλή καθυστέρηση είναι κρίσιμη για εφαρμογές όπως οι ρομποτικές διεργασίες, οι οποίες απαιτούν άμεση ανταπόκριση και συγχρονισμό μεταξύ των συσκευών. Η δυνατότητα των βιομηχανικών δικτύων να αξιοποιούν τα χαρακτηριστικά του Wi-Fi 7 θα επιτρέψει την ενσωμάτωση καινοτόμων εφαρμογών, όπως ο τηλεχειρισμός μηχανημάτων ή η προληπτική συντήρηση μέσω συνεχούς ροής δεδομένων από αισθητήρες.

4.4.3 Ευρυζωνικά Οικιακά Δίκτυα και Δίκτυα Διασκέδασης

Το Wi-Fi 7 δεν εξυπηρετεί μόνο επαγγελματικά και βιομηχανικά περιβάλλοντα, αλλά παρέχει και μια εξαιρετική λύση για τα οικιακά δίκτυα επόμενης γενιάς. Με την αυξανόμενη ζήτηση για υψηλής ποιότητας video streaming, online gaming, ενσωμάτωση IoT συσκευών και εφαρμογές τεχνητής νοημοσύνης στις κατοικίες, το Wi-Fi 7 προσφέρει σημαντικά πλεονεκτήματα [1], [73]:

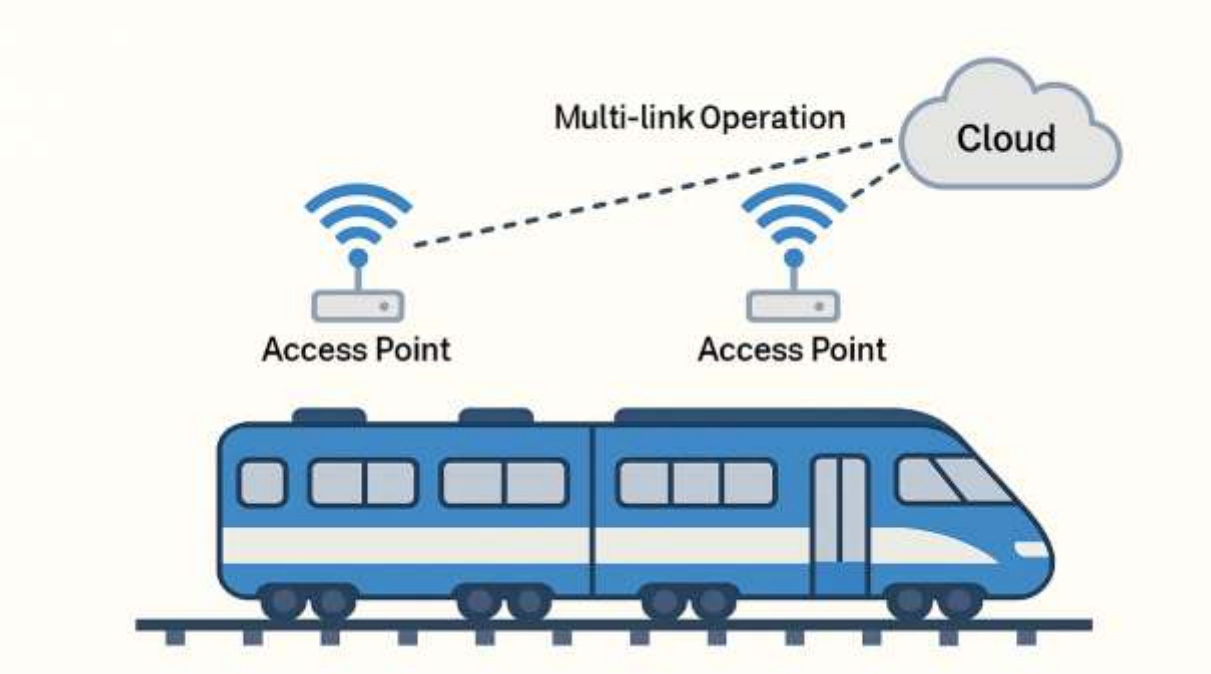
Η υποστήριξη για 4096-QAM και τα ευρυζωνικά κανάλια 320 MHz επιτρέπουν την μετάδοση δεδομένων υψηλής ταχύτητας και την εκτέλεση απαιτητικών εφαρμογών, όπως streaming σε 4K/8K ή gaming χωρίς καθυστερήσεις, ακόμα και σε πυκνά αστικά περιβάλλοντα.

Η καλύτερη διαχείριση των πόρων μέσω της τεχνολογίας OFDMA και της δυνατότητας MLO επιτρέπει την ταυτόχρονη εξυπηρέτηση πολλών συσκευών χωρίς να μειώνεται η απόδοση του δικτύου, κάτι ιδιαίτερα χρήσιμο για τα έξυπνα σπίτια, τα οποία διαθέτουν πολλές συνδεδεμένες συσκευές IoT.

Η προτεραιοποίηση υπηρεσιών και η δυνατότητα παροχής εγγυημένης ποιότητας για απαιτητικές εφαρμογές εξασφαλίζουν ότι υπηρεσίες όπως οι βιντεοκλήσεις, το online gaming και η παρακολούθηση πολυμέσων σε υψηλή ανάλυση θα λειτουργούν ομαλά και χωρίς διακοπές.

4.4.4 Κινητές Εφαρμογές και Δίκτυα Εν κινήσει

Η ικανότητα του Wi-Fi 7 να υποστηρίζει δίκτυα εν κινήσει, όπως τα δίκτυα για κινητά οχήματα (π.χ. αυτοκίνητα και τρένα), προσφέρει νέες δυνατότητες στη συνδεσιμότητα και την ασφάλεια. Η υποστήριξη για πολλαπλά κανάλια συχνότητας και αδιάλειπτη συνδεσιμότητα εξασφαλίζει ότι οι επιβάτες και οι χρήστες κινητών συσκευών μπορούν να απολαμβάνουν αδιάκοπες υπηρεσίες συνδεσιμότητας ακόμα και κατά τη διάρκεια των μετακινήσεών τους, χωρίς να υποστούν καθυστερήσεις ή διακοπές [4], [56], [67]. Ένα ενδεικτικό σενάριο τέτοιας λειτουργίας αποτυπώνεται στην Εικόνα 12.



Εικόνα 12 Ενδεικτική απεικόνιση λειτουργίας Wi-Fi 7 εν κινήσει

4.5 Παραδείγματα Εφαρμογών Wi-Fi 7 σε Πραγματικά Περιβάλλοντα

Η εφαρμογή του προτύπου Wi-Fi 7 (IEEE 802.11be) ξεπερνά το πλαίσιο των θεωρητικών δυνατοτήτων και αποκτά πρακτική σημασία σε πλήθος πεδίων, όπου απαιτείται υψηλό εύρος ζώνης και εξαιρετικά χαμηλή καθυστέρηση. Ένα χαρακτηριστικό παράδειγμα αποτελεί ο τομέας της επαυξημένης και εικονικής πραγματικότητας (AR/VR). Σε εφαρμογές όπως η εκπαίδευση μέσω εικονικών εργαστηρίων ή η απομακρυσμένη συντήρηση βιομηχανικών εγκαταστάσεων, η καθυστέρηση στη μετάδοση πρέπει να παραμένει κάτω από τα 5 ms ώστε η εμπειρία του χρήστη να είναι φυσική και χωρίς ασυγχρονίες. Το Wi-Fi 7, μέσω του Multi-Link Operation (MLO) και των καναλιών 320 MHz, επιτυγχάνει τη μεταφορά εικόνας και ήχου σε πραγματικό χρόνο, επιτρέποντας την αποδέσμευση των συσκευών από τα ενσύρματα δίκτυα και τη χρήση ελαφριών, φορητών headsets [72].

Σημαντικές προοπτικές εμφανίζονται και στον χώρο του cloud gaming και των καθηλωτικών εμπειριών ψυχαγωγίας. Οι υπηρεσίες cloud gaming (π.χ. NVIDIA GeForce Now, Xbox Cloud Gaming) αποτελούν χαρακτηριστική κατηγορία εφαρμογών που ωφελείται από τις δυνατότητες του Wi-Fi 7, καθώς οι απαιτήσεις τους για σταθερό εύρος ζώνης και χαμηλή, προβλέψιμη καθυστέρηση εξυπηρετούνται από τα κανάλια 320 MHz και το Multi-Link Operation [1], [72].

Στον τομέα του Internet of Things (IoT), το Wi-Fi 7 καθιστά εφικτή τη δημιουργία “έξυπνων” οικιακών και βιομηχανικών δικτύων με εκατοντάδες συνδεδεμένες συσκευές. Η τεχνολογία OFDMA και το Target Wake Time (TWT) μειώνουν σημαντικά την κατανάλωση ενέργειας, καθιστώντας βιώσιμη τη λειτουργία αισθητήρων και φορητών συσκευών για μεγάλα χρονικά διαστήματα χωρίς επαναφόρτιση. Στην πράξη, τέτοια δίκτυα μπορούν να υποστηρίξουν εφαρμογές όπως παρακολούθηση ενέργειας, έξυπνη στάθμευση, ή έλεγχο περιβαλλοντικών συνθηκών σε “πράσινα” κτήρια [73].

Στον τομέα της υγείας, τα νέα χαρακτηριστικά του Wi-Fi 7 καλύπτουν ανάγκες που τα παλαιότερα πρότυπα δυσκολεύονταν να καλύψουν. Η χαμηλή καθυστέρηση και η μεγαλύτερη αξιοπιστία μπορούν να βοηθήσουν πολύ σε εφαρμογές όπως η τηλεϊατρική, η παρακολούθηση ασθενών από απόσταση, οι συνδεδεμένες ιατρικές συσκευές και η μεταφορά ιατρικών εικόνων υψηλής ανάλυσης [72]. Σε πιο τεχνικό επίπεδο, μελέτες για το 802.11be δείχνουν ότι, αν ρυθμιστεί σωστά η πρόσβαση μέσω OFDMA, το δίκτυο μπορεί να διατηρεί την καθυστέρηση σε πολύ χαμηλά επίπεδα, ακόμη και υπό υψηλό φόρτο ή με πολύ μεγάλο αριθμό ταυτόχρονα συνδεδεμένων συσκευών [74]. Αυτό

είναι πολύ σημαντικό για νοσοκομεία και κλινικές, όπου μπορούν να βρίσκονται συνδεδεμένες δεκάδες ιατρικές συσκευές IoT.

5 *Πρότυπο IEEE 802.11bn (Wi-Fi 8 - Υπό Ανάπτυξη)*

Το πρότυπο IEEE 802.11bn, γνωστό και ως Wi-Fi 8, βρίσκεται επί του παρόντος σε φάση ανάπτυξης και έρευνας, με κύριο στόχο την υποστήριξη προηγμένων ασύρματων επικοινωνιών σε περιβάλλοντα υψηλής πυκνότητας και αυξημένων απαιτήσεων μετάδοσης δεδομένων. Η εξέλιξη του προτύπου βασίζεται στην ανάγκη για ακόμη μεγαλύτερες ταχύτητες, χαμηλότερη καθυστέρηση και αυξημένη ενεργειακή απόδοση, σε συνδυασμό με τη συμβατότητα με υπάρχουσες υποδομές [3], [12], [89].

Οι πρώτες ερευνητικές δημοσιεύσεις και τεχνικές συνεισφορές στο IEEE αναδεικνύουν χαρακτηριστικά όπως [3], [12], [61], [89]:

- Υποστήριξη φασματικού εύρους 2,4/5/6 GHz με έμφαση στην αξιοπιστία (κυρίως στην περιοχή των 6 GHz),
- Χρήση τεχνικών **MU-MIMO** και **beamforming** υψηλής ακρίβειας,
- Βελτιωμένη πολυπλεξία OFDMA και δυναμική διαχείριση πόρων,
- Δυνατότητες για εφαρμογές πολύ χαμηλής καθυστέρησης (ultra-low latency), όπως AR/VR και real-time industrial IoT.
- Συντονισμός Πολλαπλών Σημείων Πρόσβασης (Multi-AP Coordination – MAPC): Στοχεύει στην επίτευξη Υπερ-υψηλής Αξιοπιστίας (Ultra-High Reliability – UHR), με συγκεκριμένες ποσοτικές απαιτήσεις σε σχέση με το 802.11be: αύξηση της ρυθμαπόδοσης κατά 25%, μείωση της καθυστέρησης στο 95^{ο} εκατοστημόριο κατά 25% και μείωση κατά 25% των απωλειών πλαισίων (MPDU loss), ακόμη και σε σενάρια κινητικότητας και επικαλυπτόμενων BSS [3], [61].

Η ερευνητική δραστηριότητα γύρω από το Wi-Fi 8 εστιάζει σε τρεις βασικούς άξονες:

1. **Βελτίωση ενεργειακής απόδοσης**: Προτεινόμενοι μηχανισμοί, όπως το sleep scheduling και η περαιτέρω αξιοποίηση του wake-up radio (WUR), αποσκοπούν στη μείωση της κατανάλωσης ενέργειας, ειδικά για συσκευές IoT με περιορισμένες δυνατότητες. Η ανάγκη

για ενεργειακά αποδοτικές λύσεις είναι κρίσιμη, ιδιαίτερα για συσκευές IoT, wearables και mobile εφαρμογές. Οι βασικές ερευνητικές προσεγγίσεις περιλαμβάνουν:

a) Εξελιγμένα power-saving modes με μεγαλύτερη προσαρμοστικότητα στις ανάγκες κάθε συσκευής.
b) Wake-Up Radio (WUR): Μια δευτερεύουσα χαμηλής ισχύος ραδιοσυχνότητα που επιτρέπει στη συσκευή να "ξυπνά" μόνο όταν απαιτείται, μειώνοντας σημαντικά την κατανάλωση ενέργειας. Η έρευνα στο Wi-Fi 8 εστιάζει στην ενσωμάτωσή του με τους μηχανισμούς MLO και TWT.
c) AI-driven energy management: Έρευνες εστιάζουν στη χρήση αλγορίθμων μηχανικής μάθησης για προβλέψιμη κατανάλωση ενέργειας και βελτιστοποίηση προγραμμάτων λειτουργίας.

2. **Συνεργασία Wi-Fi με άλλα δίκτυα (π.χ. 5G/6G)**: Το Wi-Fi 8 αναμένεται να λειτουργεί συμπληρωματικά με τα δίκτυα κινητής τηλεφωνίας, αξιοποιώντας μηχανισμούς συνύπαρξης (coexistence mechanisms) και κοινής διαχείρισης φάσματος. Το Wi-Fi 8 σχεδιάζεται ώστε να λειτουργεί συμπληρωματικά με δίκτυα κινητής τηλεφωνίας, κυρίως 5G και μελλοντικά 6G:
   a) Συνεργατικά δίκτυα (heterogeneous networks): Διερευνάται η υλοποίηση ενοποιημένων συστημάτων όπου η συσκευή συνδέεται ταυτόχρονα σε Wi-Fi και 5G, αξιοποιώντας το καλύτερο δίκτυο σε κάθε στιγμή.
   b) Shared spectrum access: Χρήση τεχνικών για κοινή χρήση φάσματος (π.χ. μέσω CBRS – Citizens Broadband Radio Service ή LPI – Low Power Indoor) χωρίς παρεμβολές.
   c) Multi-link operation: Υποστήριξη ταυτόχρονης μετάδοσης σε πολλαπλές συχνότητες (π.χ. 5 GHz + 6 GHz), με ευφυή εναλλαγή.

3. **Χρήση AI/ML στην απόδοση του MAC layer**: Γίνονται πειράματα με τη χρήση τεχνητής νοημοσύνης για τη βελτιστοποίηση της διαχείρισης προσβάσεων, τον έλεγχο συμφόρησης, και την πρόβλεψη κινήσεων χρηστών (mobility prediction). Επιπλέον, εξετάζεται η ενσωμάτωση μηχανισμών ενισχυτικής μάθησης (reinforcement learning) για τη δυναμική προσαρμογή των παραμέτρων του MAC layer σε πραγματικό χρόνο, με στόχο τη βελτιστοποίηση της αποδοτικότητας του δικτύου υπό μεταβαλλόμενες συνθήκες φορτίου

και παρεμβολών. Παράλληλα, η χρήση AI επιτρέπει την πιο «έξυπνη» κατανομή πόρων μεταξύ χρηστών, μειώνοντας τις καθυστερήσεις και βελτιώνοντας την ποιότητα υπηρεσίας (QoS) σε εφαρμογές υψηλών απαιτήσεων.

Το Wi-Fi 8 αναμένεται να ενισχύσει σημαντικά εφαρμογές που απαιτούν:

- Χαμηλή και κυρίως προβλέψιμη καθυστέρηση, με στόχο μείωση κατά 25% στο 95ο εκατοστημόριο έναντι του Wi-Fi 7, για εφαρμογές όπως η **τηλεχειρουργική**, **ο βιομηχανικός αυτοματισμός και το gaming υψηλής απόκρισης**.
- Διατήρηση υψηλών ρυθμών μετάδοσης για **εικονική / επαυξημένη πραγματικότητα (AR/VR)** και **μεταδόσεις 8K βίντεο σε πραγματικό χρόνο**.
- Ακριβή εντοπισμό θέσης και ανίχνευση κίνησης μέσω Wi-Fi Sensing, με εφαρμογές σε **έξυπνα σπίτια**, **ασφάλεια** και **υγεία**.

Αν και το IEEE 802.11bn βρίσκεται ακόμα στα αρχικά στάδια διαμόρφωσης, η ερευνητική κοινότητα και οι βιομηχανικοί φορείς συνεργάζονται ενεργά στην κατεύθυνση της διαμόρφωσης ενός προτύπου που θα καλύπτει τις ανάγκες της επόμενης δεκαετίας, τόσο για οικιακές όσο και για επαγγελματικές χρήσεις.

Οι βασικοί μηχανισμοί που περιλαμβάνονται στο τρέχον σχέδιο του IEEE 802.11bn και υπηρετούν άμεσα τον στόχο της υπερ-υψηλής αξιοπιστίας είναι οι ακόλουθοι [3], [12], [61], [89]:

- Συντονισμός πολλαπλών σημείων πρόσβασης (Multi-AP Coordination – MAPC): συνεργατική λειτουργία γειτονικών σημείων πρόσβασης, με συντονισμένη χωρική επαναχρησιμοποίηση, διαμόρφωση δέσμης και κοινή μετάδοση, ώστε να περιορίζονται οι παρεμβολές και να βελτιώνεται η απόδοση όχι μόνο κατά μέσο όρο, αλλά και στις δυσμενέστερες περιπτώσεις.

- Απρόσκοπτη μετάβαση μεταξύ σημείων πρόσβασης (seamless / enhanced roaming): προετοιμασία της νέας ζεύξης πριν από την αποσύνδεση από την προηγούμενη, ώστε η αλλαγή σημείου πρόσβασης να γίνεται χωρίς αισθητή διακοπή — κρίσιμο για κινητές βιομηχανικές εφαρμογές και αυτόνομα καθοδηγούμενα οχήματα (AGV).

- Δυναμική λειτουργία υποζωνών (dynamic sub-band operation): προσαρμογή του ενεργού τμήματος του καναλιού ανά συσκευή σε πραγματικό χρόνο, ώστε σταθμοί που λειτουργούν

σε στενότερο εύρος ζώνης ή με χαμηλή κατανάλωση να συνυπάρχουν με μεταδόσεις μεγάλου εύρους ζώνης στο ίδιο κανάλι.

- Πρόσβαση σε μη πρωτεύον κανάλι (Non-Primary Channel Access – NPCA): δυνατότητα χρήσης δευτερεύοντος καναλιού όταν το πρωτεύον είναι κατειλημμένο από γειτονικό BSS, με αποτέλεσμα να μειώνεται ο χρόνος αναμονής σε πυκνά περιβάλλοντα.

Σημειώνεται ότι το 802.11bn δεν επιδιώκει αύξηση του μέγιστου ρυθμού μετάδοσης. Διατηρεί τις ζώνες 2,4 / 5 / 6 GHz, το μέγιστο εύρος καναλιού των 320 MHz και τη διαμόρφωση 4096-QAM του Wi-Fi 7, μετατοπίζοντας τον στόχο σχεδίασης από την ταχύτητα στην αξιοπιστία [3], [12].

5.1 Διασύνδεση με 6G, IoT και edge computing

Το μοντέλο των δικτύων 6G προσανατολίζεται στη μετάβαση από το παραδοσιακό cloud-centric παράδειγμα προς ένα αποκεντρωμένο, ευφυές οικοσύστημα “connected intelligence”, όπου η επεξεργασία, η εκπαίδευση και η λήψη αποφάσεων πραγματοποιούνται στην περιφέρεια του δικτύου (edge), κοντά στις ίδιες τις πηγές δεδομένων — όπως αισθητήρες, κινητές συσκευές και κόμβοι IoT [17]. Το πλαίσιο αυτό επιτυγχάνεται μέσω της ενσωμάτωσης τεχνητής νοημοσύνης στο άκρο (Edge AI), η οποία επιτρέπει την εκτέλεση πολύπλοκων αλγορίθμων μάθησης και πρόβλεψης απευθείας στους τοπικούς κόμβους. Με τον τρόπο αυτό, μειώνεται δραστικά η καθυστέρηση (latency), βελτιώνεται η αποδοτικότητα εύρους ζώνης και ενισχύεται η ιδιωτικότητα των δεδομένων, καθώς περιορίζεται η ανάγκη μεταφοράς τους προς τα κεντρικά υπολογιστικά νέφη. Επιπλέον, η δυνατότητα συνεργατικής μάθησης (Federated Learning) μεταξύ πολλαπλών edge κόμβων επιτρέπει τη συλλογική εκπαίδευση μοντέλων χωρίς αποκάλυψη ευαίσθητων πληροφοριών [17].

Οι εφαρμογές του Edge AI και του 6G επεκτείνονται σε βιομηχανικά, αστικά και οικιακά περιβάλλοντα, όπου η συνεχής ροή δεδομένων από αισθητήρες, οχήματα και συσκευές IoT απαιτεί επεξεργασία σε πραγματικό χρόνο και έξυπνη διαχείριση πόρων. Σύμφωνα με πρόσφατες έρευνες, η ενσωμάτωση τεχνητής νοημοσύνης στα συστήματα διαχείρισης πόρων των ετερογενών δικτύων 6G (AI-enabled Resource Management) συμβάλλει στη βελτιστοποίηση της υπολογιστικής κατανομής, της κατανάλωσης ενέργειας και της αξιοπιστίας μετάδοσης [19], [20]. Παράλληλα, η συνέργεια μεταξύ edge computing, caching και τοπικής ανάλυσης δεδομένων καθιστά δυνατή την επεξεργασία μεγάλου όγκου πληροφοριών κοντά στο σημείο παραγωγής τους, μειώνοντας τη συμφόρηση του δικτύου και διασφαλίζοντας υψηλότερη ποιότητα υπηρεσίας (QoS) και ποιότητα εμπειρίας χρήστη (QoE) [17], [18]. Έρευνες παρουσιάζουν ολοκληρωμένα frameworks (π.χ.

ARMO) που ενσωματώνουν deep learning και reinforcement learning για τη διαχείριση offloading και κατανομής πόρων, ισορροπώντας ανάμεσα στη χαμηλή καθυστέρηση και την εξοικονόμηση ενέργειας σε 6G-IoT περιβάλλοντα με edge nodes [21].

Ωστόσο, για την πλήρη αξιοποίηση των πλεονεκτημάτων αυτών, ιδιαίτερα σε δίκτυα υψηλής κινητικότητας, απαιτείται βελτιωμένη αντιμετώπιση φαινομένων όπως το Doppler Effect, το οποίο επηρεάζει τη συχνότητα των λαμβανόμενων σημάτων και, κατά συνέπεια, την ακρίβεια συγχρονισμού και αποκωδικοποίησης. Μελέτες στο πλαίσιο του IEEE 802.11ax έχουν δείξει ότι η μεταβολή της συχνότητας λόγω κινητικότητας μπορεί να προκαλέσει υποβάθμιση της φασματικής αποδοτικότητας και απώλειες πακέτων, ειδικά σε υψηλές ταχύτητες ή σε περιβάλλοντα με έντονες ανακλάσεις [19]. Τα ευρήματα αυτά έχουν άμεση εφαρμογή στα μελλοντικά δίκτυα 6G και Wi-Fi 8, όπου η ανάγκη για ακριβή χρονισμό, δυναμική αντιστάθμιση Doppler και προσαρμοστικά σχήματα διαμόρφωσης είναι κρίσιμη για τη διατήρηση της σταθερότητας και της αξιοπιστίας σύνδεσης σε πραγματικό χρόνο.

Για την αντιμετώπιση των παραπάνω ζητημάτων, χρησιμοποιούνται αλγόριθμοι μηχανικής μάθησης και ενισχυτικής μάθησης (reinforcement learning) που εκπαιδεύονται να λαμβάνουν αποφάσεις σε πραγματικό χρόνο για το πού θα μεταφερθεί κάθε υπολογιστικό φορτίο (offloading), ανάλογα με [21], [22], [23]:

- την κατάσταση του δικτύου (π.χ. διαθέσιμο εύρος ζώνης),
- τον φόρτο των edge servers,
- το είδος και την προτεραιότητα των δεδομένων,
- την υπολειπόμενη ενέργεια της συσκευής.

Ένα τέτοιο παράδειγμα είναι το ARMO framework, το οποίο εφαρμόζει deep reinforcement learning για τη βέλτιστη κατανομή των υπολογιστικών εργασιών, με στόχο την ελαχιστοποίηση της καθυστέρησης και τη μεγιστοποίηση της αποδοτικότητας σε επίπεδο ενέργειας [22].

Συγκεκριμένες τεχνικές που εφαρμόζονται [21], [22], [23]:

- Dynamic Task Offloading: Το σύστημα αποφασίζει δυναμικά αν η κάθε εργασία θα υποβληθεί σε επεξεργασία στο IoT node, στο edge ή στο cloud.
- Energy-aware Scheduling: Προβλέπεται η κατανάλωση ενέργειας για κάθε επιλογή και επιλέγεται εκείνη που μειώνει τη συνολική χρήση ενέργειας χωρίς να υπονομεύει τον χρόνο απόκρισης.
- QoS-constrained Optimization: Επιτυγχάνεται ποιότητα υπηρεσίας (QoS) μέσω constraints που εγγυώνται ότι οι πιο κρίσιμες εργασίες θα εκτελούνται με προτεραιότητα.

Πραγματικές εφαρμογές [21], [22], [23]:

- Έξυπνα εργοστάσια: Μηχανήματα που λειτουργούν σε πραγματικό χρόνο πρέπει να λαμβάνουν δεδομένα αμέσως, αλλά και να διατηρούν ενεργειακή αυτονομία.
- IoT σε απομακρυσμένες περιοχές: Σε αγροτικά ή ιατρικά σενάρια, η ανάγκη για γρήγορη αντίδραση (π.χ. συναγερμοί) πρέπει να συμβαδίζει με χαμηλή κατανάλωση ενέργειας.
- Δίκτυα οχημάτων (V2X): Το 6G αναμένεται να υποστηρίξει εφαρμογές αυτόνομης οδήγησης, όπου κάθε χιλιοστό του δευτερολέπτου και κάθε milliwatt ενέργειας είναι κρίσιμα.

5.2 Ενεργειακή αποδοτικότητα και περιβαλλοντικές προσεγγίσεις

Η μετάβαση προς τα δίκτυα 6G, σε συνδυασμό με IoT και edge computing, συνοδεύεται από την ανάγκη για συστήματα που είναι ενεργειακά αποδοτικά **και** περιβαλλοντικά βιώσιμα. Ο σχεδιασμός πρέπει να λαμβάνει υπόψη όχι μόνο την κατανάλωση ενέργειας κατά τη λειτουργία, αλλά και τον αντίκτυπο σε επίπεδο υλικών, απόρριψης συσκευών και περιβαλλοντικών πόρων. Οι σύγχρονες μελέτες δείχνουν ότι ο σχεδιασμός ενός ενεργειακά συνειδητού δικτύου (energy-aware 6G) περιλαμβάνει [24], [27], [28], [29]:

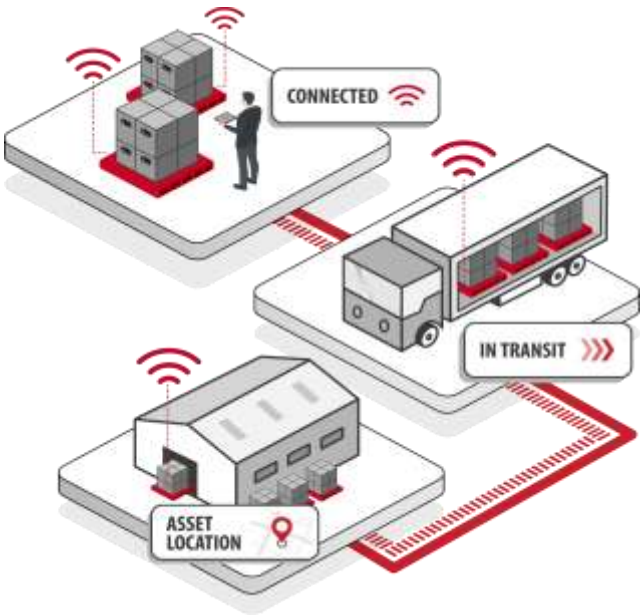
- Σχεδιασμό πράσινων σταθμών βάσης (green base stations) **και** δικτύων ραδιοπρόσβασης (RAN) με χρήση ανανεώσιμων πηγών ενέργειας**,** έξυπνης διαχείρισης ισχύος**, και** χαμηλού ενεργειακού footprint**.**
- Πρωτόκολλα προσαρμογής ισχύος, όπου συστατικά του δικτύου ενεργοποιούνται/απενεργοποιούνται δυναμικά ανάλογα με τη ζήτηση (adaptive modulation, sleep modes, link-rate control).
- Βελτιστοποίηση τοπολογίας και χωροθέτησης κόμβων (relay nodes, μικρο-κυψελίδες) ώστε να ελαχιστοποιείται κατανάλωση ενέργειας και παρεμβολές.

5.3 Ερευνητικές κατευθύνσεις και πιθανές εφαρμογές του Wi-Fi 8

Το Wi-Fi 8 (IEEE 802.11bn) βρίσκεται ακόμη υπό τυποποίηση, ωστόσο οι πρώτες ερευνητικές προτάσεις και πειραματικές αξιολογήσεις αναδεικνύουν το εύρος των δυνατοτήτων του. Η νέα γενιά προτύπων συνδέεται στενά με το οικοσύστημα του Industry 4.0, της τεχνητής νοημοσύνης στα δίκτυα και των επικοινωνιών εξαιρετικά χαμηλής καθυστέρησης. Ένα χαρακτηριστικό παράδειγμα είναι η βιομηχανική αυτοματοποίηση. Ερευνητικές εργασίες σχετικά με το IEEE 802.11bn εξετάζουν τη χρήση τεχνικών όπως ο συντονισμός πολλαπλών σημείων πρόσβασης και

η βελτιστοποίηση της διαχείρισης πόρων, με στόχο τη βελτίωση της αξιοπιστίας και τη μείωση της καθυστέρησης σε απαιτητικά βιομηχανικά περιβάλλοντα [3], [12], [16], [38].

Παράλληλα, το Wi-Fi 8 αναμένεται να μπορεί να υποστηρίξει εφαρμογές σε περιβάλλοντα έξυπνων πόλεων, όπου η υψηλή αξιοπιστία και η χαμηλή καθυστέρηση είναι ιδιαίτερα σημαντικές. Η ενσωμάτωση τεχνικών τεχνητής νοημοσύνης για τη βελτιστοποίηση της κατανομής πόρων και του φορτίου των σημείων πρόσβασης αποτελεί αναδυόμενη ερευνητική κατεύθυνση και θα μπορούσε να συμβάλει στη δυναμική διαχείριση της κίνησης δεδομένων σε πραγματικό χρόνο, για παράδειγμα σε εφαρμογές αυτόνομων οχημάτων ή κρίσιμων αισθητήρων ασφαλείας [89]. Ανάλογο ενδιαφέρον παρουσιάζει η έξυπνη εφοδιαστική (Smart Logistics), όπου η ταυτόχρονη και αξιόπιστη σύνδεση μεγάλου αριθμού αυτόνομων οχημάτων (AGVs) σε αποθήκες απαιτεί σταθερή καθυστέρηση και ανθεκτικότητα στις παρεμβολές — απαιτήσεις που το 802.11bn στοχεύει να καλύψει [12], [89]. Ένα τέτοιο περιβάλλον αποτυπώνεται ενδεικτικά στην Εικόνα 13.



Εικόνα 13 Smart Logistics [95]

Τέλος, οι δυνατότητες ενοποίησης Wi-Fi 8 και 6G διαμορφώνουν ένα νέο πλαίσιο για δίκτυα υπερυψηλής αξιοπιστίας. Η συνεργασία αυτών των τεχνολογιών μπορεί να οδηγήσει στη δημιουργία κοινών ασύρματων υποδομών, όπου οι συσκευές μεταβαίνουν απρόσκοπτα μεταξύ Wi-Fi και κυψελωτών συνδέσεων, ανάλογα με τη ζήτηση και το φορτίο [3], [12], [16], [38].

5.4 Αναδυόμενες ερευνητικές κατευθύνσεις: χρονοδρομολόγηση με χρήση τεχνητής νοημοσύνης και υψηλότερες ζώνες συχνοτήτων

Πέρα από τα χαρακτηριστικά που περιλαμβάνονται στο ίδιο το σχέδιο του IEEE 802.11bn, η ερευνητική κοινότητα εξετάζει και κατευθύνσεις που δεν αποτελούν μέρος του προτύπου, όπως η υποβοηθούμενη από τεχνητή νοημοσύνη χρονοδρομολόγηση (AI-assisted scheduling) και η αξιοποίηση υψηλότερων ζωνών συχνοτήτων (mmWave, low-THz). Οι κατευθύνσεις αυτές παρουσιάζονται εδώ ως ερευνητικές προοπτικές.

5.4.1 Χρονοδρομολόγηση με χρήση τεχνητής νοημοσύνης (AI-assisted scheduling)

Η τεχνητή νοημοσύνη (AI) είναι ένας από τους βασικούς τομείς εξέλιξης για το Wi-Fi 8, καθώς προσφέρει νέες δυνατότητες στον τρόπο με τον οποίο τα δίκτυα μπορούν να διαχειρίζονται τα δεδομένα και τις συνδέσεις. Η "AI-assisted scheduling" χρησιμοποιεί αλγορίθμους μηχανικής μάθησης για να προβλέψει τις ανάγκες του δικτύου και να βελτιώσει την κατανομή των πόρων (όπως το εύρος ζώνης, η χωρητικότητα, και η ισχύς σήματος) σε πραγματικό χρόνο. Αυτό όχι μόνο εξασφαλίζει καλύτερη απόδοση αλλά μειώνει και την κατανάλωση ενέργειας και τις καθυστερήσεις. Με την ανάπτυξη αυτής της τεχνολογίας, το Wi-Fi 8 μπορεί να προσαρμόζεται αυτόματα στις συνθήκες του περιβάλλοντος, διαχειριζόμενο δυναμικά τις επερχόμενες συνδέσεις, τις επιθέσεις και τις παρεμβολές, ακόμα και όταν οι χρήστες και οι συσκευές είναι κινητές [8], [16]. Τα βασικά στοιχεία του Wi-Fi 8 συνοψίζονται στην Εικόνα 14.

Εικόνα 14 Βασικά στοιχεία του Wi-Fi 8 [93]

Πρόκειται για τη διαδικασία κατά την οποία η τεχνητή νοημοσύνη προβλέπει, αναλύει και βελτιστοποιεί τη συμπεριφορά του δικτύου σε πραγματικό χρόνο. Σε αντίθεση με τα παραδοσιακά μοντέλα προγραμματισμού που ακολουθούν προκαθορισμένους κανόνες ή στατικά πρότυπα πρόσβασης, η AI προσαρμόζεται συνεχώς με βάση [8], [14], [16]:

- Την κίνηση των χρηστών (mobility patterns)
- Το είδος της κίνησης (π.χ. video, gaming, IoT)
- Τον αριθμό και το είδος των συσκευών
- Το ιστορικό χρήσης του καναλιού
- Τις παρεμβολές από άλλα δίκτυα ή συσκευές

Με βάση τα παραπάνω δεδομένα, οι αλγόριθμοι AI αποφασίζουν ποια συσκευή θα μεταδώσει, πότε, και μέσω ποιου καναλιού, με στόχο τη βελτιστοποίηση της απόδοσης και την ελαχιστοποίηση των καθυστερήσεων. Τα πλεονεκτήματα της τεχνολογίας αυτής είναι [8], [14], [16]:

- **Προσαρμοστικότητα σε πραγματικό χρόνο**

  Τα δίκτυα μπορούν να αντιδρούν ακαριαία σε αλλαγές του περιβάλλοντος ή της ζήτησης, όπως η μετακίνηση πολλών χρηστών σε έναν χώρο (π.χ. αίθουσες συνεδρίων ή στάδια).

- **Βελτιωμένη αξιοποίηση του φάσματος**

  Η AI μπορεί να προβλέπει πότε και πού υπάρχει χαμηλή χρήση φάσματος και να ανακατανέμει τους πόρους εκεί όπου υπάρχει ανάγκη, αποφεύγοντας έτσι φαινόμενα συμφόρησης.

- **Μείωση παρεμβολών και αποτυχιών σύνδεσης**

  Με την ευφυή διαχείριση του φάσματος, μειώνεται η πιθανότητα παρεμβολών μεταξύ συσκευών και αυξάνεται η αξιοπιστία της σύνδεσης.

- **Ενεργειακή αποδοτικότητα**

  Η AI μπορεί να μειώσει τη χρήση ενέργειας των συσκευών Wi-Fi, καθώς υπολογίζει πότε και πόση ισχύ απαιτείται για μετάδοση, μειώνοντας έτσι την κατανάλωση σε επίπεδο hardware.

Χαρακτηριστική περίπτωση χρήσης της τεχνολογίας αυτής είναι το έξυπνο σπίτι, όπου η τεχνητή νοημοσύνη μπορεί να προγραμματίσει την προτεραιότητα σύνδεσης μεταξύ ενός βίντεο που γίνεται streaming και μιας συσκευής IoT που στέλνει αισθητήριες μετρήσεις. Ακόμη, σε ένα πυκνό περιβάλλον γραφείων, το σύστημα μπορεί να αναγνωρίζει πότε μια αίθουσα είναι γεμάτη και να

ανακατευθύνει τη διαχείριση των καναλιών για να προσφέρει σταθερή ποιότητα υπηρεσίας [8], [14], [16].

Παρότι υπόσχεται μεγάλες βελτιώσεις, η τεχνολογία αυτή έρχεται με σημαντικές τεχνικές και ηθικές προκλήσεις, όπως η υπολογιστική πολυπλοκότητα, καθώς η εφαρμογή αλγορίθμων AI σε πραγματικό χρόνο απαιτεί ισχυρό υλικό (hardware) και αποδοτικούς αλγορίθμους. Απαιτούνται επίσης ασφάλεια και διαφάνεια, αφού οι αποφάσεις που λαμβάνει ένα σύστημα AI πρέπει να είναι ελέγξιμες και ασφαλείς έναντι κακόβουλων επιθέσεων ή λανθασμένων προβλέψεων. Ακόμη, πρέπει να υποστηρίζεται διαλειτουργικότητα, δεδομένου ότι χρειάζεται να υπάρξουν διεθνή πρότυπα για την ενσωμάτωση αυτών των τεχνολογιών σε διαφορετικά προϊόντα και κατασκευαστές [8], [14], [16].

5.4.2 Υψηλότερες Ζώνες Συχνοτήτων

Το IEEE 802.11bn ορίζει τη λειτουργία στις ζώνες 2,4 GHz, 5 GHz και 6 GHz. Παράλληλα όμως, η ερευνητική κοινότητα εξετάζει τη συμπεριφορά υψηλότερων ζωνών όπως mmWave (60 GHz) και low-THz, σε σενάρια που σχετίζονται με τους στόχους υπερ-υψηλής αξιοπιστίας του Wi-Fi 8. Πρόσφατες μετρήσεις διάδοσης σε βιομηχανικά περιβάλλοντα συγκρίνουν τα 6 GHz, τα 60 GHz και το φάσμα low-THz ως προς την καταλληλότητά τους για εφαρμογές UHR σε μελλοντικά εργοστάσια [18].

Οι ζώνες αυτές προσφέρουν πολύ μεγαλύτερο διαθέσιμο εύρος ζώνης, αλλά συνοδεύονται από σημαντική εξασθένηση, ιδίως λόγω απορρόφησης από τα υλικά αλλά και από την ατμόσφαιρα, καθώς και από την ανάγκη χρήσης κατευθυντικών κεραιών και ακριβούς διαμόρφωσης της δέσμης εκπομπής (beamforming). Για το λόγο αυτό, δεν αποτελούν μέρος του τρέχοντος προτύπου, αλλά ενδέχεται να επηρεάσουν μελλοντικές γενιές του Wi-Fi και τη σύγκλισή του με τα δίκτυα 6G [16], [18].

6 *Συγκριτική Ανάλυση Προτύπων IEEE 802.11ax, 802.11be και 802.11bn*

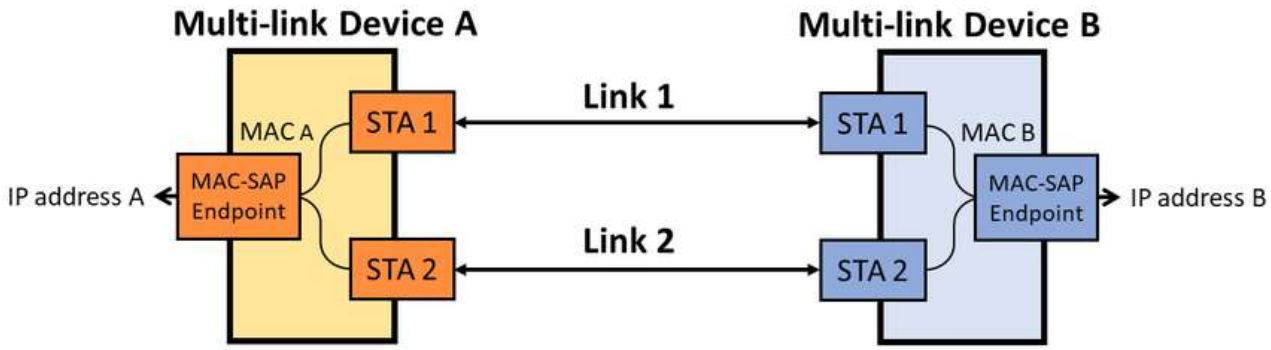
6.1 Σύγκριση βασικών τεχνικών χαρακτηριστικών

Η εξέλιξη από το Πρότυπο IEEE 802.11ax (Wi-Fi 6) προς το IEEE 802.11be (Wi-Fi 7) και τελικά προς το 802.11bn (Wi-Fi 8) φέρνει σημαντικές τεχνολογικές βελτιώσεις ως προς την απόδοση, τη χωρητικότητα, τη διαχείριση φάσματος και την αξιοπιστία σύνδεσης. Με την εξέλιξη των ασύρματων τεχνολογιών, τα πρότυπα Wi-Fi αναβαθμίζονται διαρκώς ώστε να ανταποκρίνονται στις αυξανόμενες απαιτήσεις σε εύρος ζώνης, αξιοπιστία, πυκνότητα συσκευών και καθυστέρηση (latency). Οι προδιαγραφές IEEE 802.11ax (Wi-Fi 6/6E), 802.11be (Wi-Fi 7) και η επερχόμενη 802.11bn (Wi-Fi 8) ενσωματώνουν νέες τεχνικές βελτιώσεις σε πολλά επίπεδα. Η συγκριτική ανάλυση των βασικών τεχνικών χαρακτηριστικών μεταξύ των τριών προτύπων επικεντρώνεται σε κρίσιμες παραμέτρους όπως το φάσμα συχνοτήτων, η διαμόρφωση, το εύρος καναλιών, οι τεχνικές πολλαπλής πρόσβασης και η απόδοση υπό συνθήκες υψηλού φόρτου [1], [3], [12], [16], [35], [38].

6.1.1 Συχνότητες & Κανάλια

Ένα από τα πλέον καθοριστικά χαρακτηριστικά κάθε προτύπου Wi-Fi είναι το φάσμα συχνοτήτων και το εύρος των διαθέσιμων καναλιών, καθώς αυτά επηρεάζουν άμεσα τη χωρητικότητα, την παρεμβολή, και το ρυθμό μετάδοσης. Το Wi-Fi 6 (IEEE 802.11ax) λειτουργεί σε dual-band (2,4 και 5 GHz), ενώ με το Wi-Fi 6E προστίθεται η νέα ζώνη των 6 GHz, ανοίγοντας χώρο για περισσότερα κανάλια και μειωμένη παρεμβολή. Το μέγιστο εύρος καναλιού φτάνει τα 160 MHz, αλλά στην πράξη χρησιμοποιούνται συχνότερα τα 80 MHz λόγω περιορισμών [1], [35].

Επιπλέον, το πρωτόκολλο 802.11be (Wi-Fi 7) εισάγει tri-band λειτουργία με ταυτόχρονη χρήση των 2,4 GHz, 5 GHz και 6 GHz. Το εύρος καναλιών αυξάνεται στα 320 MHz, επιτρέποντας σημαντικά υψηλότερες ταχύτητες. Το νέο χαρακτηριστικό Multi-Link Operation (MLO) επιτρέπει την ταυτόχρονη χρήση διαφορετικών καναλιών από μία σύνδεση για μέγιστη ρυθμαπόδοση (throughput) και ελάχιστη καθυστέρηση (latency) [1], [35]. Η αρχή λειτουργίας του MLO αποτυπώνεται σχηματικά στην Εικόνα 15.



Εικόνα 15 Multi-Link Operation [94]

Το 802.11bn (Wi-Fi 8) διατηρεί το ίδιο φάσμα συχνοτήτων με το Wi-Fi 7, αλλά βελτιστοποιεί τη χρήση του με προηγμένες τεχνικές όπως dynamic sub-channel operation, coordinated channel reuse και beamformed channel access, ενισχύοντας τη σταθερότητα της μετάδοσης και τη χρήση φάσματος σε πυκνά περιβάλλοντα [1], [3], [35]. Ο Πίνακας 3 συνοψίζει τη σύγκριση των τριών προτύπων ως προς τις συχνότητες και τα κανάλια.

Πίνακας 3 Σύγκριση βασικών τεχνικών χαρακτηριστικών ως προς συχνότητες και κανάλια

Πρότυπο	Ζώνες Συχνοτήτων	Μέγιστο Εύρος Καναλιού	Κανάλια
802.11ax	2,4 GHz, 5 GHz, 6 GHz (Wi-Fi 6E)	160 MHz	20/40/80/160 MHz
802.11be	2,4 GHz, 5 GHz, 6 GHz (Tri-band)	320 MHz	20/40/80/160/320 MHz
802.11bn	2,4 GHz, 5 GHz, 6 GHz (βελτιστοποιημένο)	320 MHz (με dynamic sub-channel support)	Προσαρμοστικά κανάλια με beam coordination

6.1.2 Διαμόρφωση & QAM

Η τεχνική της διαμόρφωσης, και συγκεκριμένα η τετραγωνική διαμόρφωση εύρους (QAM – Quadrature Amplitude Modulation), αποτελεί καθοριστικό παράγοντα για την αποδοτικότητα και την ταχύτητα των ασύρματων επικοινωνιών. Κάθε νέα γενιά Wi-Fi εισάγει βελτιωμένα σχήματα QAM, τα οποία επιτρέπουν τη μετάδοση περισσότερων bit ανά σύμβολο — αυξάνοντας έτσι τη ρυθμαπόδοση, ειδικά σε συνθήκες υψηλής ποιότητας σήματος. Η σύγκριση μεταξύ των προτύπων 802.11ax (Wi-Fi 6), 802.11be (Wi-Fi 7) και 802.11bn (Wi-Fi 8) αποκαλύπτει μια εξέλιξη στις τεχνικές διαμόρφωσης με στόχο τη μεγιστοποίηση της απόδοσης χωρίς να θυσιάζεται η σταθερότητα ή η αξιοπιστία του δικτύου [3], [35].

Το Wi-Fi 6 εισήγαγε τη διαμόρφωση 1024-QAM, που αντιστοιχεί σε 10 bit ανά σύμβολο, έναντι των 8 bit (256-QAM) του Wi-Fi 5. Η αναβάθμιση αυτή επιτρέπει έως περίπου 25% υψηλότερο

ρυθμό μετάδοσης ανά σύμβολο, βελτιώνοντας την απόδοση σε περιβάλλοντα με χαμηλό θόρυβο και καλή ποιότητα σήματος. Πρόκειται για ένα σημαντικό βήμα που καθιστά το Wi-Fi 6 κατάλληλο για εφαρμογές streaming, gaming και επιχειρησιακή χρήση [1], [35].

Αντίθετα, το πρότυπο 802.11be (Wi-Fi 7) κάνει ένα άλμα στην απόδοση με την ενσωμάτωση της διαμόρφωσης 4096-QAM, η οποία αντιστοιχεί σε 12 bits ανά σύμβολο. Αυτή η αύξηση της πυκνότητας διαμόρφωσης επιτρέπει θεωρητικά 20% περισσότερα bits ανά σύμβολο (12 έναντι 10), και άρα αντίστοιχη αύξηση ρυθμού για ίδιο ρυθμό κωδικοποίησης και ίδιο εύρος καναλιού σε σχέση με το Wi-Fi 6, ειδικά όταν χρησιμοποιείται σε συνδυασμό με ευρέα κανάλια (320 MHz) και προηγμένες τεχνικές MIMO [1], [3].

Το Wi-Fi 8 (802.11bn), σε επίπεδο διαμόρφωσης, διατηρεί τη 4096-QAM του Wi-Fi 7, αλλά δίνει έμφαση στη βελτιστοποίηση της αξιοπιστίας και της ποιότητας σύνδεσης, ειδικά σε δυσμενείς συνθήκες. Μέσω της έξυπνης διαχείρισης της διαμόρφωσης ανάλογα με το κανάλι και τον θόρυβο, μειώνονται σημαντικά οι απώλειες πακέτων, ενώ η σταθερότητα παραμένει υψηλή ακόμη και σε περιβάλλοντα με παρεμβολές [1], [3].

Η σύγκριση μεταξύ των προτύπων Wi-Fi 6, Wi-Fi 7 και Wi-Fi 8 είναι καθοριστικής σημασίας, καθώς επιτρέπει την αποτύπωση της τεχνολογικής εξέλιξης των ασύρματων δικτύων όχι μόνο σε επίπεδο ταχύτητας, αλλά και σε ζητήματα όπως η καθυστέρηση, η ενεργειακή αποδοτικότητα και η προσαρμοστικότητα σε νέες εφαρμογές. Οι επόμενοι πίνακες συνοψίζουν τα πιο ουσιαστικά σημεία διαφοροποίησης ανάμεσα στις τρεις γενιές του προτύπου IEEE 802.11 και βοηθούν στην κατανόηση των πρακτικών συνεπειών κάθε αναβάθμισης [1], [3]. Ο Πίνακας 4 παρουσιάζει τα βασικά τεχνικά χαρακτηριστικά των τριών εκδόσεων. Παρατηρείται ότι η αύξηση της θεωρητικής ταχύτητας μετάδοσης δεν είναι η μόνη πρόοδος· εξίσου σημαντικές είναι οι βελτιώσεις στην καθυστέρηση, τη φασματική απόδοση και τον αριθμό των χωρικών ροών (spatial streams). Το Wi-Fi 7 διπλασιάζει σχεδόν το εύρος καναλιού του Wi-Fi 6 και εισάγει πιο πυκνή διαμόρφωση (4096-QAM), γεγονός που οδηγεί σε θεαματική αύξηση της ρυθμαπόδοσης, ενώ το υπό ανάπτυξη Wi-Fi 8 διατηρεί το ίδιο φάσμα (2,4/5/6 GHz), το ίδιο μέγιστο εύρος καναλιού (320 MHz) και τον ίδιο μέγιστο ρυθμό μετάδοσης με το Wi-Fi 7, εστιάζοντας, αντιθέτως, στον συντονισμό πολλαπλών σημείων πρόσβασης (MAPC) και στην υπερ-υψηλή αξιοπιστία. Η σταδιακή μετάβαση από στατικές προς προσαρμοστικές αρχιτεκτονικές φαίνεται να είναι η πιο ουσιαστική εξέλιξη [1], [3].

Πίνακας 4 Συγκριτική αποτύπωση κύριων τεχνικών χαρακτηριστικών

Χαρακτηριστικό	Wi-Fi 6 (802.11ax)	Wi-Fi 7 (802.11be)	Wi-Fi 8 (802.11bn, υπό ανάπτυξη)
Έτος Τυποποίησης	2019 – 2021	2024 – 2025	~2028 (αναμενόμενο)
Μέγιστο Εύρος Καναλιού	160 MHz	320 MHz	320 MHz (ίδιο με Wi-Fi 7)
Διαμόρφωση	1024-QAM	4096-QAM	4096-QAM (ίδιο με Wi-Fi 7)
Χωρικά Ρεύματα (Spatial Streams)	έως 8	έως 8 (τελικό πρότυπο· 16 στα αρχικά σχέδια)	έως 8 (υπό διαμόρφωση)
OFDMA / MU-MIMO	Ναι / Ναι	Βελτιωμένο / Multi-Link OFDMA	Βελτιωμένο OFDMA και συντονισμός πολλαπλών AP (MAPC)
Θεωρητική Μέγιστη Ταχύτητα	~9,6 Gbit/s	~23 Gbit/s (46 Gbit/s στα αρχικά σχέδια με 16 χωρικές ροές)	~23 Gbit/s (χωρίς αύξηση έναντι Wi-Fi 7)
Καθυστέρηση (Latency)	Χαμηλή	Πολύ χαμηλή (στοχεύει σε εφαρμογές που απαιτούν < 5 ms [1])	25% μικρότερη καθυστέρηση έναντι Wi-Fi 7
Φάσμα Λειτουργίας	2,4 / 5 / 6 GHz	2,4 / 5 / 6 GHz	2,4 / 5 / 6 GHz (ίδιο με Wi-Fi 7)
QoS / QoE	Βασική υποστήριξη	Ενισχυμένη (UL/DL συντονισμός)	Ενισχυμένη (MAPC, δυναμική λειτουργία υποζωνών)
Ενεργειακή Αποδοτικότητα	Μεσαία – TWT μηχανισμός	Βελτιωμένη με TWT και MLO	Υψηλή (βελτιωμένοι μηχανισμοί εξοικονόμησης ενέργειας)

Ο Πίνακας 5 εστιάζει στην πρακτική απόδοση των προτύπων σε διαφορετικές κατηγορίες εφαρμογών. Από τη σύγκριση προκύπτει ότι το Wi-Fi 6 παραμένει ιδιαίτερα αποτελεσματικό σε περιβάλλοντα IoT και οικιακές εγκαταστάσεις, όμως το Wi-Fi 7 υπερέχει σε εφαρμογές υψηλής ταχύτητας και χαμηλής καθυστέρησης, όπως η εικονική πραγματικότητα ή το cloud gaming. Το Wi-Fi 8 αναδεικνύεται ως υποδομή επόμενης γενιάς, ικανή να υποστηρίξει κρίσιμες εφαρμογές με εξαιρετικά χαμηλές καθυστερήσεις και πλήρη ενσωμάτωση με τεχνολογίες edge computing. Η εξέλιξη δείχνει σαφώς τη μετατόπιση του Wi-Fi από μια τεχνολογία «άνεσης» σε τεχνολογία «κρίσιμης αξιοπιστίας».

Πίνακας 5 Απόδοση και καταλληλότητα ανά εφαρμογή

Πεδίο Χρήσης	Wi-Fi 6	Wi-Fi 7	Wi-Fi 8
Streaming & Ψυχαγωγία	Επαρκές έως 4K	Ιδανικό έως 8K / AR-VR	Υποστήριξη XR / ολιστικών εμπειριών
Βιομηχανικές Εφαρμογές	Περιορισμένη σταθερότητα	Καλή, με χαμηλή καθυστέρηση	Εξαιρετική / Ultra-Reliable
IoT & Smart Homes	Πολύ καλή υποστήριξη μέσω TWT	Ενισχυμένη για μαζικά δίκτυα	Πλήρως ενσωματωμένη με AI συσκευές
Τηλεϊατρική & Κρίσιμες Επικοινωνίες	Οριακή καθυστέρηση	Πολύ καλή (< 5 ms)	Βέλτιστη (< 1 ms / 6G συνεργασία)
Cloud Gaming / Edge Services	Μέτρια σταθερότητα	Πολύ υψηλή ρυθμαπόδοση	Προσαρμοστικό AI offloading
Ενεργειακή Αποδοτικότητα σε IoT	Καλή (με TWT)	Καλύτερη (Adaptive sleep cycles)	Βέλτιστη (ενεργειακή αυτονομία AI βασισμένη)

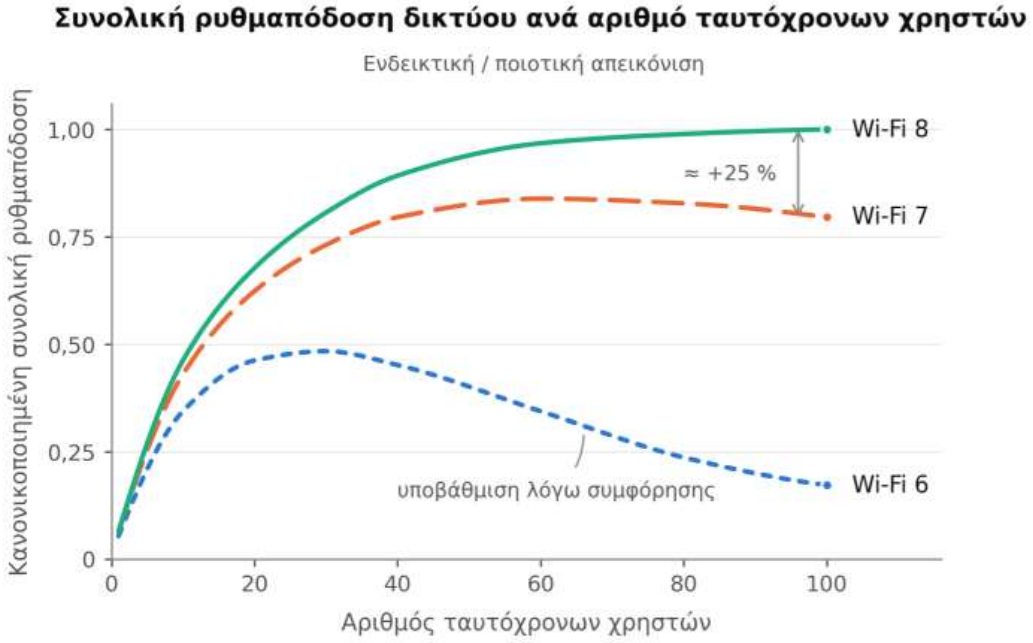
Τέλος, ο Πίνακας 6 συγκεντρώνει μια κριτική αποτίμηση των πλεονεκτημάτων και αδυναμιών κάθε προτύπου. Παρά τις επιδόσεις του, το Wi-Fi 7 εξακολουθεί να αντιμετωπίζει αυξημένη πολυπλοκότητα στη ρύθμιση και υψηλότερο ενεργειακό κόστος, ενώ το Wi-Fi 8 — αν και υπό ανάπτυξη — αναμένεται να διορθώσει αυτές τις αδυναμίες μέσω αυτοματοποιημένης διαχείρισης και βελτιστοποίησης πόρων. Η συνολική εικόνα δείχνει μια πορεία από ταχύτητα και πυκνότητα προς αυτονομία και ευφυΐα, με τελικό στόχο δίκτυα που αυτορρυθμίζονται και μαθαίνουν από το ίδιο τους το περιβάλλον.

Πίνακας 6 Συνοπτική κριτική αποτίμηση – πλεονεκτήματα και περιορισμοί

Παράμετρος	Wi-Fi 6	Wi-Fi 7	Wi-Fi 8 (υπό ανάπτυξη)
Κύρια Καινοτομία	OFDMA / MU-MIMO / TWT	Multi-Link Operation / 4096-QAM	Συντονισμός πολλαπλών AP (MAPC) / Υπερ-υψηλή αξιοπιστία
Πλεονεκτήματα	Βελτιωμένη απόδοση σε πυκνά περιβάλλοντα	Εξαιρετική ρυθμαπόδοση και χαμηλή καθυστέρηση	Αυξημένη αξιοπιστία και σταθερότητα σε πυκνά περιβάλλοντα και υπό κινητικότητα
Αδυναμίες	Περιορισμένο φάσμα / ασυμβατότητες	Αυξημένη πολυπλοκότητα & κόστος	Υπό τυποποίηση / έλλειψη υποδομών

Καταλληλότητα	Καθημερινές εφαρμογές / IoT μεσαίας κλίμακας	Εφαρμογές υψηλών απαιτήσεων (AR/VR, βιομηχανία)	Εφαρμογές κρίσιμης αξιοπιστίας (βιομηχανία, ηλεκτρονική υγεία, XR)
Προοπτική Υιοθέτησης	Ώριμη και εκτεταμένη	Σε φάση ενεργής εμπορικής διείσδυσης	Πειραματική – αναμενόμενη μετά το 2028

Η Εικόνα 16 απεικονίζει τη μεταβολή της συνολικής ρυθμαπόδοσης (throughput) σε συνάρτηση με τον αριθμό των ταυτόχρονων χρηστών για τα πρότυπα Wi-Fi 6, Wi-Fi 7 και Wi-Fi 8. Σκοπός της απεικόνισης είναι να αποδοθεί συγκριτικά ο βαθμός αποδοτικότητας κάθε προτύπου όταν αυξάνεται η πυκνότητα του δικτύου, δηλαδή η ταυτόχρονη δραστηριότητα πολλών συσκευών. Το σχήμα είναι ενδεικτικό και ποιοτικό και δεν προκύπτει από μετρήσεις ή προσομοιώσεις. Όπως φαίνεται από το διάγραμμα, το Wi-Fi 6 παρουσιάζει την εντονότερη πτώση της μέσης ταχύτητας καθώς αυξάνεται ο αριθμός των ενεργών χρηστών. Η συμπεριφορά αυτή αποδίδεται κυρίως στο μικρότερο διαθέσιμο εύρος καναλιού, στην απουσία συντονισμού μεταξύ γειτονικών σημείων πρόσβασης και στην επιβάρυνση του ανταγωνιστικού μηχανισμού πρόσβασης. Σημειώνεται ότι το πρότυπο δεν επιβάλλει στατική κατανομή πόρων, καθώς ο αλγόριθμος χρονοδρομολόγησης αφήνεται στην υλοποίηση του κατασκευαστή. Σε περιβάλλοντα υψηλής πυκνότητας, η αύξηση των ανταγωνιστικών μεταδόσεων οδηγεί σε συμφόρηση του καναλιού και περιορισμό της συνολικής ρυθμαπόδοσης.



Εικόνα 16 Σύγκριση μέσης ρυθμαπόδοσης (throughput) ανά αριθμό χρηστών

Αντίθετα, το Wi-Fi 7 διατηρεί τη σταθερότητά του σε σημαντικά μεγαλύτερο αριθμό ταυτόχρονων χρηστών. Αυτό οφείλεται στην τεχνολογία Multi-Link Operation (MLO), η οποία επιτρέπει την ταυτόχρονη χρήση πολλών φασματικών ζωνών (2,4, 5 και 6 GHz), και στη βελτιωμένη 4096-QAM διαμόρφωση που αυξάνει τη χωρητικότητα καναλιού. Έτσι, η μείωση της ρυθμαπόδοσης είναι πιο ήπια και η συνολική εμπειρία χρήστη παραμένει σταθερή.

Το Wi-Fi 8, αν και ακόμη υπό ανάπτυξη, παρουσιάζεται στο γράφημα ως προβλεπόμενη εξέλιξη με ακόμη μεγαλύτερη ανθεκτικότητα στην αύξηση χρηστών. Ο συντονισμός πολλαπλών σημείων πρόσβασης (MAPC) και η δυναμική λειτουργία υποζωνών αναμένεται να περιορίσουν την πτώση της απόδοσης καθώς αυξάνεται η πυκνότητα, χωρίς ωστόσο αύξηση του μέγιστου ρυθμού μετάδοσης σε σχέση με το Wi-Fi 7. Με άλλα λόγια, το δίκτυο προσαρμόζεται αυτόματα στις συνθήκες φόρτου, αποφεύγοντας τη συμφόρηση και εξισορροπώντας την κατανομή πόρων.

6.2 Πλεονεκτήματα και αδυναμίες κάθε έκδοσης

Η εξέλιξη των προτύπων Wi-Fi από το 802.11ax (Wi-Fi 6) έως το 802.11be (Wi-Fi 7) και την επερχόμενη έκδοση 802.11bn (Wi-Fi 8) αντανακλά την ανάγκη για μεγαλύτερη απόδοση, αξιοπιστία και προσαρμοστικότητα σε όλο και πιο απαιτητικά περιβάλλοντα επικοινωνίας. Κάθε έκδοση φέρει συγκεκριμένα τεχνολογικά πλεονεκτήματα, αλλά συνοδεύεται και από περιορισμούς που επηρεάζουν την εφαρμογή της σε διαφορετικά σενάρια χρήσης [31], [37].

Το Wi-Fi 6 (IEEE 802.11ax), επηρεασμένο από τις αρχές της δίκαιης κατανομής πόρων και της χρονικής προτεραιότητας (scheduling) που χρησιμοποιούνται σε σύγχρονα LTE δίκτυα, ενσωματώνει μηχανισμούς που στοχεύουν στη βελτιστοποίηση της απόδοσης και της ποιότητας υπηρεσίας (QoS) σε περιβάλλοντα υψηλής πυκνότητας. Όπως συμβαίνει στους QoS-Aware Proportional Fair (PF) αλγόριθμους, έτσι και στο Wi-Fi 6 η κατανομή του διαθέσιμου φάσματος μεταξύ των σταθμών (STAs) γίνεται με τρόπο που εξισορροπεί τη συνολική απόδοση και τη δικαιοσύνη πρόσβασης. Η υιοθέτηση τεχνολογιών όπως το OFDMA και το MU-MIMO επιτρέπει την ταυτόχρονη εξυπηρέτηση πολλών συσκευών σε διαφορετικά Resource Units (RUs), μειώνοντας τον χρόνο αναμονής και βελτιώνοντας τη φασματική αποδοτικότητα [31].

Παράλληλα, η υποστήριξη του μηχανισμού Target Wake Time (TWT) επιτρέπει τον προγραμματισμό περιόδων αδράνειας και αφύπνισης, προσφέροντας ενεργειακά αποδοτική επικοινωνία, ιδανική για εφαρμογές IoT και συσκευές χαμηλής κατανάλωσης. Με αυτόν τον τρόπο, το Wi-Fi 6 υιοθετεί μια προσαρμοστική στρατηγική διαχείρισης πόρων, παρόμοια με τις μεθόδους

δυναμικής χρονοδρομολόγησης που παρατηρούνται στα δίκτυα LTE, εξασφαλίζοντας ομαλή εξυπηρέτηση πολλαπλών χρηστών με διαφοροποιημένες ανάγκες QoS [3].

Ωστόσο, παρά τις βελτιώσεις του, το Wi-Fi 6 εξακολουθεί να περιορίζεται σε εύρος καναλιού έως 160 MHz και διαμόρφωση 1024-QAM, με αποτέλεσμα να υπολείπεται του Wi-Fi 7 σε μέγιστη ταχύτητα και προσαρμοστικότητα. Το επόμενο πρότυπο, το Wi-Fi 7 (802.11be), επεκτείνει τα παραπάνω μέσω της υποστήριξης 4096-QAM και Multi-Link Operation (MLO), προσφέροντας δυναμική κατανομή φάσματος και βελτιστοποιημένη απόδοση ακόμα και υπό συνθήκες έντονης συμφόρησης [3], [31].

Από την άλλη, το Wi-Fi 7 προσφέρει εξαιρετικά υψηλό ρυθμό μετάδοσης δεδομένων μέσω της χρήσης 4096-QAM, καναλιών εύρους έως 320 MHz και πολλών χωρικών ροών (spatial streams). Η εισαγωγή του MLO επιτρέπει τη χρήση πολλών συχνοτήτων ταυτόχρονα, ενισχύοντας τη σταθερότητα της σύνδεσης και μειώνοντας την καθυστέρηση. Επιπλέον, με τεχνικές όπως το preamble puncturing και τη δυναμική αξιοποίηση του φάσματος, το Wi-Fi 7 είναι κατάλληλο για απαιτητικές εφαρμογές όπως AR/VR, cloud gaming και real-time βιομηχανικές διεργασίες. Ωστόσο, η αυξημένη πολυπλοκότητα του εξοπλισμού και οι υψηλές απαιτήσεις ποιότητας σήματος καθιστούν το Wi-Fi 7 λιγότερο αποδοτικό σε περιβάλλοντα με θόρυβο ή εμπόδια, ενώ η ενεργειακή κατανάλωση είναι μεγαλύτερη εξαιτίας των πολλών streams και της διαχείρισης του MLO [33], [34].

Το Wi-Fi 8, που βρίσκεται ακόμα υπό ανάπτυξη, δεν επικεντρώνεται κυρίως στην αύξηση της ταχύτητας αλλά στην ενίσχυση της αξιοπιστίας και της σταθερότητας των ασύρματων συνδέσεων. Παρότι διατηρεί τη διαμόρφωση 4096-QAM του Wi-Fi 7, ενσωματώνει τεχνικές όπως η προσαρμοστική χρήση υπο-καναλιών (dynamic sub-channel operation), ο συντονισμένος σχηματισμός δεσμών (coordinated beamforming) και η ευφυής διαχείριση του φάσματος για μείωση των παρεμβολών και των απωλειών πακέτων. Αυτά τα χαρακτηριστικά καθιστούν το Wi-Fi 8 ιδανικό για εφαρμογές με υψηλές απαιτήσεις σε αξιοπιστία, όπως η ιατρική τηλεμετρία ή τα δίκτυα κρίσιμης σημασίας [4], [34]. Ωστόσο, η έλλειψη αύξησης της θεωρητικής ρυθμαπόδοσης, σε συνδυασμό με την περιορισμένη διαθεσιμότητα hardware και την πρόωρη φάση ανάπτυξης του προτύπου, περιορίζουν την άμεση υιοθέτησή του στην αγορά.

6.3 Προοπτικές χρήσης σε διαφορετικά σενάρια

Τα πρότυπα Wi-Fi 6, Wi-Fi 7 και Wi-Fi 8 ανοίγουν το δρόμο για ποικίλες εφαρμογές σε σύγχρονα σενάρια χρήσης, από την καθημερινή οικιακή δικτύωση έως την αυτοματοποιημένη βιομηχανία και

την επαυξημένη πραγματικότητα. Κάθε πρότυπο χαρακτηρίζεται από ιδιότητες που το καθιστούν κατάλληλο για συγκεκριμένες απαιτήσεις εφαρμογών.

6.3.1 Wi-Fi 6 (IEEE 802.11ax / 6E) – ιδανικό για υψηλή πυκνότητα και IoT εφαρμογές

Το Wi-Fi 6 πρωτοστάτησε στη βελτίωση της απόδοσης σε πυκνά περιβάλλοντα μέσω τεχνολογιών όπως OFDMA και MU-MIMO, επιτρέποντας αποδοτική διαχείριση μεγάλου αριθμού ταυτόχρονων συνδέσεων με βελτίωση της ενεργειακής διαχείρισης μέσω των TWT μηχανισμών. Αυτά το καθιστούν ιδιαίτερα χρήσιμο για έξυπνα σπίτια, χώρους γραφείων και κόμβους IoT, όπου απαιτείται σταθερή σύνδεση πολλών συσκευών χωρίς σημαντική αύξηση της κατανάλωσης ενέργειας [1], [3].

6.3.2 Wi-Fi 7 (IEEE 802.11be) – για υψηλό εύρος ζώνης, πολύ χαμηλή καθυστέρηση και καθηλωτικές εμπειρίες

Το Wi-Fi 7 μεταφέρει τις δυνατότητες σε άλλο επίπεδο με χαρακτηριστικά όπως 4096-QAM**,** εύρος καναλιού έως 320 MHz**,** Multi-Link Operation (MLO) και υποστήριξη TSN-like scheduling**,** που το καθιστούν κατάλληλο για [1], [3]:

- Εφαρμογές εικονικής, επαυξημένης και εκτεταμένης πραγματικότητας (VR/AR/XR) και ροή περιεχομένου εξαιρετικά υψηλής ευκρίνειας (ultra-HD), όπου η χαμηλή καθυστέρηση και η υψηλή σταθερότητα είναι κρίσιμες.
- Βιομηχανικά περιβάλλοντα (IIoT), όπου απαιτείται επικοινωνία πραγματικού χρόνου (real-time) για ρομποτικά συστήματα, αισθητήρες και εφαρμογές ελέγχου χαμηλής καθυστέρησης (low latency). Μάλιστα, μελέτες δείχνουν ότι η χρήση του MLO σε εφαρμογές AR οδηγεί σε χαμηλότερη καθυστέρηση και καλύτερη απόδοση σε περιβάλλοντα με περιορισμένους πόρους δικτύου.

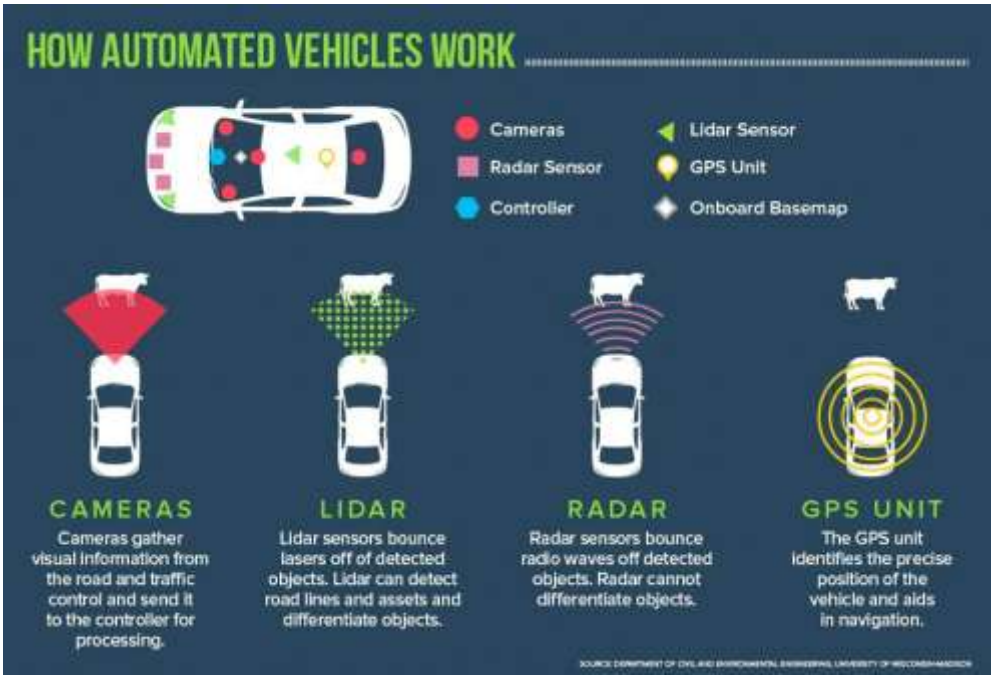
Η αποτελεσματικότητα σε τέτοια σενάρια επιβεβαιώνεται και από αναλύσεις που δείχνουν θεωρητική ρυθμαπόδοση άνω των 20 Gbit/s, σε συνδυασμό με σημαντικά μικρότερη καθυστέρηση σε σχέση με το Wi-Fi 6 [1].

6.3.3 Wi-Fi 8 (IEEE 802.11bn – Υπερ-υψηλή Αξιοπιστία) – για βιομηχανικές εφαρμογές και δίκτυα κρίσιμα ως προς την κινητικότητα

Το Wi-Fi 8 δεν στοχεύει στην αύξηση των ταχυτήτων μετάδοσης δεδομένων, αλλά στη βελτίωση της αξιοπιστίας και αντοχής σε δύσκολες συνθήκες, με επιδιωκόμενη αύξηση 25% στην

πραγματικά παρεχόμενη ρυθμαπόδοση —όχι στον μέγιστο ονομαστικό ρυθμό PHY—, μείωση 25% στην καθυστέρηση του 95ου εκατοστημορίου και μείωση 25% στην απώλεια πλαισίων έναντι του Wi-Fi 7, διατηρώντας τη ρυθμαπόδοση ακόμη και όταν το σήμα είναι αδύναμο ή υπάρχει κινητικότητα [3]. Αυτό το καθιστά ιδανικό για:

- Βιομηχανικά περιβάλλοντα με κινητές συσκευές, όπου απαιτείται απρόσκοπτη περιαγωγή (roaming) μεταξύ σημείων πρόσβασης χωρίς απώλειες ή διακοπές.
- Δημόσιους χώρους υψηλής πυκνότητας (αεροδρόμια, στάδια, εμπορικά κέντρα), όπου η αξιοπιστία και η αντοχή σε παρεμβολές είναι καθοριστικές.
- Εφαρμογές AR/VR, IoT e-Health, autonomous vehicles και edge computing, όπου απαιτείται εγγυημένη σύνδεση χαμηλής καθυστέρησης ακόμη και σε δύσκολο περιβάλλον. Τα βασικά μέρη ενός αυτόνομου οχήματος παρουσιάζονται ενδεικτικά στην Εικόνα 17.



Εικόνα 17 Μέρη ενός αυτόνομου οχήματος [96]

7 Συμπεράσματα και Προτάσεις

Η μετάβαση από το Wi-Fi 6 στο Wi-Fi 7 και την επερχόμενη τεχνολογία Wi-Fi 8 αποδεικνύει τη ραγδαία εξέλιξη των ασύρματων δικτύων, με στόχο όχι μόνο τη βελτίωση της ταχύτητας, αλλά και της αξιοπιστίας, της αποδοτικότητας και της σταθερότητας. Κάθε έκδοση βασίζεται στην προηγούμενη, ενσωματώνοντας καινοτομίες που ανταποκρίνονται σε νέες τεχνολογικές απαιτήσεις όπως το metaverse, το βιομηχανικό διαδίκτυο των πραγμάτων (IIoT), οι εφαρμογές επαυξημένης πραγματικότητας (AR/VR), και η ολοένα αυξανόμενη ανάγκη για σταθερές συνδέσεις χαμηλής καθυστέρησης. Οι τεχνολογίες όπως το Multi-Link Operation, το 4096-QAM και τα beamforming συστήματα συνιστούν ένα νέο επίπεδο προσαρμογής του Wi-Fi σε απαιτητικά περιβάλλοντα.

Παράλληλα, η ποικιλία των σεναρίων χρήσης επιβεβαιώνει πως δεν υπάρχει μία ιδανική τεχνολογία για όλες τις περιπτώσεις: το Wi-Fi 6 εξακολουθεί να είναι αποτελεσματικό για IoT και βασικές καθημερινές ανάγκες, το Wi-Fi 7 αναλαμβάνει τον ρόλο της πλατφόρμας για καθηλωτικές εμπειρίες και real-time εφαρμογές, ενώ το Wi-Fi 8 έρχεται να καλύψει την ανάγκη για αξιοπιστία και αδιάλειπτη λειτουργία σε κρίσιμες εφαρμογές. Συνολικά, η κατεύθυνση που ακολουθεί η εξέλιξη των προτύπων Wi-Fi ευθυγραμμίζεται πλήρως με το όραμα του 6G, της ευφυούς δικτύωσης και της βιώσιμης, ολιστικής συνδεσιμότητας.

7.1 Συμπεράσματα εργασίας

Η παρούσα εργασία είχε ως βασικό αντικείμενο τη μελέτη της εξέλιξης των προτύπων ασύρματης δικτύωσης IEEE 802.11, με έμφαση στις σύγχρονες και επερχόμενες εκδόσεις Wi-Fi 6 (802.11ax), Wi-Fi 7 (802.11be) και Wi-Fi 8 (802.11bn). Μέσα από την ανάλυση των τεχνικών χαρακτηριστικών, των πλεονεκτημάτων και των περιορισμών κάθε προτύπου, έγινε φανερό ότι η πορεία του Wi-Fi δεν είναι απλώς γραμμική αναβάθμιση ταχύτητας, αλλά μια συνολική μετάβαση προς πιο έξυπνα, ευέλικτα και ενεργειακά αποδοτικά δίκτυα.

Κατά τη διάρκεια της μελέτης, διαπιστώθηκε πως το Wi-Fi 6 αποτέλεσε το πρώτο ουσιαστικό βήμα προς την κατεύθυνση της μαζικής συνδεσιμότητας, εισάγοντας τεχνολογίες όπως OFDMA και MU-MIMO που βελτίωσαν την αποδοτικότητα σε πυκνά περιβάλλοντα. Το Wi-Fi 7 επέκτεινε αυτές τις δυνατότητες, συνδυάζοντας ευρύτερα κανάλια (320 MHz), πολλαπλές ταυτόχρονες ζεύξεις (Multi-

Link Operation) και 4096-QAM διαμόρφωση, γεγονός που το καθιστά ικανό να εξυπηρετήσει εφαρμογές υψηλής ζήτησης, όπως AR/VR, βιομηχανικό IoT και cloud gaming. Το Wi-Fi 8, αν και βρίσκεται ακόμη σε ερευνητικό στάδιο, στρέφεται προς την αξιοπιστία και την προσαρμοστικότητα, διατηρώντας το φάσμα και τον μέγιστο ρυθμό μετάδοσης του Wi-Fi 7 και αξιοποιώντας τον συντονισμό πολλαπλών σημείων πρόσβασης καθώς και βελτιωμένους μηχανισμούς MAC — σημάδι ότι το μέλλον της ασύρματης επικοινωνίας δεν περιορίζεται πλέον στη χωρητικότητα, αλλά στην ποιότητα εμπειρίας και στην ευφυΐα του δικτύου.

Από κριτικής σκοπιάς, η εργασία ανέδειξε τόσο τα τεχνολογικά άλματα όσο και τα όρια των τρεχουσών λύσεων. Παρά τη βελτίωση της θεωρητικής απόδοσης, η πραγματική απόδοση επηρεάζεται ακόμη από ζητήματα συμβατότητας, ενεργειακής κατανάλωσης, και ασφάλειας. Η έρευνα φανερώνει ότι το Wi-Fi εξακολουθεί να αντιμετωπίζει προκλήσεις σε περιβάλλοντα με έντονη κινητικότητα ή παρεμβολές, όπου η σταθερότητα των ζεύξεων και η ποιότητα υπηρεσίας δεν είναι πάντα εγγυημένες. Επιπλέον, η υιοθέτηση νέων προτύπων εξαρτάται από το οικοσύστημα συσκευών, το κόστος εξοπλισμού και τη διαθεσιμότητα φάσματος, παράγοντες που συχνά καθυστερούν τη μετάβαση από τη θεωρία στην πράξη.

Συνοψίζοντας, η εξέλιξη των ασύρματων προτύπων είναι αποτέλεσμα συνεχούς συμβιβασμού μεταξύ θεωρητικής υπεροχής και πρακτικής ωριμότητας. Το Wi-Fi μετασχηματίζεται σταδιακά από τεχνολογία “για όλους” σε υποδομή κρίσιμης σημασίας, η οποία θα πρέπει να είναι αξιόπιστη, ενεργειακά αποδοτική και επαρκώς ασφαλής. Αυτό το πέρασμα από τη «συνδεσιμότητα» στην «ευφυή συνδεσιμότητα» αποτελεί το βασικό μάθημα της παρούσας μελέτης — ένα βήμα προς δίκτυα που δεν εξυπηρετούν απλώς δεδομένα, αλλά ανθρώπινες εμπειρίες.

7.2 Μελλοντική εργασία

Η περαιτέρω έρευνα μπορεί να κινηθεί σε πολλαπλές κατευθύνσεις. Πρώτον, είναι απαραίτητη η πειραματική επιβεβαίωση των θεωρητικών συμπερασμάτων μέσα από πραγματικές μετρήσεις και δοκιμές πεδίου, με χρήση εξομοιωτών ή δικτυακών testbeds που υποστηρίζουν Wi-Fi 6E/7. Ένα τέτοιο πλαίσιο θα επιτρέψει τη μελέτη παραμέτρων όπως καθυστέρηση, ρυθμαπόδοση και ενεργειακή απόδοση σε ρεαλιστικά περιβάλλοντα. Δεύτερον, αξίζει να διερευνηθεί η ενσωμάτωση τεχνικών μηχανικής μάθησης (AI/ML) στη χρονοδρομολόγηση και κατανομή πόρων. Οι έξυπνοι αλγόριθμοι θα μπορούσαν να βελτιστοποιούν δυναμικά τη χρήση φάσματος, να προβλέπουν συμφόρηση και να αυτορρυθμίζουν το δίκτυο ανάλογα με τη συμπεριφορά των χρηστών.

Τρίτον, η ενεργειακή βιωσιμότητα των ασύρματων δικτύων αποτελεί ένα σχετικά ανεξερεύνητο πεδίο, ιδίως καθώς ο αριθμός των IoT συσκευών αυξάνεται εκθετικά. Η μελέτη ενεργειακά

αποδοτικών σχημάτων μετάδοσης και “sleep scheduling” θα μπορούσε να συμβάλει στη δημιουργία πράσινων, αυτόνομων δικτύων. Τέλος, ενδιαφέρον παρουσιάζει και η συνύπαρξη Wi-Fi με 6G και δίκτυα THz, καθώς τα όρια ανάμεσα στις ασύρματες τεχνολογίες αρχίζουν να θολώνουν.

Βιβλιογραφία

[1] X. Liu, Y. Dong, Y. Li, Y. Lin, X. Yang, and M. Gan, "IEEE 802.11be Wi-Fi 7: Feature summary and performance evaluation," *arXiv preprint* arXiv:2309.15951, 2023. [Online]. Available: https://arxiv.org/abs/2309.15951

[2] R. Liu and N. Choi, "A first look at Wi-Fi 6 in action: Throughput, latency, energy efficiency, and security," in *Proc. ACM SIGMETRICS*, 2023, pp. 1–2.

[3] L. Galati-Giordano, G. Geraci, M. Carrascosa, and B. Bellalta, "What will Wi-Fi 8 be? A primer on IEEE 802.11bn ultra high reliability," *IEEE Commun. Mag.*, vol. 62, no. 8, pp. 126–132, 2024.

[4] M. Alsakati, C. Pettersson, S. Max, V. N. Moothedath, and J. Gross, "Performance of 802.11be Wi-Fi 7 with multi-link operation on AR applications," in *Proc. IEEE WCNC*, Mar. 2023, pp. 1–6.

[5] S. W. Kim, "Performance and simulation analysis of 802.11ax OFDMA in contention-driven scenarios," PeerJ Comput. Sci., vol. 11, p. e2687, 2025.

[6] Elhilali, Narimane, Mostapha Badri, and Mouncef Filali Bouami. "Evaluation of QoS over IEEE 802.11 wireless network in the implementation of internet protocols mobility supporting." International Journal of Advanced Computer Science and Applications 14, no. 2 (2023).

[7] E. Ndaguba et al., "Operability of smart spaces in urban environments," *PMC*, 2023. [Online]. Available: https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC10422534/

[8] G. K. Walia, M. Kumar, and S. S. Gill, "AI-empowered fog/edge resource management for IoT applications: A comprehensive review, research challenges, and future perspectives," *IEEE Commun. Surveys Tuts.*, vol. 26, no. 1, pp. 619–669, 2023.

[9] T. Wang, J. Zhang, L. Zhou, and C. Ma, "Performance evaluation for 11ac," 2013. [Online]. Available: https://mentor.ieee.org/802.11/dcn/13/11-13-0576-03-0hew-performanceevaluation-for-11ac.pptx

[10] A. Amirova et al., "Handover decisions for ultra-dense networks in smart cities (a survey)," *Technologies*, vol. 13, no. 8, p. 313, 2025.

[11] F. Wilhelmi, S. Barrachina-Muñoz, C. Cano, I. Selinis, and B. Bellalta, "Spatial reuse in IEEE 802.11ax WLANs," Comput. Commun., vol. 170, pp. 65–83, 2021.

[12] A. Karamyshev, I. Levitsky, D. Bankov, and E. Khorov, "A tutorial on Wi-Fi 8: The journey to ultra high reliability," *Probl. Inf. Transm.*, vol. 61, no. 2, pp. 164–210, 2025.

[13] A. López-Raventós and B. Bellalta, "Dynamic traffic allocation in IEEE 802.11be multi-link WLANs," IEEE Wireless Commun. Lett., vol. 11, no. 7, pp. 1404–1408, 2022.

[14] M. Abusubaih, "Intelligent wireless networks: Challenges and future research topics," *J. Netw. Syst. Manage.*, vol. 30, no. 1, p. 18, 2022.

[15] J. Kerr, "The regulatory triumph of Wi-Fi," *The Regulatory Review*, May 31, 2023. [Online]. Available: https://www.theregreview.org/2023/05/31/kerr-the-regulatory-triumph-of-wi-fi/

[16] E. Reshef and C. Cordeiro, "Future directions for Wi-Fi 8 and beyond," *IEEE Commun. Mag.*, vol. 60, no. 10, pp. 50–55, 2022.

[17] V. Shankar, "Edge AI: A comprehensive survey of technologies, applications, and challenges," in *Proc. 1st Int. Conf. Adv. Comput. Emerg. Technol. (ACET)*, 2024, doi: 10.1109/ACET61898.2024.10730112.

[18] M. G. Doone, J. Zhang, P. Zhang, O. Yurduseven, T. Q. Duong, and S. L. Cotton, "An analysis of 6 GHz, 60 GHz, and low-THz propagation for Wi-Fi 8 UHR in future factories," in Proc. IEEE Int. Symp. Dynamic Spectrum Access Networks (DySPAN), 2025, pp. 97–98.

[19] H. F. Alhashimi et al., "Survey on AI-enabled resource management for 6G heterogeneous networks: Recent research, challenges, and future trends," *Comput. Mater. Continua*, vol. 83, no. 3, pp. 3585–3622, 2025.

[20] "What is edge computing and why it matters," *Wired*. [Online]. Available: https://www.wired.com/story/edge-computing-iot

[21] A. M. Alwakeel, "Synergistic integration of edge computing and 6G networks for real-time IoT applications," *Mathematics*, vol. 13, no. 9, p. 1540, 2025.

[22] R. Imamguluyev, P. Hasanova, T. Imanova, and U. Poladova, "The role of edge computing in 6G-enabled IoT applications," *Int. J. Res. Publ. Rev.*, vol. 5, no. 12, pp. 2007–2013, Dec. 2024.

[23] A. Choudhury, M. Ghose, and A. Islam, "Machine learning-based computation offloading in multi-access edge computing: A survey," *J. Syst. Archit.*, vol. 148, Art. 103090, 2024.

[24] R. Kumar, S. K. Gupta, H. C. Wang, C. S. Kumari, and S. S. V. P. Korlam, "From efficiency to sustainability: Exploring the potential of 6G for a greener future," *Sustainability*, vol. 15, no. 23, Art. 16387, 2023.

[25] A. A. Abdalhafid, S. K. Subramaniam, Z. A. Zukarnain, and F. H. Ayob, "Multi-link operation in IEEE 802.11be extremely high throughput: A survey," *IEEE Access*, vol. 12, pp. 46891–46906, 2024.

[26] P. E. Iturria-Rivera, M. Chenier, B. Herscovici, B. Kantarci, and M. Erol-Kantarci, "RL meets multi-link operation in IEEE 802.11be: Multi-headed recurrent soft-actor critic-based traffic allocation," *arXiv preprint* arXiv:2303.08959, 2023. [Online]. Available: https://arxiv.org/abs/2303.08959

[27] R. Sen and D. A. Wood, "Energy-proportional computing: A new definition," *Computer*, vol. 50, no. 8, pp. 26–33, 2017.

[28] M. H. Alsharif, A. H. Kelechi, A. Jahid, R. Kannadasan, M. K. Singla, J. Gupta, and Z. W. Geem, "A comprehensive survey of energy-efficient computing to enable sustainable massive IoT networks," *Alexandria Eng. J.*, vol. 91, pp. 12–29, 2024.

[29] M. T. Abbas, K. J. Grinnemo, G. Ferré, P. Laurent, S. Alfredsson, M. Rajiullah, and J. Eklund, "Towards zero-energy: Navigating the future with 6G in cellular Internet of Things," *J. Netw. Comput. Appl.*, vol. 230, Art. 103945, 2024.

[30] "Wi-Fi 6 (802.11ax): Explained," *Purple AI Blog*. [Online]. Available: https://www.purple.ai/blogs/wifi-6-802-11ax

[31] M. Sotoudeh Bahreyni and V. Sattari-Naeini, "QoS-aware enhanced proportional fair scheduling algorithm for real-time services in LTE networks," Comput. Algorithms Numer. Dimens., vol. 2, no. 2, pp. 102–112, 2023.

[32] "Arista Wi-Fi 7 white paper," Arista Networks. [Online]. Available: https://www.arista.com/assets/data/pdf/Whitepapers/Arista-Wi-Fi-7-White-Paper.pdf

[33] "The 7th generation of Wi-Fi technology is coming," Junleepower Blog. [Online]. Available: https://www.junleepower.com/blogs/industry-news/the-7th-generation-of-wifi-technology-is-coming

[34] "Next-gen Wi-Fi 8 focuses on reliability instead of speed," *Tom's Hardware*. [Online]. Available: https://www.tomshardware.com/networking/next-gen-wi-fi-8-focuses-on-reliability-instead-of-speed-ultra-high-reliability-initiative-boosts-performance-lowers-latency-and-packet-loss-in-challenging-conditions

[35] E. J. Oughton, G. Geraci, M. Polese, M. Ghosh, W. Webb, and D. Bubley, "The future of wireless broadband in the peak smartphone era: 6G, Wi-Fi 7, and Wi-Fi 8," *IEEE Wireless Commun.*, 2025.

[36] M. Buczkowski, "Explained: Wi-Fi standard evolution," Grandmetric, May 29, 2018. [Online]. Available: https://www.grandmetric.com/2018/05/29/wi-fi-standards-evolution/

[37] N. N. Sirhan and M. Martínez-Ramón, "LTE cellular networks packet scheduling algorithms in downlink and uplink transmission: A survey," *arXiv preprint* arXiv:2204.11369, 2022.

[38] Charfi, Emna, Ahlem Saddoud, and Lamia Chaari Fourati. "From Wi-Fi 7 to Wi-Fi 8: A survey of technological evolution, emerging applications, challenges, and future aspects." Computer Networks (2025): 111590.

[39] "Milestones: WaveLAN, precursor of Wi-Fi, 1987," Engineering and Technology History Wiki (ETHW). [Online]. Available: https://ethw.org/Milestones:WaveLAN,_Precursor_of_Wi-Fi,_1987

[40] "The evolution of Wi-Fi networks: From IEEE 802.11 to Wi-Fi 6E," Wevolver, May 2022.

[41] "Wi-Fi 6 vs. Wi-Fi 6E vs. Wi-Fi 7: What are the differences?," TechTarget, 2024. [Online]. Available: https://www.techtarget.com/searchnetworking/tip/Wi-Fi-6-vs-Wi-Fi-6E-vs-Wi-Fi-7-Spectrum-not-hype-is-key-difference

[42] N. I. Sarkar, N. Faiz, and M. J. Ali, "The impact of security protocols on TCP/UDP throughput in IEEE 802.11ax client-server network: An empirical study," *Electronics*, vol. 14, no. 19, Art. 3890, 2025.

[43] "Wi-Fi 7 for enterprise: Wireless design and deployment," UT Consulting. [Online]. Available: https://www.utconsulting.com.au/wi-fi-7-for-enterprise-wireless-design-and-deployment/

[44] IEEE Standards Association, "The evolution of Wi-Fi technology and standards," 2023. [Online]. Available: https://standards.ieee.org/beyond-standards/the-evolution-of-wi-fi-technology-and-standards/

[45] "A history of wireless standards: Wi-Fi back to basics," Extreme Networks Blog, 2022. [Online]. Available: https://www.extremenetworks.com/resources/blogs/a-history-of-wireless-standards-wi-fi-back-to-basics

[46] Tektronix, "Wi-Fi overview: IEEE 802.11 physical layer and transmitter measurements," 2023. [Online]. Available: https://www.tek.com/en/documents/primer/wi-fi-overview-80211-physical-layer-and-transmitter-measurements

[47] IONOS Digital Guide, "What are the different IEEE 802.11 WLAN standards?," Aug. 31, 2023. [Online]. Available: https://www.ionos.com/digitalguide/server/know-how/ieee-80211/

[48] CableFree Networks, "History of Wi-Fi technology," 2024. [Online]. Available: https://www.cablefree.net/history-of-wifi-technology/

[49] W. Lemstra, V. Hayes, and J. Groenewegen, Eds., *The Innovation Journey of Wi-Fi: The Road to Global Success*. Cambridge, U.K.: Cambridge Univ. Press, 2010.

[50] D. Kanellopoulos et al., "Networking architectures and protocols for IoT applications in smart cities: Recent developments and perspectives," *Electronics*, vol. 12, no. 11, Art. 2490, Jun. 2023.

[51] *IEEE Std 802.11b-1999/Cor 1-2001, Higher-Rate Physical Layer Extension in the 2.4 GHz Band — Corrigendum 1*, IEEE, 2001. [Online]. Available: https://standards.ieee.org/ieee/802.11b-1999_Cor_1/1167/

[52] M. Silva, J. Santos, and M. Curado, "The path towards virtualized wireless communications: A survey and research challenges," J. Netw. Syst. Manage., vol. 32, no. 1, p. 12, 2024.

[53] B. P. Crow, I. Widjaja, J. G. Kim, and P. T. Sakai, "IEEE 802.11 wireless local area networks," *IEEE Commun. Mag.*, vol. 35, no. 9, pp. 116–126, 1997.

[54] Idaho National Laboratory, "Experimental evaluation of interference in the 2.4 GHz ISM band," Rep. INL/RPT-23-74719, Rev. 0, 2023.

[55] G. Hochet Derevianckine, A. Guitton, O. Iova, B. Ning, and F. Valois, "Hate or love in the 2.4 GHz ISM band: The story of LoRa and IEEE 802.11g," ACM Trans. Internet Things, vol. 7, no. 1, pp. 1–30, 2025.

[56] Zacharias, Sven, and Thomas Newe. "Competition at the wireless sensor network MAC layer: Low power probing interfering with X-MAC." In Journal of Physics: Conference Series, vol. 307, no. 1, p. 012038. 2011

[57] E. V. Ramanaiah Chintha, K. K. Agrawal, and S. Jain, "802.11 Wi-Fi standards: Performance metrics," *Int. J. Innov. Res. Technol. (IJIRT)*, vol. 9, no. 5, Oct. 2022. [Online]. Available: https://ijirt.org/publishedpaper/IJIRT167456_PAPER.pdf

[58] IEEE Std 802.11g-2003, IEEE Standard for Information Technology — Local and Metropolitan Area Networks — Specific Requirements — Part 11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications: Further Higher Data Rate Extension in the 2.4 GHz Band, IEEE, 2003. https://ptacts.uspto.gov/ptacts/public-informations/petitions/1518778/download-documents?artifactId=3kdTz_QPSSyWLGPR5UbjYwQtBGZFnkCXeGWvpGFsKFxU44HcDaTbzNM

[59] B. Bellalta, L. Bononi, R. Bruno, and A. Kassler, "Next generation IEEE 802.11 wireless local area networks: Current status, future directions and open challenges," *Comput. Commun.*, vol. 75, pp. 1–25, 2016.

[60] G. Geraci, F. Meneghello, F. Wilhelmi, D. Lopez-Perez, I. Val, L. Galati-Giordano, C. Cordeiro, M. Ghosh, E. Knightly, and B. Bellalta, "Wi-Fi: Twenty-five years and counting," arXiv preprint arXiv:2507.09613, 2025.

[61] F. Wilhelmi, B. Bellalta, G. Geraci, L. Galati-Giordano, F. Meneghello, A. Kijanka, and D. López-Pérez, "A tutorial on IEEE 802.11bn multi-AP coordination for Wi-Fi 8: From standardization to performance evaluation," arXiv preprint arXiv:2606.13759, 2026.

[62] A. Yarali and B. Ahsant, "802.11n: The new wave in WLAN technology," in *Proc. 4th Int. Conf. Mobile Technol., Appl., Syst.*, Sep. 2007, pp. 310–316.

[63] M. S. Gast, *802.11n: A Survival Guide*. Sebastopol, CA, USA: O'Reilly, 2012.

[64] M. Afroze Alin and M. D. Hossain, "Wireless evolution: IEEE 802.11n, 802.11ac, and 802.11ax performance comparison," *Int. J. AdHoc Netw. Syst. (IJANS)*, vol. 14, no. 1, Jan. 2024.

[65] E. Perahia and R. Stacey, Next Generation Wireless LANs: 802.11n and 802.11ac, 2nd ed. Cambridge, U.K.: Cambridge University Press, 2013.

[66] "Understanding Wi-Fi 4/5/6/6E/7 (802.11 n/ac/ax/be)," Wiisfi.com, 2023. [Online]. Available: https://www.wiisfi.com/

[67] L. M. Bartolín-Arnau, F. Orozco-Santos, V. Sempere-Payá, J. Silvestre-Blanes, T. Albero-Albero, and D. Llacer-Garcia, "Exploring the potential of Wi-Fi in industrial environments: A comparative performance analysis of IEEE 802.11 standards," *Telecom*, vol. 6, no. 2, Art. 40, 2025.

[68] P. Patil, M. Patil, S. Itraj, and U. Bombale, "IEEE 802.11n: Joint modulation-coding and guard interval adaptation scheme for throughput enhancement," Int. J. Commun. Syst., vol. 33, no. 8, p. e4347, 2020.

[69] S. C. Roy, N. Funabiki, M. M. Rahman, B. Wu, M. Kuribayashi, and W.-C. Kao, "A study of the active access-point configuration algorithm under channel bonding to dual IEEE 802.11n and 11ac interfaces in an elastic WLAN system for IoT applications," *Signals*, vol. 4, no. 2, pp. 274–296, 2023, doi: 10.3390/signals4020015.

[70] Z. K. Farej and M. A. Hassan, "Multi-channel bonding effects of the IEEE 802.11ac on the WLAN performance," *Przegląd Elektrotechniczny*, vol. 99, no. 11, pp. 54–59, Nov. 2023, doi: 10.15199/48.2023.11.54.

[71] *IEEE Std 802.11be-2024, Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications — Amendment: Extremely High Throughput (EHT)*, IEEE Standards Association, 2024.

[72] Wi-Fi Alliance, "Wi-Fi 7 technology overview," 2024. [Online]. Available: https://www.wi-fi.org/discover-wi-fi/wi-fi-7

[73] C. Deng, X. Fang, X. Han, X. Wang, L. Yan, R. He, Y. Long, and Y. Guo, "IEEE 802.11be Wi-Fi 7: New challenges and opportunities," IEEE Commun. Surveys Tuts., vol. 22, no. 4, pp. 2136–2166, 2020.

[74] E. Avdotin, D. Bankov, E. Khorov, and A. Lyakhov, "Enabling massive real-time applications in IEEE 802.11be networks," in Proc. IEEE 30th Annu. Int. Symp. Personal, Indoor and Mobile Radio Commun. (PIMRC), 2019, pp. 1–6.

[75] Wi-Fi Alliance, "Wi-Fi CERTIFIED 6®," Wi-Fi Alliance. [Online]. Available: https://www.wi-fi.org/wi-fi-macphy

[76] E. Mozaffariahrar, F. Theoleyre, and M. Menth, "A survey of Wi-Fi 6: Technologies, advances, and challenges," Future Internet, vol. 14, no. 10, p. 293, 2022.

[77] S. K. Venkateswaran, C.-L. Tai, R. Garnayak, Y. Ben-Yehezkel, Y. Alpert, and R. Sivakumar, "IEEE 802.11ax target wake time: Design and performance analysis in ns-3," in Proc. 2024 Workshop on ns-3, 2024, pp. 10–18.

[78] E. Khorov, A. Kiryanov, and A. Krotov, "Cloud-based management of energy-efficient dense IEEE 802.11ax networks," in *Proc. IEEE Int. Black Sea Conf. Commun. Networking (BlackSeaCom)*, 2019.

[79] *IEEE Std 802.11ax-2021, IEEE Standard for Information Technology — Telecommunications and Information Exchange Between Systems — LAN/MAN Specific Requirements*, IEEE, 2021.

[80] S. Tutelian, D. Bankov, D. Shmelkin, and E. Khorov, “IEEE 802.11ax OFDMA resource allocation with frequency-selective fading,” Sensors, vol. 21, no. 18, Art. no. 6099, 2021, doi: 10.3390/s21186099.

[81] Q. Chen, Z. Weng, X. Xu, and G. Chen, “A target wake time scheduling scheme for uplink multi-user transmission in IEEE 802.11ax-based next generation WLANs,” IEEE Access, vol. 7, pp. 158207–158222, 2019, doi: 10.1109/ACCESS.2019.2950464

[82] T. Lamers, J. Mensenkamp, and C. Vink, “Securing home Wi-Fi with WPA3 personal,” in Proc. IEEE 18th Annual Consumer Communications & Networking Conference (CCNC), 2021, pp. 1–6, doi: 10.1109/CCNC49032.2021.9369629.

[83] B. Bellalta, "IEEE 802.11ax: High-efficiency WLANs," *IEEE Wireless Commun.*, vol. 23, no. 1, pp. 38–46, 2016.

[84] Y. Daldoul, D.-E. Meddour, and A. Ksentini, “Performance evaluation of OFDMA and MU-MIMO in 802.11ax networks,” *Computer Networks*, vol. 182, Art. no. 107477, 2020, doi: 10.1016/j.comnet.2020.107477

[85] S. Bhattarai, G. Naik, and J.-M. J. Park, “Uplink resource allocation in IEEE 802.11ax,” in *Proc. IEEE International Conference on Communications (ICC)*, 2019, pp. 1–6.

[86] M. Vanhoef and E. Ronen, “Dragonblood: Analyzing the Dragonfly handshake of WPA3 and EAP-pwd,” in *Proc. IEEE Symposium on Security and Privacy*, 2020, pp. 517–533.

[87] M. Nurchis and B. Bellalta, “Target Wake Time: Scheduled access in IEEE 802.11ax WLANs,” IEEE Wireless Communications, vol. 26, no. 2, pp. 142–150, Apr. 2019, doi: 10.1109/MWC.2019.1800163.

[88] Q. Chen and Y.-H. Zhu, “Scheduling channel access based on Target Wake Time mechanism in 802.11ax WLANs,” IEEE Transactions on Wireless Communications, vol. 20, no. 3, pp. 1918–1933, Mar. 2021, doi: 10.1109/TWC.2020.3034173.

[89] S. He, C. Peng, W. Huang, Z. An, Y. Qian, and L. Liu, "Toward Wi-Fi 8 standard: A survey of state-of-the-art technologies," *IEEE Open J. Commun. Soc., vol. 6, pp. 10150–10170, 2025*.

[90] E. Avdotin, D. Bankov, E. Khorov, and A. Lyakhov, "OFDMA resource allocation for real-time applications in IEEE 802.11ax networks," in Proc. IEEE Int. Black Sea Conf. Commun. Netw. (BlackSeaCom), 2019, pp. 1–3.

[91] T. Adame et al., "On the multi-RU allocation mechanism in IEEE 802.11be," *IEEE Commun. Lett.*, vol. 27, no. 2, pp. 460–463, 2023.

[92] E. Khorov, A. Kiryanov, A. Lyakhov, and G. Bianchi, "A tutorial on IEEE 802.11ax high efficiency WLANs," *IEEE Commun. Surveys Tuts.*, vol. 21, no. 1, pp. 197–216, 2018.

[93] "Wi-Fi 8 has arrived to drive the wireless AI edge," Broadcom Blog. [Online]. Available: https://www.broadcom.com/blog/wi-fi-8-has-arrived-to-drive-the-wireless-ai-edge

[94] E. Khorov, I. Levitsky, and I. F. Akyildiz, "Current status and directions of IEEE 802.11be, the future Wi-Fi 7," *IEEE Access*, vol. 8, pp. 88664–88688, 2020.

[95] SmartLogistics Inc., "Smart logistics solutions" (πηγή εικόνας). [Online]. Available: https://smartlogisticsinc.com/

[96] "Different sensors enabled in autonomous vehicles" (πηγή εικόνας), ResearchGate. [Online]. Available: https://www.researchgate.net/figure/Different-sensors-enabled-in-autonomous-vehicles_fig3_350389718

[97] O. C. Nosiri and J. Agajo, "Enhancing wireless communication using software-defined radio architecture," Int. J. Res. Rev. Comput. Sci. (IJRRCS), Oct. 2012.

[98] GX Group, "Understanding the differences: OFDM vs. OFDMA," LinkedIn, Apr. 8, 2024. [Online]. Available: https://www.linkedin.com/pulse/understanding-differences-ofdm-vs-ofdma-gxgroup-2etwc/

[99] Accolade Wireless, "802.11ac Gigabit WiFi: How we reached here?" (πηγή εικόνας), Jun. 2016. [Online]. Available: https://www.accoladewireless.com/802-11ac-gigabit-wifi-how-we-reached/

[100] Wifi-professionals, "BSS colouring or spatial reuse (802.11ax AKA WiFi 6)", Jul. 4, 2019. [Online]. Available: https://www.wifi-professionals.com/2019/07/bss-colouring-or-spatial-reuse-802-11ax-aka-wifi6