



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ  
ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ &  
ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΜΕΤΑΔΟΣΗΣ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΑΣ ΚΑΙ  
ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΥΛΙΚΩΝ

**Εξυπηρέτηση εφαρμογών  
Επαυξημένης Πραγματικότητας  
(Augmented Reality - AR) με χρήση των  
τεχνολογιών Wi-Fi και  
Mobile Edge Computing (MEC)**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΝΙΚΗ Α. ΠΑΝΤΑΖΗ

**Επιβλέπων:** Παναγιώτης Γ. Κωττής

Καθηγητής Ε.Μ.Π.

*Αθήνα, Μάρτιος 2019*





ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ  
ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ &  
ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΜΕΤΑΔΟΣΗΣ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΑΣ ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ  
ΥΛΙΚΩΝ

**Εξυπηρέτηση εφαρμογών  
Επαυξημένης Πραγματικότητας  
(Augmented Reality - AR) με χρήση των  
τεχνολογιών Wi-Fi και  
Mobile Edge Computing (MEC)**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**ΝΙΚΗ Α. ΠΑΝΤΑΖΗ**

**Επιβλέπων:** Παναγιώτης Γ. Κωττής

Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή την 15η Μαρτίου 2019

.....

Π. Κωττής

Καθηγητής Ε.Μ.Π.

.....

Χ. Καψάλης

Καθηγητής Ε.Μ.Π.

.....

Γ. Φικιώρης

Καθηγητής Ε.Μ.Π.

**Αθήνα, Μάρτιος 2019**





.....

Νίκη Α. Πανταζή

Διπλωματούχος Ηλεκτρολόγος Μηχανικός & Μηχανικός Υπολογιστών Ε.Μ.Π

Copyright © Νίκη Α. Πανταζή, 2019.

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

Απαγορεύεται η αντιγραφή, αποθήκευση και διανομή της παρούσας εργασίας, εξ ολοκλήρου ή τμήματος αυτής, για εμπορικό σκοπό. Επιτρέπεται η ανατύπωση, αποθήκευση και διανομή για σκοπό μη κερδοσκοπικό, εκπαιδευτικής ή ερευνητικής φύσης, υπό την προϋπόθεση να αναφέρεται η πηγή προέλευσης και να διατηρείται το παρόν μήνυμα. Ερωτήματα που αφορούν τη χρήση της εργασίας για κερδοσκοπικό σκοπό πρέπει να απευθύνονται προς το συγγραφέα. Οι απόψεις και τα συμπεράσματα που περιέχονται σε αυτό το έγγραφο εκφράζουν το συγγραφέα και δεν πρέπει να ερμηνευθεί ότι αντιπροσωπεύουν τις επίσημες θέσεις του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου.



## ***Ευχαριστίες***

Θα ήθελα να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα καθηγητή της διπλωματικής μου εργασίας κ. Παναγιώτη Γ. Κωττή για την ευκαιρία που μου έδωσε να ασχοληθώ με ένα τόσο ενδιαφέρον θέμα. Η καθοδήγησή του, οι επισημάνσεις και οι διορθώσεις του συνέβαλαν καθοριστικά στο τελικό αποτέλεσμα. Επιπλέον, θέλω να εκφράσω ένα μεγάλο ευχαριστώ στον πατέρα μου, Αντώνη, που με στήριξε καθ' όλη τη διάρκεια των σπουδών μου τόσο οικονομικά όσο και ηθικά. Του αφιερώνω την παρούσα εργασία, ως ελάχιστο δείγμα αναγνώρισης και ευγνωμοσύνης για όσα μου προσέφερε.



*Στον πατέρα μου, Αντώνη*  
*&*  
*στη μνήμη της μητέρας μου, Μαρίας*



# Περιεχόμενα

Περίληψη.....	15
Abstract.....	17
Κατάλογος Σχημάτων.....	19
Κατάλογος Πινάκων.....	21
Κατάλογος Συντμήσεων.....	23
<b>1. Η ΕΠΑΓΧΕΙΡΗΜΕΝΗ ΠΡΑΓΜΑΤΙΚΟΤΗΤΑ.....</b>	<b>27</b>
1.1 Εισαγωγή στην επαυξημένη πραγματικότητα.....	27
1.1.1 Μικτή Πραγματικότητα.....	27
1.1.2 Ιστορική αναδρομή.....	28
1.2 Χαρακτηριστικά συστήματος AR.....	30
1.2.1 Απεικόνιση.....	30
1.2.1.1 Συσκευές απεικόνισης.....	30
1.2.1.2 Τεχνικές απεικόνισης.....	32
1.2.2 Εντοπισμός θέσης και εγγραφή.....	33
1.2.2.1 Sensor-based μέθοδοι.....	34
1.2.2.2 Vision-based μέθοδοι.....	35
1.3 Εφαρμογές.....	35
1.3.1 Τουρισμός και αξιοθέατα.....	35
1.3.2 Πλοήγηση.....	36
1.3.3 Gaming.....	36
1.3.4 Εκπαίδευση.....	37
1.3.5 Ιατρική.....	37
1.3.6 Εμπόριο.....	38
1.4 Ασύρματη συνδεσιμότητα για τις AR εφαρμογές.....	38
1.4.1 Wireless Wide Area Network (WWAN).....	39
1.4.2 Wireless Local Area Network (WLAN).....	39
1.4.3 Wireless Personal Area Network (WPAN).....	39
1.4.4 Η τεχνολογία MEC.....	40
<b>2. ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΑΣΥΡΜΑΤΟΥ ΔΙΚΤΥΟΥ ΓΙΑ ΤΗΝ ΕΞΥΠΗΡΕΤΗΣΗ AR ΕΦΑΡΜΟΓΩΝ.....</b>	<b>41</b>
2.1 Το πρότυπο IEEE 802.11.....	41
2.1.1 Η αρχιτεκτονική 802.11.....	41
2.1.2 Το φυσικό επίπεδο του 802.11.....	43
2.1.3 Το πρωτόκολλο MAC 802.11.....	45
2.1.3.1 Πρόσβαση στο μέσο.....	45
2.1.3.2 Αντιμετώπιση κρυμμένων τερματικών.....	47
2.1.3.3 Συσχέτιση.....	48
2.1.3.4 Αξιοπιστία και εξοικονόμηση ενέργειας.....	48
2.1.4 Το πλαίσιο IEEE 802.11.....	49
2.2 Σχεδιασμός ζώνης Wi-Fi.....	50
2.2.1 Μοντέλο υπηρεσιών.....	51
2.2.1.1 Πλήθος συνυπαρχόντων χρηστών.....	51
2.2.1.2 Τύπος τερματικών.....	52
2.2.1.3 Είδος υπηρεσίας.....	52
2.2.2 Χωρητικότητα και κάλυψη.....	53
2.2.2.1 Εκτίμηση παραμέτρων σημείων πρόσβασης.....	53

2.2.2.2	Επιλογή ζώνης συχνότητων.....	54
2.2.2.3	Κανάλια και χωρικά ρεύματα.....	56
2.2.2.4	Ισχύς και ποιότητα σήματος.....	57
2.2.2.5	Ελαχιστοποίηση διακαναλικής παρεμβολής.....	59
2.2.2.6	Χαρακτηριστικά εγκαταστάσεων τοποθέτησης δικτύου Wi-Fi.....	59
2.2.2.7	Εξισορρόπηση φορτίου.....	60
2.2.3	Ασφάλεια και ποιότητα υπηρεσίας.....	61
2.3	Η τεχνολογία Wi-Fi στην εξυπηρέτηση AR εφαρμογών.....	61
2.3.1	Απαιτήσεις συστήματος.....	61
2.3.1.1	Εύρος Ζώνης .....	62
2.3.1.2	Καθυστέρηση.....	63
2.3.1.3	Υπολογιστική ικανότητα.....	63
2.3.2	Επιλογή προτύπων.....	64
2.3.2.1	Το πρότυπο 802.11ax.....	64
<b>3.</b>	<b>Η ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ MEC ΣΤΗΝ ΥΠΗΡΕΣΙΑ ΤΩΝ AR ΕΦΑΡΜΟΓΩΝ.....</b>	<b>67</b>
3.1	Τεχνολογία LTE.....	67
3.1.1	Αρχιτεκτονική LTE.....	67
3.1.1.1	E-UTRAN.....	68
3.1.1.2	EPC.....	69
3.1.2	Φυσικό στρώμα.....	71
3.1.2.1	Πλαίσια LTE.....	71
3.1.3.2	Τεχνολογίες μετάδοσης.....	72
3.2	Mobile Edge Computing.....	73
3.2.1	Αρχιτεκτονική MEC.....	74
3.2.1.1	Πλαίσιο MEC.....	75
3.2.1.2	Αρχιτεκτονική αναφοράς MEC.....	75
3.2.2	Υπηρεσίες MEC.....	78
3.2.2.1	Πληροφορίες ραδιοδικτύου.....	78
3.2.2.2	Υπηρεσία τοποθεσίας.....	78
3.2.2.3	Υπηρεσία διαχείρισης εύρους ζώνης.....	79
3.2.3	Πλεονεκτήματα τεχνολογίας MEC.....	79
3.2.4	Πεδία εφαρμογής.....	80
3.2.4.1	Ευφυής επιτάχυνση βίντεο.....	80
3.2.4.2	Διασυνδεδεμένα οχήματα.....	80
3.2.4.3	Πύλη Internet of Things.....	81
3.3	Εφαρμογή της τεχνολογίας MEC στο LTE.....	82
3.3.1	Bump in the wire.....	82
3.3.2	Κατανεμημένος EPC.....	83
3.3.3	Κατανεμημένες S-GW / P-GW.....	84
3.3.4	Κατανεμημένη S-GW με τοπικό breakout.....	85
3.4	Περί δικτύων 5G.....	85
3.4.1	Εφαρμογή της τεχνολογίας MEC στα δίκτυα 5G.....	86
3.5	Η τεχνολογία MEC στις AR εφαρμογές.....	88
3.5.1	Επισκόπηση συστήματος.....	88
3.5.2	AR εφαρμογές 5G/MEC.....	89
<b>4.</b>	<b>ΔΙΑΣΤΑΣΙΟΛΟΓΗΣΗ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΕΞΥΠΗΡΕΤΗΣΗΣ AR ΕΦΑΡΜΟΓΩΝ.....</b>	<b>91</b>
4.1	Γενικά στοιχεία.....	91



4.1.1 Επικοινωνία με το δίκτυο.....	91
4.2 Μαθηματική περιγραφή της χωρητικότητας δικτύου Wi-Fi.....	93
4.2.1 Πακέτα φυσικού στρώματος.....	94
4.2.2 Εκτίμηση διεκπεραιωτικής ικανότητας των χρηστών.....	95
4.2.3 Εκτίμηση παραμέτρων σημείων πρόσβασης.....	95
4.3 Η τεχνολογία MEC στις AR εφαρμογές.....	96
4.3.1 Μοντέλο βελτιστοποίησης των πόρων.....	97
4.4 Εξυπηρέτηση AR εφαρμογών σε στάδια.....	98
4.4.1 Σενάριο εξυπηρέτησης AR εφαρμογών σε δίκτυο Wi-Fi.....	98
4.4.2 Σενάριο εξυπηρέτησης AR εφαρμογών σε σύστημα MEC.....	100
4.5 AR εφαρμογές σε χώρους μουσείων.....	101
4.5.1 Διαστασιολόγηση εξυπηρέτησης AR εφαρμογής σε δίκτυο Wi-Fi.....	102
4.5.2 Διαστασιολόγηση εξυπηρέτησης AR εφαρμογής σε δίκτυο MEC.....	104
<b>Βιβλιογραφία.....</b>	<b>105</b>



# Περίληψη

Οι εφαρμογές επαυξημένης πραγματικότητας (Augmented Reality - AR) εμπλουτίζουν το πραγματικό περιβάλλον με ψηφιακή πληροφορία μέσω της κάμερας των έξυπνων συσκευών. Στην παρούσα εργασία, μελετάται η αξιοποίηση των τεχνολογιών Wi-Fi και Mobile Edge Computing (MEC) στην εξυπηρέτηση AR εφαρμογών. Οι AR εφαρμογές παρουσιάζουν υψηλές απαιτήσεις σε μεγάλο εύρος ζώνης, χαμηλή καθυστέρηση και ισχυρή υπολογιστική ικανότητα.

Στο πρώτο κεφάλαιο γίνεται επισκόπηση της τεχνολογίας των AR εφαρμογών. Στο δεύτερο κεφάλαιο, περιγράφεται η τεχνολογία Wi-Fi και αναλύονται οι παράμετροι που συμβάλλουν στο σχεδιασμό και την εγκατάσταση μιας ζώνης Wi-Fi. Το τρίτο κεφάλαιο αποτελεί αναφορά στην τεχνολογία MEC, εστιάζοντας στην αρχιτεκτονική ενός MEC συστήματος. Τέλος, στο τέταρτο κεφάλαιο εξετάζεται η αξιοποίηση των συστημάτων Wi-Fi και MEC με σκοπό την εξυπηρέτηση εφαρμογών επαυξημένης πραγματικότητας.

**Λέξεις κλειδιά:** Επαυξημένη πραγματικότητα, Wi-Fi, 802.11, LTE, Mobile Edge Computing



# Abstract

Augmented Reality (AR) applications overlay digital content on top of real environment with the help of smart device's camera. This thesis explores the exploitation of Wi-Fi and Mobile Edge Computing technologies in AR applications. AR applications require high bandwidth, low latency and strong computational ability.

The first chapter provides an overview of AR technology. The second chapter is dedicated to Wi-Fi technology, focusing on planning and implementing a Wi-Fi zone. The third chapter is a reference to MEC with emphasis on the architecture of a MEC system. The last chapter is dedicated to the way Wi-Fi and MEC technologies can serve AR applications.

**Key words:** Augmented Reality, Wi-Fi, 802.11, LTE, Mobile Edge Computing



# Κατάλογος Σχημάτων

Σχήμα 1.1 Το συνεχές εικονικότητας - πραγματικότητας.....	28
Σχήμα 1.2 Η πρώτη συσκευή απεικόνισης AR.....	28
Σχήμα 1.3 Διάγραμμα απλού AR συστήματος.....	30
Σχήμα 1.4 Φορητή συσκευή απεικόνισης (Google Glass).....	31
Σχήμα 1.5 Head-up display στη θέση του συγκυβερνήτη αεροσκάφους.....	32
Σχήμα 1.6 Δείκτες για χρήση στη marker-based ανίχνευση.....	35
Σχήμα 1.7 Το παιχνίδι Pokemon Go.....	36
Σχήμα 1.8 Εφαρμογή της AR στην ιατρική.....	37
Σχήμα 2.1 Αρχιτεκτονική LAN IEEE 802.11.....	42
Σχήμα 2.2 Τοπολογία IEEE 802.11 ad hoc.....	43
Σχήμα 2.3 Η στοίβα πρωτοκόλλων του 802.11.....	44
Σχήμα 2.4 Επιβεβαίωση επιπέδου ζεύξης.....	46
Σχήμα 2.5 Μέθοδος CSMA/CA.....	46
Σχήμα 2.6 Αποφυγή σύγκρουσης με πλαίσια RTS και CTS.....	47
Σχήμα 2.7 Το πλαίσιο δεδομένων του IEEE 802.11.....	50
Σχήμα 2.8 Παράδειγμα πλήθους συνολικών, ενεργών και ταυτόχρονων χρηστών στο δίκτυο.....	51
Σχήμα 2.9 Χωρητικότητα της συχνότητας των 2.4GHz.....	55
Σχήμα 2.10 Χωρητικότητα της συχνότητας 5GHz.....	56
Σχήμα 2.11 Ρυθμός μετάδοσης δεδομένων εναντίον εύρους κάλυψης.....	58
Σχήμα 2.12 Εξισορρόπηση φορτίου μεταξύ AP.....	60
Σχήμα 2.13 Εύρος ζώνης AR εφαρμογών.....	62
Σχήμα 2.14 Ταξινόμηση εφαρμογών στα πρότυπα 802.11.....	65
Σχήμα 2.15 Χρησιμοποίηση καναλιών στις τεχνικές OFDM και OFDMA.....	65
Σχήμα 3.1 Αρχιτεκτονική LTE.....	67
Σχήμα 3.2 Διασυνδέσεις E-UTRAN.....	68
Σχήμα 3.3 Συστατικά στοιχεία του EPC.....	69
Σχήμα 3.4 Λειτουργίες E-UTRAN και EPC.....	70
Σχήμα 3.5 Πλαίσιο FDD.....	71
Σχήμα 3.6 Πλαίσιο TDD.....	72
Σχήμα 3.7 Downlink resource grid.....	72
Σχήμα 3.8 Σύγκριση OFDMA και SC-FDMA.....	73
Σχήμα 3.9 Επισκόπηση συστήματος MEC.....	74
Σχήμα 3.10 Το πλαίσιο MEC.....	75
Σχήμα 3.11 Αρχιτεκτονική MEC.....	76
Σχήμα 3.12 Υπηρεσία ευφυούς επιτάχυνσης βίντεο.....	80
Σχήμα 3.13 Υπηρεσία διασυνδεδεμένων οχημάτων.....	81
Σχήμα 3.14 Υπηρεσία πύλης IoT.....	82
Σχήμα 3.15 Bump in the wire.....	83
Σχήμα 3.16 Κατανεμημένος EPC.....	84
Σχήμα 3.17 Κατανεμημένες S-GW / P-GW.....	84
Σχήμα 3.18 Κατανεμημένη S-GW με τοπικό breakout.....	85
Σχήμα 3.19 5G εφαρμογές.....	86
Σχήμα 3.20 Ένταξη του MEC στο δίκτυο 5G.....	87
Σχήμα 3.21 Τεχνολογία MEC στις AR εφαρμογές.....	88
Σχήμα 3.22 Υπηρεσία Social Sharing.....	89

Σχήμα 3.23 Διαδίκτυο αφής.....	90
Σχήμα 4.1 Τοπολογίες δικτύων Wi-Fi και MEC.....	92
Σχήμα 4.2 Λειτουργίες πελάτη και εξυπηρετητή.....	92
Σχήμα 4.3 Ενθυλάκωση πακέτων στο πρότυπο IEEE 802.11.....	93
Σχήμα 4.4 Σχήμα μετάδοσης προτύπου 802.11.....	94
Σχήμα 4.5 Πλαίσια φυσικού στρώματος για τα πρότυπα 802.11n και 802.11ac.....	94
Σχήμα 4.6 Αρχιτεκτονική MEC για τις AR εφαρμογές.....	96
Σχήμα 4.7 Διαμοιρασμός δεδομένων και εργασιών.....	97
Σχήμα 4.8 Κατανομή εργασιών στο MEC εξυπηρετητή.....	101
Σχήμα 4.9 Εφαρμογή AR σε εκθέματα μουσείων.....	101



# Κατάλογος Πινάκων

Πίνακας 1.1 Απαιτήσεις και περιορισμοί δικτύου σε MAR εφαρμογές.....	38
Πίνακας 1.2 Σύγκριση διαφορετικών τύπων ασύρματων δικτύων για MAR εφαρμογές.....	40
Πίνακας 2.1 Σύνοψη των προτύπων 802.11.....	41
Πίνακας 2.2 Διεκπεραιωτική ικανότητα για την εξυπηρέτηση διαφόρων εφαρμογών.....	53
Πίνακας 2.3 Σημαντικοί ρυθμοί μετάδοσης των προτύπων 802.11 a/n/ac.....	57
Πίνακας 3.1 Χαρακτηριστικά φυσικού στρώματος LTE.....	71
Πίνακας 4.1 Διεκπεραιωτική ικανότητα προτύπου 802.11ac σε περιβάλλον υψηλής πυκνότητας....	95
Πίνακας 4.2 Πλήθος χρηστών που σχετίζονται με το δίκτυο Wi-Fi.....	99
Πίνακας 4.3 Αριθμός AP για διάφορους τύπους του προτύπου 802.11ac.....	99
Πίνακας 4.4 Τιμές καθυστέρησης για τις εργασίες επεξεργασίας AR εφαρμογών.....	102



# Κατάλογος Συντμήσεων

3GPP	3 <sup>rd</sup> Generation Partnership Project
5GC	5 <sup>th</sup> Generation Core
6DoF	6 Degrees of Freedom
AES	Advanced Encryption Standard
AF	Application Function
AMF	Access and Mobility Management Function
AP	Access Point
APN	Access Point Name
AR	Augmented Reality
AUC	Authentication Center
AV	Augmented Virtuality
BSS	Basic Service Set
CCI	Co-Channel Interference
CFS	Customer Facing Service Portal
CN	Core Network
CP	Control Plane
CSMA/CA	Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance
CTS	Clear To Send
CUPS	Control Plane User Plane Separation
DCF	Distributed Coordination Function
DFT	Discrete Fourier Transform
DIFS	Distributed Inter Frame Spacing
DL	Downlink
DNS	Domain Name System
DS	Distribution System
DSSS	Direct Sequence Spread Spectrum
eNB	evolved Node B

EPC	Evolved Packet Core
ESS	Extended Service Set
ETSI	European Telecommunications Standards Institute
E-UTRAN	Evolved Universal Terrestrial Radio Access Network
FCS	Frame Control Sequence
FDD	Frequency Division Duplexing
FPS	Frames Per Second
GPS	Global Positioning System
HD	High Definition
HMD	Head Mounted Display
HSS	Home Subscriber Server
HTTP	Hypertext Transfer Protocol
HUD	Head Up Display
IoT	Internet of Things
ISG	Industry Specification Groups
LAN	Local Area Network
LCM	Lifecycle Management
LLC	Logical Link Control
LTE	Long Term Evolution
LTE-A	Long Term Evolution Advanced
MAC	Media Access Control
MAR	Mobile Augmented Reality
ME	Mobile Edge
MEC	Mobile Edge Computing
MEO	Mobile Edge Orchestrator
MEP	Mobile Edge Platform
MEPM	Mobile Edge Platform Manager
MIMO	Multiple Input Multiple Output

MME	Mobility Management Entity
MPDU	MAC Protocol Data Unit
MQAM	Multiple Quadrature Amplitude Modulation
MSDU	MAC Service Data Unit
MU-MIMO	Multi User - Multiple Input Multiple Output
NAS	Non Access Stratum
NEF	Network Exposure Function
NF	Network Function
NG-RAN	Next Generation Radio Access Network
OFDM	Orthogonal Frequency Division Multiplexing
OFDMA	Orthogonal Frequency Division Multiple Access
OSS	Operations Support System
PAPR	Peak to Average Ratio
PCF	Point Coordination Function
PCF	Police Control Function
PCRF	Police Control and Charging Rules Function
PDA	Personal Digital Assistant
PDN	Packet Data Network
P-GW	Packet Data Network Gateway
PPDU	Physical Protocol Data Unit
PRB	Physical Resource Blocks
PSDU	Physical Service Data Unit
QCI	Quality of Service Class Identifier
QoE	Quality of Experience
QoS	Quality of Service
RAN	Radio Access Network
RNIS	Radio Network Information Service
RRS	Radio Resource Management

RSSI	Received Signal Strength Indicator
RTS	Request To Send
RTT	Round Trip Time
SBA	Service Based Architecture
SC-FDMA	Single Carrier - Frequency Division Multiple Access
S-GW	Serving Gateway
SIFS	Short Inter Frame Spacing
SMF	Session Management Function
SNR	Signal to Noise Ratio
SSID	Service Set Identifier
TAC	Tracking Area Code
TCP	Transmission Control Protocol
TDD	Time Division Duplexing
UE	User Equipment
UL	Uplink
UP	User Plane
UPF	User Plane Function
VIM	Virtualization Infrastructure Manager
VNF	Virtual Network Function
VR	Virtual Reality
WLAN	Wireless Local Area Network
WPA2	Wi-Fi Protected Access 2
WPAN	Wireless Personal Area Network
WWAN	Wireless Wide Area Network

# ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

## Η ΕΠΑΥΞΗΜΕΝΗ ΠΡΑΓΜΑΤΙΚΟΤΗΤΑ

### 1.1 Εισαγωγή στην επαυξημένη πραγματικότητα

Ο όρος επαυξημένη πραγματικότητα (Augmented Reality - AR) αναφέρεται στην τεχνολογία η οποία επιτρέπει την προσθήκη ψηφιακής πληροφορίας στο πραγματικό, φυσικό περιβάλλον μέσω κατάλληλων συσκευών. Το πραγματικό περιβάλλον δεν υποκαθίσταται όπως συμβαίνει στην εικονική πραγματικότητα (Virtual Reality - VR), αλλά εμπλουτίζεται με πρόσθετες ψηφιακές πληροφορίες που ενσωματώνονται σε αυτό. Ο όρος χρησιμοποιήθηκε για πρώτη φορά από τον Tom Caudell το 1990.

Ένα σύστημα επαυξημένης πραγματικότητας έχει τα εξής χαρακτηριστικά:

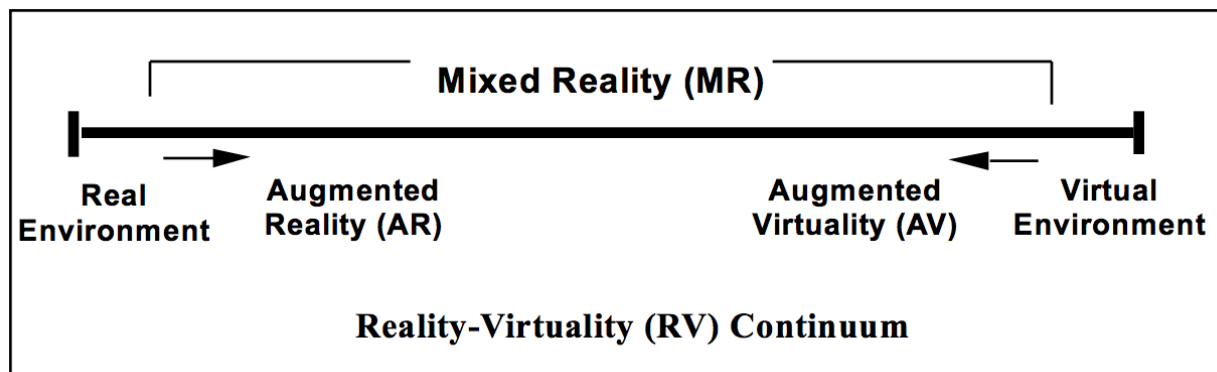
- Συνδυάζει το πραγματικό περιβάλλον με την εικονική πληροφορία
- Επιτρέπει την αλληλεπίδραση σε πραγματικό χρόνο
- Λειτουργεί αναφορικά με το πραγματικό, τρισδιάστατο περιβάλλον

Η επαυξημένη πραγματικότητα χρησιμοποιείται για να βελτιώσει την προοπτική του φυσικού κόσμου και να προσφέρει εμπλουτισμένη εμπειρία της πραγματικότητας στο χρήστη. Οι τεχνολογίες της όρασης και της γραφικής υπολογιστών μετατρέπουν το πραγματικό περιβάλλον σε ψηφιακή πληροφορία παρέχοντας στο χρήστη τη δυνατότητα της διαδραστικότητας και του χειρισμού των ψηφιακών δεδομένων.

Η αλματώδης εξέλιξη της τεχνολογίας έχει προσφέρει στον καταναλωτή πληθώρα έξυπνων συσκευών που χρησιμεύουν στη διευκόλυνσή του στην καθημερινότητα καθώς και στην ψυχαγωγία του. Η τεχνολογία αυτή, σε συνδυασμό με τη διαρκή αναβάθμιση των δικτύων τηλεπικοινωνιών, έχουν δώσει στο χρήστη την ευκαιρία να εξερευνήσει την επαυξημένη πραγματικότητα μέσω ποικίλων εφαρμογών και τελικά να την ενσωματώσει στις καθημερινές του δραστηριότητες.

#### 1.1.1 Μικτή Πραγματικότητα

Το 1994 οι Paul Milgram και Fumio Kishino όρισαν το “συνεχές πραγματικότητας-εικονικότητας” το οποίο εκτείνεται από το πρώτο άκρο, που είναι το πραγματικό περιβάλλον, στο δεύτερο, που είναι ένα πλήρως εικονικό περιβάλλον. Ενδιάμεσα βρίσκεται η μικτή πραγματικότητα (mixed reality) που μπορεί να διακριθεί σε επαυξημένη πραγματικότητα και επαυξημένη εικονικότητα (Augmented Virtuality - AV). Η AR βρίσκεται πιο κοντά στο πραγματικό περιβάλλον, αφού έχει ως βάση της τον πραγματικό κόσμο, στον οποίο προστίθενται εικονικά αντικείμενα. Αντίθετα, η AV βρίσκεται πλησιέστερα στο εικονικό περιβάλλον και ορίζεται ως υποκατηγορία της μικτής πραγματικότητας, στην οποία το εικονικό περιβάλλον εμπλουτίζεται με δεδομένα από τον πραγματικό κόσμο.

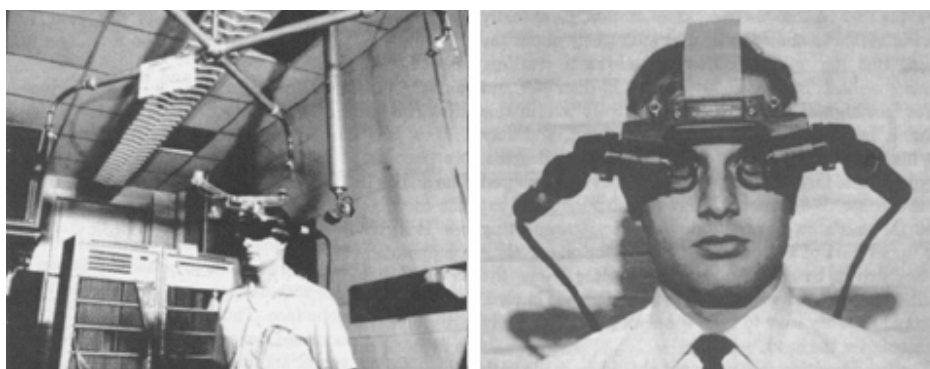


Σχήμα 1.1 Το συνεχές εικονικότητας - πραγματικότητας

### 1.1.2 Ιστορική αναδρομή

Η ιδέα της επαυξημένης πραγματικότητας διατυπώθηκε για πρώτη φορά το 1901 από τον αμερικανό συγγραφέα L. Frank Baum στο βιβλίο του "The Master Key". Ο Baum στο έργο του οραματίστηκε ένα είδος γυαλιών τα οποία πρόβαλλαν τον πραγματικό κόσμο με πρόσθετη πληροφορία. Το 1962 ο κινηματογραφιστής Morton Heilig, ο οποίος είχε την πεποίθηση ότι ο κινηματογράφος ως μορφή τέχνης θα έπρεπε να εμπλέκει τους θεατές στα γεγονότα που διαδραματίζονται στις οθόνες τους, δημιούργησε και κατοχύρωσε τον προσομοιωτή Sensorama που έδινε στους θεατές εμπειρία εικόνας, ήχου, δόνησης και οσμών.

Το πρώτο δείγμα συσκευής επαυξημένης πραγματικότητας συναντάται το 1968, όταν ο Ivan Sutherland και οι φοιτητές του κατασκεύασαν μια συσκευή τρισδιάστατης απεικόνισης που τοποθετούνταν στο κεφάλι του χρήστη, ενώ ήταν στερεωμένη στο ταβάνι. Η ιδέα στην οποία στηρίχτηκε η κατασκευή ήταν ότι ο χρήστης, φορώντας τη συσκευή, θα έβλεπε στο κάθε μάτι του κατάλληλες δισδιάστατες εικόνες που θα δημιουργούσαν την οφθαλμαπάτη τρισδιάστατης προοπτικής. Καθώς ο χρήστης κινούνταν, προβάλλονταν διαφορετικές εικόνες βάσει της θέσης και του προσανατολισμού του. Λόγω των τεχνικών περιορισμών της εποχής, τα τρισδιάστατα αντικείμενα που παρουσιάζονταν στο χρήστη δεν ήταν συμπαγή αλλά διάφανα και καθορίζονταν από τα περιγράμματά τους.



Σχήμα 1.2 Η πρώτη συσκευή απεικόνισης AR



Το 1975 ο Myron Crueger δημιούργησε το “Videoplace”, ένα εργαστήριο τεχνητής πραγματικότητας όπου οι χρήστες έμπαιναν σε ένα διαδραστικό περιβάλλον που ανταποκρινόταν στις κινήσεις τους, χωρίς τη χρήση ειδικών γυαλιών ή γαντιών. Το 1990 ο Tom Caudell, ο οποίος εργαζόταν στη Boeing, επινόησε τον όρο “Augmented Reality”. Ο Caudell μαζί με τον συνεργάτη του David Mizell ανέπτυξαν ένα σύστημα επαυξημένης πραγματικότητας που θα βοηθούσε τους εργάτες στην καλωδίωση των αεροσκαφών. Δύο χρόνια αργότερα, ο Louis Rosenberg ανέπτυξε το πρώτο σύστημα επαυξημένης πραγματικότητας που ονομάστηκε “Virtual Fixtures”. Το σύστημα αυτό σχεδιάστηκε για την Πολεμική Αεροπορία των Η.Π.Α. με σκοπό να βελτιώσει την ανθρώπινη απόδοση στο χειρισμό των εργασιών. Το επόμενο έτος, οι Steven Feiner, Blair MacIntyre και Doree Seligmann παρουσίασαν το πρώτο επιστημονικό άρθρο πάνω σε ένα πρωτότυπο σύστημα AR, το “KARMA” (Knowledge-based Augmented Reality for Maintenance Assistance), το οποίο είχε σκοπό να βοηθήσει το χρήστη σε εργασίες συντήρησης και αποκατάστασης βλαβών σε έναν εκτυπωτή laser.

Το 1994 οι Milgram και Kishino διατύπωσαν το “συνεχές πραγματικότητας- εικονικότητας” ενώ το 1997 ο Ronald Azuma δημοσίευσε το άρθρο του “A Survey of Augmented Reality”, όπου εισήγαγε τον πλέον ευρέως αποδεκτό ορισμό για την επαυξημένη πραγματικότητα. Σύμφωνα με τον Azuma η επαυξημένη πραγματικότητα είναι μια μίξη πραγματικού και εικονικού περιβάλλοντος σε τρισδιάστατο χώρο και σε πραγματικό χρόνο.

Το 1999 ο Hirokazu Kato δημιούργησε το ARToolKit, μια βιβλιοθήκη ανοικτού κώδικα για την ανάπτυξη εφαρμογών AR. Η βιβλιοθήκη αυτή χρησιμοποιείται μέχρι και σήμερα καθώς στη διάρκεια των χρόνων επανακυκλοφόρησε σε παραλλαγές. Χρησιμοποιεί δυνατότητες ικνηλασίας των βίντεο που υπολογίζουν την πραγματική θέση και τον προσανατολισμό της κάμερας σε σχέση με πραγματικούς δείκτες (markers).

Το 2000 ο Bruce Thomas ανέπτυξε το πρώτο παιχνίδι AR εξωτερικού χώρου για κινητές συσκευές και το παρουσίασε στο International Symposium on Wearable Computers. Το 2007 αναπτύχθηκαν AR εφαρμογές στο πεδίο της ιατρικής, ενώ το 2008 δημιουργήθηκε το Wikitude AR Travel Guide, μια εφαρμογή για κινητά τηλέφωνα που χρησιμοποιεί την κάμερα του τηλεφώνου και υπερθέτει πληροφορίες από το Διαδίκτυο στον περιβάλλοντα χώρο και σε πραγματικό χρόνο, μέσω βίντεο. Το 2012 αναπτύχθηκε το Lyteshot, μία πλατφόρμα AR gaming που χρησιμοποιεί έξυπνα γυαλιά. Ένα χρόνο αργότερα, η Google ανακοίνωσε ανοικτό δοκιμαστικό έλεγχο για το Google Glass. Τα γυαλιά συνδέονται με το κινητό τηλέφωνο του χρήστη μέσω Bluetooth, για να αποκτήσουν έτσι πρόσβαση στο Διαδίκτυο. Το 2014 η εταιρία Mahej δημιούργησε την πρώτη γενιά εκπαιδευτικών AR παιχνιδιών.

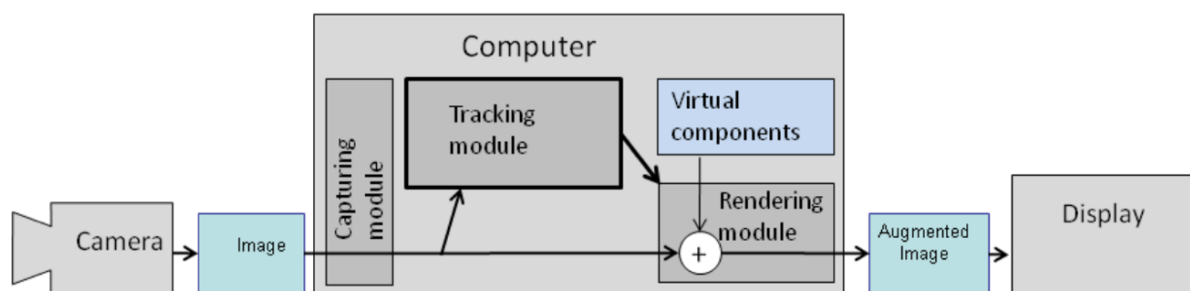
Έναν χρόνο αργότερα η Microsoft δημιούργησε τη συσκευή HoloLens η οποία φοριέται στο κεφάλι του χρήστη και χρησιμοποιώντας διάφορους αισθητήρες και μια μονάδα επεξεργασίας, αναμειγνύει “ολογράμματα” υψηλής ανάλυσης με τον πραγματικό κόσμο.

Τον Ιούλιο του 2016 η Niantic κυκλοφόρησε το Pokemon Go, ένα AR παιχνίδι σχεδιασμένο για έξυπνα κινητά τηλέφωνα (smartphones) με λειτουργικό σύστημα iOS και Android. Το

παιχνίδι έγινε πολύ γρήγορα μια από τις πλέον δημοφιλείς εφαρμογές για κινητά και αύξησε κατακόρυφα τη ζήτηση των AR εφαρμογών.

## 1.2 Χαρακτηριστικά συστήματος AR

Ένα απλό σύστημα επαυξημένης πραγματικότητας περιλαμβάνει μια κάμερα, μια μονάδα επεξεργασίας και μια οθόνη. Η λειτουργία του συστήματος αυτού είναι να τοποθετεί εικονικά αντικείμενα στο σημείο που υποδεικνύει μια εικόνα-δείκτης (marker). Το σύστημα λαμβάνει μια εικόνα από το πραγματικό περιβάλλον και κατόπιν εντοπίζει την εικόνα-δείκτη χρησιμοποιώντας μια μονάδα εντοπισμού, η οποία υπολογίζει την τοποθεσία και τον προσανατολισμό της κάμερας βασιζόμενη στη λήψη. Η μονάδα επίστρωσης (rendering module) χρησιμοποιεί τη θέση και τον προσανατολισμό της κάμερας σε σχέση με την εικόνα-δείκτη για να τοποθετήσει το εικονικό αντικείμενο πάνω στην εικόνα και να παρουσιάσει το αποτέλεσμα στην οθόνη. Αυτό είναι το απλούστερο σύστημα επαυξημένης πραγματικότητας και χρησιμοποιείται ευρέως στις εφαρμογές παιχνιδιών. Χρησιμοποιώντας την ανίχνευση αντικειμένων, το σύστημα AR γνωρίζει τόσο την τοποθεσία όσο και τον τύπο ενός αντικειμένου στην σκηνή και βάσει αυτών μπορεί να παρουσιάσει τα κατάλληλα εικονικά αντικείμενα ή την ψηφιακή πληροφορία.



Σχήμα 1.3 Διάγραμμα απλού AR συστήματος

### 1.2.1 Απεικόνιση

#### 1.2.1.1 Συσκευές απεικόνισης

Ο πλέον απαραίτητος εξοπλισμός ενός συστήματος επαυξημένης πραγματικότητας είναι η συσκευή απεικόνισης, η οποία εμφανίζει τη μίξη του πραγματικού και του εικονικού περιβάλλοντος. Μεγάλες εταιρίες τεχνολογίας έχουν κατασκευάσει τα τελευταία έτη συσκευές που προορίζονται αποκλειστικά για χρήση εφαρμογών AR, όπως τα έξυπνα γυαλιά (smart glasses). Καθώς όμως η τεχνολογία της επαυξημένης πραγματικότητας εξελισσόταν και αποκτούσε κοινό, οι μεγαλύτερες εταιρίες κατασκευής έξυπνων κινητών τηλεφώνων (smartphones) και tablets, ενσωμάτωσαν στα προϊόντα τους τα κατάλληλα εργαλεία και το λογισμικό που χρειαζόνταν, ώστε κάθε τέτοια συσκευή να υποστηρίζει εφαρμογές AR.

Βάσει της θέσης τους μεταξύ του χρήστη και του πραγματικού περιβάλλοντος οι συσκευές αυτές διακρίνονται στις εξής κατηγορίες: (i)φορετές (head-worn), (ii)φορητές (hand-held) και (iii)χωρικές.

Οι φορετές συσκευές απεικόνισης (head-mounted display-HMD) προσαρτώνται στο κεφάλι του χρήστη και συνδυάζουν την εικόνα του πραγματικού κόσμου με εικονικά αντικείμενα μέσω οπτικής ή βίντεο τεχνολογίας. Κάποια μοντέλα έχουν το μέγεθος και το σχήμα γυαλιών όρασης, όπου στο ένα ή και στα δύο κρύσταλλα έχει ενσωματωθεί πρίσμα που αντανακλά την εικόνα μιας πολύ μικρής οθόνης LCD. Ο χρήστης ελέγχει το HMD είτε με τα χέρια του, ακουμπώντας την περιοχή αφής της συσκευής, είτε δίνει λεκτικές εντολές. Τα HMD μπορούν να ελέγχουν ή να αντλούν δεδομένα από άλλα όργανα ή υπολογιστές. Για τη σύνδεσή τους στο Διαδίκτυο, υποστηρίζουν ασύρματες τεχνολογίες όπως Bluetooth, Wi-Fi και GPS. Τα HMD χρησιμοποιούνται σε διάφορα πεδία εφαρμογών AR, όπως στον τομέα του στρατού, σε εκπαιδευτικές διαδικασίες και προσομοιώσεις, σε αθλητικά γεγονότα και gaming.

Μια ιδιαίτερα δημοφιλής συσκευή αυτής της κατηγορίας είναι το Google Glass, που αναπτύχθηκε από τη Google. Η συσκευή αυτή δείχνει την εικονική πληροφορία πάνω στην επιφάνεια γυαλιών και παρέχει τη δυνατότητα στο χρήστη να την ελέγχει με φωνητική λειτουργία. Το Google Glass υποστηρίζει πολλές λειτουργίες που παραδοσιακά ανήκουν στα κινητά τηλέφωνα, όπως αποστολή μηνυμάτων, λήψη φωτογραφιών, εγγραφή βίντεο, αναζήτηση πληροφοριών και πλοήγηση. Τα τελευταία μοντέλα που κυκλοφόρησαν έχουν τη δυνατότητα να συνδεθούν με το smartphone του χρήστη για πρόσβαση στο Διαδίκτυο. Η συσκευή επικεντρώνεται στην επαύξηση του περιβάλλοντος με πληροφορία σε μορφή κειμένου και εικόνας και έτσι δεν απαιτεί ανίχνευση και ευθυγράμμιση πραγματικών και εικονικών αντικειμένων.



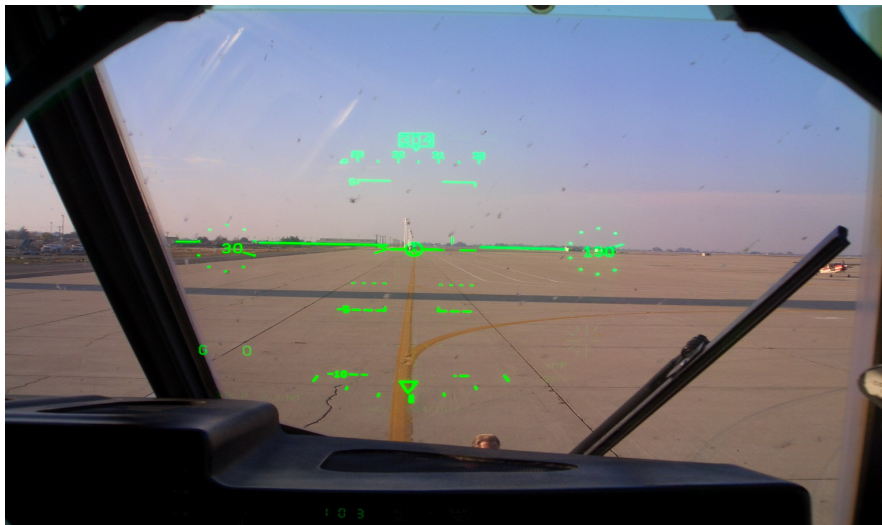
Σχήμα 1.4 Φορετή συσκευή απεικόνισης (Google Glass)

Οι φορητές συσκευές απεικόνισης (hand-held) κατέχουν μια οθόνη στην οποία απεικονίζεται η επαυξημένη σκηνή και μια ενσωματωμένη κάμερα. Έχουν μέγεθος τέτοιο ώστε ο χρήστης να μπορεί να τις κρατήσει στο χέρι του και να τις μεταφέρει. Τέτοιες συσκευές είναι τα κινητά τηλέφωνα, τα PDA (Personal Digital Assistant) και τα tablets. Οι περισσότερες AR εφαρμογές που προορίζονται για hand-held συσκευές χρησιμοποιούν την

κάμερα της συσκευής, η οποία λαμβάνει την εικόνα του πραγματικού περιβάλλοντος. Στη συνέχεια, η εικόνα επαυξάνεται με την εικονική πληροφορία και απεικονίζεται στην οθόνη του χρήστη. Οι συσκευές αυτές είναι απαραίτητο να ενσωματώνουν διάφορους αισθητήρες, όπως πυξίδες, γυροσκόπια, επιταχυνσιόμετρα και GPS.

Η τελευταία κατηγορία συσκευών απεικόνισης είναι οι χωρικές (spatial) που κατανέμονται στατικά στο χώρο. Συνήθως, χρησιμοποιούνται για μεγάλες παρουσιάσεις και εκθέσεις, που δεν απαιτούν αλληλεπίδραση με το χρήστη. Οι συσκευές αυτές μπορεί να είναι είτε προβολείς είτε συσκευές που διαθέτουν μια συμβατική οθόνη (υπολογιστής, τηλεόραση) που προβάλλει τη ροή μιας κάμερας με μια επίστρωση επαυξημένης πραγματικότητας. Χαρακτηριστικό παράδειγμα χρήσης χωρικών συσκευών απεικόνισης είναι η προβολή αθλημάτων στην τηλεόραση, όταν ο τηλεθεατής μπορεί να παρακολουθήσει απευθείας έναν αγώνα, λαμβάνοντας στην τηλεόρασή του και πρόσθετη πληροφορία, όπως αποστάσεις μέσα στον αγωνιστικό χώρο και βέλη που υποδεικνύουν την κίνηση των αθλητών.

Σε αυτή την κατηγορία ανήκουν και τα head-up displays (HUD) που παρουσιάζουν πληροφορία στο χρήστη χωρίς να απαιτούν από αυτόν να αλλάξει οπτική γωνία. Ένα τυπικό HUD περιλαμβάνει έναν προβολέα, ένα σύστημα μίξης και μια μονάδα δημιουργίας βίντεο. Τα συστήματα αυτά εφευρέθηκαν για τα στρατιωτικά αεροσκάφη, όπου ο πιλότος μπορεί να βλέπει πληροφορίες κοιτώντας ευθεία μπροστά του, αποφεύγοντας να σκύβει για να ενημερωθεί από άλλα όργανα.



Σχήμα 1.5 Head-up display στη θέση του συγκυβερνήτη αεροσκάφους

### 1.2.1.2 Τεχνικές απεικόνισης

Υπάρχουν τρεις τεχνικές για την οπτική παρουσίαση της επαυξημένης πραγματικότητας: η video see-through, η optical see-through και η προβολική απεικόνιση (projective).

- Η video-see through απεικόνιση βρίσκεται εγγύτερα στην εικονική πραγματικότητα.

Το ολοκληρωτικά εικονικό περιβάλλον στη VR υποκαθίσταται από μια ροή βίντεο από το πραγματικό περιβάλλον του χρήστη, η οποία επαυξάνεται με εικονικά αντικείμενα. Ο χρήστης είναι εντελώς αποκομμένος από το φυσικό περιβάλλον και λαμβάνει την εικόνα αυτού μέσω της κάμερας. Εφόσον το περιβάλλον της πραγματικότητας ψηφιοποιείται, είναι ευκολότερο να προστεθούν ή να αφαιρεθούν αντικείμενα από αυτό. Η μέθοδος αυτή χρησιμοποιείται τόσο στα HMD όσο και στις συσκευές χειρός. Τα HMD αυτής της κατηγορίας είναι απαραίτητο να διαθέτουν κάμερα, ώστε να λαμβάνουν βίντεο του πραγματικού περιβάλλοντος. Το βίντεο αυτό επαυξάνεται με εικονικά αντικείμενα και στέλνεται στην οθόνη του HMD για απεικόνιση. Ο ενσωματωμένος ανιχνευτής χρησιμοποιείται για να λαμβάνει τη θέση και τον προσανατολισμό του χρήστη. Ανάλογη λειτουργία εκτελείται και στις hand-held συσκευές. Το σημαντικό πλεονέκτημα αυτής της μεθόδου είναι ότι το αποτέλεσμα δεν επηρεάζεται από τις παρακείμενες συνθήκες του περιβάλλοντος. Εντούτοις, η διαδικασία συγχώνευσης δημιουργεί καθυστερήσεις στο σύστημα ενώ η ποιότητα του βίντεο περιορίζει την αίσθηση ρεαλισμού. Επίσης, ανακύπτουν και θέματα ασφάλειας, αφού ο χρήστης αποκόπτεται εντελώς από το πραγματικό του περιβάλλον.

- Στην optical see-through απεικόνιση, ο χρήστης έχει αντίληψη του πραγματικού κόσμου, στον οποίο τοποθετείται η AR επίστρωση με τη βοήθεια διάφανων κατόπτρων και φακών. Τα κάτοπτρα τοποθετούνται σε κατάλληλες θέσεις μπροστά από το μάτι του χρήστη και ανακλούν εικόνα από μια οθόνη υπολογιστή. Η επιφάνεια προβολής της εικονικής πληροφορίας πρέπει να είναι ημιδιάφανη και ημιαντανακλαστική ώστε ο χρήστης να μπορεί να δει και τα εικονικά αντικείμενα αλλά και τον πραγματικό κόσμο. Η μέθοδος αυτή βρίσκει εφαρμογή κυρίως στα HMD. Το βασικότερο πρόβλημα της μεθόδου είναι ότι αποκόπτει τις ακτίνες φωτός από τον πραγματικό κόσμο και μειώνει την φωτεινότητα της σκηνής.
- Στην προβολική απεικόνιση χρησιμοποιούνται συσκευές οι οποίες προβάλλουν εικονική πληροφορία πάνω στα φυσικά αντικείμενα. Η επιφάνεια προβολής μπορεί να είναι οτιδήποτε, όπως ένας τοίχος, ένα κομμάτι χαρτί, ακόμα και η παλάμη του χρήστη. Μια ενδιαφέρουσα εφαρμογή των προβολικών συσκευών είναι ο συνδυασμός τους με ειδικά ανακλαστικά υλικά. Χρησιμοποιώντας ένα ανακλαστικό επίχρισμα σε ένα πραγματικό αντικείμενο και προβάλλοντας μια εικόνα του περιβάλλοντος χωρίς το αντικείμενο αυτό, είναι δυνατή η απόκρυψη του αντικειμένου, που καθίσταται ημιδιαφανές. Τα πλεονεκτήματα της μεθόδου είναι ότι ο χρήστης δεν χρειάζεται να φορά ή να κρατά κάποιον εξοπλισμό, καθώς και ότι η εικόνα μπορεί να καλύψει μεγάλες επιφάνειες προσφέροντας ευρύ οπτικό πεδίο.

### **1.2.2 Εντοπισμός θέσης και εγγραφή**

Ο εντοπισμός θέσης (tracking) και η εγγραφή (registration) αποτελούν τη διαδικασία αξιολόγησης των πληροφοριών της σκηνής ώστε να ευθυγραμμιστεί το εικονικό περιεχόμενο με τα φυσικά αντικείμενα του πραγματικού κόσμου. Η κατηγοριοποίηση των

μεθόδων μπορεί να γίνει βάσει αισθητήρων (sensor-based) ή βάσει της οπτικής (vision-based). Οι sensor-based μέθοδοι χρησιμοποιούν αδρανειακά και ηλεκτρομαγνητικά πεδία, υπερηχητικά κύματα και ραδιοκύματα και υπολογίζουν τις πληροφορίες της σκηνής. Οι vision-based μέθοδοι εκτιμούν τις πληροφορίες της κίνησης μέσω δεικτών ή άλλων χαρακτηριστικών των εικόνων.

### 1.2.2.1 Sensor-based μέθοδοι

Ένα από τα βασικότερα ζητήματα στη λειτουργία ενός AR συστήματος είναι η ευθυγράμμιση της εικονικής πληροφορίας με το πραγματικό περιβάλλον. Αν τα εικονικά αντικείμενα δεν τοποθετηθούν σωστά στο περιβάλλον του χρήστη, η ψευδαίσθηση της συνύπαρξης των δύο κόσμων καταστρέφεται. Για να επιτευχθεί ο συντονισμός, το σύστημα πρέπει να γνωρίζει κάθε στιγμή τη θέση και τον προσανατολισμό του χρήστη. Για το σκοπό αυτό, χρησιμοποιείται πλήθος ανιχνευτών οι οποίοι είναι ενσωματωμένοι στη συσκευή.

Η πρώτη κατηγορία ανιχνευτών που χρησιμοποιούνται για τον εντοπισμό της θέσης της κάμερας είναι οι αδρανειακοί, όπως τα επιταχυνσιόμετρα και τα γυροσκόπια, και χρησιμεύουν για την ανίχνευση της θέσης και της γωνίας του χρήστη. Η μέθοδος που βασίζεται σε αυτά τα όργανα χρησιμοποιείται κάτω από πολλές συνθήκες χωρίς περιορισμό εμβέλειας. Το μειονέκτημά της είναι η γρήγορη εξάπλωση της απόκλισης λόγω διακυμάνσεων από εξωτερικούς παράγοντες. Έχουν γίνει αρκετές προσπάθειες για να βελτιωθεί η ακρίβεια της μεθόδου, όπως με την εφαρμογή φίλτρου Kalman και τη χρησιμοποίηση σχετικών μετρήσεων, αντί απόλυτων.

Η μέθοδος της μαγνητικής ανίχνευσης χρησιμοποιεί το μαγνητικό πεδίο της Γης για να εντοπίσει τον προσανατολισμό του χρήστη. Συνδυάζεται με άλλες μεθόδους ανίχνευσης ώστε να αποκτήσει τους έξι βαθμούς ελευθερίας (six degrees of freedom-6DOF): μπροστά-πίσω, πάνω-κάτω, δεξιά-αριστερά. Το μειονέκτημα της μαγνητικής μεθόδου είναι ότι δέχεται παρεμβολές από περιβάλλοντα ηλεκτρομαγνητικά πεδία, ειδικά όταν ο χρήστης περιβάλλεται από μεταλλικά αντικείμενα.

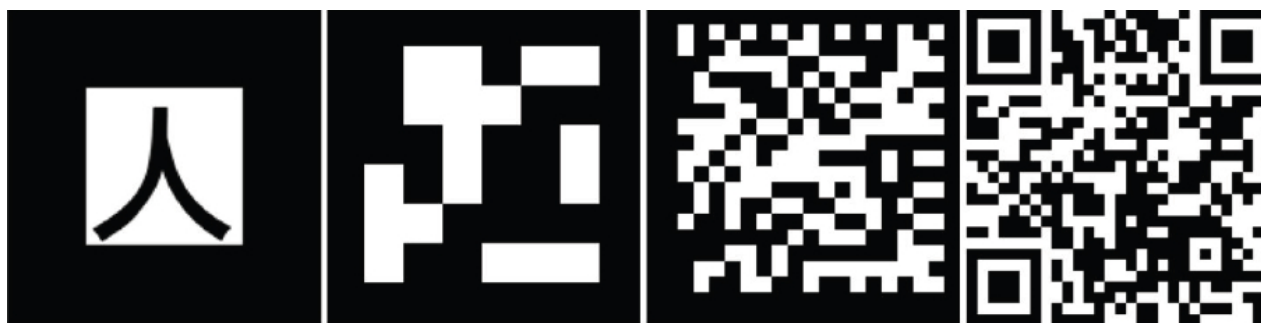
Οι ηλεκτρομαγνητικές μέθοδοι βασίζονται στην ώρα άφιξης του σήματος, στο δείκτη ισχύος του σήματος λήψης ή στη διαφορά φάσης των ηλεκτρομαγνητικών σημάτων. Η γνωστότερη μέθοδος της κατηγορίας αυτής είναι το σύστημα GPS (Global Positioning System), το οποίο μπορεί να δώσει ακριβείς πληροφορίες για την τοποθεσία της συσκευής μέσω δορυφόρων. Οι δορυφόροι εκπέμπουν σήματα που υποδεικνύουν την ακριβή θέση τους και την ώρα αποστολής τους. Η συσκευή που έχει ενσωματωμένο σύστημα GPS δέχεται σήματα από τουλάχιστον τέσσερις δορυφόρους, επεξεργάζεται τις πληροφορίες και υπολογίζει την ακριβή θέση της.

Η μέθοδος της υπερηχητικής ανίχνευσης μπορεί να εκτιμήσει πληροφορίες θέσης και ταχύτητας και να επιτύχει μεγάλη ακρίβεια ανίχνευσης. Εντούτοις, οι υπερηχητικοί πομποί και δέκτες χρησιμοποιούνται σπάνια στις συσκευές χειρός και η χρήση τους εντοπίζεται κυρίως στις πρώιμες AR εφαρμογές. Οι υπερηχητικοί αισθητήρες είναι ευαίσθητοι στη θερμοκρασία, στην παρεμβολή άλλων αντικειμένων καθώς και σε θορύβους από το

περιβάλλον.

### 1.2.2.2 Vision-based μέθοδοι

Στα visual-based συστήματα, η θέση της κάμερας μπορεί να υπολογιστεί με βάση την παρατήρηση των σκηνών που καταγράφει. Για να είναι ευκολότερο αυτό το έργο, εισάγεται μια προκαθορισμένη ανιχνεύσιμη εικόνα στο πραγματικό περιβάλλον που ονομάζεται δείκτης (marker). Η εικόνα αυτή έχει προκαθορισμένη γεωμετρία και χαρακτηριστικά, όπως σχήμα, μέγεθος και χρωματικά μοτίβα. Ειδικότερα, οι επίπεδοι δείκτες είναι ιδιαίτερα δημοφιλείς στη marker-based μέθοδο καθώς προσφέρουν μεγάλη ακρίβεια και ανθεκτικότητα στις αλλαγές των συνθηκών φωτισμού. Μόλις εντοπιστεί ο δείκτης μπορεί να οριστεί η ακριβής θέση και ο προσανατολισμός της κάμερας.



Σχήμα 1.6 Δείκτες για χρήση στη marker-based ανίχνευση

Όταν δεν γίνεται η χρήση δεικτών εφαρμόζεται η μέθοδος φυσικών χαρακτηριστικών. Αυτή η μέθοδος χρησιμοποιεί χαρακτηριστικά σημείων και περιοχών σε μια αλληλουχία εικόνων προκειμένου να εκτιμήσει τις πληροφορίες της σκηνής και να ανιχνεύσει τη θέση της συσκευής. Η εναλλαγή των εικόνων (frames) βοηθά στο να αφαιρεθούν ασυμβατότητες και να εντοπιστούν αποκλίσεις, αν και η μέθοδος οδηγεί πολλές φορές σε παραμόρφωση εικόνας και είναι δύσκολη στην υλοποίηση.

## 1.3 Εφαρμογές

Καθώς η τεχνολογία εξελίσσεται συνεχώς και οι έξυπνες συσκευές αποτελούν αναπόσπαστο τμήμα της καθημερινότητας των ανθρώπων, έχουν αναπτυχθεί πολλές AR εφαρμογές με σκοπό την εξυπηρέτηση του χρήστη σε διάφορους τομείς.

### 1.3.1 Τουρισμός και αξιοθέατα

Στον τομέα του τουρισμού έχουν αναπτυχθεί AR εφαρμογές που σχετίζονται με τη γεωγραφική τοποθεσία του χρήστη και έχουν κυρίως πληροφοριακό χαρακτήρα. Χρησιμοποιώντας μια τέτοια AR εφαρμογή, ο ταξιδιώτης μπορεί να αναζητήσει κατάλυμα, σημεία διασκέδασης, αξιοθέατα της περιοχής, ενώ όλες αυτές οι πληροφορίες εμφανίζονται στη συσκευή του σε πραγματικό χρόνο. Με την τεχνολογία της επαυξημένης πραγματικότητας παρέχεται η δυνατότητα στο χρήστη να στοχεύσει με την κάμερά του (tablet, smartphone κλπ) πάνω σε ένα αξιοθέατο, είτε πραγματικό είτε εικονικό (χάρτη,



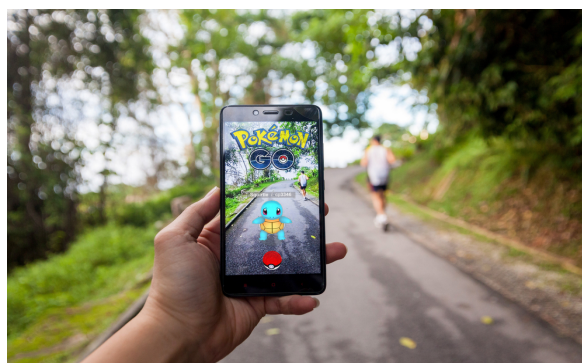
φωτογραφία κλπ), και να λάβει πληροφορίες στην οθόνη του για το συγκεκριμένο σημείο ενδιαφέροντος. Οι πληροφορίες που λαμβάνει ο χρήστης έχουν τη μορφή κειμένου, φωτογραφίας, video ή παραπομπών για διευθύνσεις στο διαδίκτυο. Τα αξιοθέατα μπορούν είτε να βρίσκονται σε εξωτερικό χώρο είτε να είναι εκθέματα σε μουσεία. Οι προηγμένες AR εφαρμογές του είδους περιλαμβάνουν προσομοιώσεις ιστορικών γεγονότων, τοποθεσιών και αντικειμένων που σχετίζονται με συγκεκριμένο περιβάλλον.

### 1.3.2 Πλοήγηση

Η επαυξημένη πραγματικότητα μπορεί να βελτιώσει σημαντικά την αποτελεσματικότητα των συσκευών πλοήγησης. Οι πληροφορίες μπορούν να εμφανίζονται στον ανεμοθώρακα του οχήματος υποδεικνύοντας τις κατευθύνσεις και τις αποστάσεις, τις καιρικές συνθήκες, την ποιότητα του εδάφους, την κυκλοφοριακή κίνηση καθώς επίσης και προειδοποιήσεις για ενδεχόμενο κίνδυνο. Χάρη στη διαδραστικότητα των εφαρμογών, ο χρήστης μπορεί να ορίσει και άλλες πληροφορίες που επιθυμεί να λάβει ο ίδιος, όπως σημεία ενδιαφέροντος, καταστήματα κ.ά.

### 1.3.3 Gaming

Η επαυξημένη πραγματικότητα έχει διεισδύσει στον τομέα της ψυχαγωγίας και έχει τύχει ιδιαίτερης αποδοχής από τη βιομηχανία παιχνιδιών. Τα πρώτα AR παιχνίδια ήταν σχεδιασμένα για εσωτερικούς χώρους και ο χρήστης είχε τη δυνατότητα να αλληλεπιδρά σε πραγματικό χρόνο τόσο με πραγματικά αντικείμενα του περιβάλλοντός του όσο και με εικονικά. Η αίσθηση του ρεαλισμού που προσφέρει η επαυξημένη πραγματικότητα προσέελκυσε το κοινό και αύξησε κατακόρυφα τη δημοφιλία των AR παιχνιδιών. Αποκορύφωμα υπήρξε το παιχνίδι Pokemon Go που κυκλοφόρησε τον Ιούλιο 2016 από τη Niantic, οι λήψεις (downloads) του οποίου μέχρι το Μάιο του 2018 είχαν ξεπεράσει τα 800 εκατομμύρια παγκοσμίως. Το παιχνίδι δίνει τη δυνατότητα στους παίκτες να συλλαμβάνουν, να μονομαχούν και να προπονούν εικονικά πλάσματα τα οποία εμφανίζονται μέσω ενός ειδικού λογισμικού στην οθόνη της έξυπνης συσκευής τους, η οποία αποτυπώνει μέσω κάμερας τον πραγματικό κόσμο. Λίγους μήνες μετά την κυκλοφορία της εφαρμογής, μεγάλος αριθμός παικτών αποχώρησε, η Niantic όμως ανακοίνωσε ότι η εφαρμογή θα βελτιώνεται διαρκώς με τακτικές αναβαθμίσεις και events.



Σχήμα 1.7 Το παιχνίδι Pokemon Go



### 1.3.4 Εκπαίδευση

Στον τομέα της εκπαίδευσης, η επαυξημένη πραγματικότητα έχει χρησιμοποιηθεί για να βελτιώσει την εμπειρία των μαθητών κάνοντας το αντικείμενο μελέτης περισσότερο δελεαστικό και ενδιαφέρον. Εφαρμογές AR χρησιμοποιούνται για την προσομοίωση εργαστηριακών πειραμάτων, τη διδασκαλία γεωμετρικών εννοιών, την περιβαλλοντική εκπαίδευση, τη γεωγραφία, την αναπαράσταση ιστορικών γεγονότων και γενικότερα την κατανόηση δυσνόητων εννοιών και φαινομένων. Μέσω των AR εφαρμογών, οι μαθητές μπορούν να κατανοούν περίπλοκες και αφηρημένες επιστημονικές έννοιες καθώς πλέον εμφανίζονται στις οθόνες τους. Οι περισσότερες εφαρμογές AR στην εκπαίδευση βασίζονται στην τεχνολογία με δείκτη (marker-based). Τα βιβλία, οι εκπαιδευτικές καρτέλες και γενικά όλο το εκπαιδευτικό υλικό που χρησιμοποιείται στη διδασκαλία, περιέχουν ενσωματωμένους δείκτες (markers) οι οποίοι όταν σαρωθούν από την κάμερα της έξυπνης συσκευής, παρέχουν πρόσθετη πληροφορία υπό μορφή πολυμέσων.

### 1.3.5 Ιατρική

Η επαυξημένη πραγματικότητα μπορεί να δώσει λύσεις στον τομέα της υγείας, διευκολύνοντας τόσο τους γιατρούς στο έργο τους όσο και τους φοιτητές ιατρικής στην εκμάθηση της επιστήμης τους. Η αρχή για τις AR εφαρμογές στον τομέα της υγείας έγινε το 2006, όταν κυκλοφόρησε μια συσκευή για τους παρόχους υγείας η οποία μπορεί να απεικονίζει το σύστημα των φλεβών του κάθε ασθενή. Σήμερα, οι γιατροί μπορούν να χρησιμοποιήσουν την επαυξημένη πραγματικότητα για τη βοήθεια στη διάγνωση και τη θεραπεία μιας ασθένειας ή ακόμα και στη χειρουργική. Τα δεδομένα που συλλέγονται σε μία εξέταση, όπως για παράδειγμα μια μαγνητική τομογραφία ή ένας υπέρηχος, μπορούν να συνδυαστούν με την επιτόπια εξέταση του ασθενούς και μέσω κάποιας συσκευής απεικόνισης, ο γιατρός είναι σε θέση να έχει μια ρεαλιστική εικόνα του εσωτερικού του ασθενούς. Ανάλογη διαδικασία γίνεται και στη λαπαροσκοπική χειρουργική, όπου ο γιατρός μπορεί έχει οπτική πληροφορία για την χειρουργούμενη περιοχή χωρίς να χρειάζεται να κάνει περαιτέρω τομές.



Σχήμα 1.8 Εφαρμογή της AR στην ιατρική

### 1.3.6 Εμπόριο

Οι AR εφαρμογές μπορούν να προσφέρουν έξυπνες λύσεις στις καθημερινές αγορές των καταναλωτών αυξάνοντας έτσι την ποιότητας της εμπειρίας του αγοραστή. Τα τελευταία χρόνια έχουν αναπτυχθεί πολλές AR εφαρμογές στον τομέα του ηλεκτρονικού εμπορίου οι οποίες προσφέρουν στον καταναλωτή τη δυνατότητα να δοκιμάσει προϊόντα μέσω της οθόνης της συσκευής του. Ο χρήστης χρησιμοποιώντας την κάμερα της συσκευής του μπορεί να επιλέξει τα προϊόντα της αρεσκείας του όπως ρούχα, παπούτσια, κοσμήματα και να τα δει φορεμένα πάνω του. Σε κάποιες περιπτώσεις, μπορεί να απαιτείται η εκτύπωση κάποιας εικόνας η οποία λειτουργεί ως δείκτης, ώστε η εφαρμογή να γνωρίζει το σημείο όπου θα τοποθετήσει το εικονικό αντικείμενο. Η επαυξημένη πραγματικότητα μπορεί να διευκολύνει τους καταναλωτές και κατά την παρουσία τους στα καταστήματα. Ο χρήστης της AR εφαρμογής μπορεί να στοχεύσει με την κάμερα της έξυπνης συσκευής του το αντικείμενο του ενδιαφέροντός του. Αμέσως, εμφανίζονται στην οθόνη του πληροφορίες για το προϊόν, όπως τα χαρακτηριστικά του και τα πλεονεκτήματά του, κριτικές άλλων αγοραστών, σύγκριση με προϊόντα της κατηγορίας του και πληροφορίες σχετικά με την τιμή του. Επίσης, μια AR εφαρμογή μπορεί να δώσει στον αγοραστή τη δυνατότητα να “δει” στο εσωτερικό μιας συσκευασίας, χωρίς να την ανοίξει.

### 1.4 Ασύρματη συνδεσιμότητα για τις AR εφαρμογές

Τα ασύρματα δίκτυα χρησιμοποιούνται ευρέως για την επικοινωνία και τη μεταφορά δεδομένων στην κινητή επαυξημένη πραγματικότητα (mobile augmented reality-MAR). Ως αποτέλεσμα της συνεχούς αναβάθμισης στις τεχνολογίες ασύρματων δικτύων και των επενδύσεων σε υποδομές, έχουν δομηθεί πολυάριθμα συστήματα βασισμένα σε αρχιτεκτονική πελάτη-διακομιστή (client-server) αξιοποιώντας τα ασύρματα δίκτυα για την επικοινωνία. Οι κινητές συσκευές διαθέτουν ποικίλες διεπαφές δικτύου και μπορούν να συνδεθούν με ένα απομακρυσμένο διακομιστή (remote server) είτε μέσω του κυψελωτού δικτύου είτε με την τεχνολογία Wi-Fi. Συνήθως, οι φορητές συσκευές δεν έχουν κάποια διεπαφή που να τις συνδέει άμεσα με το δίκτυο αλλά συνδέονται σε αυτό μέσω άλλων συσκευών με την τεχνολογία bluetooth.

Visual Input	Single HD Streaming	Uncompressed Video/Model
Latency	10 ms <sup>a</sup>	1 ~ 10 ms
Jitter	<1 ms	<1 ms
Throughput	6 MBps	1 GBps

Πίνακας 1.1 Απαιτήσεις και περιορισμοί δικτύου σε MAR εφαρμογές

Ο μέγιστος εκτιμώμενος όγκος δεδομένων που θεωρητικά μεταφέρονται σε μία ροή βίντεο είναι 9-12Gbps. Αυτή η εκτίμηση αντιπροσωπεύει το ανώτατο όριο δεδομένων που μπορούν

να παραχθούν ανά δευτερόλεπτο. Ακόμα και αν αυτός ο αριθμός μπορεί να ελαττωθεί σημαντικά λόγω συμπίεσης, επιλογής συγκεκριμένων περιοχών κ.ά, μερικές εφαρμογές μπορεί να απαιτήσουν εκατοντάδες megabits ή ακόμα και gigabits ανά δευτερόλεπτο.

Σχετικά με τις απαιτήσεις στο μέγεθος της καθυστέρησης και σύμφωνα με εμπειρικές μελέτες σε real-time εφαρμογές, αν θεωρηθεί μια από άκρο σε άκρο σύνδεση μονής κατεύθυνσης, η καθυστέρηση κυμαίνεται από 75ms έως και 250ms, με τη μέση καθυστέρηση να προκύπτει γύρω στα 100ms. Εντούτοις, λόγω πολλών ζητημάτων στις AR εφαρμογές, όπως η ευθυγράμμιση του εικονικού επιπέδου με τον πραγματικό κόσμο, η καθυστέρηση πρέπει να είναι μικρότερη από 20ms, ενώ έχει υποστηριχθεί ότι ιδανικό μέγεθος είναι περίπου 7ms, ώστε να διατηρηθεί η ακεραιότητα του εικονικού περιβάλλοντος και να αποφευχθούν φαινόμενα όπως η ναυτία λόγω κίνησης στους χρήστες.

Υπάρχουν τρεις σημαντικές κατηγορίες δικτύων που χρησιμοποιούνται στις AR εφαρμογές.

#### **1.4.1 Wireless Wide Area Network (WWAN)**

Τα ασύρματα δίκτυα ευρείας περιοχής εκτείνονται σε μεγάλες γεωγραφικές περιοχές και συνδέουν τοπικά δίκτυα. Κάθε σταθμός βάσης στα κυψελωτά WWAN καλύπτει απόστασεις της τάξης των km. Οι σταθμοί βάσης συνδέονται μεταξύ τους με ένα δίκτυο κορμού που είναι συνήθως ενσύρματο. Το είδος αυτών των δικτύων είναι κατάλληλο για εφαρμογές που υποστηρίζουν κινητικότητα μεγάλης κλίμακας. Υπάρχουν πολλές εφαρμογές των WWAN βασισμένες σε διαφορετικές τεχνολογίες, όπως το 2G GSM και το CDMA, το 2.5G GPRS, το 3G UMTS και το 4G LTE. Τα δίκτυα υψηλότερης γενιάς έχουν αρκετά μεγαλύτερο εύρος ζώνης και μικρότερη καθυστέρηση σε σχέση με παλαιότερων γενιών. Πολλές AR εφαρμογές χρησιμοποιούν τα WWAN για επικοινωνία και μεταφορά δεδομένων. Ένα μεγάλο πρόβλημα των WWAN είναι το μεγάλο κόστος για την αρχική επένδυση των υποδομών. Εντούτοις, η WWAN τεχνολογία είναι πολύ δημοφιλής και μερικές φορές η μόνη λύση για κινητές AR εφαρμογές, καθώς είναι η μόνη διαθέσιμη τεχνολογία για μεγάλους δημόσιους χώρους.

#### **1.4.2 Wireless Local Area Network (WLAN)**

Τα ασύρματα τοπικά δίκτυα εκτείνονται σε έκταση μερικών εκατοντάδων μέτρων. Λειτουργούν σε πολύ μικρότερη περιοχή από αυτή των WWAN, αλλά προσφέρουν μεγαλύτερο εύρος ζώνης και μικρότερες καθυστερήσεις. Οι τεχνολογίες Wi-Fi και MIMO είναι παραδείγματα τυπικών WLAN. Το είδος των δικτύων αυτών είναι πολύ δημοφιλές και κατάλληλο για εφαρμογές εσωτερικού χώρου. Όμως, η μικρή κάλυψη μπορεί να αποτελέσει πρόβλημα όταν ο χρήστης κινείται σε μεγάλες αποστάσεις.

#### **1.4.3 Wireless Personal Area Network (WPAN)**

Τα δίκτυα προσωπικής περιοχής επιτρέπουν σε συσκευές να επικοινωνούν εντός της εμβάλειας ενός ατόμου. Οι ηλεκτρονικοί υπολογιστές, τα έξυπνα τηλέφωνα και τα PDA μπορούν να συνδεθούν μεταξύ τους σε ένα WPAN. Υπάρχουν πολλές εφαρμογές WPAN,

όπως η τεχνολογία Bluetooth, το ZigBee και το UWB. Οι δύο πρώτες χρησιμοποιούνται συνήθως για ανίχνευση της θέσης καθώς και για μεταφορά δεδομένων, ενώ το UWB χρησιμοποιείται κυριώς στην ανίχνευση. Το WPAN έχει αρκετά πλεονεκτήματα όπως ο μικρός όγκος, η μικρή κατανάλωση ενέργειας και το μεγάλο εύρος ζώνης, αλλά δεν ενδείκνυται για εφαρμογές σε μεγάλες περιοχές.

Type	Technology	Coverage	Bandwidth(bps)	Latency(ms)	Power(mw)
WWAN	GSM	~35km	60K	high	1000~2000
	CDMA	12km~50km	384K	high	200~100
	GPRS	~10km	56K~114K	high	~1000
	UMTS	1km~2km	2M	medium	~250
	LTE	5km~100 km <sup>a</sup>	5~50M	low	~ 500
WLAN	Wi-Fi	~90m	11M~54M	low	~100
	MIMO	~100m	300M	medium	unknown
WPAN	UWB	10m~100m	20M~1G	low	20~1000
	Bluetooth	~10m	1M~3M	medium	1~2.5
	ZigBee	~75m	20K~250K	low	1~100

Πίνακας 1.2 Σύγκριση διαφορετικών τύπων ασύρματων δικτύων για MAR εφαρμογές

#### 1.4.4 Η τεχνολογία MEC

Οι δύο σημαντικότερες απαιτήσεις των AR εφαρμογών είναι η μεγάλη ταχύτητα εξυπηρέτησης και η μικρή καθυστέρηση. Αυτά τα δύο προβλήματα καλείται να λύσει μια νέα τεχνολογία δικτύου που ονομάζεται MEC (Mobile Edge Computing). Σύμφωνα με την αρχιτεκτονική του MEC, οι εξυπηρετητές δικτύου έρχονται εγγύτερα στον τελικό χρήστη. Με αυτόν τον τρόπο, μειώνεται η διαδρομή ανάμεσα στο χρήστη της εφαρμογής και στον εξυπηρετητή, με αποτέλεσμα να ελαχιστοποιείται η καθυστέρηση και να αποφεύγονται φαινόμενα συμφόρησης.

# ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

## ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΑΣΥΡΜΑΤΟΥ ΔΙΚΤΥΟΥ ΓΙΑ ΤΗΝ ΕΞΥΠΗΡΕΤΗΣΗ ΑΡ ΕΦΑΡΜΟΓΩΝ

### 2.1 Το πρότυπο IEEE 802.11

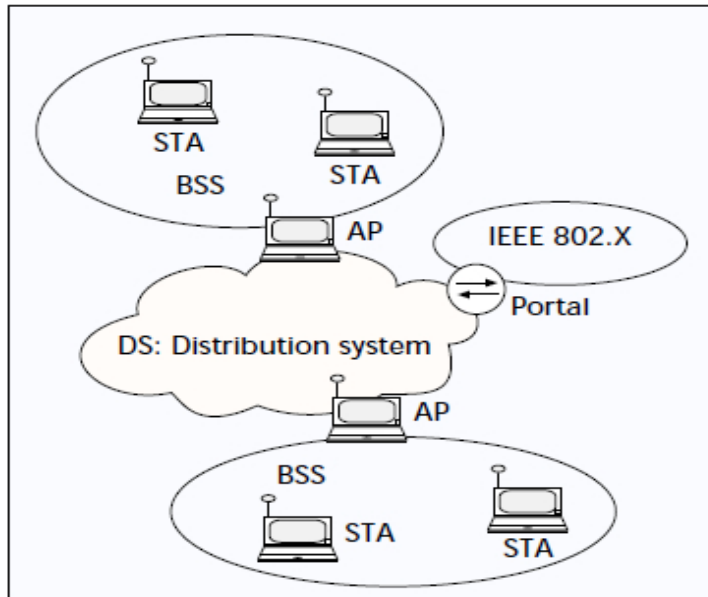
Τα τοπικά ασύρματα δίκτυα είναι σήμερα η σημαντικότερη τεχνολογία προσπέλασης του Διαδίκτυου. Κατά τη διάρκεια των ετών αναπτύχθηκαν πολλές τεχνολογίες και πρότυπα για ασύρματα LAN. Όμως, αυτή που κυριάρχησε είναι η κατηγορία προτύπων IEEE 802.11, που είναι ευρέως γνωστή ως Wi-Fi. Το αρχικό πρότυπο κυκλοφόρησε το 1997 και παρείχε ταχύτητες έως 2Mbps. Έκτοτε, έχουν κυκλοφορήσει ποικίλες εκδόσεις, με τις 802.11a, 802.11b, 802.11g και 802.11n να είναι οι πλέον διαδεδομένες τεχνολογίες. Το πρότυπο 802.11n κάνει χρήση της τεχνολογίας πολλαπλών κεραιών (Multiple-Input Multiple-Output - MIMO), λειτουργεί σε συχνότητες 2.4 και 5GHz και παρέχει ρυθμούς μετάδοσης δεδομένων έως 600Mbps. Το 2013 κυκλοφόρησε το 802.11ac με ταχύτητες που φθάνουν τα 6930Mbps, ενώ στο τέλος του 2019 αναμένεται το 802.11ax με εκτιμώμενο μέγιστο ρυθμό μετάδοσης δεδομένων στα 10Gbps.

	Έτος Έκδοσης	Συχνότητα (GHz)	Εύρος Ζώνης (MHz)	Ρυθμός Μετάδοσης (Mbps)	Διαμόρφωση	Ακτίνα Κάλυψης (m)
802.11a	1999	5	20	54	OFDM	35
802.11b	1999	2.4	22	11	DSSS	38
802.11g	2003	2.4	20	54	OFDM	38
802.11n	2009	2.4/5	20/40	600	MIMO-OFDM	70
802.11ac	2013	5	20/40/80/160	6930	MIMO-OFDM	35

Πίνακας 2.1 Σύνοψη των προτύπων 802.11

#### 2.1.1 Η αρχιτεκτονική 802.11

Το θεμελιώδες στοιχείο της αρχιτεκτονικής 802.11 είναι το βασικό σύνολο υπηρεσιών (Basic Service Set - BSS). Ένα BSS περιέχει ένα ή περισσότερους ασύρματους σταθμούς και ένα κεντρικό σταθμό βάσης (Base Station), ο οποίος είναι γνωστός ως σημείο πρόσβασης (Access Point - AP). Τα σημεία πρόσβασης είναι αυτά που συνδέονται με το δίκτυο κορμού (Distribution System - DS) μέσω μιας συσκευής διασύνδεσης. Πολλά BSS συνδεδεμένα με κοινό δίκτυο κορμού σχηματίζουν μια ενιαία υποδομή που ονομάζεται εκτεταμένη ομάδα εξυπηρέτησης (Extended Service Set - ESS)

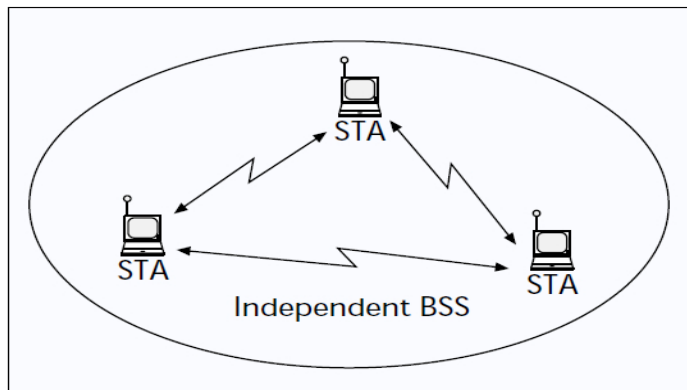


Σχήμα 2.1 Αρχιτεκτονική LAN IEEE 802.11

Τα συστατικά στοιχεία ενός ασύρματου LAN του προτύπου 802.11 είναι:

- **Ασύρματοι σταθμοί.** Τα δίκτυα δημιουργούνται με σκοπό τη μεταφορά δεδομένων μεταξύ των σταθμών. Ένας ασύρματος σταθμός μπορεί να είναι ένας φορητός υπολογιστής, ένα έξυπνο τηλέφωνο, ακόμα και ένας επιτραπέζιος υπολογιστής. Οι υπολογιστές είναι τα τερματικά συστήματα που εκτελούν εφαρμογές.
- **Σημεία πρόσβασης.** Τα κινητά τερματικά επικοινωνούν με το δίκτυο μέσω των σημείων πρόσβασης. Οι συσκευές αυτές λειτουργούν ως γέφυρα που συνδέει το δίκτυο 802.11 με την υποδομή του ενσύρματου δικτύου κορμού.
- **Ασύρματες ζεύξεις.** Ένας υπολογιστής συνδέεται με το σημείο πρόσβασης ή με έναν άλλο υπολογιστή μέσω μιας ασύρματης ζεύξης επικοινωνίας (wireless communication link). Διαφορετικές τεχνολογίες ασύρματων ζεύξεων έχουν διαφορετικούς ρυθμούς μετάδοσης και μπορούν να μεταδίδουν σε διαφορετικές αποστάσεις.
- **Σύστημα διανομής.** Αυτό είναι το ευρύτερο δίκτυο με το οποίο επικοινωνούν τα σημεία πρόσβασης για την αναμετάδοση πλαισίων.

Τα ασύρματα LAN που χρησιμοποιούν AP ονομάζονται ασύρματα LAN υποδομής (infrastructure wireless LANs). Τα σημεία πρόσβασης μαζί με την ενσύρματη δικτύωση Ethernet αποτελούν την υποδομή. Υπάρχουν, όμως, και δίκτυα που δεν διαθέτουν σημείο πρόσβασης και τα τερματικά επικοινωνούν μεταξύ τους σε ανεξάρτητη BSS, χωρίς σύνδεση προς το ενσύρματο δίκτυο κορμού. Στην περίπτωση αυτή, λειτουργίες του AP που χρειάζονται για το σχηματισμό και τη διατήρηση μιας BSS, παρέχονται από τα ίδια τα τερματικά. Τα δίκτυα αυτά ονομάζονται ad hoc.



Σχήμα 2.2 Τοπολογία IEEE 802.11 ad hoc

Εκτός από την ύπαρξη ή μη υποδομής, τα δίκτυα 802.11 μπορούν να κατηγοριοποιηθούν και βάσει των βημάτων (hops) που κάνουν τα πακέτα κατά τη μετάδοση μεταξύ των σημείων πρόσβασης και των τερματικών. Όταν όλη η επικοινωνία διεξάγεται ανάμεσα στο σημείο πρόσβασης και έναν ασύρματο υπολογιστή χωρίς τη μεσολάβηση άλλων ασύρματων κόμβων, το δίκτυο ονομάζεται ενός άλματος. Υπάρχουν, όμως, περιπτώσεις όπου ορισμένοι ασύρματοι κόμβοι χρειάζεται να μεταβιβάσουν τις επικοινωνίες τους μέσω άλλων ασύρματων κόμβων για την ανταλλαγή μηνυμάτων με το σημείο πρόσβασης. Τα δίκτυα αυτά ονομάζονται πολλαπλών αλμάτων (multihop).

Τα δίκτυα Wi-Fi πολλαπλών αλμάτων αποτελούν τη διασύνδεση πολλαπλών νησίδων (hot-spots) οι οποίες σχηματίζουν ένα ασύρματο δίκτυο κορμού, στην άκρη του οποίου βρίσκονται οι πάροχοι υπηρεσιών. Τα σημεία πρόσβασης τοποθετούνται σε κατάλληλα σημεία και σχηματίζουν μικρές νησίδες κάλυψης. Κάθε μία νησίδα εξυπηρετεί κινητά τερματικά και λειτουργεί ως δρομολογητής, εντοπίζοντας γειτονικά AP και μεταφέροντας πακέτα μεταξύ των πολλαπλών hop του ασύρματου κορμού. Αν απαιτείται προσδιορισμός θέσης ενός κινητού τερματικού, η ακρίβεια του εντοπισμού είναι ίση με την περιοχή που καλύπτει ένα AP.

### 2.1.2 Το φυσικό επίπεδο του 802.11

Το πρότυπο IEEE 802.11 εστιάζεται στα δύο χαμηλότερα στρώματα του μοντέλου διαστρωμάτωσης OSI, δηλαδή στο φυσικό επίπεδο και στο επίπεδο ζεύξης δεδομένων. Το φυσικό επίπεδο είναι το κατώτερο επίπεδο της ιεραρχίας του μοντέλου πρωτοκόλλων 802.11. Το επίπεδο ζεύξης δεδομένων διαχωρίζεται σε δύο επιμέρους υποστρώματα: το υπόστρωμα MAC και στο υπόστρωμα ελέγχου λογικής ζεύξης (Logical Link Control - LLC), με το όνομα 802.2.

802.2	Data Link Layer
802.11 MAC	
802.11 <sub>x</sub>	PHY Layer

Σχήμα 2.3 Η στοίβα πρωτοκόλλων του 802.11

Το φυσικό επίπεδο χρησιμοποιεί διάφορες τεχνικές για τη μετάδοση δεδομένων με ραδιοκύματα μικρής εμβέλειας (RF κύματα). Οι δύο ζώνες συχνοτήτων που χρησιμοποιούνται είναι αυτές των 2.4GHz και των 5GHz, οι οποίες έχουν το πλεονέκτημα ότι η χρήση τους δεν χρειάζεται αδειοδότηση και είναι διαθέσιμες ελεύθερα.

Το πρότυπο 802.11b χρησιμοποιεί την τεχνική διασποράς φάσματος άμεσης ακολουθίας (Direct Sequence Spread Spectrum - DSSS). Πρόκειται για μια μέθοδο εξάπλωσης του φάσματος που υποστηρίζει ταχύτητες 1, 2, 5.5 και 11Mbps. Κάθε bit πληροφορίας αντικαθίσταται με μια ομάδα από bits που ονομάζεται κώδικας εξάπλωσης - διεύρυνσης. Τα bits του κώδικα διεύρυνσης μεταδίδονται σε πολύ υψηλότερο ρυθμό από τα αρχικά bits πληροφορίας, οπότε το φάσμα του μεταδιδόμενου σήματος εξαπλώνεται. Ο δέκτης πραγματοποιεί την αντίστροφη διαδικασία, δηλαδή εξάγει τα αρχικά bits πληροφορίας αναδημιουργώντας το σήμα στενής ζώνης. Τα πλεονεκτήματα της τεχνικής είναι η υψηλή ασφάλεια καθώς και η ανοχή σε παρεμβολές στενής ζώνης.

Τα πρότυπα 802.11 a/g/n/ac χρησιμοποιούν την τεχνική μετάδοσης που ονομάζεται ορθογωνική πολύπλεξη με διαίρεση συχνότητας (Orthogonal Frequency Division Multiplexing - OFDM), η οποία χρησιμοποιεί αποδοτικά το φάσμα και εμφανίζει ανθεκτικότητα στην υποβάθμιση του ασύρματου σήματος. Η διαμόρφωση OFDM κωδικοποιεί μια ενιαία μετάδοση σε πολλαπλάσιους υπομεταφορείς. Συγκεκριμένα, μια ροή ψηφίων πληροφορίας διαχωρίζεται σε πολλές επιμέρους ροές που μεταδίδονται σε αντίστοιχο πλήθος υποδιαύλων. Επειδή τα φάσματα των υποφερουσών επικαλύπτονται, επιλέγεται οι υπο-φέρουσες συχνότητες να είναι ορθογώνιες μεταξύ τους. Κάθε υποδιαύλος έχει ρυθμό μετάδοσης και εύρος ζώνης που είναι υποπολλαπλάσια των αντίστοιχων συνολικών.

Το πρότυπο 802.11a λειτουργεί στη ζώνη των 5GHz. Τα bit αποστέλλονται παράλληλα σε 52 υπο-φορείς, από τους οποίους οι 48 χρησιμοποιούνται για δεδομένα και οι 4 για συγχρονισμό. Κάθε σύμβολο έχει διάρκεια 4μs και στέλνει 1, 2, 4 ή 6 bit. Τα bit κωδικοποιούνται πρώτα με ένα δυαδικό συνελικτικό κώδικα για διόρθωση σφαλμάτων, οπότε μόνο το 1/2, 2/3 ή 3/4 των bit δεν είναι πλεονάζοντα. Με τους διάφορους συνδυασμούς το 802.11a μπορεί να λειτουργήσει σε οκτώ διαφορετικές ταχύτητες, από 6 έως 54Mbps. Οι ταχύτητες αυτές είναι πολύ μεγαλύτερες από αυτές του 802.11b και



επίσης, υπάρχουν λιγότερες παρεμβολές στη ζώνη των 5GHz. Ανάλογα χαρακτηριστικά έχει και το πρότυπο 802.11g, που όμως λειτουργεί στη ζώνη των 2.4GHz.

Το 2009 επικυρώθηκε το πρότυπο 802.11n. Ο στόχος αυτού του προτύπου ήταν η επίτευξη διεκπεραιωτικής ικανότητας (throughput) τουλάχιστον 100Mbps. Για να γίνει αυτό, η επιτροπή αύξησε το πλάτος των καναλιών από 20 στα 40MHz και μείωσε την επιβάρυνση λόγω της πλαισίωσης, επιτρέποντας να στέλνονται μαζί ομάδες πλαισίων. Το πιο σημαντικό όμως είναι πως το 802.11n χρησιμοποιεί τέσσερις κεραιές για τη μετάδοση έως τεσσάρων ρευμάτων επικοινωνίας. Τα σήματα αυτά παρεμβάλλονται μεταξύ τους στον παραλήπτη, όμως μπορούν να διαχωριστούν με την τεχνική πολλαπλής εισόδου - πολλαπλής εξόδου (Multiple Input Multiple Output - MIMO).

Το πρότυπο 802.11ac κυκλοφόρησε το Δεκέμβρη του 2013. Η τεχνική του είναι αντίστοιχη με αυτή του 802.11n, με τη διαφορά ότι λειτουργεί αποκλειστικά στη ζώνη των 5GHz χρησιμοποιώντας κανάλια των 20, 40, 80 ή 160MHz και κάνει χρήση έως 8 ρευμάτων επικοινωνίας.

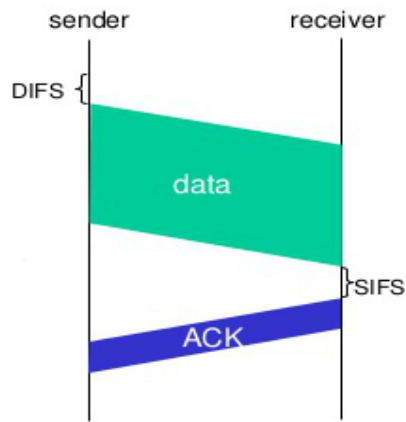
### **2.1.3 Το πρωτόκολλο MAC 802.11**

Εκτός από το φυσικό επίπεδο, το πρότυπο 802.11 προσδιορίζει και το υποεπίπεδο ελέγχου πρόσβασης στο μέσο (Media Access Control - MAC). Το υπόστρωμα MAC είναι υπεύθυνο για τη δέσμευση των καναλιών, τη διευθυνσιοδότηση των μονάδων δεδομένων πρωτοκόλλου, το σχηματισμό των πλαισίων, τον έλεγχο λαθών, τον τεμαχισμό και την επανασυναρμολόγηση των πακέτων.

#### **2.1.3.1 Πρόσβαση στο μέσο**

Ως μηχανισμός πρόσβασης στο μέσο χρησιμοποιείται η τεχνική της πολλαπλής προσπέλασης με ανίχνευση του φέροντος (Carrier Sense Multiple Access - CSMA). Η τεχνική βασίζεται στην ανίχνευση της κίνησης στο μέσο εκτελώντας έλεγχο πριν την έναρξη της μετάδοσης. Εφόσον το μέσο είναι ελεύθερο γίνεται μετάδοση, ενώ αν είναι κατειλημμένο απαιτείται αναμονή μέχρι να τερματιστεί η τρέχουσα σύνδεση. Σε αντίθεση με το ενσύρματο Ethernet, το 802.11 προσπαθεί να αποφύγει τις συγκρούσεις με την τεχνική αποφυγής συγκρούσεων (CSMA with Collision Avoidance - CSMA/CA) και όχι με την ανίχνευσή τους. Αυτό οφείλεται κυρίως στο γεγονός ότι η ισχύς του σήματος λήψης είναι πολύ μικρότερη από την ισχύ του μεταδιδόμενου στα ασύρματα δίκτυα.

Όταν ένας σταθμός σε ασύρματο LAN στείλει ένα πλαίσιο, το πλαίσιο αυτό μπορεί να μη φθάσει ανέπαφο στο σταθμό προορισμού. Για να αντιμετωπίσει αυτήν την αστοχία, το πρωτόκολλο MAC 802.11 χρησιμοποιεί το σχήμα επιβεβαίωσης επιπέδου ζεύξης (link layer acknowledgement). Όταν ο σταθμός προορισμού λαμβάνει ένα πλαίσιο, περιμένει επί ένα μικρό διάστημα που είναι γνωστό ως βραχεία διαπλαισιακή απόσταση (short inter-frame spacing - SIFS) και μετά αποστέλλει πίσω ένα πλαίσιο επιβεβαίωσης (ACK). Αν ο σταθμός μετάδοσης δεν λάβει μια επιβεβαίωση μέσα σε δεδομένο χρονικό διάστημα, υποθέτει ότι έχει συμβεί σφάλμα και αναμεταδίδει το πλαίσιο. Αν δεν ληφθεί το πλαίσιο μετά από συγκεκριμένο αριθμό αναμεταδόσεων, ο σταθμός μετάδοσης απορρίπτει το πλαίσιο.



Σχήμα 2.4 Επιβεβαίωση επιπέδου ζεύξης

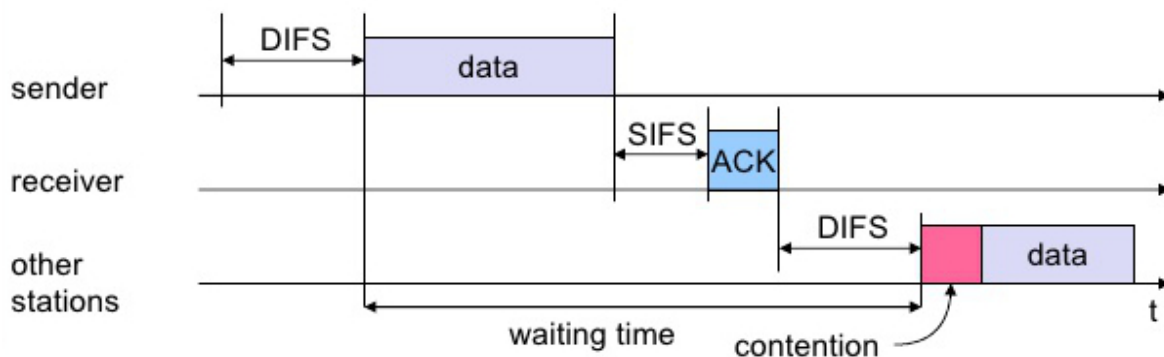
Κάνοντας την υπόθεση ότι κάποιος σταθμός θέλει να μεταδώσει ένα πλαίσιο, το CSMA/CA λειτουργεί ως εξής:

Αν ο σταθμός ανιχνεύσει αρχικά ότι το κανάλι είναι αδρανές, μεταδίδει το πλαίσιο του μετά από ένα διάστημα που ονομάζεται καταναμημένη διαπλαισιακή απόσταση (distributed inter-frame space - DIFS).

Αν το κανάλι δεν είναι διαθέσιμο, ο σταθμός “οπισθοχωρεί” επιλέγοντας μια τυχαία τιμή οπισθοχώρησης και αρχίζει να μετρά αντίστροφα από αυτήν την τιμή όταν ανιχνεύσει ότι το κανάλι είναι αδρανές.

Όταν ο μετρητής φθάσει στην τιμή μηδέν, ο σταθμός μεταδίδει το πλαίσιο και μετά αναμένει για επιβεβαίωση.

Αν ο σταθμός μετάδοσης λάβει επιβεβαίωση, γνωρίζει ότι το πλαίσιο του έχει ληφθεί σωστά.



Σχήμα 2.5 Μέθοδος CSMA/CA

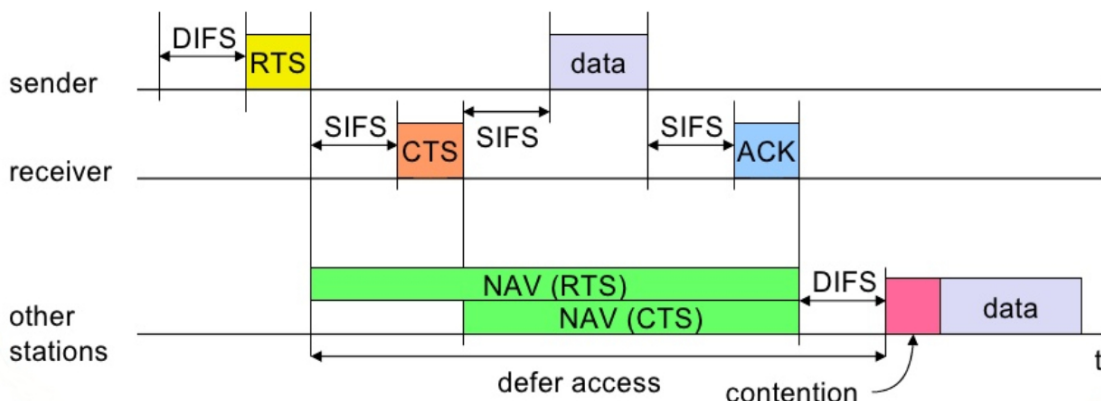
Υπάρχουν δύο υπηρεσίες για την παραχώρηση ασύρματου μέσου στο υπόστρωμα MAC: η λειτουργία καταναμημένου συντονισμού (Distributed Coordination Function - DCF) και η

λειτουργία συντονισμού από ένα σημείο (Point Coordination Function - PCF). Στην πρώτη λειτουργία, καθένας από τους σταθμούς λειτουργεί ανεξάρτητα χωρίς κάποια μορφή κεντρικού ελέγχου, ενώ στη δεύτερη υπάρχει ένα σημείο πρόσβασης που ελέγχει όλη τη δραστηριότητα. Η DCF έχει σχεδιαστεί για ασύγχρονη μετάδοση δεδομένων, όπου όλοι οι σταθμοί που θέλουν να μεταδώσουν δεδομένα έχουν ίσες ευκαιρίες για πρόσβαση στο δίκτυο. Η PCF είναι κατάλληλη για μεταφορά κίνησης που είναι ευαίσθητη σε καθυστερήσεις.

### 2.1.3.2 Αντιμετώπιση κρυμμένων τερματικών

Το πρωτόκολλο MAC 802.11 περιλαμβάνει ένα προαιρετικό σχήμα δέσμευσης που συμβάλλει στην αποφυγή συγκρούσεων ακόμα και στην περίπτωση των κρυμμένων τερματικών. Κρυμμένοι θεωρούνται δύο ή περισσότεροι ασύρματοι σταθμοί που αν και δεν βρίσκεται ο ένας μέσα στην εμβέλεια του άλλου, σχετίζονται και επικοινωνούν με το ίδιο AP. Αν, ενόσω κάποιος σταθμός μεταδίδει ένα πλαίσιο, ένας άλλος σταθμός θέλει να στείλει και αυτός ένα πλαίσιο στο AP, ο δεύτερος δεν έχει επίγνωση ότι υπάρχει ήδη κάποια μετάδοση που πραγματοποιείται. Έτσι, ο δεύτερος πρέπει να αναμείνει επί ένα διάστημα DIFS και μετά να μεταδώσει κι αυτός το πλαίσιό του.

Για να αποφευχθεί αυτό το πρόβλημα, το πρωτόκολλο 802.11 επιτρέπει σε ένα σταθμό να χρησιμοποιήσει ένα βραχύ πλαίσιο ελέγχου αίτησης για αποστολή (Request to Send - RTS) και ένα βραχύ πλαίσιο ελέγχου καθαρού προς αποστολή (Clear to Send - CTS), για να δεσμεύσει την προσπέλαση προς το κανάλι. Όταν ένας αποστολέας θέλει να στείλει ένα πλαίσιο δεδομένων, μπορεί να στείλει πρώτα ένα πλαίσιο RTS στο AP δηλώνοντας το συνολικό χρόνο που απαιτείται για τη μετάδοση του πλαισίου δεδομένων και του πλαισίου επιβεβαίωσης (ACK). Όταν το AP δεχθεί το πλαίσιο RTS, αποκρίνεται εκπέμποντας ένα πλαίσιο CTS, το οποίο δίνει στον αποστολέα ρητή άδεια να μεταδώσει και στους άλλους σταθμούς να μην μεταδώσουν για τη δεσμευμένη χρονική περίοδο.



Σχήμα 2.6 Αποφυγή σύγκρουσης με πλαίσια RTS και CTS

Αν και η ανταλλαγή RTS/CTS συμβάλλει στη μείωση των συγκρούσεων, εισάγει πρόσθετη καθυστέρηση και καταναλώνει πόρους του καναλιού. Για το λόγο αυτό, η ανταλλαγή RTS/CTS χρησιμοποιείται κυρίως για δέσμευση του καναλιού στη μετάδοση μεγάλου

πακέτου δεδομένων. Συνήθως, εισάγεται μια τιμή κατωφλίου RTS, ώστε τα πλαίσια RTS και CTS να ανταλλάσσονται μόνο όταν το μέγεθος των πλαισίων προς αποστολή είναι μεγαλύτερο από το κατώφλι.

### **2.1.3.3 Συσχέτιση**

Στο πρότυπο 802.11, κάθε ασύρματο τερματικό πρέπει να συσχετίζεται με ένα AP ώστε να μπορεί να στείλει και να δεχθεί δεδομένα. Κάθε AP διαθέτει ένα αναγνωριστικό συνόλου υπηρεσιών (Service Set Identifier - SSID) και έναν αριθμό καναλιού. Τα διαθέσιμα κανάλια προσδιορίζονται από την περιοχή συχνοτήτων στην οποία λειτουργεί το πρότυπο καθώς και από το εύρος ζώνης των καναλιών. Δύο κανάλια δεν είναι αλληλοεπικαλυπτόμενα εφόσον διαχωρίζονται από τέσσερα ή περισσότερα κανάλια.

Όταν ένα τερματικό εισέρχεται στην περιοχή ενός LAN μπορεί να λαμβάνει σήμα από πολλά AP. Για να αποκτήσει πρόσβαση στο Διαδίκτυο πρέπει να συσχετιστεί με μοναδικό AP, να δημιουργήσει δηλαδή μια σύνδεση με αυτό. Προκειμένου να συμβεί η συσχέτιση αυτή, τα AP στέλνουν περιοδικά σήματα ραδιοφάρου (beacon frames), το καθένα από τα οποία περιέχει το SSID και τη διεύθυνση MAC του AP. Το τερματικό σαρώνει τα διαθέσιμα κανάλια της περιοχής συχνοτήτων μέσα στην οποία λειτουργεί αναζητώντας πλαίσια ραδιοφάρου, λαμβάνει γνώση για τα διαθέσιμα AP και κατόπιν πραγματοποιείται η συσχέτιση. Αφού ο ασύρματος σταθμός συνδέεται στο υποδίκτυο στο οποίο ανήκει το AP, λαμβάνει μια διεύθυνση IP του υποδικτύου.

Η διαδικασία σάρωσης καναλιών και ακρόασης για πλαίσια ραδιοφάρου ονομάζεται παθητική σάρωση (passive scanning). Ένα ασύρματο τερματικό μπορεί επίσης να κάνει και ενεργή σάρωση (active scanning) εκπέμποντας ένα πλαίσιο βολιδοσκόπησης, το οποίο λαμβάνεται από όλα τα AP που βρίσκονται μέσα στην εμβέλεια του ασύρματου τερματικού. Τα AP αποκρίνονται στο πλαίσιο αίτησης με ένα πλαίσιο απόκρισης βολιδοσκόπησης και, στη συνέχεια, ο υπολογιστής μπορεί να επιλέξει με ποιο από τα AP που αποκρίθηκαν θα συσχετιστεί.

Η επανασυσχέτιση (reassociation) επιτρέπει σε ένα σταθμό να αλλάξει το σημείο πρόσβασης με το οποίο επικοινωνεί. Η λειτουργία αυτή είναι χρήσιμη για κινητούς σταθμούς που μετακινούνται από ένα σημείο πρόσβασης σε ένα άλλο μέσα στο ίδιο LAN και εκκινεί πάντα από τον κινητό σταθμό. Για τον τερματισμό μιας συσχέτισης εφαρμόζεται η λειτουργία της αποσυσχέτισης (dissociation), η οποία μπορεί να ξεκινήσει είτε από τον κινητό σταθμό είτε από το AP.

### **2.1.3.4 Αξιοπιστία και εξοικονόμηση ενέργειας**

Σε αντίθεση με τα ενσύρματα δίκτυα, τα ασύρματα δίκτυα χαρακτηρίζονται από θόρυβο και έχουν μειωμένη αξιοπιστία λόγω των παρεμβολών από άλλα είδη συσκευών που χρησιμοποιούν τις μη αδειοδοτούμενες ζώνες συχνοτήτων ISM. Μια στρατηγική για την αύξηση των επιτυχών μεταδόσεων είναι η ελάττωση της ταχύτητας μετάδοσης. Οι χαμηλότερες ταχύτητες χρησιμοποιούν περισσότερο εύρωστες τεχνικές ψηφιακής διαμόρφωσης, ώστε να καταστεί πιθανότερο να ληφθούν σωστά υπό δεδομένο λόγο

σήματος προς θόρυβο. Το μέτρο αυτό, όμως, κρίνεται μη αποδοτικό και δεν βρίσκει εφαρμογή στα σύγχρονα LAN.

Μια εναλλακτική στρατηγική για αύξηση της πιθανότητας επιτυχούς μετάδοσης είναι η αποστολή μικρότερων πλαισίων. Η υλοποίηση μικρότερων πλαισίων μπορεί να γίνει με ελάττωση του μέγιστου μεγέθους μηνύματος που θα γίνει αποδεκτό από το επίπεδο δικτύου. Εναλλακτικά, το πρότυπο 802.11 επιτρέπει στα πλαίσια να τεμαχίζονται σε μικρότερα τεμάχια (fragments), καθένα από τα οποία έχει το δικό του άθροισμα ελέγχου (checksum). Το άθροισμα ελέγχου είναι μια ακολουθία από bits που βρίσκεται στο τέλος κάθε πακέτου και χρησιμεύει στην εύρεση σφαλμάτων. Το μέγιστο μέγεθος των τεμαχίων δεν καθορίζεται από το πρότυπο, αλλά αποτελεί παράμετρο που μπορεί να καθοριστεί από το σημείο πρόσβασης. Τα τεμάχια αριθμούνται και επιβεβαιώνονται χωριστά μέσω ενός πρωτοκόλλου παύσης και αναμονής. Κατόπιν, αποστέλλονται το ένα μετά το άλλο με ενδιάμεσες επιβεβαιώσεις, μέχρι να μεταδοθεί ολόκληρο το πλαίσιο ή μέχρι να τελειώσει ο χρόνος μετάδοσης.

Η εξοικονόμηση ενέργειας είναι απαραίτητη σε όλες τις ασύρματες συσκευές που λειτουργούν με μπαταρίες. Ο βασικός μηχανισμός για το σκοπό αυτό βασίζεται στα πλαίσια ραδιοφάρου (beacon frames), τα οποία είναι περιοδικές μεταδόσεις από το σημείο πρόσβασης. Το πλαίσιο ραδιοφάρου υποδεικνύει την παρουσία του σημείου πρόσβασης στα τερματικά και μεταφέρει παραμέτρους του συστήματος όπως το αναγνωριστικό του σημείου πρόσβασης, την ώρα και τις ρυθμίσεις ασφαλείας. Τα τερματικά ενεργοποιούν ένα bit διαχείρισης ενέργειας στα πλαίσια που στέλνουν στο σημείο πρόσβασης ώστε να το ενημερώσουν για την κατάσταση εξοικονόμησης. Το AP αποθηκεύει προσωρινά την κυκλοφορία που προορίζεται για το συγκεκριμένο τερματικό. Για να ελέγξει την εισερχόμενη κυκλοφορία, το τερματικό αφυπνίζεται σε κάθε πλαίσιο ραδιοφάρου και ελέγχει το χάρτη κίνησης που αποστέλλεται με το πλαίσιο αυτό. Αν υπάρχει αποθηκευμένη πληροφορία, το τερματικό στέλνει στο AP ένα μήνυμα λήψης και το AP του αποστέλλει την αποθηκευμένη πληροφορία.

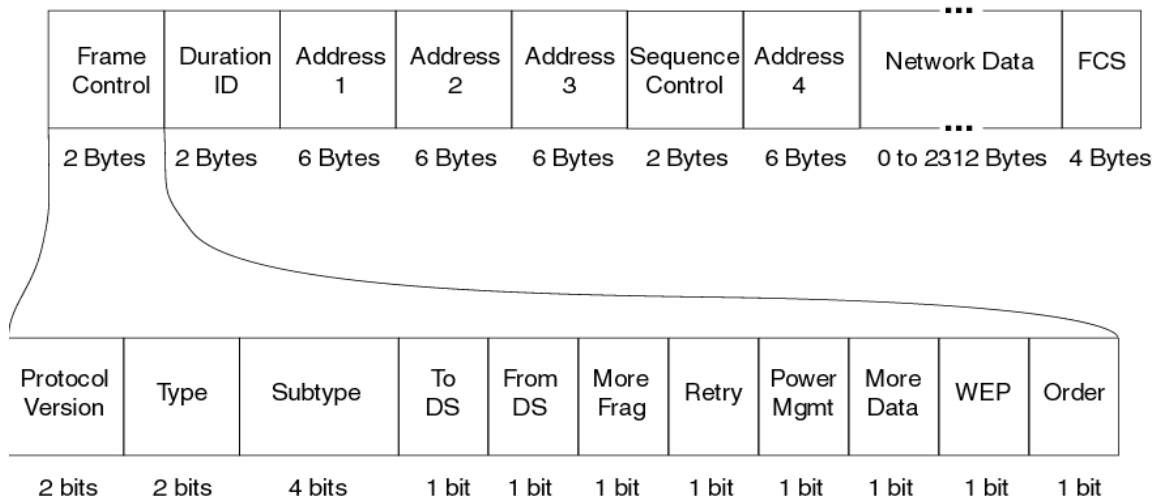
#### **2.1.4 Το πλαίσιο IEEE 802.11**

Το πρότυπο 802.11 ορίζει τρεις κατηγορίες πλαισίων: τα πλαίσια δεδομένων, ελέγχου και διαχείρισης. Κάθε μία από αυτές τις κατηγορίες έχει μια επικεφαλίδα με διάφορα πεδία που χρησιμοποιούνται στο υποεπίπεδο MAC.

Στον πυρήνα του πλαισίου δεδομένων βρίσκεται το ωφέλιμο φορτίο που έχει μήκος έως 2312 bytes. Το πρώτο πεδίο του πλαισίου είναι ο Έλεγχος Πλαισίου (Frame Control) το οποίο έχει 11 υποπεδία. Το πρώτο από αυτά είναι η Έκδοση Πρωτοκόλλου (Protocol Version), το οποίο έχει τιμή 00. Το πεδίο αυτό επιτρέπει την ταυτόχρονη λειτουργία στην ίδια κυψέλη μελλοντικών εκδόσεων του πρωτοκόλλου. Ακολουθούν τα πεδία Τύπος (Type) που αντιστοιχεί σε δεδομένα, έλεγχο ή διαχείριση και Δευτερεύων Τύπος (Subtype), όπως είναι τα RTS και CTS. Για τα πλαίσια δεδομένων χωρίς ποιότητα υπηρεσίας, τα πεδία αυτά έχουν τις τιμές 10 και 0000 αντίστοιχα. Τα bit Από DS και Προς DS δείχνουν ότι το πλαίσιο προέρχεται ή κατευθύνεται στο δίκτυο διανομής, που είναι συνδεδεμένο με το σημείο

πρόσβασης. Το bit Περισσότερα Τεμάχια (More Frag) δηλώνει ότι θα ακολουθήσουν και άλλα τεμάχια.

Το bit Επανάληψη (Retry) σημαίνει ότι υπάρχει αναμετάδοση ενός πλαισίου που στάλθηκε νωρίτερα. Ακολουθεί το bit Ισχύς (Power Mgmt) που χρησιμοποιείται για να δείξει ότι ο αποστολέας εισέρχεται σε κατάσταση εξοικονόμησης ενέργειας. Το bit Περισσότερα Δεδομένα (More Data) δηλώνει ότι ο αποστολέας έχει περισσότερα δεδομένα για τον παραλήπτη. Στη συνέχεια, το bit WEP υποδεικνύει ότι το σώμα του πλαισίου έχει κρυπτογραφηθεί για λόγους ασφαλείας. Τέλος, το bit Σειρά (Order) δηλώνει στον παραλήπτη ότι το υψηλότερο επίπεδο αναμένει ότι η ακολουθία πλαισίων θα φθάσει στην ορθή σειρά.



Σχήμα 2.7 Το πλαίσιο δεδομένων του IEEE 802.11

Το δεύτερο πεδίο του πλαισίου δεδομένων, το πεδίο Διάρκεια (Duration ID) δείχνει σε πόσα μς το πλαίσιο και η επιβεβαίωσή του θα δεσμεύσουν το κανάλι. Κατόπιν ακολουθούν τρία πεδία των 6bytes έκαστο. Το πρώτο είναι η διεύθυνση του παραλήπτη, το δεύτερο η διεύθυνση του αποστολέα και το τρίτο δείχνει τον τελικό προορισμό του πλαισίου. Το πεδίο Ακολουθία (Sequence Control) επιτρέπει την αρίθμηση των τεμαχίων. Ακολουθεί το πεδίο Δεδομένα, τα πρώτα byte του οποίου υποδεικνύουν το LLC που καθορίζει το επίπεδο υψηλότερου επιπέδου στο οποίο θα μεταβιβαστεί το ωφέλιμο φορτίο. Στο τέλος, βρίσκεται η Ακολουθία Ελέγχου Πλαισίου (Frame Control Sequence - FCS) που χρησιμοποιείται για τον έλεγχο σφαλμάτων.

Τα πλαίσια διαχείρισης έχουν σχεδόν ίδια μορφή με τα πλαίσια δεδομένων, ενώ τα πλαίσια ελέγχου είναι συντομότερα, αφού χρησιμοποιούν μόνο μια διεύθυνση και δεν έχουν τμήμα δεδομένων.

## 2.2 Σχεδιασμός ζώνης Wi-Fi

Με την αύξηση της διείσδυσης του Wi-Fi, ολοένα και περισσότεροι δημόσιοι χώροι προσφέρουν στους χρήστες smartphones και λοιπών φορητών έξυπνων συσκευών τη

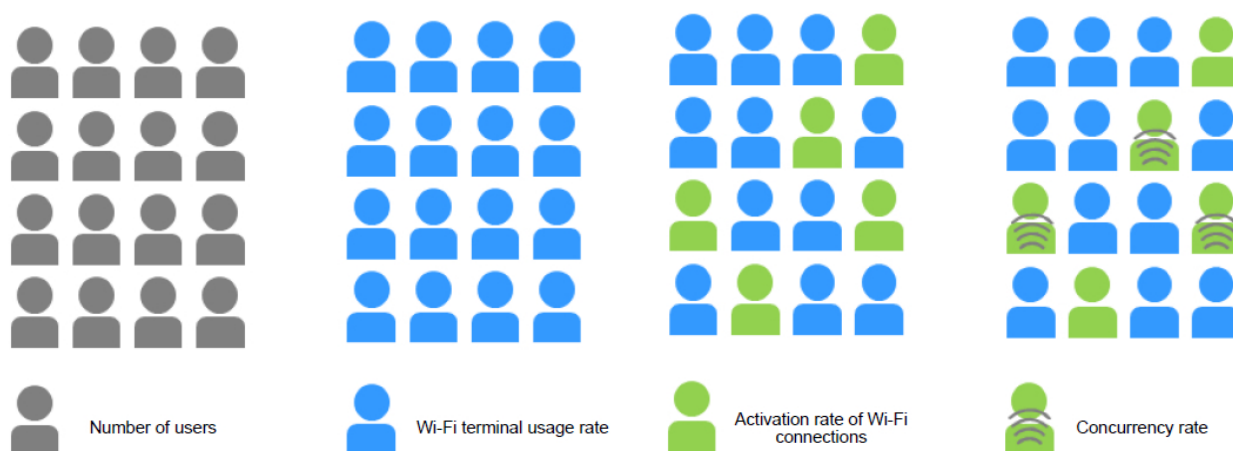
δυνατότητα να συνδέονται ανά πάσα στιγμή στο Διαδίκτυο. Οι αυξημένες απαιτήσεις των χρηστών, όμως, θέτουν ζητήματα κάλυψης και χωρητικότητας στο σχεδιασμό των δικτύων. Το απλοποιημένο μοντέλο του ενός hot-spot, που είναι συνηθισμένο σε μικρούς χώρους όπως οι κατοικίες, κρίνεται ανεπαρκές σε εκτεταμένους χώρους όπως τα ξενοδοχεία, τα στάδια, οι χώροι συναυλιών και τα αεροδρόμια. Σε αυτή την περίπτωση, απαιτείται η ανάπτυξη μιας ζώνης Wi-Fi.

Σε μια ζώνη Wi-Fi υπάρχουν περισσότερα από ένα σημεία πρόσβασης, τα οποία επικοινωνούν μεταξύ τους. Καθώς ένας χρήστης μετακινείται μέσα στη ζώνη Wi-Fi, έχει τη δυνατότητα να συσχετίζεται με διαφορετικά AP χωρίς να γίνεται διακοπή της σύνδεσής του. Το αποτέλεσμα είναι μια ευρύτερη περιοχή κάλυψης. Όταν μεγάλο πλήθος χρηστών συνυπάρχουν στην περιοχή εμβέλειας του δικτύου, είναι απαραίτητη η σχεδίαση του LAN με παραμέτρους υψηλής πυκνότητας (high density). Σε αυτές τις περιπτώσεις, τα AP μπορεί να τοποθετούνται ακόμα και με 10m απόσταση μεταξύ τους, ενώ το σύνηθες σενάριο είναι απόσταση από 20 έως 30m.

## 2.2.1 Μοντέλο υπηρεσιών

### 2.2.1.1 Πλήθος συνυπαρχόντων χρηστών

Οι έξυπνες συσκευές τεχνολογίας έχουν διεισδύσει στην καθημερινότητα μεγάλου μέρους του πληθυσμού. Σχεδόν το σύνολο όλων αυτών των τερματικών υποστηρίζουν λειτουργίες Wi-Fi. Για τη σχεδίαση ενός ασύρματου LAN 802.11 είναι απαραίτητη η εκτίμηση του πλήθους των χρηστών του δικτύου. Από όλα τα τερματικά που υποστηρίζουν Wi-Fi και βρίσκονται στην εμβέλεια ενός LAN, μόνο ένα μέρος έχει ενεργές σύνδεσεις στο δίκτυο. Οι συνδέσεις αυτές μπορεί να είναι ταυτόχρονες ή όχι. Ο αριθμός των χρηστών που πραγματοποιούν ταυτόχρονη σύνδεση είναι ιδιαίτερα σημαντικός για τη σχεδίαση του δικτύου.



Σχήμα 2.8 Παράδειγμα πλήθους συνολικών, ενεργών και ταυτόχρονων χρηστών στο δίκτυο

Από το συνολικό πληθυσμό χρηστών που εισέρχονται στην περιοχή κάλυψης ενός δικτύου, μόνο ένα μέρος χρησιμοποιεί συσκευές που υποστηρίζουν τεχνολογία Wi-Fi. Στο Σχ.2.8 ο αριθμός των χρηστών του δικτύου ταυτίζεται με τον αριθμό των συσκευών που μπορούν να συνδεθούν σε ασύρματο LAN, δηλαδή κάθε χρήστης φέρει συσκευή τεχνολογίας Wi-Fi. Οι χρήστες που πραγματοποιούν συσχέτιση με κάποιο AP είναι λιγότεροι από αυτούς που φέρουν συσκευή τεχνολογίας Wi-Fi, ενώ οι ενεργοί χρήστες είναι ένα μικρότερο ποσοστό επί των συσχετισμένων χρηστών.

### **2.2.1.2 Τύπος τερματικών**

Βάσει των τεχνολογιών πρόσβασης στο Δίκτυο που υποστηρίζουν, υπάρχουν πολλά είδη τερματικών που χρησιμοποιούνται σήμερα. Πολλές συσκευές είναι βασισμένες στα πρότυπα 802.11b/g που θεωρούνται παρωχημένα, ενώ οι πλέον πρόσφατες βασίζονται στα 802.11n/ac. Επίσης, τα τερματικά μπορεί να διαφέρουν ως προς τη συχνότητα λειτουργίας. Ορισμένα είναι σχεδιασμένα να λειτουργούν αποκλειστικά σε μία συχνότητα, ενώ άλλα σε δύο. Καθώς υπάρχει διαφορά στην απόδοση μεταξύ των διαφόρων τύπων τερματικών, ο σχεδιασμός ενός δικτύου πρέπει να συνυπολογίζει τον παράγοντα αυτό, καθώς επηρεάζει τη χωρητικότητα των σημείων πρόσβασης.

Συγκεκριμένα, τα τερματικά που λειτουργούν σε χαμηλότερους ρυθμούς (low-rate) χρειάζονται περισσότερο χρόνο για να μεταδώσουν το ίδιο πακέτο, σε σχέση με αυτά που λειτουργούν σε υψηλότερο ρυθμό (high-rate). Τα AP που συνδέονται με low-rate τερματικά προσφέρουν μικρότερη χωρητικότητα συγκριτικά με τη σύνδεση με high-rate τερματικά. Όσο μεγαλύτερο είναι το ποσοστό των χρηστών με συσκευές παλαιότερης τεχνολογίας, τόσο μικρότερη είναι η χωρητικότητα ενός AP, δηλαδή ο αριθμός των τερματικών που εξυπηρετούνται από το AP. Επομένως, ο ίδιος αριθμός low-rate τερματικών απαιτεί περισσότερα AP ώστε να παρέχουν το ίδιο εύρος ζώνης σε όλους τους χρήστες.

Σχετικά με τη συχνότητα λειτουργίας, τα περισσότερα AP που είναι διαθέσιμα στην αγορά λειτουργούν και στις δύο ζώνες συχνοτήτων των 2.4 και 5GHz. Όταν περισσότερα από τα μισά τερματικά που είναι συνδεδεμένα σε ένα δίκτυο υποστηρίζουν και τις δύο ζώνες συχνοτήτων λειτουργίας, χρησιμοποιώντας AP που υποστηρίζουν και αυτά και τις δύο ζώνες συχνοτήτων, επιτυγχάνεται διπλασιασμός της χωρητικότητας κάλυψης. Αυτό συμβαίνει επειδή η συχνότητα των 5GHz αξιοποιείται πλήρως και γίνεται κατανομή των τερματικών και στις δύο συχνότητες.

### **2.2.1.3 Είδος υπηρεσίας**

Μια σημαντική παράμετρος για τον σχεδιασμό ενός δικτύου είναι το είδος των υπηρεσιών που θα προσφέρονται στους χρήστες, δηλαδή η κατηγορία εφαρμογών καθώς και η απαιτήσες τους σε ταχύτητα μετάδοσης δεδομένων και ποιότητα υπηρεσίας (Quality of Service - QoS). Η ανάπτυξη υπηρεσιών και εφαρμογών αξιοποιεί τις ενισχυμένες δυνατότητες των κινητών συσκευών και τη διαρκή εξέλιξη στις τεχνολογίες δικτύων παρέχοντας εφαρμογές υψηλής ποιότητας και αυξημένων δυνατοτήτων. Οι



απαιτητικότερες υπηρεσίες ως προς την ταχύτητα μετάδοσης χρειάζονται περισσότερους τηλεπικοινωνιακούς πόρους ανά χρήστη. Υπάρχει μεγάλη απόκλιση μεταξύ των ταχυτήτων που απαιτούνται από τις διαφορετικές υπηρεσίες που παρέχονται στους χρήστες, ξεκινώντας από μερικά Kbps και φθάνοντας τα δεκάδες Mbps για υπηρεσίες βίντεο υψηλής ποιότητας.

Application Class	Required Throughput
Web-browsing/email	500 Kbps–1 Mbps
Video Conferencing (example: WebEx)	384 Kbps–1 Mbps
SD video streaming (example: Netflix , Hulu )	1–1.5 Mbps
HD video streaming (example: Netflix, Hulu)	2–5 Mbps
Apple TV streaming	2.5–8 Mbps
Apple FaceTime	900 Kbps
YouTube video streaming	500 Kbps
Printing	1 Mbps
File Sharing	5 Mbps
E-Learning and Online Testing	2–4 Mbps
Thin-client (example: RDP , XenDesktop )	85–150 Kbps
Thin-client (with video or printing)	600–1,800 Kbps
Thin-apps (example: XenApp )	20 Kbps (per App)
Device Backups (example: cloud services)	Uses available bandwidth
VoIP Call Signaling (example: SIP)	5 Kbps
VoIP Call Stream (codec dependent)	27–93 Kbps

Πίνακας 2.2 Διεκπεραιωτική ικανότητα για την εξυπηρέτηση διαφόρων εφαρμογών

## 2.2.2 Χωρητικότητα και κάλυψη

### 2.2.2.1 Εκτίμηση παραμέτρων σημείων πρόσβασης

Εφόσον προσδιοριστούν οι απαιτήσεις του συστήματος βάσει του μοντέλου υπηρεσιών, μπορεί να εκτιμηθεί η απαιτούμενη χωρητικότητα των σημείων πρόσβασης και δευτερευόντως το πλήθος τους. Η πρόβλεψη επιτυγχάνεται εκτιμώντας το φόρτο του δικτύου, δηλαδή τη χρονική διάρκεια μετάδοσης που απαιτείται για να επιτευχθεί η ζητούμενη διεκπεραιωτική ικανότητα για συγκεκριμένο είδος εφαρμογής.

Αρχικά υπολογίζεται το ποσοστό της χωρητικότητας ενός AP για κάθε μία συσκευή που εξυπηρετεί συγκεκριμένη εφαρμογή. Αυτό προκύπτει διαιρώντας τον απαιτούμενο ρυθμό μετάδοσης δεδομένων της εφαρμογής με τη μέγιστη διεκπεραιωτική ικανότητα της συσκευής. Ο υπολογισμός επαναλαμβάνεται για κάθε τύπο συσκευής στο δίκτυο συνδυαστικά με όλα τα δυνατά είδη εφαρμογών. Κατόπιν, για τον υπολογισμό του απαιτούμενου πλήθους AP, αρκεί ένας πολλαπλασιασμός μεταξύ του πλήθους των συσκευών συγκεκριμένου τύπου, με το ποσοστό της χωρητικότητας που καταναλώνει η συσκευή. Αν η πράξη εκτελεστεί για κάθε τύπο συσκευής, προκύπτει ο συνολικός αριθμός AP που θα χρειαστεί το δίκτυο. Ο αριθμός αυτός πρέπει να προσαρμοστεί με βάση (i) την εκτίμηση του αριθμού των χρηστών που θα χρησιμοποιούν ταυτόχρονα το LAN και (ii) αν τα AP υποστηρίζουν μία ή δύο συχνότητες λειτουργίας.

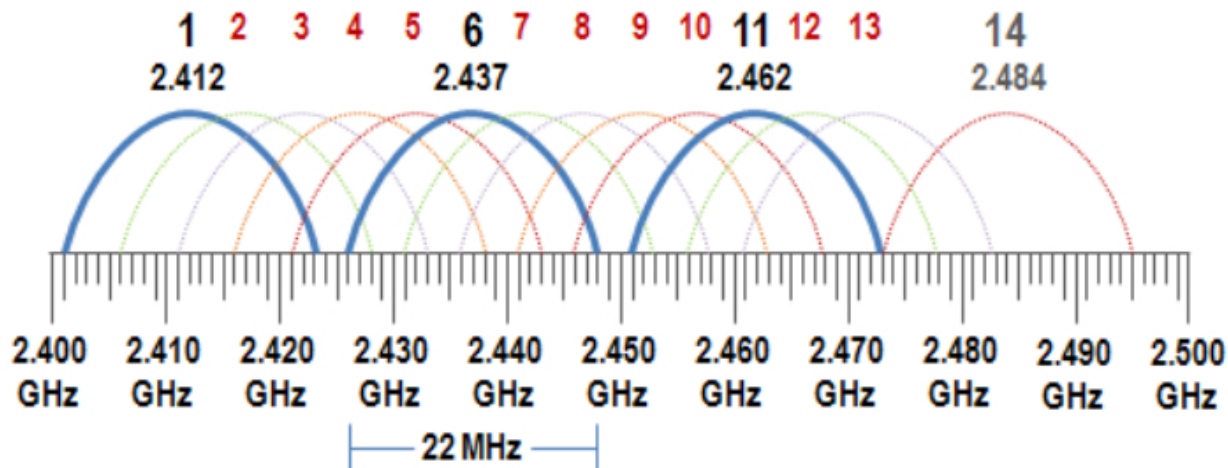
### 2.2.2.2 Επιλογή ζώνης συχνοτήτων

Ένα συνεκτικό ασύρματο δίκτυο απαιτεί αλληλοεπικάλυψη ανάμεσα σε γειτονικές κυψέλες ώστε να εξασφαλίσει ότι οι υπηρεσίες θα προσφέρονται στους χρήστες χωρίς διακοπές καθώς αυτοί μετακινούνται στο χώρο του δικτύου. Η ανάγκη της αλληλοεπικάλυψης γίνεται επιτακτική στα ασύρματα δίκτυα υψηλής πυκνότητας όπου οι απαιτήσεις σε χωρητικότητα είναι αρκετά μεγάλες, λόγω του μεγάλου πλήθους χρηστών. Όλοι οι σταθμοί Wi-Fi, συμπεριλαμβανομένων και των σημείων πρόσβασης, που λειτουργούν στην ίδια συχνότητα πρέπει να ανταγωνιστούν μεταξύ τους για τη διάρκεια μετάδοσης (airtime). Συνεπώς, η τοποθέτηση πολλών AP που λειτουργούν στο ίδιο κανάλι, δηλαδή στην ίδια ακριβώς συχνότητα, μέσα στην ίδια περιοχή υπηρεσιών δεν αυξάνει τη χωρητικότητα του συστήματος. Αντιθέτως, έχει αρνητικά αποτελέσματα αφού αυξάνει τις συγκρούσεις για το μέσο και επομένως μειώνει τη χωρητικότητα.

Είναι ιδιαίτερα κρίσιμο οι γειτονικές νησίδες Wi-Fi να λειτουργούν σε διαφορετικές συχνότητες, ώστε να αποφεύγονται οι συγκρούσεις για το μέσο και να αυξάνεται η χωρητικότητα του δικτύου. Η λειτουργία γειτονικών AP στην ίδια συχνότητα, προκαλεί συχνά παρεμβολές στην επικοινωνία καθώς τα AP ανταγωνίζονται για τη διεκδίκηση του καναλιού. Το φαινόμενο αυτό ονομάζεται διακαναλική παρεμβολή (Co-Channel Interference - CCI) και μπορεί να αποφευχθεί με το σωστό σχεδιασμό του δικτύου. Οι σταθμοί Wi-Fi που λειτουργούν σε μη επικαλυπτόμενες ζώνες συχνοτήτων δεν μπορούν να μεταδώσουν ο ένας προς τον άλλο και είναι λιγότερο πιθανό οι μεταδόσεις τους να ανταγωνιστούν για το μέσο. Στην πραγματικότητα, με την ομαδοποίηση των Wi-Fi σταθμών σε διαφορετικές ζώνες συχνοτήτων, οι συγκρούσεις ελαχιστοποιούνται, με αποτέλεσμα ο ανταγωνισμός για το μέσο να διαμοιράζεται σε μικρότερη ομάδα σταθμών οδηγώντας σε αύξηση της χωρητικότητας μέσα στη νησίδα, δηλαδή τη φυσική περιοχή κάλυψης ενός AP.

Το πρότυπο 802.11 λειτουργεί στις περιοχές συχνοτήτων 2.4GHz και 5GHz. Η ζώνη συχνοτήτων των 2.4GHz παρέχει τρία μη επικαλυπτόμενα κανάλια του εύρους των 20MHz που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για Wi-Fi συστήματα. Αν ο σχεδιασμός του LAN απαιτεί υψηλή πυκνότητα για την παροχή υπηρεσιών σε μεγάλο αριθμό χρηστών, η ζώνη συχνοτήτων αυτή κρίνεται ακατάλληλη, καθώς τα τρία κανάλια δεν επαρκούν στην περίπτωση όπου τα AP είναι γειτονικά με αλληλοεπικαλυπτόμενες περιοχές. Για να

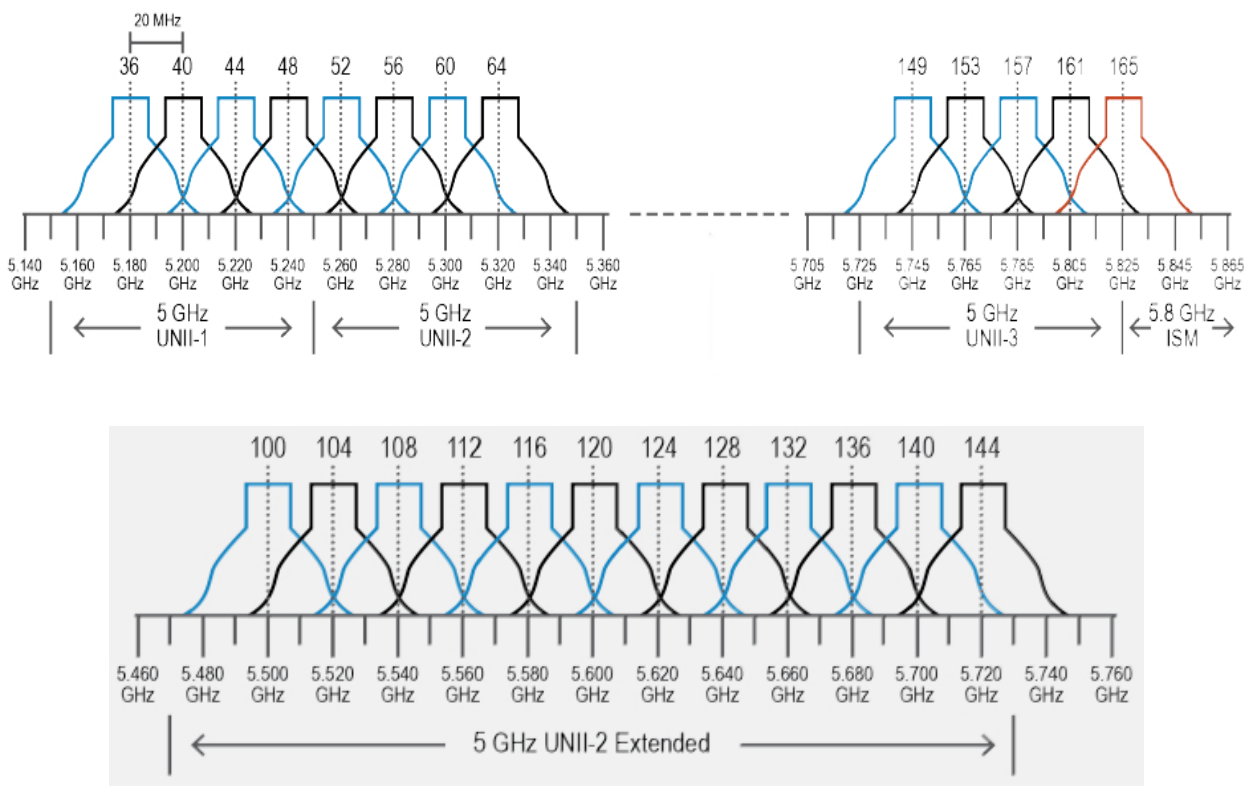
αποφευχθούν οι συγκρούσεις όταν το δίκτυο είναι υψηλής πυκνότητας, επιτρέπεται η χρησιμοποίηση μικρού αριθμού AP της συχνότητας των 2.4GHz μέσα σε μια περιοχή κάλυψης.



Σχήμα 2.9 Χωρητικότητα της συχνότητας των 2.4GHz

Η ζώνη συχνοτήτων των 5GHz περιλαμβάνει 23 κανάλια εύρους 20MHz, ενώ με τις εκτεταμένες εκδόσεις φθάνει τα 25 κανάλια. Σε αντίθεση με τη ζώνη συχνοτήτων των 2.4GHz, η ζώνη συχνοτήτων των 5GHz προσφέρει πολύ μεγαλύτερη φασματική χωρητικότητα για δίκτυα Wi-Fi. Τα AP που λειτουργούν στο ίδιο κανάλι βρίσκονται σε μεγαλύτερη απόσταση μεταξύ τους, μειώνοντας έτσι τον κίνδυνο συγκρούσεων. Σε περίπτωση δικτύων με μεγάλη πυκνότητα, η χρήση της ζώνης συχνοτήτων των 5GHz είναι καταλληλότερη καθώς τα AP μπορούν να τοποθετηθούν αρκετά κοντά και να λειτουργούν σε διαφορετικά κανάλια. Η υψηλότερη συχνότητα γενικά επιτρέπει τη μετάδοση περισσότερης πληροφορίας, όμως ένα ακόμα χαρακτηριστικό της είναι ότι χρησιμοποιεί κύματα RF με μικρότερο μήκος κύματος σε σχέση με την περιοχή των 2.4GHz, τα οποία είναι δυσκολότερο να διαπεράσουν τοίχους ή άλλα στερεά αντικείμενα. Το γεγονός αυτό λειτουργεί θετικά στο θέμα της αντιμετώπισης των παρεμβολών αλλά είναι αρνητικό για τις περιπτώσεις όπου απαιτείται μεγαλύτερη κάλυψη με λιγότερα AP.

Η ζώνη συχνοτήτων των 5GHz εκτείνεται από 5.15GHz έως 5.925GHz και διαιρείται σε υποπεριοχές, με τη ζώνη των 5.35-5.47GHz να μην παραχωρείται για μη αδειοδοτούμενη χρήση.



Σχήμα 2.10 Χωρητικότητα της συχνότητας 5GHz

### 2.2.2.3 Κανάλια και χωρικά ρεύματα

Ένας επιπλέον παράγοντας που επηρεάζει τη φασματική χωρητικότητα, δηλαδή το πλήθος των καναλιών που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τον σχεδιασμό μιας ζώνης Wi-Fi, είναι το πλάτος των καναλιών. Στη ζώνη συχνοτήτων των 5GHz είναι διαθέσιμο ένα σημαντικό πλήθος καναλιών και η σύνδεσή τους αποτελεί μια κοινή τεχνική για την αύξηση της χωρητικότητας μιας νησίδας. Το πρότυπο 802.11n εισήγαγε κανάλια εύρους ζώνης 40MHz με σκοπό την αύξηση του εύρους ζώνης και της διεκπεραιωτικής ικανότητας κάθε κυψέλης. Το πρότυπο το 801.11ac που ακολούθησε, επιτρέπει τη χρήση ακόμα ευρύτερων καναλιών εύρους 80 και 160MHz, παρέχοντας έτσι ταχύτητες της τάξης μερικών Gbps.

Η αύξηση του εύρους των καναλιών είναι ιδιαίτερα δελεαστική καθώς επιφέρει αντίστοιχα αποτελέσματα στο μέγιστο ρυθμό μετάδοσης δεδομένων και στη διεκπεραιωτική ικανότητα. Εντούτοις, η χρήση καναλιών μεγάλου εύρους ενδείκνυται σε περιπτώσεις δικτύων όπου δεν απαιτούνται πολλά AP, όπως τα οικιακά LAN. Σε δίκτυα υψηλής πυκνότητας, η αναχρησιμοποίηση και ο διαχωρισμός των καναλιών είναι μεγαλύτερης σημασίας από την επίτευξη υψηλών ταχυτήτων, οπότε προτιμώνται περισσότερα κανάλια με μικρότερο εύρος.

Το εύρος ζώνης των καναλιών σε συνδυασμό με το σχήμα διαμόρφωσης που χρησιμοποιείται και το πλήθος των χωρικών ρευμάτων (spatial streams) καθορίζουν τις ταχύτητες μετάδοσης. Κατά την εξέλιξη των προτύπων 802.11 σημειώθηκε σημαντική αύξηση στις μέγιστες ταχύτητες μετάδοσης δεδομένων, καθώς επίσης και στη

διεκπεραιωτική ικανότητα (πραγματικός ρυθμός μετάδοσης). Η διαμόρφωση MQAM (Multiple Quadrature Amplitude Modulation) είναι αυτή που προσφέρει υψηλότερη φασματική απόδοση από τις άλλες μεθόδους και αυξημένους ρυθμούς μετάδοσης.

	Εύρος ζώνης (MHz)	Αριθμός Διαδρομών	Διαμόρφωση	Μέγιστος Ρυθμός Μετάδοσης (Mbps)	Διεκπεραιωτική Ικανότητα (Mbps)
802.11a	20	1	64QAMr3/4	54	24
802.11n	20	1	64QAMr5/6	65	46
802.11n	40	4	64QAMr5/6	600	420
802.11ac	80	1	64QAMr5/6	293	210
802.11ac	80	8	256QAMr5/6	3470	2400
802.11ac	160	1	256QAMr5/6	867	610
802.11ac	160	8	256QAMr5/6	6930	1900

Πίνακας 2.3 Σημαντικοί ρυθμοί μετάδοσης των προτύπων 802.11 a/n/ac

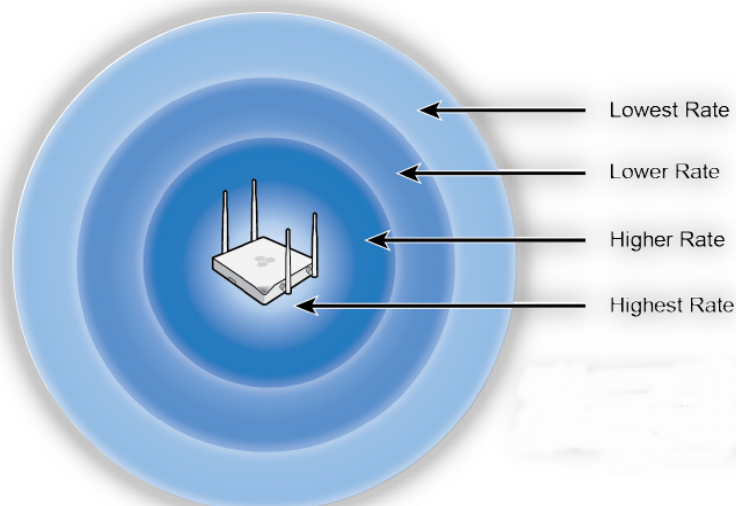
Το πρότυπο 802.11n εισήγαγε για πρώτη φορά την τεχνική MIMO, η οποία κάνει χρήση πολλαπλών κεραιών εκπομπής και λήψης RF σημάτων για τη βελτίωση της επικοινωνίας και της χωρητικότητας του δικτύου. Η τεχνική της διαφορικής μετάδοσης χώρου (space diversity) προσφέρει τη δυνατότητα στο λήπτη να δέχεται σήματα από πολλαπλές κεραιές, βελτιώνοντας την αξιοπιστία των λαμβανόμενων δεδομένων και την ποιότητα της επικοινωνίας. Η τεχνολογία της χωρικής πολυπλεξίας (spatial multiplexing) επιτρέπει σε ένα αποστολέα να διαιρέσει το σήμα σε περισσότερα σήματα, τα οποία εκπέμπονται από πολλαπλές κεραιές. Με αυτόν τον τρόπο, αυξάνεται η χωρητικότητα χωρίς να απαιτούνται περισσότεροι φασματικοί πόροι. Τα παράλληλα χωρικά κανάλια μέσω των οποίων μεταδίδεται το διαχωρισμένο σήμα καλούνται χωρικά ρεύματα (spatial streams). Ο αριθμός των χωρικών ρευμάτων ταυτίζεται συνήθως με τον αριθμό των κεραιών που χρησιμοποιούνται σε πομπό και δεκτη.

Το πρότυπο 802.11n επιτρέπει μέχρι τέσσερις διαδρομές, ενώ το πιο πρόσφατο 802.11ac κάνει χρήση μέχρι και οκτώ διαδρομών, με αποτέλεσμα να παρέχει ρυθμούς μετάδοσης που φθάνουν τα 10Gbps.

#### 2.2.2.4 Ισχύς και ποιότητα σήματος

Για τη βέλτιστη λειτουργία ενός δικτύου, οι χρήστες πρέπει να συνδέονται στα σημεία πρόσβασης με το μεγαλύτερο δυνατό ρυθμό μετάδοσης δεδομένων. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα να μεγιστοποιείται η διεκπεραιωτική ικανότητα των εφαρμογών και άρα να μειώνεται ο χρόνος μετάδοσης για κάθε χρήστη. Εφόσον οι χρήστες διαμοιράζονται τους πόρους ενός καναλιού και βρίσκονται ο ένας μέσα στην εμβέλεια του άλλου, ο μικρός

χρόνος μετάδοσης για κάθε χρήστη επιτρέπει σε περισσότερους χρήστες να εξυπηρετηθούν από το ίδιο κανάλι ή να αυξηθεί η διεκπεραιωτική ικανότητα για τους ήδη υπάρχοντες.



Σχήμα 2.11 Ρυθμός μετάδοσης δεδομένων εναντίον εύρους κάλυψης

Με τη διαδικασία της επιλογής προσαρμοσμένου ρυθμού οι χρήστες του δικτύου επιτυγχάνουν τον υψηλότερο ρυθμό μετάδοσης δεδομένων όταν έχουν το ισχυρότερο σήμα από και προς το σημείο πρόσβασης με τις μικρότερες παρεμβολές. Κάθε τερματικό συνοδεύεται από προδιαγραφές σχετικά με την ευαισθησία του δέκτη του, που προσδιορίζουν την ισχύ λήψης που απαιτείται ώστε να επιτευχθούν διάφοροι ρυθμοί μετάδοσης. Ο λόγος σήματος προς θόρυβο (signal to noise ratio - SNR) είναι ένα σχετικό μέτρο της ισχύος του σήματος λήψης και του θορύβου. Πολλοί κατασκευαστές συσκευών προτείνουν ελάχιστη ισχύ σήματος λήψης μεταξύ -65 και -67dBm με SNR 25 έως 30dB για να επιτύχουν την καλύτερη απόδοση.

Τα δίκτυα υψηλής πυκνότητας πρέπει να είναι σχεδιασμένα έτσι ώστε να διασφαλίζουν ότι ο χρήστης λαμβάνει ισχυρό σήμα από δύο σημεία πρόσβασης και από μη επικαλυπτόμενα κανάλια, ώστε να είναι εγγυημένη η ποιότητα υπηρεσίας καθώς αυτός κινείται. Όσο εγγύτερα βρίσκεται το τερματικό στο σημείο πρόσβασης τόσο ισχυρότερο σήμα λαμβάνει, ενώ όσο μεγαλώνει η εμβέλεια, το σήμα λήψης εξασθενεί. Καθώς ο χρήστης απομακρύνεται από ένα AP και η ισχύς του σήματος πλησιάζει το κατώφλι των -67dBm, πρέπει να βρεθεί εντός της εμβέλειας εναλλακτικού AP το οποίο θα συνεχίσει να του παρέχει ικανό σήμα λήψης.

Για την καλύτερη εξυπηρέτηση των χρηστών μέσω της επίτευξης υψηλών ρυθμών μετάδοσης δεδομένων, ο σχεδιαστής του δικτύου έχει τη δυνατότητα να “απενεργοποιήσει” τους χαμηλούς ρυθμούς μετάδοσης δεδομένων. Σε αυτήν την περίπτωση, το τερματικό αναζητεί συνεχώς το AP που θα του εξασφαλίσει υψηλότερους ρυθμούς μετάδοσης. Επομένως, η χρήση των ρυθμών μετάδοσης του προτύπου 802.11b πρέπει να αποφεύγεται, καθώς χρησιμοποιείται η διαμόρφωση DSSS, η οποία καταναλώνει

περισσότερους πόρους από την πλέον πρόσφατη OFDM. Ωστόσο, αν έστω ένα τερματικό της τεχνολογίας 802.11b πρέπει να εξυπηρετηθεί από το δίκτυο, αυτό πρέπει να είναι σε θέση να το ικανοποιήσει.

### **2.2.2.5 Ελαχιστοποίηση διακαναλικής παρεμβολής**

Η διακαναλική παρεμβολή είναι από τις σημαντικότερες αιτίες μειωμένης απόδοσης και χωρητικότητας στα ασύρματα LAN και συμβαίνει όταν διασταυρώνονται οι μεταδόσεις από δύο διαφορετικούς σταθμούς που χρησιμοποιούν το ίδιο κανάλι. Παρατηρείται στις περιπτώσεις όπου πραγματοποιούνται διαφορετικές μεταδόσεις, χρησιμοποιώντας κανάλι της ίδιας συχνότητας και επομένως τους ίδιους πόρους. Ο σχεδιασμός του δικτύου πρέπει να γίνεται συνυπολογίζοντας την παράμετρο της διακαναλικής παρεμβολής, ώστε να επιτυγχάνεται αποτελεσματικός διαμοιρασμός του χρόνου μετάδοσης και της χωρητικότητας μεταξύ των AP. Η προσθήκη σημείων πρόσβασης σε ένα ασύρματο δίκτυο δεν αυξάνει απαραίτητα τη χωρητικότητα του δικτύου καθώς αν τα AP μοιράζονται το ίδιο κανάλι και βρίσκεται το ένα εντός της εμβέλειας του άλλου, η χωρητικότητα θα διαμοιραστεί ανάμεσα στα δύο AP. Αντιθέτως, αν τα πρόσθετα AP λειτουργούν σε κανάλια μη επικαλυπτόμενα με τα γειτονικά τους, η χωρητικότητα του δικτύου θα αυξηθεί. Η θέσπιση ενός σχεδίου καναλιών που ελαχιστοποιεί τη διακαναλική παρεμβολή είναι σημαντικά ευκολότερη στη ζώνη συχνοτήτων των 5GHz, καθώς προσφέρει περισσότερα κανάλια για χρήση συγκριτικά με τη ζώνη συχνοτήτων των 2.4GHz.

Η περιοχή εμβέλειας ενός AP ορίζεται από την ελάχιστη ισχύ λήψης των -67dBm. Αυτό σημαίνει ότι ο σχεδιασμός αλληλοεπικαλυπτόμενων Wi-Fi νησίδων γειτονικών AP πρέπει να γίνεται σε διαφορετικά κανάλια μέσα σε εμβέλεια ισχύος -67dBm ή μεγαλύτερης. Επιπλέον, το εύρος διαμάχης για σημεία πρόσβασης που λειτουργούν στο ίδιο κανάλι είναι από -67 έως -85dBm, δηλαδή η διακαναλική παρεμβολή υφίσταται σε μεγαλύτερη απόσταση από την περιοχή συσχέτισης των χρηστών με τα AP. Επομένως, ο σχεδιασμός ζώνης Wi-Fi πρέπει να γίνεται με τρόπο ώστε να ελαχιστοποιείται η διακαναλική παρεμβολή μεταξύ των AP που λειτουργούν στο ίδιο κανάλι για ισχύ κάτω των -85dBm.

### **2.2.2.6 Χαρακτηριστικά εγκαταστάσεων τοποθέτησης δικτύου Wi-Fi**

Κατά το σχεδιασμό ενός δικτύου Wi-Fi, ιδιαίτερης σημασίας είναι η συνεκτίμηση των χαρακτηριστικών των εγκαταστάσεων στις οποίες θα τοποθετηθούν οι ασύρματες υπηρεσίες. Η διάδοση των RF σημάτων καθώς και η εξασθένησή τους επηρεάζονται σημαντικά από τα υλικά που χρησιμοποιούνται για την κατασκευή των κτιρίων. Επομένως η σχεδίαση ενός ασύρματου LAN είναι διαφορετική για κλειστούς χώρους, για περιοχές με μεγάλους ανοικτούς χώρους και για εξωτερικούς χώρους.

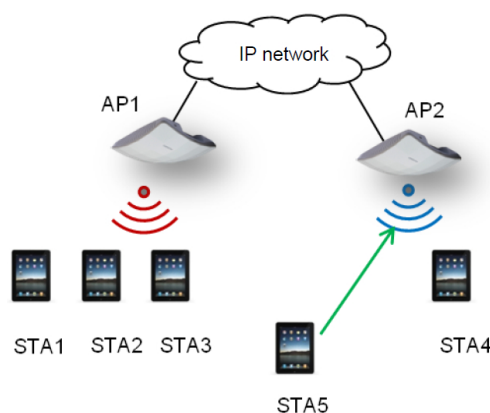
Στους μικρούς εσωτερικούς χώρους οι οποίοι είναι κατασκευασμένοι από υλικά που απορροφούν εύκολα τα RF σήματα και προκαλούν μεγάλη εξασθένηση, ενδείκνυται η αναχρησιμοποίηση ενός καναλιού από διαφορετικά AP, αφού ο κίνδυνος παρεμβολών ελαττώνεται. Αντιθέτως, σε ανοικτούς χώρους δεν υπάρχει σημαντική εξασθένηση των RF σημάτων και η αναχρησιμοποίηση ενός καναλιού κρίνεται ακατάλληλη, ειδικά στη ζώνη

συχνοτήτων των 2.4GHz όπου ο αριθμός των μη αλληλοεπικαλυπτόμενων καναλιών είναι περιορισμένος. Έτσι, κατά τη σχεδίαση ενός δικτύου Wi-Fi στη ζώνη συχνοτήτων των 2.4GHz, μπορεί να αξιοποιηθεί η κατασκευή των εγκαταστάσεων ώστε να απομονωθούν τα AP μεταξύ τους.

Σε ειδικές περιπτώσεις όπως τα δίκτυα υψηλής πυκνότητας, απαιτείται η εγκατάσταση πολλαπλών AP στην ίδια φυσική περιοχή ώστε να επιτευχθεί μεγάλη χωρητικότητα. Προκειμένου να αποφευχθεί ο κίνδυνος παρεμβολών, μία λύση αποτελεί η χρήση κατευθυντικών κεραιών μικρής γωνίας δέσμης, οι οποίες επιτρέπουν τον έλεγχο της περιοχής κάλυψης ενός AP. Η επέκταση της χωρητικότητας ενός δικτύου που λειτουργεί στη ζώνη συχνοτήτων των 5GHz μπορεί να γίνει τοποθετώντας AP σε κανάλια που δεν χρησιμοποιούνται ήδη. Για τη ζώνη συχνοτήτων των 2.4GHz, η επέκταση μπορεί να γίνει τοποθετώντας AP σε περιοχές όπου η εξασθένηση των RF σημάτων μειώνει την εξάπλωση του σήματος, όπως πίσω από ένα τοίχο ή στο εσωτερικό του δαπέδου.

### 2.2.2.7 Εξισορρόπηση φορτίου

Η εξισορρόπηση φορτίου μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τη βελτιστοποίηση της συσχέτισης των τερματικών που επικοινωνούν με μια ομάδα σημείων πρόσβασης. Τα AP μοιράζονται δεδομένα σχετικά με τον αριθμό των τερματικών, τη χρησιμοποίηση των καναλιών, τον αριθμό των αστοχιών και τις RF παρεμβολές, δημιουργώντας μια βάση δεδομένων του συστήματος. Βάσει των πληροφοριών αυτών, τα σημεία πρόσβασης ανταποκρίνονται επιλεκτικά στις αιτήσεις για συσχέτιση σε περίπτωση νέων χρηστών. Όταν ένα AP υποστηρίζει και τις δύο ζώνες συχνοτήτων των 2.4GHz και 5GHz, μπορεί να ζητήσει από το χρήστη να συνδεθεί πρώτα στη ζώνη συχνοτήτων των 5GHz, μειώνοντας έτσι το φορτίο και τις παρεμβολές στη ζώνη των 2.4GHz. Σε περίπτωση γειτονικών AP, η εξισορρόπηση φορτίου κατανέμει τους χρήστες ομοιόμορφα στα σημεία πρόσβασης, βασιζόμενη στον αριθμό των χρηστών και στις ενεργές συνδέσεις.



Σχήμα 2.12 Εξισορρόπηση φορτίου μεταξύ AP



### 2.2.3 Ασφάλεια και ποιότητα υπηρεσίας

Στα ενσύρματα δίκτυα, το μέσο μετάδοσης μπορεί να παρέχει φυσική ασφάλεια και η πρόσβαση στο δίκτυο ελέγχεται εύκολα. Στα ασύρματα δίκτυα, όμως, το μέσο μετάδοσης είναι ελεύθερο σε οποιονδήποτε βρίσκεται στην περιοχική ραδιοκάλυψη ενός πομπού και, επομένως, η ασφάλεια επικοινωνίας είναι δυσκολότερο να ελεγχθεί. Το πρότυπο 802.11 παρέχει μια υπηρεσία πιστοποίησης σύμφωνα με την οποία τα τερματικά πρέπει να πιστοποιήσουν την ταυτότητά τους προκειμένου να συνδεθούν στο δίκτυο. Συγκεκριμένα, με το συνιστώμενο σχήμα που ονομάζεται Προστατευμένη Πρόσβαση Wi-Fi 2 (Wi-Fi Protected Access 2 - WPA2) το σημείο πρόσβασης μπορεί να συνομιλεί με ένα διακομιστή πιστοποίησης ταυτότητας που διαθέτει μια βάση δεδομένων με ονόματα χρηστών και κωδικούς πρόσβασης, προσδιορίζοντας με αυτόν τον τρόπο αν επιτρέπεται σε ένα τερματικό να χρησιμοποιήσει το δίκτυο. Εναλλακτικά, μπορεί να διαμορφωθεί ένα προ-κοινόχρηστο κλειδί, ο κωδικός πρόσβασης του δικτύου.

Η ασύρματη μετάδοση είναι ένα σήμα ευρείας εκπομπής (broadcast). Προκειμένου να είναι εμπιστευτικές οι πληροφορίες που μεταδίδονται μέσω του ασύρματου LAN, πρέπει να κρυπτογραφηθούν. Για το σκοπό αυτό, χρησιμοποιείται μια υπηρεσία εξασφάλισης απορρήτου, η οποία διαχειρίζεται την κρυπτογράφηση και την αποκρυπτογράφηση. Ο αλγόριθμος που χρησιμοποιείται βασίζεται στο Προηγμένο Πρότυπο Κρυπτογράφησης (Advanced Encryption Standard - AES) και τα κλειδιά που χρησιμοποιούνται για την κρυπτογράφηση προσδιορίζονται στη φάση της πιστοποίησης ταυτότητας.

Επίσης, τα Wi-Fi δίκτυα πρέπει να παρέχουν μηχανισμούς εξασφάλισης ποιότητας υπηρεσίας (QoS). Για το χειρισμό της κυκλοφορίας με διαφορετικές προτεραιότητες υπάρχει ένας μηχανισμός χρονοπρογραμματισμού κίνησης, ο οποίος αποδίδει στη μετάδοση φωνής και βίντεο προνομιακή μεταχείριση. Επίσης, μια συνοδευτική υπηρεσία παρέχει συγχρονισμό της λειτουργίας των υψηλότερων επιπέδων, επιτρέποντας στους σταθμούς να συντονίζουν τις ενέργειές τους, κάτι που μπορεί να είναι χρήσιμο στην επεξεργασία πολυμέσων.

## 2.3 Η τεχνολογία Wi-Fi στην εξυπηρέτηση AR εφαρμογών

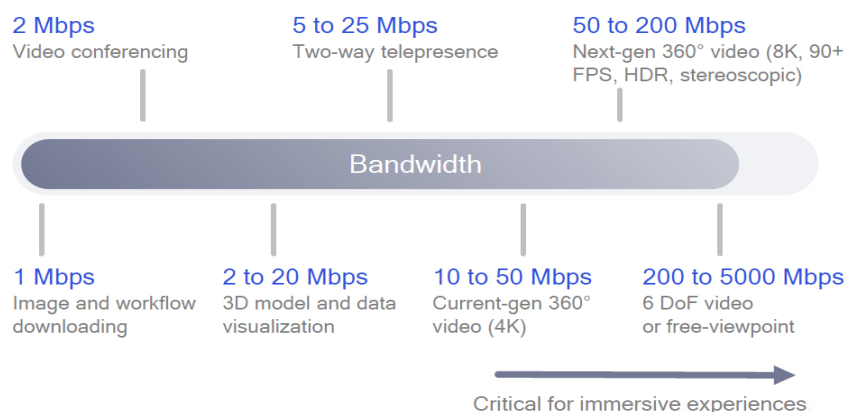
### 2.3.1 Απαιτήσεις συστήματος

Οι AR εφαρμογές είναι απαιτητικές τόσο στην εντατικότητα η οποία χαρακτηρίζει τις πολύπλοκες διαδικασίες που εκτελούνται, όσο και στην επεξεργασία μεγάλου όγκου δεδομένων. Η χρήση των AR εφαρμογών προϋποθέτει την άμεση ανταπόκριση του δικτύου, κάτι που μεταφράζεται σε ανάγκη για μεγάλο εύρος ζώνης. Επίσης, λόγω της φύσης των εφαρμογών απαιτείται εξυπηρέτηση σε πραγματικό χρόνο, δηλαδή ελαχιστοποίηση των καθυστερήσεων στη μετάδοση. Τέλος, το δίκτυο πρέπει να παρέχει υψηλή υπολογιστική ικανότητα λόγω της απαιτούμενης προσαρμοστικότητας σε ενδεχόμενη κίνηση του χρήστη.

### 2.3.1.1 Εύρος Ζώνης

Οι απαιτήσεις μιας AR εφαρμογής σε εύρος ζώνης εξαρτώνται από το είδος της. Τυπικά, το εύρος ζώνης δεδομένων που μπορεί να διακρίνει το ανθρώπινο μάτι προκύπτει μερικά Gbps. Η εκτίμηση αυτή βασίζεται στην ικανότητα του ανθρώπου να διακρίνει 200 σημεία (dots) ανά μοίρα στο οπτικό του πεδίο, το οποίο ορίζεται τουλάχιστον 150 μοίρες οριζοντίως και 120 μοίρες καθέτως. Για ένα βίντεο των 30 πλαισίων ανά δευτερόλεπτο (frames per second - fps) και κάποιο βαθμό συμπίεσης, το εύρος ζώνης ανέρχεται στα 5.2 Gbps. Η τιμή αυτή είναι αντιπροσωπευτική για μια AR εφαρμογή που απαιτεί τη λήψη ενός 6DoF (Degrees of Freedom) 360° βίντεο, ενώ για απλούστερες εφαρμογές, όπως ένα παιχνίδι που ενσωματώνει εικονικά αντικείμενα στο πραγματικό περιβάλλον, οι απαιτήσεις σε εύρος ζώνης ξεκινούν από λίγα Mbps.

Τα δύο ευρέως διαδεδομένα πρωτόκολλα στην υπηρεσία των AR εφαρμογών είναι τα 802.11n και 802.11ac, ενώ το πρωτόκολλο 802.11ax που αναμένεται στο τέλος του 2019, είναι ειδικά προσαρμοσμένο στις ανάγκες της επαυξημένης και της εικονικής πραγματικότητας, του Internet of Things (IoT) και γενικότερα των real-time εφαρμογών. Η μέγιστη θεωρητική τιμή ρυθμού μετάδοσης δεδομένων για το 802.11n ανέρχεται στα 600 Mbps, ενώ για το 802.11ac είναι 6930Mbps. Οι τιμές αυτές απέχουν σημαντικά από τις αντίστοιχες τιμές που έχουν μετρηθεί για συνθήκες πραγματικού περιβάλλοντος, όπου η μετάδοση πακέτων δεδομένων συμπεριλαμβάνει σημαντικό ποσό πλεονάζουσας πληροφορίας (overhead) οδηγώντας σε συμφόρηση εντός των καναλιών. Στην περίπτωση αυτή, οι ρυθμοί μετάδοσης δεδομένων ανέρχονται σε 90Mbps και 390Mbps αντίστοιχα, ενώ τα νούμερα που επιτυγχάνονται τελικώς είναι ακόμα μικρότερα. Το φαινόμενο αυτό οφείλεται σε διάφορα αίτια. Αρχικά, οι θεωρητικές μέγιστες τιμές υπολογίζονται για περιπτώσεις ιδανικών συνθηκών, σε περιβάλλον χωρίς παρεμβολές. Στον πραγματικό κόσμο, στην περιοχή εμβέλειας ενός LAN μπορεί να υπάρχουν άλλα δίκτυα ή συσκευές που λειτουργούν στην ίδια συχνότητα και προκαλούν παρεμβολές. Εξάλλου, η απόσταση από το AP παίζει σημαντικό ρόλο, καθώς και τα αντικείμενα που μπορεί να παρεμβάλονται ανάμεσα στο AP και στο τερματικό. Τέλος, το διαθέσιμο εύρος ζώνης διαμοιράζεται μεταξύ των χρηστών του δικτύου, μειώνοντας την ταχύτητά τους.



Σχήμα 2.13 Εύρος ζώνης AR εφαρμογών

### 2.3.1.2 Καθυστέρηση

Διακρίνονται δύο ειδών καθυστερήσεις στις AR εφαρμογές. Η πρώτη είναι η από άκρο σε άκρο καθυστέρηση (end-to-end delay) λόγω αλληλεπίδρασης των χρηστών. Για παράδειγμα, σε μια εφαρμογή τηλεδιάσκεψης εισάγεται καθυστέρηση έως 100ms για την ανταπόκριση κάθε χρήστη. Το δεύτερο είδος καθυστέρησης προκαλείται όταν ο χρήστης αλλάζει την οπτική του γωνία και η εφαρμογή πρέπει να ανταποκριθεί άμεσα ώστε να αποφευχθούν φαινόμενα όπως το θόλωμα και η ναυτία λόγω κίνησης (motion sickness). Η τιμή της καθυστέρησης σε αυτήν την περίπτωση δεν πρέπει να υπερβαίνει τα 10ms. Ως εκ τούτου, οι εξυπηρετητές που βρίσκονται στην υπηρεσία των AR εφαρμογών πρέπει να βρίσκονται σε μικρή απόσταση από το χρήστη ώστε να μην εισάγονται μεγάλες καθυστερήσεις.

Η καθυστέρηση μετάδοσης σε ένα δίκτυο Wi-Fi μπορεί να υπερβαίνει τα 100ms. Η χρήση της ζώνης συχνοτήτων των 5GHz μειώνει σημαντικά την τιμή της καθυστέρησης, καθώς υπάρχουν περισσότερα κανάλια στα οποία μπορεί να διαμοιραστεί το φορτίο του δικτύου υπό μειωμένες παρεμβολές. Η τεχνολογία MIMO είναι ακόμα ένας παράγοντας που λειτουργεί θετικά στη μείωση των καθυστερήσεων, αφού οι περισσότερες διαδρομές παρέχουν τη δυνατότητα να αποστέλλονται ταυτόχρονα πολλά δεδομένα. Εντούτοις, σε ένα δίκτυο υψηλής πυκνότητας όπου πολλές συσκευές ανταγωνίζονται για τους ίδιους πόρους, οι τιμές των καθυστερήσεων αυξάνονται σημαντικά.

Το μέγεθος της καθυστέρησης είναι ένας παράγοντας που επηρεάζει τις απαιτήσεις του δικτύου σε διεκπεραιωτική ικανότητα. Για παράδειγμα, ένα βίντεο 6DoF που μεταδίδεται με καθυστέρηση 5-20ms, απαιτεί ταχύτητες των 400-600Mbps, ενώ αν η καθυστέρηση μειωθεί στα 1-5ms, αρκεί ταχύτητα των 100-200Mbps.

### 2.3.1.3 Υπολογιστική ικανότητα

Θεωρώντας ένα απλό σύστημα επαυξημένης πραγματικότητας όπου εικονικά αντικείμενα προστίθενται σε μια ροή βίντεο, οι υπολογιστικές απαιτήσεις του δικτύου διαρθρώνονται ως εξής :

Αρχικά, γίνεται αίτημα από το χρήστη, το οποίο περιλαμβάνει μια ζωντανή ροή βίντεο από την κάμερα της συσκευής του. Από το βίντεο αυτό εξάγονται τα απαραίτητα χαρακτηριστικά και αναγνωρίζονται τα μοτίβα. Το αίτημα του χρήστη απαντάται αφού προηγουμένως γίνει αναζήτηση σε κάποια βάση δεδομένων. Κατόπιν, η απάντηση επιστρέφεται στο χρήστη και ενσωματώνεται σε πραγματικό χρόνο ως πρόσθετο στρώμα στο βίντεο της συσκευής του. Καθώς ο χρήστης κινείται και αλλάζει προοπτική, αποστέλλονται διαρκώς αλληπάλληλα αιτήματα με νέα δεδομένα. Προκειμένου να μην εισάγονται καθυστερήσεις και να προσφέρεται υψηλής ποιότητας υπηρεσία στο χρήστη, οι εξυπηρετητές που αναλαμβάνουν τη διεκπεραίωση των αιτημάτων πρέπει να είναι όσο το δυνατό εγγύτερα στα τερματικά.

### 2.3.2 Επιλογή προτύπων

Η αρχιτεκτονική ενός AR συστήματος στην υπηρεσία της εξυπηρέτησης των χρηστών στηρίζεται στις απαιτήσεις για υψηλές ταχύτητες και μικρές καθυστερήσεις. Προκειμένου να επιτευχθούν υψηλοί ρυθμοί μετάδοσης δεδομένων, ενδείκνυται η χρήση προτύπων τα οποία προσφέρουν μεγάλη διεκπεραιωτική ικανότητα, όπως το 802.11ac. Εντούτοις, οι ευνοϊκές παράμετροι που προσφέρουν τα διάφορα πρότυπα αλλοιώνονται λόγω της διπλής επικοινωνίας, δηλαδή το “ανέβασμα” και το “κατέβασμα” δεδομένων. Για το λόγο αυτό και με σκοπό την ελαχιστοποίηση της διαμάχης για το μέσο, έχουν αναπτυχθεί πρωτόκολλα τόσο προς εξυπηρέτηση των πολυμέσων όσο και για τη γενικότερη βελτιστοποίηση της απόδοσης του δικτύου στο επίπεδο μεταφοράς.

Εκτός από τη λήψη πλαισίων δεδομένων, οι πολλαπλές AR συσκευές που συνδέονται σε ένα AP πρέπει να μεταδώσουν τα δεδομένα ανίχνευσης κίνησης προς το AP κάθε φορά που αλλάζει η θέση και ο προσανατολισμός του χρήστη. Αυτά τα δεδομένα μπορούν να προκαλέσουν μεγάλη καθυστέρηση για την πρόσβαση στο μέσο και υποβάθμιση της διεκπεραιωτικής ικανότητας του δικτύου. Μια προτεινόμενη λύση για την αποφυγή της συμφόρησης είναι η χρησιμοποίηση διαφορετικών προτύπων 802.11 κατά την εκπομπή και λήψη δεδομένων, που λειτουργούν σε διαφορετικές συχνότητες ώστε να μειώνεται η διαμάχη για το μέσο. Ως εκ τούτου, οι AR συσκευές, συμπεριλαμβανομένων των σημείων πρόσβασης, πρέπει να υποστηρίζουν αρχιτεκτονική πρωτοκόλλων η οποία στο φυσικό στρώμα μπορεί να χρησιμοποιήσει πολλαπλά πρότυπα 802.11. Εναλλακτικά, προτείνεται η χρήση του επερχόμενου 802.11ax, το οποίο λειτουργεί σε δύο ζώνες συχνοτήτων και είναι κατάλληλο για εφαρμογές υψηλών απαιτήσεων.

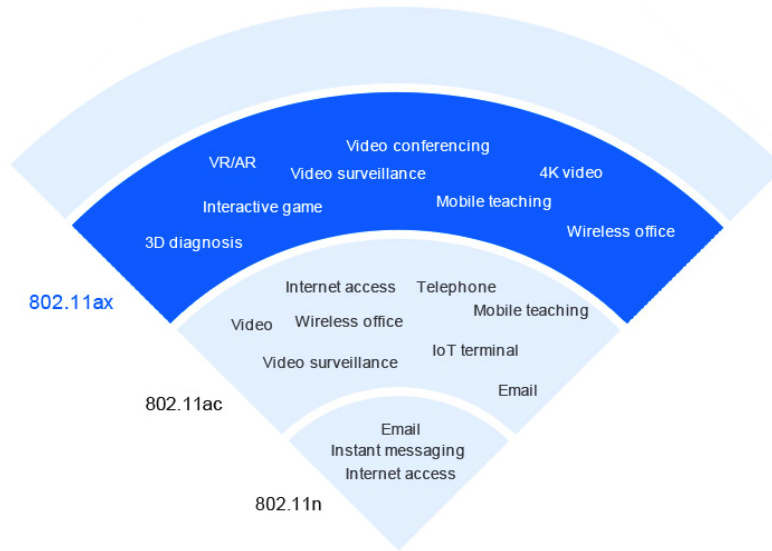
#### 2.3.2.1 Το πρότυπο 802.11ax

Το 802.11ax είναι το βελτιωμένο πρότυπο για αποδοτικό σχεδιασμό ασύρματων LAN σε περιπτώσεις μεγάλου αριθμού χρηστών, αφού επιτρέπει στα σημεία πρόσβασης να εξυπηρετούν πολλά τερματικά σε περιβάλλοντα υψηλής πυκνότητας. Ο ευέλικτος χρόνος προγραμματισμού επαναλειτουργίας επιτρέπει στις συσκευές να αδρανοποιούνται περισσότερο χρόνο σε σύγκριση με το 802.11ac και να επανέρχονται σε συνθήκες μικρότερου ανταγωνισμού, παρατείνοντας τη διάρκεια ζωής της μπαταρίας των κινητών συσκευών. Η απόδοσ του 802.11ax είναι κατάλληλη για την υποστήριξη προηγμένων εφαρμογών όπως βίντεο 4K, Ultra HD (High Definition), IoT και AR/VR.

Το 802.11ax επιτυγχάνει τα προαναφερθέντα βασιζόμενο σε τρεις παράγοντες:

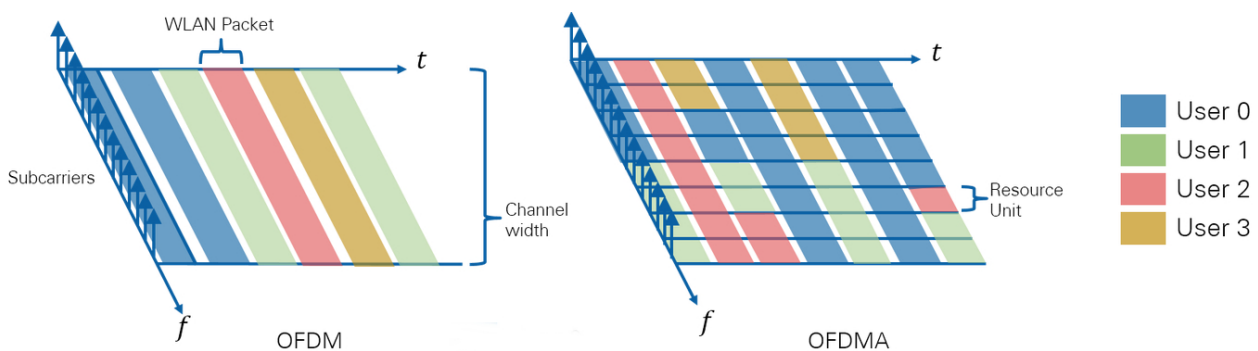
- Τη χρήση διαμόρφωσης 1024QAM που λόγω του πυκνότερου αστερισμού προσφέρει σημαντική αύξηση της ταχύτητας μετάδοσης.
- Τη χρήση της μεθόδου OFDMA (Orthogonal Frequency Division Multiple Access), που (i) αποτελεί παραλλαγή της μεθόδου OFDM για την περίπτωση πολλαπλών χρηστών και (ii) παρέχει μείωση των καθυστερήσεων.
- Την αποδοτική εκπομπή σήματος που έχει ως αποτέλεσμα την καλύτερη λειτουργία

σε μικρό ενδεικτική έντασης λαμβανόμενου σήματος (Received Signal Strength Indicator - RSSI).



**Σχήμα 2.14** Ταξινόμηση εφαρμογών στα πρότυπα 802.11

Η τεχνολογία OFDMA IEEE 802.11ax επιτρέπει στα σημεία πρόσβασης να υποστηρίζουν έως και οκτώ χωρικά ρεύματα (spatial steams) με την ταχύτητα μετάδοσης δεδομένων να ανέρχεται στα 9.6Gbps. Επίσης, σε αντίθεση με το πρότυπο 802.11ac που λειτουργεί στη ζώνη συχνοτήτων των 5GHz, το 802.11ax υποστηρίζει και τις δύο ζώνες συχνοτήτων των 2.4 και 5GHz, παρέχοντας τη δυνατότητα στους χρήστες των συσκευών που λειτουργούν στα 2.4GHz να επωφεληθούν άμεσα από τα σχετικά πλεονεκτήματά του. Με το OFDMA, επίσης, κάθε κανάλι των 20, 40, 80 και 160MHz διαχωρίζεται σε μικρότερα υπο-κανάλια, ενώ το AP αποφασίζει πώς θα κατανείμει το κανάλι στους διάφορους χρήστες. Το γεγονός ότι ένα κανάλι μπορεί να χρησιμοποιηθεί από περισσότερους χρήστες είναι σημαντικό πλεονέκτημα του 802.11ax.



**Σχήμα 2.15** Χρησιμοποίηση καναλιών στις τεχνικές OFDM και OFDMA

Πολλές φορές, στην περίπτωση των high density δικτύων απαιτείται η τοποθέτηση AP ανά 10 - 20m, ενώ κάθε AP βρίσκεται στην υπηρεσία 100 - 200 χρηστών. Στις AR εφαρμογές, το LAN πρέπει να είναι σε θέση να παρέχει υπηρεσίες βίντεο υψηλών απαιτήσεων. Για το σκοπό αυτό, το πρότυπο 802.11ax προδιαγράφει τις τεχνολογίες τόσο στο φυσικό στρώμα του δικτύου όσο και στο υπόστρωμα MAC ώστε να παρέχει στους χρήστες υπηρεσίες υψηλής ποιότητας. Η τεχνολογία MU-MIMO (Multi-User MIMO) παρέχει τη δυνατότητα σε πολλά τερματικά να μεταδίδουν δεδομένα ταυτόχρονα. Αν και η λειτουργία αυτή υποστηρίζεται και στο πρότυπο 802.11ac, εφαρμόζεται μόνο στη διεύθυνση λήψης (downlink), ενώ το 802.11ax χρησιμοποιεί τη τεχνολογία MU-MIMO τόσο στη λήψη όσο και στην εκπομπή (uplink) πληροφοριών. Ο αυξημένος ρυθμός μετάδοσης κατά την αποστολή δεδομένων (upload) είναι ιδιαίτερα χρήσιμος στις AR εφαρμογές, όπου τα τερματικά αποστέλλουν στο δίκτυο πλαίσια ροής βίντεο για την ανίχνευση της θέσης τους.

# ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

## Η ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ ΜΕΣ ΣΤΗΝ ΥΠΗΡΕΣΙΑ ΤΩΝ ΑΡ ΕΦΑΡΜΟΓΩΝ

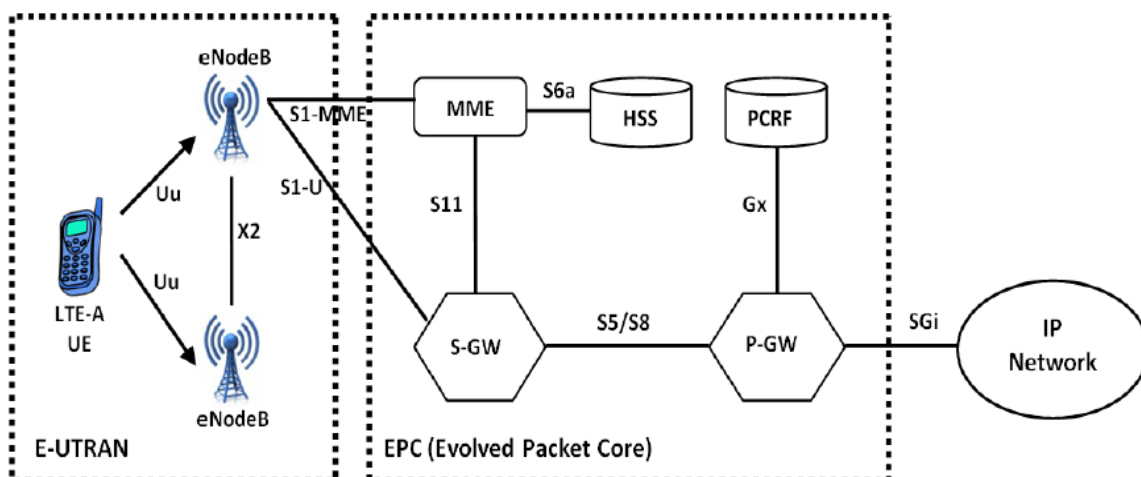
### 3.1 Τεχνολογία LTE

Η ανάγκη προσπέλασης του Διαδικτύου σε περιπτώσεις όπου ο χρήστης δεν βρίσκεται εντός της ακτίνας κάλυψης κάποιου LAN, οδήγησε στην επέκταση και αναβάθμιση των κυψελωτών δικτύων τηλεφωνίας. Η τεχνολογία LTE (Long Term Evolution) αποτελεί εξέλιξη των συστημάτων τρίτης γενιάς (3G) και αναπτύχθηκε από τη συνεργασία 3GPP (3<sup>rd</sup> Generation Partnership Project). Η πρώτη εφαρμογή της τεχνολογίας πραγματοποιήθηκε το 2009, ως υλοποίηση της έκδοσης 8 της 3GPP και έγινε γνωστή παγκοσμίως ως η απαρχή της τεχνολογίας τέταρτης γενιάς (4G). Έκτοτε, ακολούθησαν οι εκδόσεις 9 έως 14, με σκοπό τη βελτίωση της απόδοσης του δικτύου. Οι εκδόσεις 10 έως 12 είναι γνωστές ως LTE-Advanced (LTE-A) ενώ οι επόμενες δύο, 13 και 14, ονομάζονται LTE-Advanced Pro. Το 2018 ακολούθησε η έκδοση 15, η οποία σηματοδοτεί την εισαγωγή στα δίκτυα πέμπτης γενιάς (5G).

#### 3.1.1 Αρχιτεκτονική LTE

Η αρχιτεκτονική ενός δικτύου LTE μπορεί να διαχωριστεί στις εξής επιμέρους μονάδες:

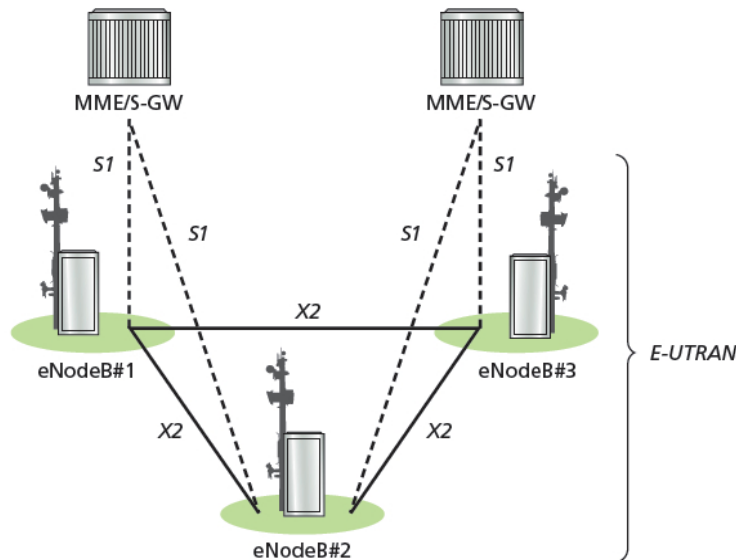
- Το δίκτυο ραδιοπρόσβασης (Radio Access Network - RAN), το οποίο στην ορολογία του LTE ονομάζεται E-UTRAN (Evolved Universal Terrestrial Radio Access Network) και είναι υπεύθυνο για την επικοινωνία των τερματικών με τους σταθμούς βάσης.
- Το δίκτυο κορμού (Core Network - CN), το οποίο ονομάζεται EPC (Evolved Packet Core) και συνδέει τους σταθμούς βάσης με το σταθερό δίκτυο.



Σχήμα 3.1 Αρχιτεκτονική LTE

### 3.1.1.1 E-UTRAN

Το E-UTRAN αποτελείται από ένα δίκτυο σταθμών βάσης που ονομάζονται eNB (evolved Node B). Η αρχιτεκτονική του είναι επίπεδη, καθώς δεν απαιτείται κάποιος κεντρικός ελεγκτής για την εποπτεία των eNB. Οι σταθμοί βάσης διασυνδέονται μεταξύ τους με τις διεπαφές X2, ενώ η επικοινωνία με τον EPC γίνεται μέσω των διεπαφών S1. Τα τερματικά, που ονομάζονται UE (User Equipment), συνδέονται με τους eNB με τις διεπαφές Uu.



Σχήμα 3.2 Διασυνδέσεις E-UTRAN

Το E-UTRAN είναι υπεύθυνο για λειτουργίες που συνοψίζονται ως εξής:

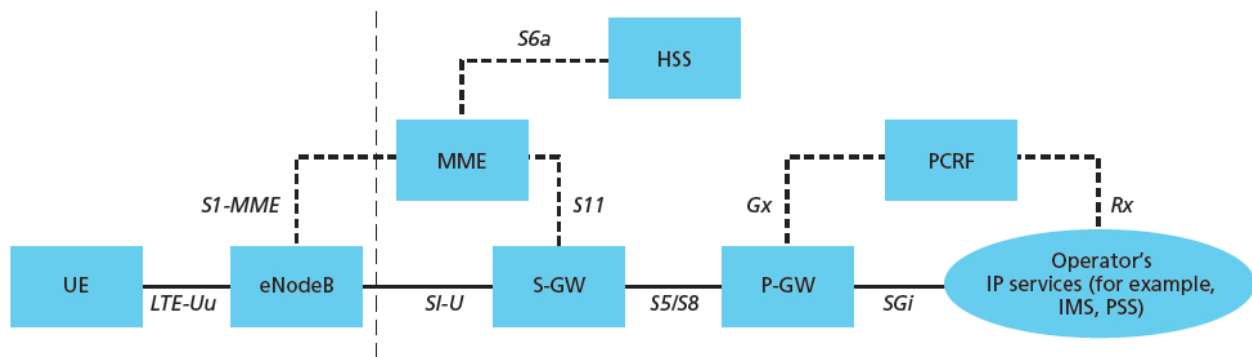
- *Διαχείριση ραδιοπόρων (Radio Resource Management - RRS)*. Το πεδίο αυτό καλύπτει όλες τις λειτουργίες που σχετίζονται με τους κομιστές (bearers). Κομιστές καλούνται οι ροές πακέτων IP με καθορισμένη QoS, μεταξύ του δικτύου δεδομένων (Packet Data Network - PDN) και των UE. Τέτοιες λειτουργίες μπορεί να είναι ο έλεγχος των κομιστών, ο έλεγχος ραδιοπρόσβασης, ο έλεγχος της κινητικότητας, ο προγραμματισμός και η δυναμική κατανομή των πόρων στα UE, τόσο στην κατεύθυνση Downlink (DL) όσο και στην Uplink (UL).
- *Συμπίεση κεφαλίδων (Header Compression)*. Η λειτουργία αυτή συμβάλλει στη διασφάλιση της αποδοτικής χρήσης της ραδιοδιεπαφής με τη συμπίεση των κεφαλίδων των IP πακέτων, οι οποίες σε διαφορετική περίπτωση προκαλούν πλεονάζουσα κίνηση (overhead).
- *Ασφάλεια*. Λειτουργίες κρυπτογράφησης δεδομένων πάνω από τη ραδιοδιεπαφή.
- *Συνδεσιμότητα με τον EPC*. Αφορά τις ροές μηνυμάτων σηματοδότησης προς τη μονάδα ελέγχου κινητικότητας και τη διαδρομή των κομιστών προς το δίκτυο πακέτων δεδομένων.



### 3.1.1.2 EPC

Τα βασικά συστατικά στοιχεία του EPC είναι:

- Η μονάδα διαχείρισης κινητικότητας (Mobility Management Entity - MME)
- Η πύλη εξυπηρέτησης (Serving Gateway - S-GW)
- Η πύλη του δικτύου πακέτων (Packet Data Network Gateway - P-GW)



Σχήμα 3.3 Συστατικά στοιχεία του EPC

Η μονάδα MME συνδέεται με το E-UTRAN μέσω της διεπαφής S1-MME και αποτελεί τον κόμβο ελέγχου, ο οποίος επεξεργάζεται τη σηματοδότηση μεταξύ των UE και του EPC. Τα πρωτόκολλα που εφαρμόζονται μεταξύ των UE και του EPC είναι γνωστά ως πρωτόκολλα στρώματος μη-πρόσβασης (Non Access Stratum - NAS). Η MME είναι υπεύθυνη για τις λειτουργίες διαχείρισης των κομιστών, οι οποίες περιλαμβάνουν την εγκατάσταση, τη συντήρηση και την κυκλοφορία των κομιστών και ελέγχονται από το επίπεδο διαχείρισης συνόδου του πρωτοκόλλου NAS. Επίσης, η μονάδα MME είναι υπεύθυνη για λειτουργίες σχετικές με τη διαχείριση της σύνδεσης, όπως η εγκατάσταση της σύνδεσης και της ασφάλειας μεταξύ του δικτύου και των UE. Οι εργασίες αυτές ελέγχονται από το επίπεδο διαχείρισης σύνδεσης και το επίπεδο διαχείρισης κινητικότητας του πρωτοκόλλου NAS.

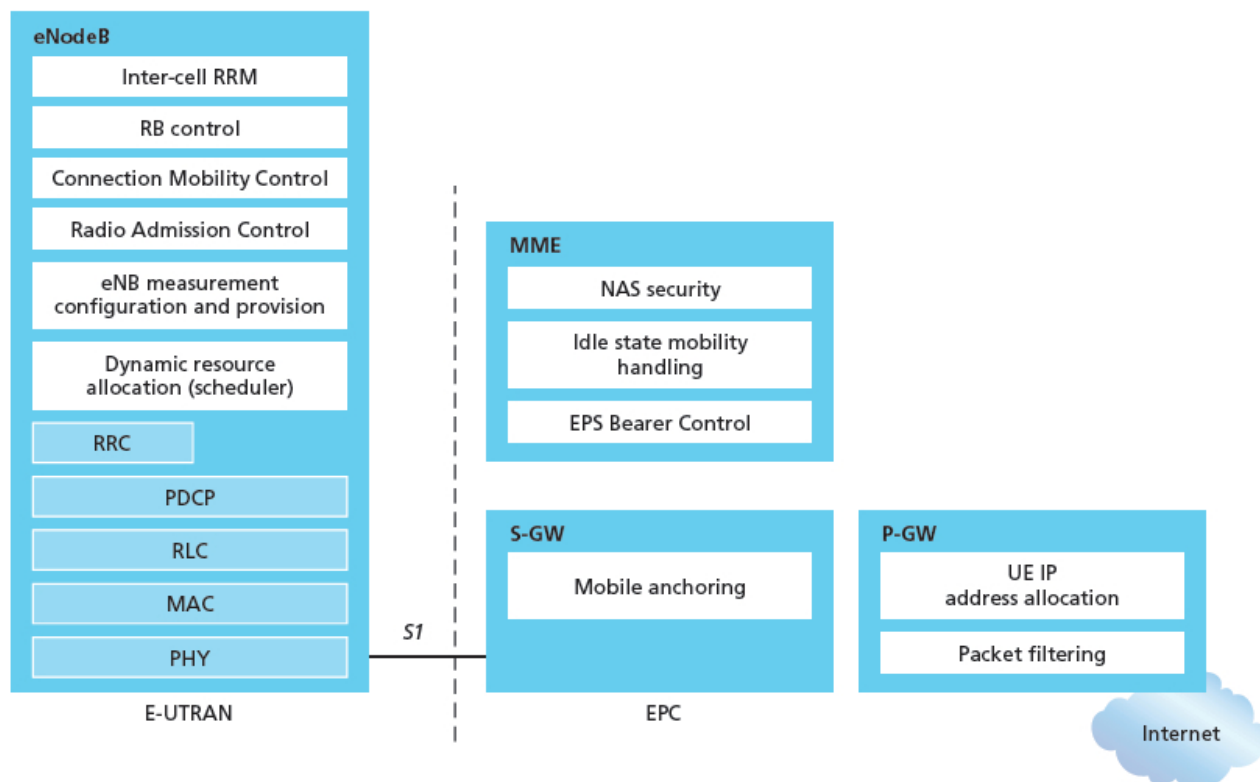
Η πύλη S-GW συνδέεται με το E-UTRAN μέσω της διεπαφής S1-U. Όλα τα IP πακέτα που προέρχονται ή προορίζονται για τους UE, μεταφέρονται μέσω της πύλης S-GW, που λειτουργεί ως υποστήριξη για τους κομιστές δεδομένων, όταν ο UE κινείται μεταξύ διαφορετικών eNB. Επίσης, η πύλη S-GW συγκρατεί τα δεδομένα σχετικά με τους κομιστές όταν ο UE βρίσκεται σε κατάσταση αδράνειας και αποθηκεύει προσωρινά τα δεδομένα DL όταν η MME εκκινεί αναζήτηση του UE ώστε να επαναφέρει τους κομιστές. Επιπλέον, η πύλη S-GW εκτελεί λειτουργίες μέτρησης του όγκου των DL και UL δεδομένων για τη χρέωση των χρηστών από τους παρόχους υπηρεσιών. Τέλος, επιτελεί υποστηρικτική λειτουργία, όταν υπάρχει εναλλαγή της τεχνολογίας πρόσβασης από 4G σε τεχνολογίες άλλων γενεών. Η πύλη S-GW επικοινωνεί με τη MME μέσω της διεπαφής S11 με σκοπό την οργάνωση της εγκατάστασης των κομιστών εντός του EPC.

Η πύλη P-GW είναι υπεύθυνη για την κατανομή των διευθύνσεων IP στους UE, την

εφαρμογή υπηρεσιών QoS καθώς και την επιβολή της εκάστοτε πολιτικής χρεώσεων. Επίσης, η πύλη P-GW πραγματοποιεί την αντιστοίχιση των πακέτων DL στους κομιστές, αντίστοιχα με το QoS που διαθέτουν, ενώ λειτουργεί υποστηρικτικά στη διασύνδεση με δίκτυα που δεν ανήκουν στις 3GPP τεχνολογίες. Η P-GW επικοινωνεί με την πύλη S-GW μέσω των διεπαφών S5 ή S8, με την S5 να χρησιμοποιείται για την επικοινωνία εσωτερικά του δικτύου και την S8 να χρησιμοποιείται σε περιπτώσεις περιαγωγής σε διαφορετικά δίκτυα.

Εκτός από τους προαναφερθέντες βασικούς κόμβους, ο EPC περιλαμβάνει τον οικείο εξυπηρετητή συνδρομητών (Home Subscriber Server - HSS) καθώς και τη μονάδα PCRF (Police Control and Charging Rules Function).

Ο εξυπηρετητής HSS περιλαμβάνει δεδομένα εγγραφής των συνδρομητών του δικτύου, όπως το προφίλ QoS και ενδεχόμενες απαγορεύσεις πρόσβασης σε περίπτωση περιαγωγής. Επίσης, αποθηκεύει δεδομένα σχετικά με το PDN με το οποίο μπορεί να συνδεθεί κάθε χρήστης και δυναμικές πληροφορίες όπως η ταυτότητα της μονάδας MME με την οποία σχετίζεται ο UE. Επιπλέον, στον εξυπηρετητή HSS βρίσκεται το κέντρο επαλήθευσης (authentication center - AUC), το οποίο παράγει τους φορείς επαλήθευσης και τα κλειδιά ασφαλείας. Ο εξυπηρετητής HSS επικοινωνεί με τη μονάδα MME μέσω της διεπαφής S6a. Η μονάδα PCRF είναι υπεύθυνη για τον έλεγχο της εφαρμογής των πολιτικών χρέωσης των χρηστών. Για το λόγο αυτό, επικοινωνεί με την πύλη P-GW μέσω της διεπαφής Gx. Παρέχει επίσης την QoS εξουσιοδότηση, η οποία καθορίζει με ποιον τρόπο η πύλη P-GW θα διαχειριστεί συγκεκριμένη ροή δεδομένων.



Σχήμα 3.4 Λειτουργίες E-UTRAN και EPC

### 3.1.2 Φυσικό στρώμα

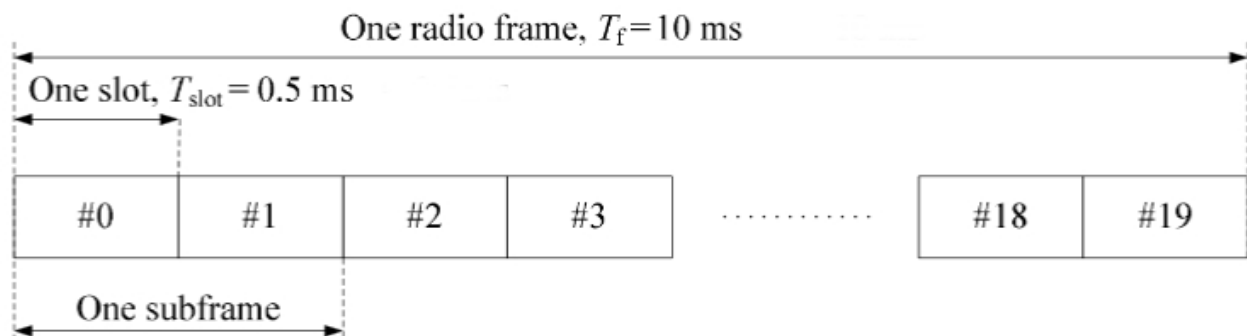
Το φυσικό στρώμα του LTE διαθέτει τα χαρακτηριστικά που παρουσιάζονται επιγραμματικά στον Πίν. 3.1.

Duplex	FDD, TDD
Εύρος ζώνης καναλιών	1.25 - 20 MHz
Διαμόρφωση	QPSK, 16-QAM, 64-QAM
Τεχνολογία μετάδοσης	DL: OFDMA, UL: SC-FDMA
Διάρκεια πλαισίου	10 ms
Σύμβολα ανά πλαίσιο	140
Εύρος Υποφερουσών	15 kHz
Διάρκεια συμβόλου	66.7 $\mu$ s
Τεχνικές κεραιών	MIMO 2x2, 4x4

Πίνακας 3.1 Χαρακτηριστικά φυσικού στρώματος LTE

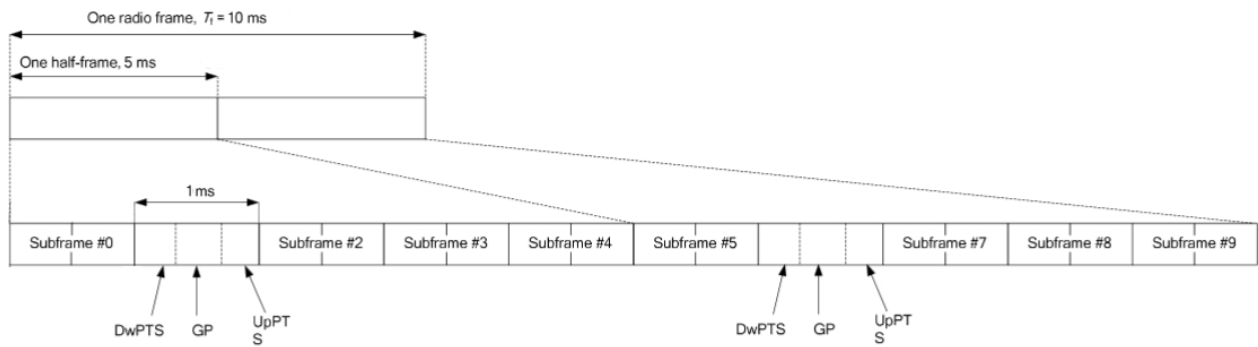
#### 3.1.2.1 Πλαίσια LTE

Με κριτήριο τον τρόπο με τον οποίο γίνεται ο διαχωρισμός των downlink και uplink μεταδόσεων, υπάρχουν δύο είδη πλαισίων LTE. Το πλαίσιο FDD (Frequency Division Duplexing) χρησιμοποιείται στην περίπτωση όπου ανατίθενται διαφορετικές φασματικές ζώνες στις κατευθύνσεις DL και UL. Αποτελείται από δέκα υποπλαίσια διάρκειας 1ms έκαστο, τα οποία διαιρούνται περαιτέρω σε δύο σχισμές διάρκειας 0.5ms έκαστη.



Σχήμα 3.5 Πλαίσιο FDD

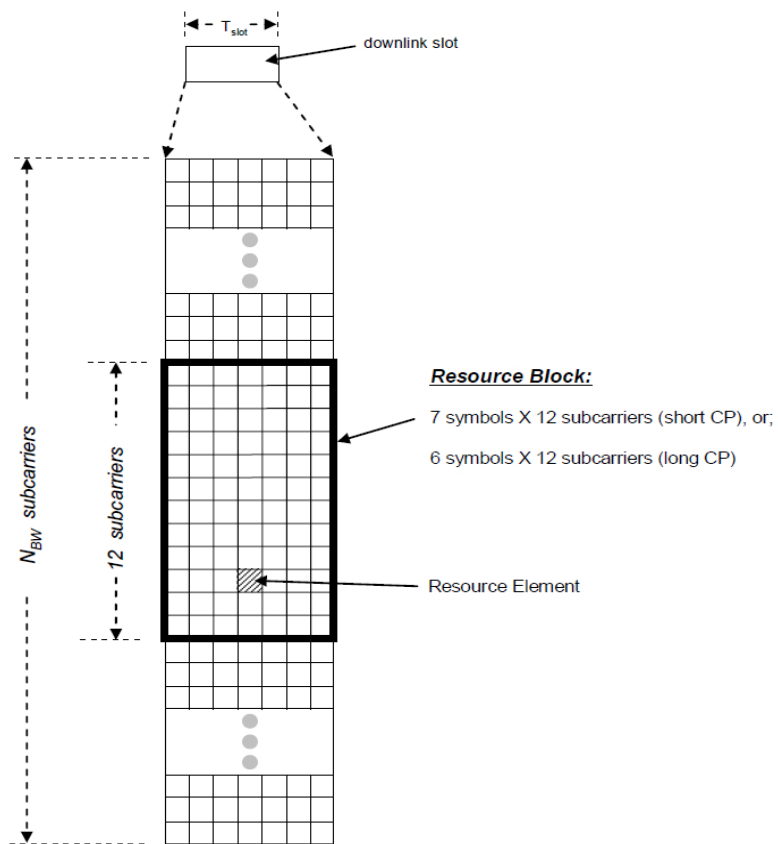
Τα πλαίσια TDD (Time Division Duplexing) εντοπίζονται στην περίπτωση όπου οι μεταδόσεις DL και UL χρησιμοποιούν την ίδια φασματική ζώνη. Κάθε πλαίσιο χωρίζεται σε δύο ίσα μέρη, καθένα από τα οποία διαχωρίζεται σε οκτώ σχισμές του 0.5ms. Ανά ολόκληρο ή μισό πλαίσιο, υπάρχει μία σχισμή η οποία διαθέτει πληροφορίες σχετικές με την ανάθεση των υπόλοιπων σχισμών στις κατευθύνσεις DL και UL. Η ειδική αυτή σχισμή, διάρκειας 1ms, διαχωρίζεται σε τρία επιπλέον πεδία: το DwPTS (Downlink Pilot Time Slot), το GP (Guard Period) και το UpPTS (Uplink Pilot Time Slot).



Σχήμα 3.6 Πλαίσιο TDD

### 3.1.3.2 Τεχνολογίες μετάδοσης

Η τεχνολογία LTE κάνει χρήση της τεχνική OFDMA για τη DL μετάδοση δεδομένων και της SC-FDMA (Single Carrier-FDMA) για την κατεύθυνση UL.

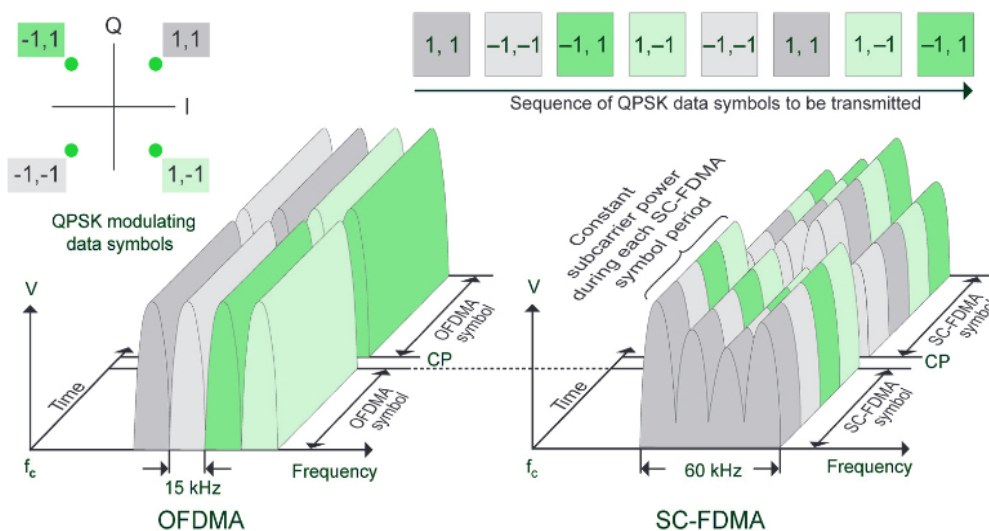


Σχήμα 3.7 Downlink resource grid

Αν και η OFDMA χαρακτηρίζεται από μεγάλη πολυπλοκότητα σε όρους προγραμματισμού κατανομής των πόρων, είναι σαφώς ανώτερη από άλλες προσεγγίσεις σε θέμα απόδοσης

και καθυστερήσεων. Στη μέθοδο αυτή, ανατίθεται στους χρήστες συγκεκριμένος αριθμός υποφερουσών, για προκαθορισμένο χρόνο. Οι μονάδες αυτές αποκαλούνται PRB (Physical Resource Blocks) σε όρους LTE και η κατανομή τους γίνεται από μια λειτουργία προγραμματισμού στους eNB. Ο συνολικός αριθμός των διαθέσιμων υποφερουσών εξαρτάται από το συνολικό εύρος ζώνης του συστήματος. Οι LTE προδιαγραφές ορίζουν παραμέτρους για συστήματα εύρους ζώνης από 1.25 έως 20MHz. Μια μονάδα PRB αποτελείται από 12 υποφέρουσες των 15kHz σε διάρκεια μιας σχισμής (0.5ms) και είναι το μικρότερο στοιχείο κατανομής πόρων που ανατίθεται στους χρήστες. Το πλήθος των OFDM συμβόλων που περιλαμβάνονται σε μια σχισμή είναι 6 ή 7, ανάλογα με το μέγεθος του CP.

Οι απαιτήσεις της UL μετάδοσης διαφέρουν αρκετά από αυτές της διεύθυνσης DL. Η κατανάλωση ενέργειας είναι ζήτημα ζωτικής σημασίας για τα τερματικά UE. Ο υψηλός λόγος μέγιστης προς μέση ισχύ (Peak to Average Ratio - PAPR) που σχετίζεται με το OFDMA, οδηγεί στην ανάγκη ύπαρξης ενισχυτών στα τερματικά, αυξάνοντας το κόστος των συσκευών. Για το λόγο αυτό, το LTE χρησιμοποιεί διαφορετικό σχήμα μετάδοσης στην κατεύθυνση UL, τη μέθοδο SC-FDMA. Στο SC-FDMA η αρχιτεκτονική του πομπού και του δέκτη μοιάζει αρκετά με αυτή της μεθόδου OFDMA, με τη διαφορά ότι εισάγεται μια βαθμίδα DFT η οποία συμβάλλει στην εξάπλωση ενός συμβόλου σε εύρος πολλαπλών υποφερόντων. Καθώς η υποκείμενη κυματομορφή είναι απλού φέροντος, παρατηρείται χαμηλότερο PAPR.



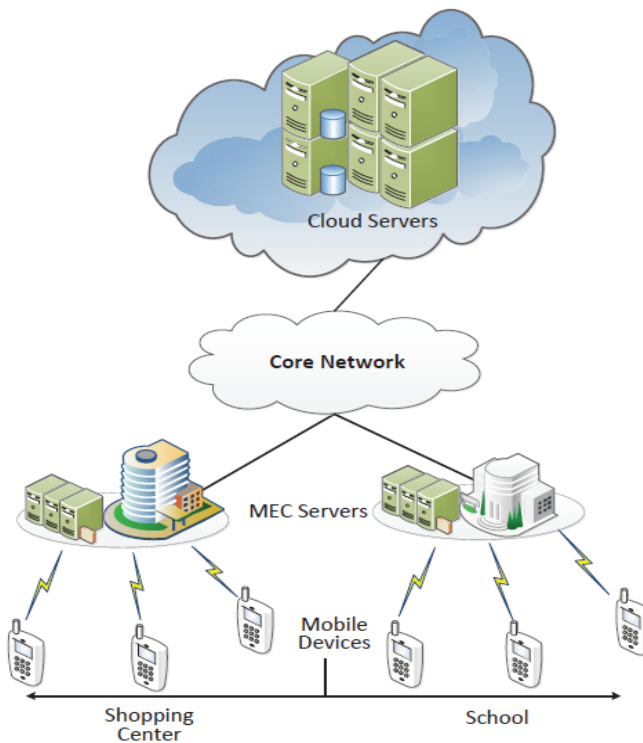
Σχήμα 3.8 Σύγκριση OFDMA και SC-FDMA

### 3.2 Mobile Edge Computing

Οι περισσότερες εφαρμογές που χρησιμοποιούνται σήμερα από τους χρήστες έξυπνων συσκευών κάνουν χρήση της τεχνολογίας υπολογιστικού νέφους (cloud computing). Η τεχνολογία αυτή παρέχει τη δυνατότητα στους χρήστες να αποθηκεύουν, επεξεργάζονται και διαχειρίζονται δεδομένα, τα οποία βρίσκονται σε κάποια απομακρυσμένη τοποθεσία που είναι προσβάσιμη μέσω Διαδικτύου. Αν και το cloud computing προσφέρει

απεριόριστους πόρους στη διάθεση του χρήστη, εισάγει σημαντική καθυστέρηση στην επικοινωνία, αφού οι εξυπηρετητές cloud είναι συνήθως απομονωμένοι από το υπόλοιπο δίκτυο. Το γεγονός αυτό λειτουργεί αρνητικά σε real-time εφαρμογές όπως υπηρεσίες video streaming, όπου η ανάγκη ελαχιστοποίησης των καθυστερήσεων είναι σημαντική.

Η τεχνολογία Mobile Edge Computing (MEC) αναπτύχθηκε με σκοπό τη μετακίνηση των εξυπηρετητών του δικτύου από τα data centers, ώστε να βρίσκονται όσο το δυνατόν εγγύτερα στον τελικό χρήστη. Με τον τρόπο αυτό, μειώνονται οι καθυστερήσεις στην από άκρο σε άκρο επικοινωνία, αφού η πληροφορία ακολουθεί συντομότερη διαδρομή. Οι εφαρμογές που είναι ευαίσθητες σε καθυστέρηση μπορούν να εξυπηρετούνται από τους MEC εξυπηρετητές, ενώ όσες είναι ανεκτικές σε θέμα καθυστέρησης δρομολογούνται προς κάποιον εξυπηρετητή cloud.



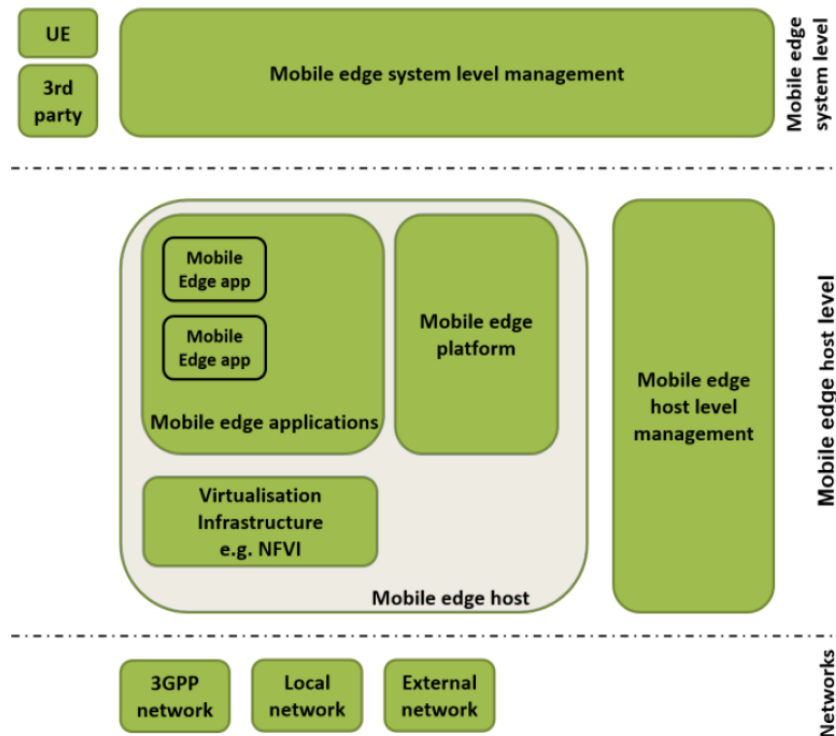
Σχήμα 3.9 Επισκόπηση συστήματος MEC

### 3.2.1 Αρχιτεκτονική MEC

Ο Ευρωπαϊκός Οργανισμός Τηλεπικοινωνιακών Προτύπων (European Telecommunications Standards Institute (ETSI)) ίδρυσε το MEC ISG (Industry Specification Groups) το Δεκέμβριο του 2014, ξεκινώντας έτσι την προτυποποίηση του MEC. Το ISG αυτό αναπτύχθηκε με σκοπό να παράγει ένα σύνολο προδιαγραφών που προσφέρουν τη δυνατότητα σε άλλους οργανισμούς να εντάξουν αποτελεσματικά τις εφαρμογές που αναπτύσσονται στο περιβάλλον MEC. Έκτοτε, το ISG εργάζεται πάνω στην προτυποποίηση των απαιτήσεων ενός συστήματος MEC καθώς και της αρχιτεκτονικής του.

### 3.2.1.1 Πλαίσιο MEC

Το πλαίσιο MEC απαρτίζεται από τρία επίπεδα: το επίπεδο του συστήματος, το επίπεδο host και το επίπεδο δικτύων.



Σχήμα 3.10 Το πλαίσιο MEC

Το επίπεδο του host αποτελείται από τον Mobile Edge (ME) host και από τη μονάδα διαχείρισής του. Ο ME host διαχωρίζεται περαιτέρω στη ME πλατφόρμα, στις ME εφαρμογές και στην υποδομή εικονικοποίησης (virtualization infrastructure). Το επίπεδο δικτύου αποτελείται από εξωτερικές οντότητες όπως το κυψελωτό δίκτυο 3GPP, τα τοπικά δίκτυα και άλλα εξωτερικά δίκτυα. Στην κορυφή του πλαισίου βρίσκεται το επίπεδο συστήματος, το οποίο έχει την καθολική εποπτεία όλου του ME συστήματος.

### 3.2.1.2 Αρχιτεκτονική αναφοράς MEC

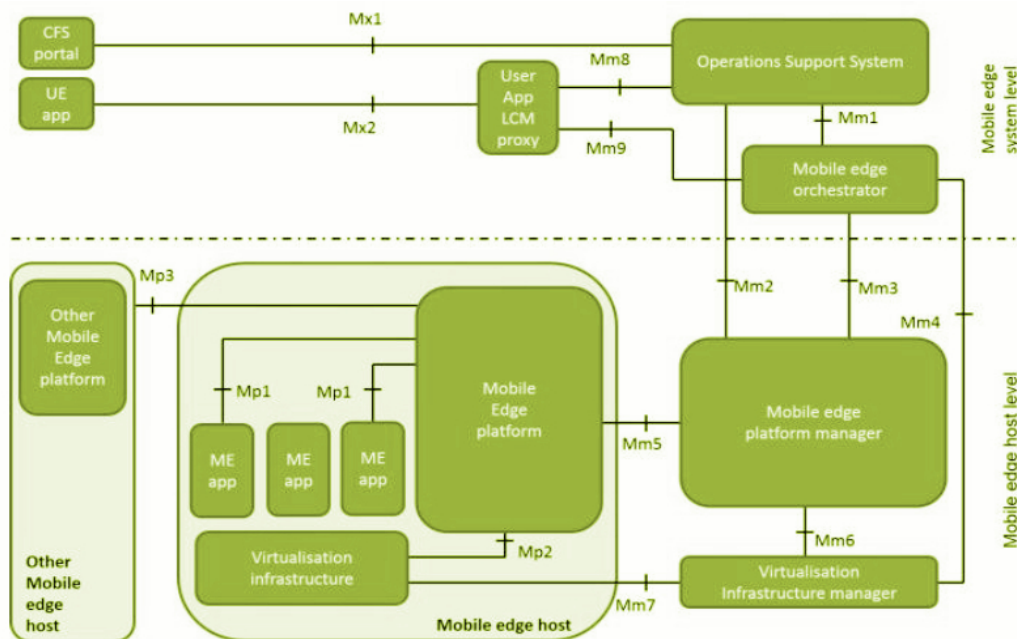
Η αρχιτεκτονική αναφοράς αποσαφηνίζει λεπτομερέστερα τις λειτουργικές οντότητες και τις συνδέσεις μεταξύ τους. Ο διαχωρισμός εδώ γίνεται σε επίπεδο συστήματος και επίπεδο host, ενώ παραλείπεται το επίπεδο δικτύων.

Η μονάδα του ME host αποτελείται από τη ME πλατφόρμα και την υποδομή εικονικοποίησης και παρέχει τους απαραίτητους υπολογιστικούς και αποθηκευτικούς πόρους για την εξυπηρέτηση των ME εφαρμογών. Η υποδομή εικονικοποίησης περιλαμβάνει ένα επίπεδο δεδομένων (data plane), το οποίο εκτελεί τους προωθημένους κανόνες που έχουν



παραληφθεί από τη ΜΕ πλατφόρμα και δρομολογεί την κίνηση μεταξύ των εφαρμογών, των υπηρεσιών και του δικτύου.

Οι ΜΕ εφαρμογές εκτελούνται ως εικονικές μηχανές πάνω στην υποδομή εικονικοποίησης που παρέχει ο ΜΕ host. Οι εφαρμογές αλληλεπιδρούν με τη ΜΕ πλατφόρμα μέσω του σημείου αναφοράς Mm1 ώστε να καταναλώσουν (consume) τις υπηρεσίες που παρέχονται από αυτή. Το Mm1 χρησιμοποιείται επίσης για επιπρόσθετες διεργασίες υποστήριξης, όπως η υπόδειξη της διαθεσιμότητας μιας εφαρμογής. Οι ΜΕ εφαρμογές προδιαγράφουν τις απαιτήσεις τους σε πόρους ή υπηρεσίες, καθώς και τους περιορισμούς σε μέγιστη επιτρεπόμενη καθυστέρηση.



Σχήμα 3.11 Αρχιτεκτονική MEC

Η ΜΕ πλατφόρμα (Mobile Edge Platform - MEP) αντιπροσωπεύει τη συλλογή βασικών λειτουργιών που απαιτούνται για την εκτέλεση των εφαρμογών σε συγκεκριμένο ΜΕ host. Επιτρέπει στις ΜΕ εφαρμογές να παρέχουν, καταναλώνουν (consume), διαφημίζουν και ανακαλύπτουν ΜΕ υπηρεσίες. Η ΜΕ πλατφόρμα συνδέεται με τη μονάδα διαχείρισής της μέσω του σημείου αναφοράς Mm5, ώστε να παραλάβει τους κανονισμούς κίνησης του δικτύου. Η μονάδα διαχείρισης της ΜΕ πλατφόρμας (Mobile Edge Platform Manager - MEPM) διαχωρίζεται περαιτέρω στο στοιχείο διαχείρισης της ΜΕ πλατφόρμας, στη μονάδα διαχείρισης του κύκλου ζωής των εφαρμογών και στις λειτουργίες διαχείρισης των κανόνων και των απαιτήσεων των ΜΕ εφαρμογών. Οι λειτουργίες κανόνων και απαιτήσεων περιλαμβάνουν εξουσιοδοτήσεις, κανόνες σχετικούς με την κίνηση, παραμέτρους DNS και ζητήματα επίλυσης στην περίπτωση όπου ένα σύνολο κανόνων βρίσκονται σε σύγκρουση. Η MEPM επικοινωνεί με το σύστημα υποστήριξης λειτουργιών του επιπέδου συστήματος μέσω του σημείου αναφοράς Mm2 με σκοπό τη ρύθμιση παραμέτρων και τη διαχείριση απόδοσης της ΜΕ πλατφόρμας. Το σημείο αναφοράς Mm3 συνδέει τη MEPM με τον



ενορχηστρωτή ΜΕ του επιπέδου συστήματος και παρέχει υποστήριξη για τη διαχείριση του κύκλου ζωής των εφαρμογών και την καταγραφή των διαθέσιμων υπηρεσιών.

Η διαχείριση υποδομής εικονικοποίησης (Virtualization Infrastructure Manager - VIM) εκτελεί λειτουργίες σχετικές με τον κύκλο ζωής των εικονικών πόρων. Τέτοιες λειτουργίες μπορεί να είναι η κατανομή των πόρων στις εφαρμογές, η διαχείριση και η απελευθέρωση των πόρων. Επίσης, προετοιμάζει την υποδομή εικονικοποίησης, ώστε αυτή να τρέξει μια εικόνα λογισμικού, συλλέγει πληροφορίες επίδοσης και ασφαλμάτων σχετικά με τους εικονικούς πόρους και τις προωθεί προς τη διαχείριση συστήματος για περαιτέρω επεξεργασία. Επικοινωνεί με την υποδομή εικονικοποίησης μέσω του σημείου αναφοράς Mm7, ενώ συνδέεται και με τη ΜΕΡΜ μέσω του Mm6, ώστε να της παρέχει πληροφορίες σχετικές με τα σφάλματα που αφορούν τους εικονικούς πόρους και μετρήσεις της επίδοσης του συστήματος.

Το επίπεδο συστήματος αποτελείται από δύο βασικά συστατικά μέρη: το *Mobile Edge Orchestrator* (ΜΕΟ) και το *Operations Support System* (OSS). Ο ΜΕΟ αποτελεί το κεντρικό σημείο σε ένα σύστημα ΜΕ, καθώς έχει την εποπτεία των πόρων και των δυνατοτήτων όλου του ΜΕC δικτύου. Διατηρεί συνολική εικόνα του συστήματος καθώς γνωρίζει πληροφορίες σχετικές με την τοπολογία του δικτύου, τους hosts που περιλαμβάνει, τους πόρους και τις υπηρεσίες που είναι διαθέσιμες στον εκάστοτε host. Επίσης, πραγματοποιεί εκτιμήσεις σχετικές με την καθυστέρηση του συστήματος και το διαθέσιμο εύρος ζώνης, οπότε είναι σε θέση να επιλέγει τον κατάλληλο host για την εκκίνηση μιας εφαρμογής. Ο ΜΕΟ είναι υπεύθυνος για την έναρξη και τον τερματισμό όλων των εφαρμογών. Επικοινωνεί με τη μονάδα VIM μέσω του Mm4, με σκοπό τη διαχείριση των εικονικών πόρων του συστήματος και την παρακολούθηση των διαθέσιμων πόρων κάθε host.

Το OSS είναι το σύστημα υψηλότερου επιπέδου που συμβάλλει στο να τρέξουν οι εφαρμογές στο επιθυμητό σημείο του δικτύου. Λαμβάνει αιτήματα για την έναρξη και τον τερματισμό των εφαρμογών, είτε μέσω της πύλης CFS (Customer Facing Service Portal), ή από τα UE. Εφόσον βρίσκεται στο σύνορο μεταξύ του εξωτερικού περιβάλλοντος και του δικτύου, το OSS ελέγχει την ακεραιότητα και την αξιοπιστία των πακέτων εφαρμογών και εγκρίνει τα αιτήματα έναρξης, τερματισμού ή μετεγκατάστασης των εφαρμογών. Επικοινωνεί με το ΜΕΟ μέσω του σημείου αναφοράς Mm1, ώστε να του προωθήσει τα αιτήματα που έχουν γίνει αποδεκτά για περαιτέρω επεξεργασία.

Τέλος, τα σημεία αναφοράς Mx1 και Mx2 χρησιμοποιούνται για την πρόσβαση στο δίκτυο ΜΕC από εξωτερικούς χρήστες. Συγκεκριμένα, στο Mx1 συνδέονται οι πύλες CGS, οι οποίες λειτουργούν ως σημεία εισόδου για τρίτους συνεργάτες, ενώ στο Mx2 συνδέονται οι εφαρμογές των UE. Η μονάδα διαχείρισης κύκλου ζωής (Lifecycle Management - LCM) των εφαρμογών χρήστη μεσολαβεί μεταξύ των UE και των ΜΕΟ/OSS και μεταβιβάζει τα αιτήματα εισαγωγής, έναρξης και τερματισμού των εφαρμογών.

## 3.2.2 Υπηρεσίες MEC

### 3.2.2.1 Πληροφορίες ραδιοδικτύου

Η υπηρεσία πληροφοριών ραδιοδικτύου (Radio Network Information Service - RNIS) παρέχει πληροφορίες σχετικές με το ραδιοδίκτυο τόσο στις εφαρμογές ME όσο και στη ME πλατφόρμα. Η υπηρεσία είναι διαθέσιμη στις εξουσιοδοτημένες ME εφαρμογές και μπορεί να εντοπιστεί στο σημείο αναφοράς Mp1, το οποίο συνδέει τις ME εφαρμογές με την πλατφόρμα. Οι παρεχόμενες πληροφορίες βασίζονται σε παραμέτρους όπως η κυψέλη, οι UE, η κλάση QCI (QoS Class Identifier) και μπορεί να ζητούνται για συγκεκριμένη χρονική περίοδο. Τέτοιες πληροφορίες είναι οι εξής:

- Πληροφορίες ραδιοδικτύου σχετικές με τις τρέχουσες συνθήκες του δικτύου
- Μετρήσεις σχετικές με το στρώμα χρήστη (user plane - UP) βάσει των 3GPP προδιαγραφών
- Πληροφορίες σχετικές με τα UE τα οποία συνδέονται σε κόμβους του δικτύου που σχετίζονται με το ME host, το γενικό τους πλαίσιο καθώς και τους σχετιζόμενους κομιστές
- Τροποποιήσεις στις ανωτέρω πληροφορίες

### 3.2.2.2 Υπηρεσία τοποθεσίας

Η υπηρεσία εντοπισμού τοποθεσίας (Location Service) παρέχει στη ME πλατφόρμα και τις εξουσιοδοτημένες εφαρμογές πληροφορίες σχετικές με την τοποθεσία των χρηστών και των κόμβων του δικτύου πρόσβασης. Υποστηρίζει μηχανισμούς ανάκτησης και εγγραφής τοποθεσίας καθώς και ανώνυμη αναφορά τοποθεσίας για συλλογή στατιστικών στοιχείων. Οι πληροφορίες που παρέχονται από την υπηρεσία τοποθεσίας είναι οι ακόλουθες:

- Η τοποθεσία συγκεκριμένων UE που εξυπηρετούνται από κόμβους σχετιζόμενους με το ME host
- Η τοποθεσία όλων των UE που εξυπηρετούνται από κόμβους σχετιζόμενους με το ME host
- Η τοποθεσία συγκεκριμένης κατηγορίας UE που εξυπηρετούνται από κόμβους σχετιζόμενους με το ME host
- Κατάλογο των UE που βρίσκονται εντός συγκεκριμένης περιοχής
- Τα UE που εισέρχονται ή εξέρχονται από συγκεκριμένη περιοχή
- Η τοποθεσία όλων των ραδιοκόμβων που σχετίζονται με το ME host

### 3.2.2.3 Υπηρεσία διαχείρισης εύρους ζώνης

Οι διαφορετικές ΜΕ εφαρμογές που τρέχουν παράλληλα σε ένα host έχουν διαφορετικές απαιτήσεις σε εύρος ζώνης καθώς και σε προτεραιότητα. Το διαθέσιμο εύρος ζώνης διαμοιράζεται στις εφαρμογές, οι οποίες διαγωνίζονται για τους διαθέσιμους πόρους. Η υπηρεσία διαχείρισης εύρους ζώνης συλλέγει τις απαιτήσεις των εφαρμογών και εκτελεί τις απαραίτητες ενέργειες, προκειμένου να ελεγχθεί η κατανομή του διαθέσιμου εύρους στις ΜΕ εφαρμογές.

### 3.2.3 Πλεονεκτήματα τεχνολογίας MEC

Το οικοσύστημα MEC σχεδιάστηκε με σκοπό να παρέχει σημαντικά οφέλη όχι μόνο στους παρόχους ασύρματων υπηρεσιών δικτύου και σε τρίτους συνεργάτες, αλλά και στον τελικό καταναλωτή. Ακολούθως, παρατίθενται τα σημαντικότερα πλεονεκτήματα της τεχνολογίας MEC.

- *Χαμηλή καθυστέρηση.* Οι MEC εξυπηρετητές βρίσκονται πλησιέστερα στον τελικό χρήστη συγκριτικά με την παραδοσιακή αρχιτεκτονική δικτύου. Επομένως, οι πληροφορίες διανύουν μικρότερη απόσταση και η εξυπηρέτηση του χρήστη πραγματοποιείται με ελάχιστη καθυστέρηση. Το γεγονός αυτό είναι ιδιαίτερα χρήσιμο για την ανάπτυξη και την εξυπηρέτηση εφαρμογών που είναι ευαίσθητες σε καθυστέρηση ή αφορούν real-time υπηρεσίες.
- *Μείωση της επιβάρυνσης του δικτύου κορμού.* Η συσσώρευση μεγάλου όγκου δεδομένων εξαιτίας της επικοινωνίας με τους cloud εξυπηρετητές, που παρατηρείται στην κλασική αρχιτεκτονική δικτύου, περιορίζεται σε σημαντικό βαθμό στο περιβάλλον MEC. Οι MEC εξυπηρετητές εντοπίζονται στο ακραίο σημείο του δικτύου εντός του RAN οπότε μόνο ένα μέρος της συνολικής κίνησης διέρχεται από το δίκτυο κορμού. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα την αποσυμφόρηση του δικτύου.
- *Αύξηση εύρους ζώνης και QoS.* Σε συνδυασμό με την υπηρεσία διαχείρισης εύρους ζώνης, οι MEC εξυπηρετητές είναι σε θέση να παρέχουν υψηλές ταχύτητες εξυπηρέτησης στους χρήστες. Οι διαθέσιμοι τηλεπικοινωνιακοί πόροι που παρέχουν οι εξυπηρετητές και η μικρή απόστασή τους από τους καταναλωτές υπηρεσιών εξασφαλίζουν το απαραίτητο επίπεδο QoS.
- *Εντοπιότητα.* Οι εξυπηρετητές MEC μπορούν να φιλοξενούν υπηρεσίες βασισμένες στην τοποθεσία τους. Οι ακραίοι κόμβοι του δικτύου είναι σε θέση να αποθηκεύουν πληροφορίες οι οποίες ενδιαφέρουν τους χρήστες που βρίσκονται εντός συγκεκριμένης περιοχής. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα να περιορίζεται η επικοινωνία με το δίκτυο κορμού.
- *Εντοπισμός θέσης των χρηστών.* Οι MEC εξυπηρετητές μπορούν να καθορίσουν με ταχύτητα και ακρίβεια τις θέσεις των χρηστών. Η λειτουργία αυτή διευκολύνει εφαρμογές που βασίζονται στη θέση των τερματικών.

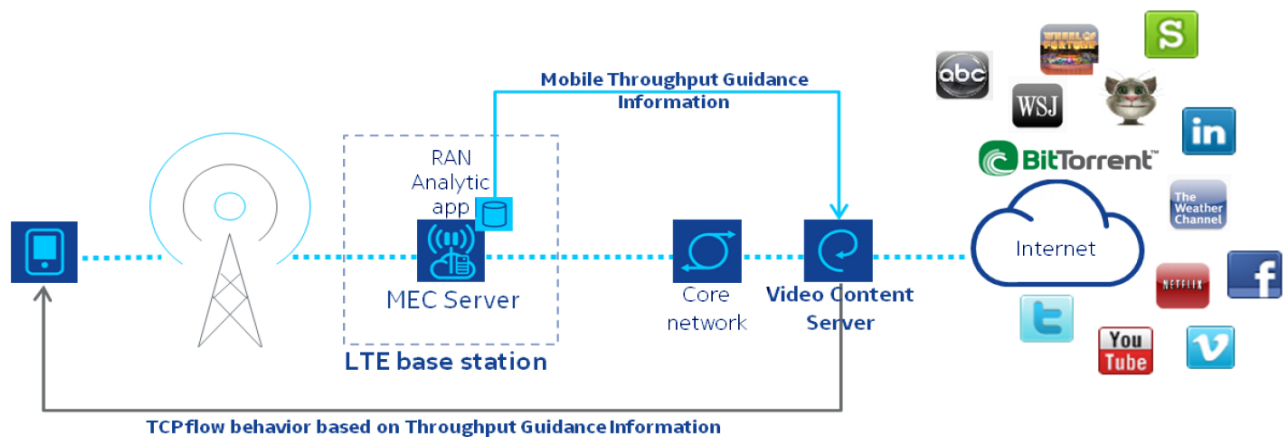
### 3.2.4 Πεδία εφαρμογής

Η τεχνολογία MEC μπορεί να προσφέρει υπηρεσίες σε καινοτόμες εφαρμογές, τις οποίες τα κυψελωτά συστήματα δεν μπορούν να υποστηρίξουν ικανοποιητικά. Οι εφαρμογές αυτές συνήθως έχουν υψηλές απαιτήσεις σε εύρος ζώνης και χαμηλή καθυστέρηση, ενώ προϋποθέτουν αλληλεπίδραση σε πραγματικό χρόνο. Ακολούθως, περιγράφονται συνοπτικά μερικά πεδία εφαρμογών.

#### 3.2.4.1 Ευφυής επιτάχυνση βίντεο

Η ποιότητα εμπειρίας του χρήστη (Quality of Experience - QoE) και η χρησιμοποίηση των πόρων του ραδιοδικτύου μπορούν να βελτιωθούν μέσω υπηρεσιών βελτιστοποίησης βίντεο. Τυπικά, η προώθηση του περιεχομένου πολυμέσων γίνεται με χρήση του πρωτοκόλλου HTTP το οποίο λειτουργεί πάνω από το TCP. Οι διαθέσιμοι πόροι του δικτύου μπορούν να μεταβληθούν εντός ελάχιστων δευτερολέπτων, λόγω μεταβολών στις συνθήκες των καναλιών ή της μετακίνησης των χρηστών. Το TCP δεν είναι σε θέση να προσαρμοστεί αρκετά γρήγορα στις μεταβαλλόμενες συνθήκες του δικτύου πρόσβασης, με αποτέλεσμα οι διαθέσιμοι πόροι να μην κατανέμονται σωστά στους χρήστες του δικτύου.

Στο Σχ 3.12 απεικονίζεται ένας τρόπος αξιοποίησης του MEC με σκοπό την καλύτερη αξιοποίηση του δικτύου και τη βελτίωση της QoE των χρηστών. Σε αυτήν την περίπτωση, ο εξυπηρετητής MEC φιλοξενεί μια εφαρμογή, η οποία παρέχει στο video server μια ένδειξη για το εκτιμώμενο διαθέσιμο throughput στη ραδιοδιεπαφή DL. Ο video server αξιοποιεί τις πληροφορίες που λαμβάνει από την εφαρμογή και προσαρμόζει κατάλληλα το ρυθμό μετάδοσης που λαμβάνει κάθε χρήστης, ενώ υποβοηθεί τις αποφάσεις του TCP σχετικά με τον έλεγχο συμφόρησης.



Σχήμα 3.12 Υπηρεσία ευφυούς επιτάχυνσης βίντεο

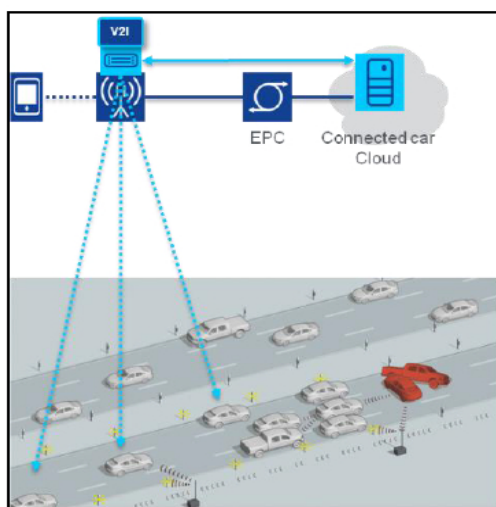
#### 3.2.4.2 Διασυνδεδεμένα οχήματα

Ο αριθμός των οχημάτων με δυνατότητα δικτύωσης αυξάνεται με ταχείς ρυθμούς και θα συνεχίσει να αυξάνεται τα προσεχή χρόνια. Τα οχήματα συνδέονται στο Διαδίκτυο

προκειμένου να επικοινωνούν τόσο μεταξύ τους όσο και με παρακείμενους των οδών αισθητήρες, με στόχο την εξασφάλιση της απαραίτητης ασφάλειας, της αποδοτικότερης κυκλοφορίας στο οδικό δίκτυο και της άνεσης του επιβάτη. Η συνδεσιμότητα στο Διαδίκτυο μπορεί να χρησιμοποιηθεί για πρόσθετες υπηρεσίες, όπως η εύρεση θέσης στάθμευσης.

Το LTE μπορεί να ανταποκριθεί αποτελεσματικά στην ανάπτυξη επικοινωνίας μεταξύ των οχημάτων, παρέχοντας μικρές καθυστερήσεις επικοινωνίας (μικρότερες των 100 ms) και επιτρέποντας την ανταλλαγή μηνυμάτων σε πραγματικό χρόνο.

Η τεχνολογία MEC μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την επέκταση του δικτύου των διασυνδεδεμένων οχημάτων παρέχοντας τη δυνατότητα στα δεδομένα και στις εφαρμογές να φιλοξενοούνται εγγύτερα στα οχήματα. Το γεγονός αυτό συμβάλλει στη μείωση του χρόνου της μετ' επιστροφής διαδρομής (round trip time - RTT) των δεδομένων, ενώ εισάγεται ένα νοητό επίπεδο μεταξύ του δικτύου κορμού και των διαδικτυακών εφαρμογών. Οι MEC εφαρμογές εκτελούνται στους MEC εξυπηρετητές που είναι τοποθετημένοι στους σταθμούς βάσης του LTE. Δέχονται τοπικά μηνύματα απευθείας από τα οχήματα ή τους αισθητήρες, τα επεξεργάζονται και στη συνέχεια, διαδίδουν προειδοποιήσεις κινδύνων και άλλα σχετικά μηνύματα σε όλα τα οχήματα της περιοχής.

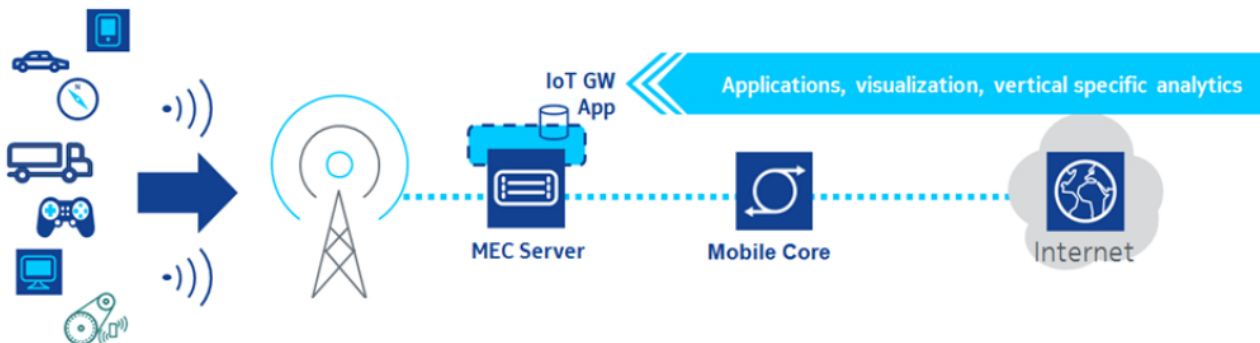


Σχήμα 3.13 Υπηρεσία διασυνδεδεμένων οχημάτων

### 3.2.4.3 Πύλη Internet of Things

Το Διαδίκτυο των πραγμάτων (IoT) δημιουργεί την ανάγκη συγκέντρωσης και διαχείρισης των πολυάριθμων μηνυμάτων που παράγονται από τα διασυνδεδεμένα αντικείμενα. Για το λόγο αυτό, χρησιμοποιούνται ειδικές πύλες IoT με αυξημένες απαιτήσεις λόγω των παραμέτρων των μηνυμάτων που ανταλλάσσονται. Συγκεκριμένα, τα μηνύματα είναι μικρά, κρυπτογραφημένα και διατυπωμένα σε ποκίλα πρωτόκολλα, ανάλογα με τη σύνδεση από την οποία προέρχονται (3G, LTE, Wi-Fi κ.ά.). Δημιουργείται, έτσι, η ανάγκη για ένα σημείο συσσώρευσης των μηνυμάτων, το οποίο θα παρέχει μικρή καθυστέρηση και θα διαχειρίζεται τα διάφορα πρωτόκολλα, την κατανομή των μηνυμάτων και την

επεξεργασία των αναλυτικών στοιχείων. Η τεχνολογία MEC παρέχει τη λύση στις ανωτέρω απαιτήσεις, μέσω της εγκατάστασης ενός MEC εξυπηρετητή στα σημεία των IoT πυλών. Οι IoT εφαρμογές μπορούν να τρέχουν στους MEC εξυπηρετητές, οι οποίοι είναι εγκατεστημένοι στους σταθμούς βάσης του LTE, με αποτέλεσμα η επικοινωνία να συντελείται σε πραγματικό χρόνο, χωρίς καθυστερήσεις.



Σχήμα 3.14 Υπηρεσία πύλης IoT

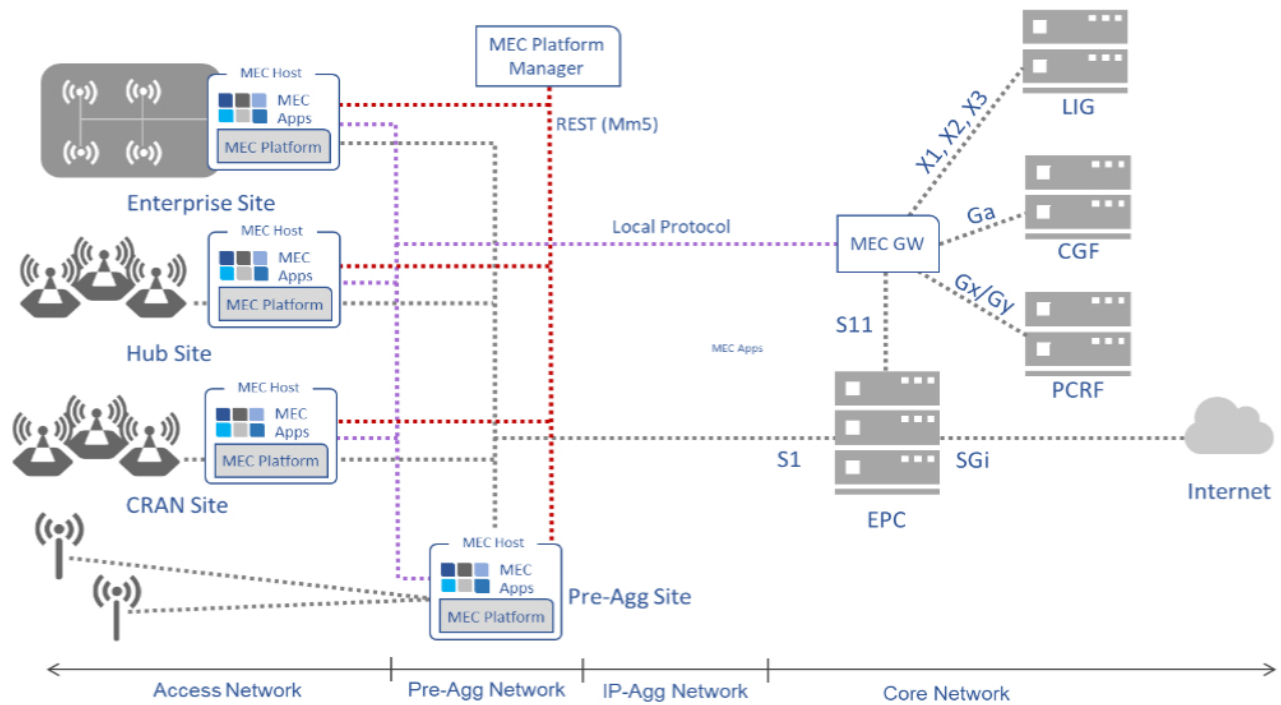
### 3.3 Εφαρμογή της τεχνολογίας MEC στο LTE

Το βασικό σχέδιο, στο οποίο στηρίχθηκε η ανάπτυξη της MEC τεχνολογίας, ήταν η ενσωμάτωσή της στα δίκτυα πέμπτης γενιάς. Εντούτοις, η αρχιτεκτονική MEC είναι ανεξάρτητη της δικτυακής υποδομής πάνω από την οποία εφαρμόζεται. Καθώς η τεχνολογία 4G προβλέπεται να είναι επιτυχημένη για αρκετά ακόμη χρόνια, ένα μεγάλο μέρος της βιομηχανίας δικτύων εξετάζει την εφαρμογή του MEC στο υφιστάμενο LTE δίκτυο. Αργότερα, οι ίδιες MEC υποδομές μπορούν να επαναχρησιμοποιηθούν στα δίκτυα πέμπτης γενιάς.

Στην ενότητα αυτή εξετάζονται τα πιθανά σενάρια εφαρμογής της τεχνολογίας MEC στο LTE δίκτυο.

#### 3.3.1 Bump in the wire

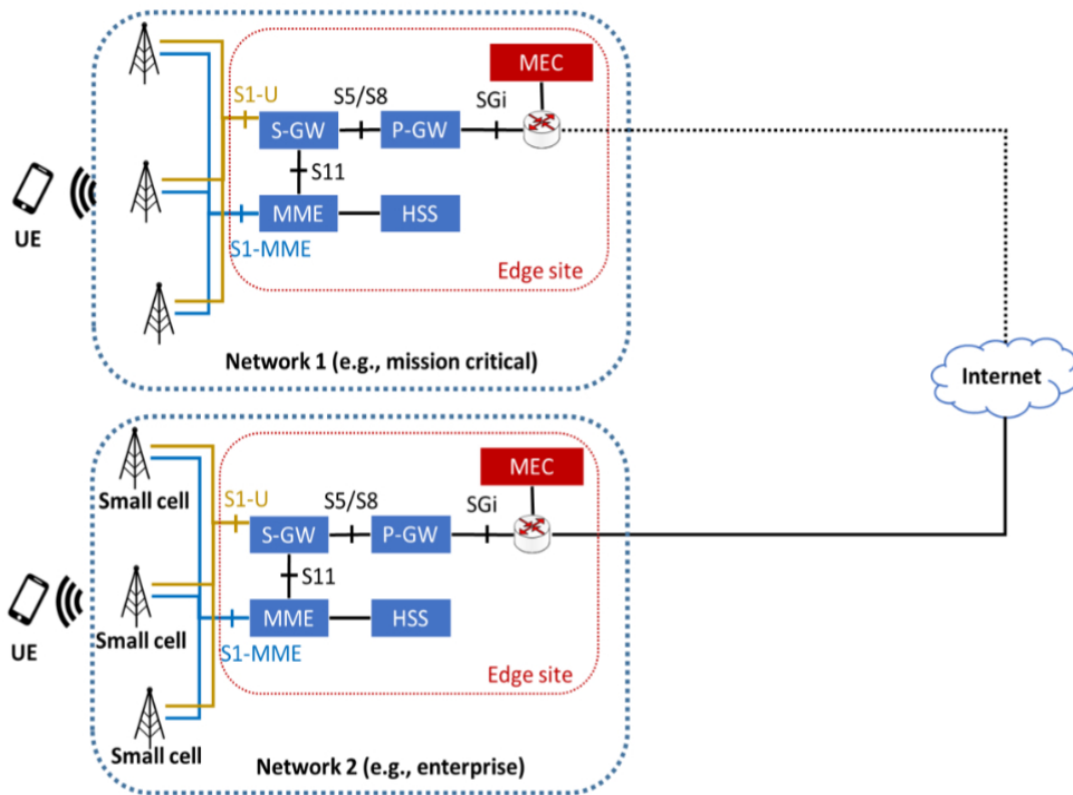
Η τεχνική bump in the wire περιλαμβάνει όλες τις περιπτώσεις όπου το σημείο εγκατάστασης της MEC πλατφόρμας βρίσκεται μεταξύ του eNB και του EPC. Στην ειδική περίπτωση όπου η MEC πλατφόρμα είναι εγκατεστημένη στον eNB, μπορεί να δρομολογεί πακέτα IP μεταξύ των MEC εφαρμογών και της S-GW. Σε όλες τις υπόλοιπες περιπτώσεις, το σημείο εγκατάστασης της MEC βρίσκεται κοντά στον eNB και η MEC συνδέεται στη διεπαφή S1. Το στρώμα δεδομένων του ME host επεξεργάζεται την κίνηση των χρηστών, η οποία ενθυλακώνεται σε GTP-U πακέτα. Επειδή ένα μέρος των δεδομένων δεν διέρχεται από τον EPC, χρησιμοποιείται μια πύλη MEC GW για τη διαχείριση λειτουργιών, όπως η νόμιμη υποκλοπή και οι υπηρεσίες χρεώσεων.



Σχήμα 3.15 Bump in the wire

### 3.3.2 Κατανεμημένος EPC

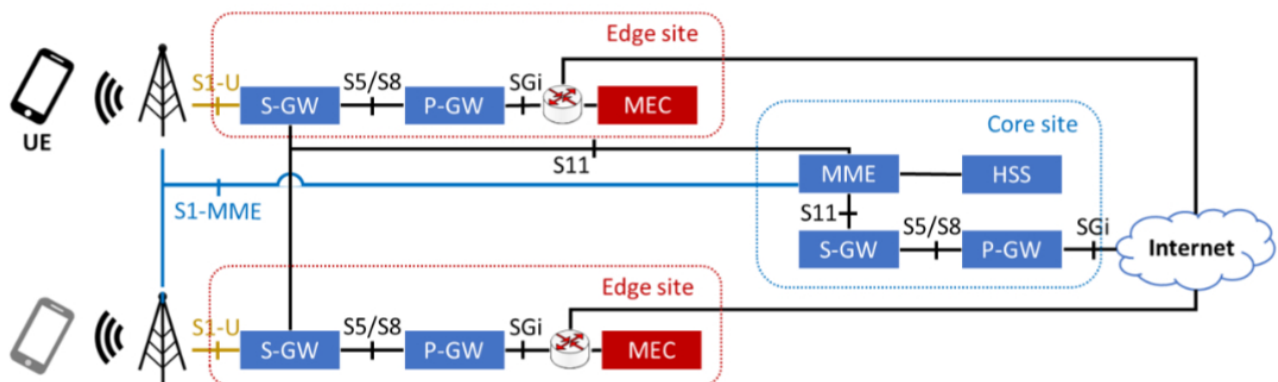
Στην περίπτωση του κατανεμημένου EPC, ο ME host συμπεριλαμβάνει στοιχεία του EPC με σκοπό την ελαχιστοποίηση των καθυστερήσεων. Το στρώμα δεδομένων του ME host συνδέεται στη διεπαφή SGi και δρομολογεί τα πακέτα μεταξύ της πύλης P-GW και των εξωτερικών δικτύων. Όταν ο HSS βρίσκεται στο ME host, δεν απαιτείται σύνδεση με το δίκτυο κορμού για τη μεταφορά δεδομένων, κάτι που ευνοεί τις εφαρμογές που είναι ευαίσθητες σε καθυστερήσεις. Στην περίπτωση όπου ο HSS βρίσκεται στον EPC, όπως στην κλασική αρχιτεκτονική LTE, δεν απαιτείται η διαρκής λειτουργική σύνδεση με το δίκτυο κορμού ώστε να παρέχεται αδιάκοπα η τοπική υπηρεσία.



Σχήμα 3.16 Καταναμημένος EPC

### 3.3.3 Καταναμημένες S-GW / P-GW

Σε αυτό το σενάριο, ο ME host συμπεριλαμβάνει τις S-GW/P-GW, ενώ οι λειτουργίες του στρώματος ελέγχου όπως ο HSS και η MME παραμένουν στον EPC. Το στρώμα δεδομένων του ME host συνδέεται με την P-GW μέσω της διεπαφής SGi. Η επιλογή του τοπικού S-GW γίνεται κεντρικά από τη MME βάσει του κωδικού περιοχής εντοπισμού (Tracking Area Code -TAC) του ραδιοδιαύλου στον οποίο συνδέεται ο UE.

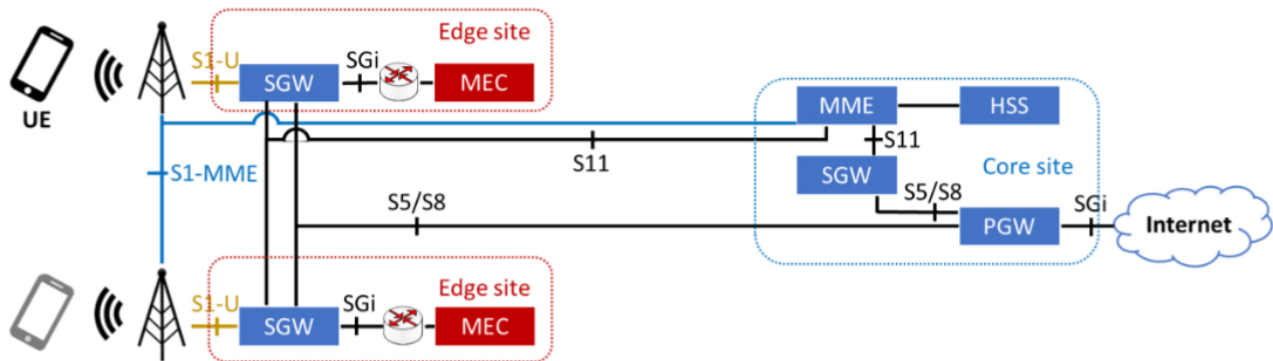


Σχήμα 3.17 Καταναμημένες S-GW / P-GW



### 3.3.4 Κατανεμημένη S-GW με τοπικό breakout

Η τοπική διαφυγή (local breakout) στις πύλες S-GW είναι το σχήμα αρχιτεκτονικής MEC που προήλθε από την ανάγκη των παρόχων να αποκτήσουν μεγαλύτερο έλεγχο στη διαβάθμιση της κίνησης που ανακατευθύνεται. Σε αυτήν την περίπτωση, μόνο η πύλη S-GW τοποθετείται μαζί με το ME host, ενώ η πύλη P-GW βρίσκεται στον EPC. Η κίνηση δρομολογείται επιλεκτικά, είτε προς το MEC μέσω του τοπικού συστήματος διαφυγής, είτε προς το Διαδίκτυο μέσω της πύλης P-GW. Η λύση αυτή επιτρέπει στον πάροχο να καθορίσει φίλτρα κίνησης με βάση πληροφορίες όπως το APN (Access Point Name), το αναγνωριστικό χρήστη ή άλλες παραμέτρους του επιπέδου IP.



Σχήμα 3.18 Κατανεμημένη S-GW με τοπικό breakout

### 3.4 Περί δικτύων 5G

Το 5G είναι η επόμενη γενιά της 3GPP τεχνολογίας, η οποία ακολουθεί το 4G/LTE. Η εισαγωγή στα δίκτυα πέμπτης γενιάς έγινε με την έκδοση 15 της 3GPP. Τα 5G δίκτυα σκοπεύουν στην επίτευξη των ακόλουθων στόχων:

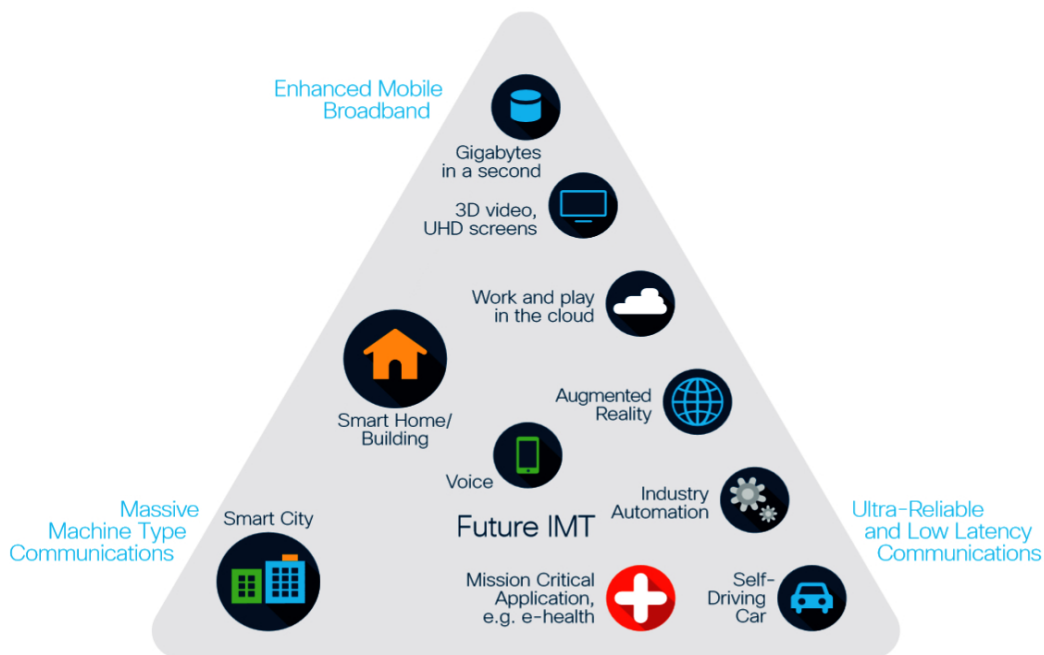
- Υψηλή διεκπεραιωτική ικανότητα (1-20Gbps)
- Πολύ μικρές καθυστερήσεις (<1ms)
- 1000x εύρος ζώνης ανά μονάδα περιοχής
- Μαζική συνδεσιμότητα
- Υψηλή διαθεσιμότητα
- Πυκνή κάλυψη
- Χαμηλή κατανάλωση ενέργειας
- Διάρκεια ζωής μπαταρίας συσκευών M2M (Machine-to-Machine) έως 10 έτη

Οι περιπτώσεις εφαρμογής του 5G μπορούν να διαχωριστούν σε τρεις επιμέρους κατηγορίες:

*Enhanced Mobile broadband (eMBB)*: Πρόκειται για εφαρμογές πρόσβασης των χρηστών σε υπηρεσίες με βελτιωμένη απόδοση ως προς την ταχύτητα, τη διεκπεραιωτική ικανότητα και τη χωρητικότητα του δικτύου.

*Ultra-reliable low latency Communications (URLLC)*: Εντάσσονται εφαρμογές που έχουν υψηλές απαιτήσεις σε καθυστέρηση και διαθεσιμότητα του δικτύου, όπως εφαρμογές επαυξημένης και εικονικής πραγματικότητας, τηλε-χειρουργικής, έξυπνων μετακινήσεων και βιομηχανικού αυτοματισμού.

*Massive IoT*: Περιλαμβάνει εφαρμογές που χρησιμοποιούνται από εξαιρετικά μεγάλο πλήθος συσκευών που επικοινωνούν μεταξύ τους και σχηματίζουν ένα σύστημα IoT.



Σχήμα 3.19 5G εφαρμογές

### 3.4.1 Εφαρμογή της τεχνολογίας MEC στα δίκτυα 5G

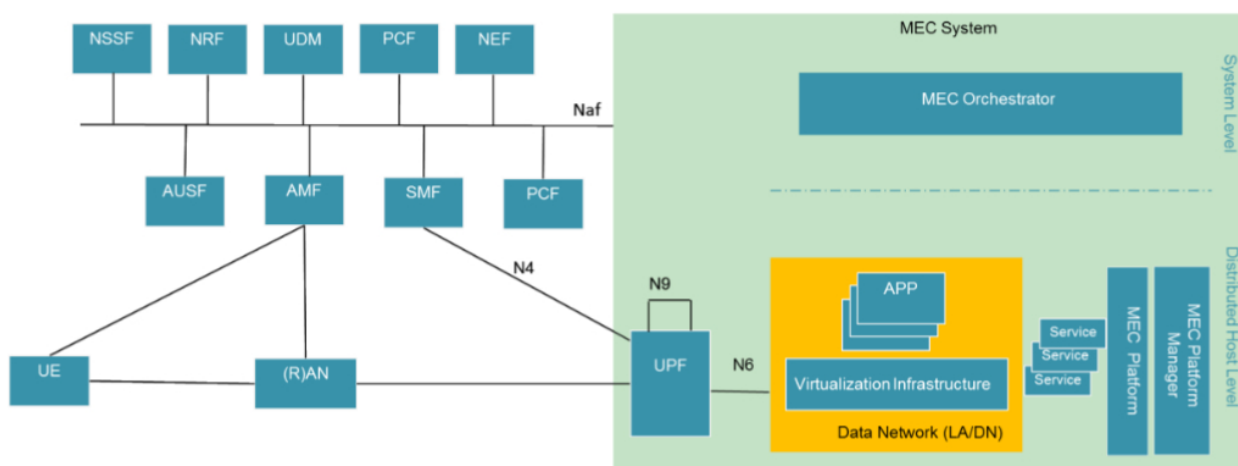
Όπως συμβαίνει και στο LTE, η αρχιτεκτονική δικτύων 5G διαχωρίζεται στο δίκτυο κορμού και το δίκτυο ραδιοπρόσβασης. Το NG-RAN (Next Generation RAN) του 5G αποτελείται από δύο στοιχεία: τους gNB, οι οποίοι παρέχουν υπηρεσίες στο επίπεδο χρήστη και στο επίπεδο ελέγχου νέας γενιάς, και τους ng-eNB, που επικοινωνούν με πρωτόκολλα E-UTRAN του LTE. Το NG-RAN συνδέεται με το δίκτυο κορμού (5G Core - 5GC) μέσω της διεπαφής NG. Η μονάδα AMF (Access and Mobility Management Function) του 5GC συνδέει το RAN με το 5GC και εκτελεί λειτουργίες σχετικές με την εγγραφή των χρηστών, τη διαχείριση κινητικότητας και την ασφάλεια. Επίσης, η μονάδα UPF (User Plane Function) συνδέει το NG-RAN με το στρώμα δεδομένων.

Το 5GC αποτελείται από ένα σύνολο δικτυακών λειτουργιών (Network Functions - NF) οι οποίες μπορούν να υλοποιηθούν ως εικονικές λειτουργίες δικτύου (Virtual NF - VNF). Το

5G εφαρμόζει την τεχνική διαχωρισμού των CP και UP επιπέδων μέσω της ανάθεσης διακριτών λειτουργιών σε κάθε NF. Η τεχνική αυτή ονομάζεται CUPS (Control Plane User Plane Separation) και επιτρέπει την κατανομή των στοιχείων του κορμού, οδηγώντας σε αποδοτικότερη χρησιμοποίηση των πόρων του δικτύου.

Η αρχιτεκτονική 5G μπορεί να αναπαρασταθεί βάσει της μορφής SBA (Service Based Architecture), όπου κάθε NF συνδέεται με τις υπόλοιπες μέσω μιας μοναδικής διεπαφής, ώστε να επιτρέπεται η ανταλλαγή υπηρεσιών. Στο Σχ.3.20 απεικονίζεται η σύνδεση ενός 5G δικτύου σε μορφή SBA, με ένα σύστημα MEC.

Το σύστημα MEC λειτουργεί ως εξωτερικό δίκτυο δεδομένων, άρα ο ME host συνδέεται με τη μονάδα λειτουργιών του στρώματος δεδομένων (UPF). Ο ρόλος της UPF είναι να κατευθύνει την κίνηση δεδομένων χρήστη μεταξύ του 5G δικτύου και των εφαρμογών MEC, βάσει κανόνων που λαμβάνει από τη μονάδα διαχείρισης συνόδου (Session Management Function - SMF). Η κίνηση επηρεάζεται επίσης από τη μονάδα ελέγχου συμπεριφοράς δικτύου (Policy Control Function - PCF), σύμφωνα με τους κανόνες χρέωσης των χρηστών.



Σχήμα 3.20 Ένταξη του MEC στο δίκτυο 5G

Οι μονάδες του MEC, όπως ο ενορμηστροτής και η πλατφόρμα, αντιμετωπίζονται από το 5G δίκτυο ως λειτουργίες εφαρμογών (Application Functions - AF) και επικοινωνούν με αυτό μέσω της διεπαφής Naf. Με αυτήν την υλοποίηση, υπηρεσίες που προέρχονται από εφαρμογές που τρέχουν στο host, μπορούν να διαφημιστούν στο 5G. Η μονάδα NEF (Network Exposure Function) εκθέτει τις διαθέσιμες δυνατότητες και γεγονότα σε άλλες NF και παρέχει ασφαλή πρόσβαση σε εφαρμογές εκτός του δικτύου 3GPP. Στο σύστημα MEC, η NEF χρησιμοποιείται για την επικοινωνία του MEO με τις υπόλοιπες NF. Εντούτοις, στην περίπτωση όπου δεν τίθενται θέματα ασφάλειας, ο MEO επικοινωνεί απευθείας με τις NF του 5G. Επίσης, είναι δυνατή η τοποθέτηση μιας NEF εντός του MEC host, η οποία θα παρέχει άμεσα τοπικές πληροφορίες ραδιοπρόσβασης στις εφαρμογές MEC.

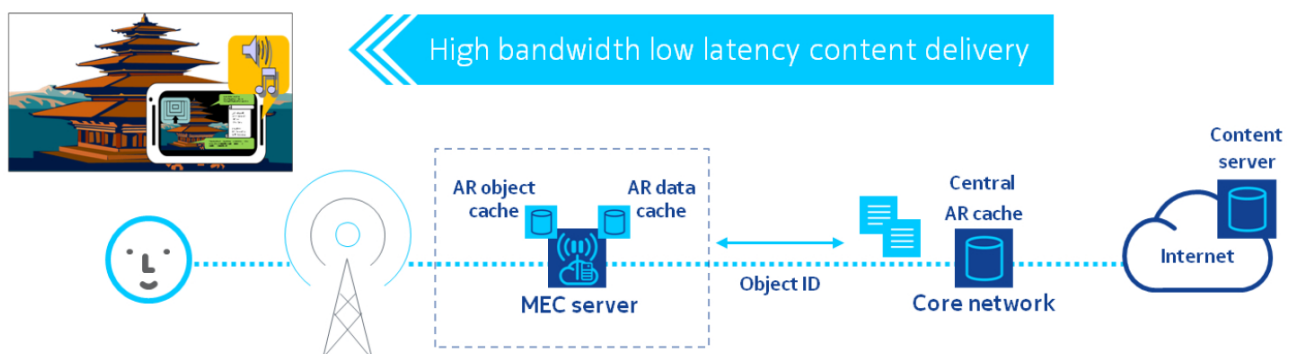
### 3.5 Η τεχνολογία MEC στις AR εφαρμογές

Η AR τεχνολογία επωφελείται από τα πλεονεκτήματα του Mobile Edge Computing καθώς παρουσιάζει υψηλές απαιτήσεις σε εύρος ζώνης και χαμηλή καθυστέρηση. Παράλληλα, το MEC υποστηρίζει real-time μετάδοση δεδομένων, καθώς οι πληροφορίες που απαιτούνται από τις εφαρμογές βρίσκονται στην άκρη του δικτύου, κοντά στον τελικό χρήστη. Οι τοπικοί MEC εξυπηρετητές που εγκαθίστανται στο δίκτυο πρόσβασης, επιτυγχάνουν χαμηλή καθυστέρηση και υψηλές ταχύτητες, χαρακτηριστικά που ευνοούν την απρόσκοπτη, υψηλής ποιότητας λειτουργία των AR εφαρμογών.

#### 3.5.1 Επισκόπηση συστήματος

Οι υπηρεσίες επαυξημένης πραγματικότητας απαιτούν την επεξεργασία υψηλού όγκου δεδομένων σε πραγματικό χρόνο, αφού το περιβάλλον που αντιλαμβάνεται ο χρήστης μέσω της κάμεράς του πρέπει να ανανεώνεται συνεχώς καθώς αυτός κινείται. Σε αυτό συμβάλλει η τεχνολογία MEC, σύμφωνα με την οποία οι εξυπηρετητές των σταθμών βάσης φιλοξενούν την απαιτούμενη πληροφορία και αναλαμβάνουν την επεξεργασία των μηνυμάτων που ανταλλάσσει η συσκευή του χρήστη με το δίκτυο. Συγκεκριμένα, ο χρήστης προωθεί στο δίκτυο την έξοδο (output) της κάμεράς του, ώστε να εντοπιστεί η ακριβής θέση και ο προσανατολισμός του. Ο εξυπηρετητής MEC επεξεργάζεται τα δεδομένα που λαμβάνει από την AR εφαρμογή και επιστρέφει στο χρήστη πληροφορίες, που βρίσκονται αποθηκευμένες σε κάποιο τοπικό data center. Παράλληλα, ο εξυπηρετητής MEC επικοινωνεί με ένα κεντρικό εξυπηρετητή, ώστε να αποκτήσει δεδομένα που δεν έχει στη διάθεσή του.

Οι πληροφορίες που αναζητούν οι χρήστες των AR εφαρμογών είναι, συνήθως, άμεσα συσχετισμένες με μια φυσική περιοχή ενδιαφέροντος. Επομένως, η χρήση της τεχνολογίας MEC υπερτερεί σε σχέση με την παραδοσιακή cloud αρχιτεκτονική, αφού ο τοπικός MEC server διαθέτει τους απαιτούμενους υπολογιστικούς πόρους και τα δεδομένα της AR εφαρμογής, ενώ παράλληλα βρίσκεται εγγύτερα στον τελικό χρήστη. Επιπλέον, οι απαιτήσεις των AR εφαρμογών σε μικρή καθυστέρηση και μεγάλο εύρος ζώνης ικανοποιούνται πλήρως μέσω της MEC τεχνολογίας.



Σχήμα 3.21 Τεχνολογία MEC στις AR εφαρμογές

### 3.5.2 AR εφαρμογές 5G/MEC

Η τεχνολογία MEC ενεργοποιεί την ανάπτυξη νέων καινοτόμων εφαρμογών, τις οποίες αδυνατούν να υποστηρίξουν επαρκώς τα υφιστάμενα δίκτυα. Σε συνδυασμό με το ανερχόμενο 5G δίκτυο, το MEC ευνοεί την εξυπηρέτηση AR εφαρμογών υψηλών απαιτήσεων, όπως οι ακόλουθες:

*Automotive video streaming:* Οι χρήστες tables και smartphones μπορούν να αξιοποιήσουν τις δυνατότητες των συσκευών τους κατά τη διάρκεια ενός ταξιδιού ή ακόμα και σε σύντομη παραμονή τους σε οχήματα. Σε συνδυασμό ή όχι με το MEC, η 5G τεχνολογία προσφέρει στους χρήστες της υπηρεσίας automotive video streaming σημαντικά πλεονεκτήματα. Η ακτίνα κάλυψης του δικτύου 5G παρέχει στους κινούμενους χρήστες υψηλή QoE, ακόμα και όταν αυτοί βρίσκονται στο όριο της κυψέλης. Παράλληλα, η χωρητικότητα της κυψέλης φθάνει τα 700Mbps, επιτρέποντας στους χρήστες την απόλαυση ποιοτικών AR υπηρεσιών.

*Social Sharing σε πολυπληθή περιβάλλοντα:* Κατά τη διάρκεια παραμονής τους σε κάποιο στάδιο ή συναυλιακό χώρο, οι χρήστες AR εφαρμογών μπορούν να διαμοιράζονται περιεχόμενο μέσω των social media. Το 5G είναι σε θέση να παρέχει upload χωρητικότητα έως 12.5Tbps/km<sup>2</sup>, παρέχοντας στους χρήστες τη δυνατότητα προβολής 4K 360° βίντεο για AR υπηρεσίες. Παράλληλα, η τοποθέτηση ενός MEC εξυπηρετητή κοντά σε αυτούς τους χώρους επεκτείνει τις δυνατότητες και την εμπειρία των χρηστών.



Σχήμα 3.22 Υπηρεσία Social Sharing

*6 DoF Video:* Το βίντεο 6 βαθμών ελευθερίας είναι η επόμενη γενιά στις τεχνολογίες πολυμέσων. Η προβολή 6 DoF βίντεο γίνεται μέσω φορητής συσκευής όπως τα έξυπνα γυαλιά, και παρέχει στο χρήστη τη δυνατότητα πλήρους κίνησης, ενώ απολαμβάνει υψηλή εμπειρία εμπύθησης. Στην περίπτωση αυτή, γίνεται αντιστάθμιση μεταξύ καθυστέρησης και εύρους ζώνης, με τις αντίστοιχες τιμές να κινούνται αντιστρόφως ανάλογα. Η χρήση της MEC τεχνολογίας επιτρέπει την ελαχιστοποίηση των καθυστερήσεων, αυξάνοντας έτσι το ρυθμό μετάδοσης δεδομένων για ποιοτικότερη εμπειρία.

*Απομακρυσμένος έλεγχος/ Διαδίκτυο αφής:* Οι τιμές της end-to-end καθυστέρησης της εμπειρίας απομακρυσμένου ελέγχου κυμαίνονται μεταξύ 40 έως 300ms. Η ανατροφοδότηση με καθυστέρηση κάτω των 5ms μπορεί να επιτρέψει καινοτόμες χρήσεις της τεχνολογίας απομακρυσμένου ελέγχου αφής, ανοίγοντας νέους ορίζοντες στον τομέα αυτό. Η εφαρμογή κάποιου MEC εξυπηρετητή κοντά στο χρήστη μειώνει σημαντικά τις καθυστερήσεις, συμβάλλοντας στη συνολική βελτίωση της επικοινωνίας.



**Σχήμα 3.23** Διαδίκτυο αφής

# ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

## ΔΙΑΣΤΑΣΙΟΛΟΓΗΣΗ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΕΞΥΠΗΡΕΤΗΣΗΣ AR ΕΦΑΡΜΟΓΩΝ

### 4.1 Γενικά στοιχεία

Στο παρόν κεφάλαιο θα εξεταστούν δύο σενάρια εξυπηρέτησης AR εφαρμογών βάσει των τεχνολογιών δικτύου που αναπτύχθηκαν στις προηγούμενες ενότητες. Για το λόγο αυτό, πρέπει προηγουμένως να εκτιμηθούν βασικές παράμετροι όπως το μήκος των μηνυμάτων που ανταλλάσσει ένα τερματικό με το δίκτυο κατά την εκτέλεση AR εφαρμογών και το πλήθος των τερματικών που βρίσκονται στην υπό εξέταση περιοχή.

Σε ένα τυπικό σύστημα επαυξημένης πραγματικότητας, όπου το πραγματικό περιβάλλον που αντιλαμβάνεται ο χρήστης μέσω της κάμεράς του επαυξάνεται με εικονικά αντικείμενα, η ανταλλαγή μηνυμάτων μεταξύ του τερματικού και του δικτύου πραγματοποιείται ως εξής:

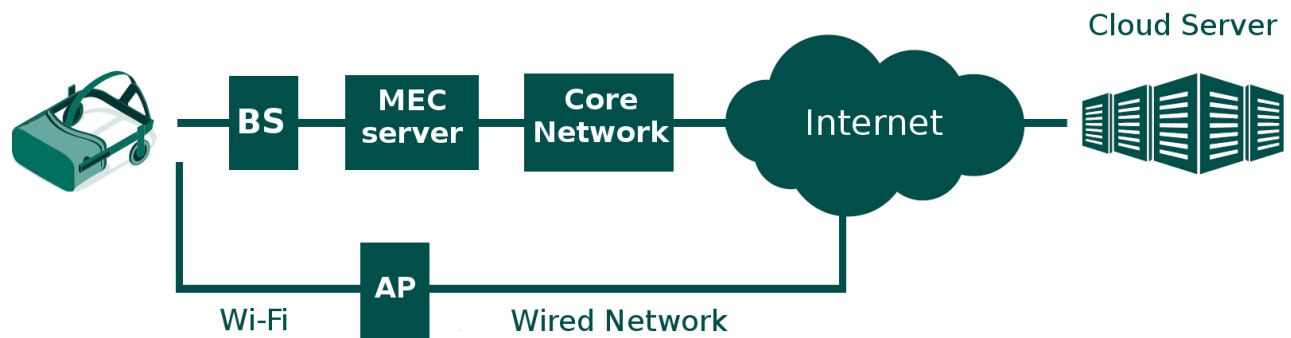
- Ο χρήστης αποστέλλει στο δίκτυο τη ροή βίντεο από την έξοδο της κάμεράς του ώστε να γίνει ανίχνευση της θέσης και του προσανατολισμού του.
- Τα δεδομένα που εξάγονται από τη ροή βίντεο υποβάλλονται σε επεξεργασία από κάποιον εξυπηρετητή. Ακολουθώντας, προωθούνται στο χρήστη πληροφορίες υπό τη μορφή εικόνας, βίντεο κλπ.
- Η διαδικασία αυτή επαναλαμβάνεται συνεχώς, καθώς ο χρήστης αλλάζει θέση και προσανατολισμό.

Για τη μελέτη της απόδοσης του συστήματος, τόσο χρησιμοποιώντας την τεχνολογία Wi-Fi όσο και αυτή του MEC, πρέπει να εξεταστούν αλληλένδετα μεγέθη, όπως ο χρόνος εξυπηρέτησης των AR εφαρμογών και η διεκπεραιωτική ικανότητα του χρήστη.

#### 4.1.1 Επικοινωνία με το δίκτυο

Η εκτέλεση των AR εφαρμογών θέτει υψηλές απαιτήσεις τόσο σε υπολογιστική ικανότητα όσο και στη διαθεσιμότητα μεγάλου όγκου πληροφοριών. Για το λόγο αυτό, είναι απαραίτητη η ύπαρξη εξυπηρετητή, ο οποίος αναλαμβάνει (i) την εκτέλεση εργασιών επεξεργασίας των δεδομένων που προωθούνται από το χρήστη και (ii) την παροχή των απαιτούμενων πληροφοριών στις AR εφαρμογές. Η τοποθεσία των εξυπηρετητών διαφέρει αντίστοιχα με το σχεδιασμό του δικτύου στο οποίο συνδέεται ο χρήστης.

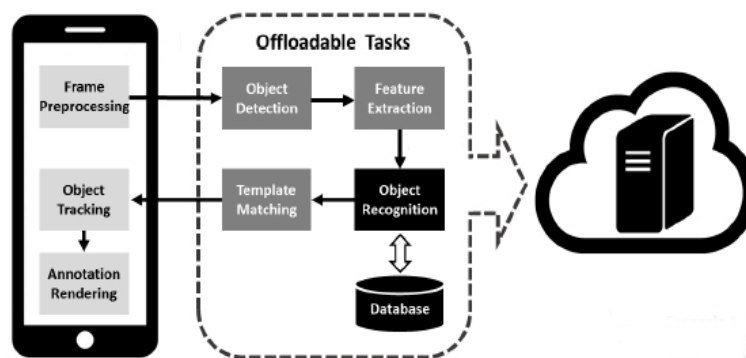




Σχήμα 4.1 Τοπολογίες δικτύων Wi-Fi και MEC

Στο πλαίσιο της εργασίας, μελετάται η περίπτωση σύνδεσης του χρήστη σε δίκτυο Wi-Fi, μέσω του οποίου ο χρήστης επικοινωνεί με κάποιο cloud server. Στη συνέχεια, εξετάζεται η περίπτωση εξυπηρέτησης των AR εφαρμογών βάσει του συστήματος MEC.

Οι λειτουργίες που ανατίθενται από τις AR εφαρμογές στους εξυπηρετητές φαίνονται στο Σχ.4.2. Αρχικά, γίνεται ανίχνευση αντικειμένου (object detection), δηλαδή αναγνωρίζονται οι δείκτες και τα μοτίβα που βρίσκονται στο οπτικό πεδίο του χρήστη, όπως επίσης και οι περιοχές ενδιαφέροντος που ανταποκρίνονται στους δείκτες. Το επόμενο βήμα είναι η εξαγωγή χαρακτηριστικών (feature extraction) από τις περιοχές ενδιαφέροντος. Ακολούθως, γίνεται χρήση της λειτουργίας αναγνώρισης αντικειμένου (object recognition) ώστε να αναγνωριστεί η πρότυπη εικόνα, η οποία ανταποκρίνεται στη μορφή του δείκτη και βρίσκεται αποθηκευμένη σε κάποια βάση δεδομένων.



Σχήμα 4.2 Λειτουργίες πελάτη και εξυπηρετητή

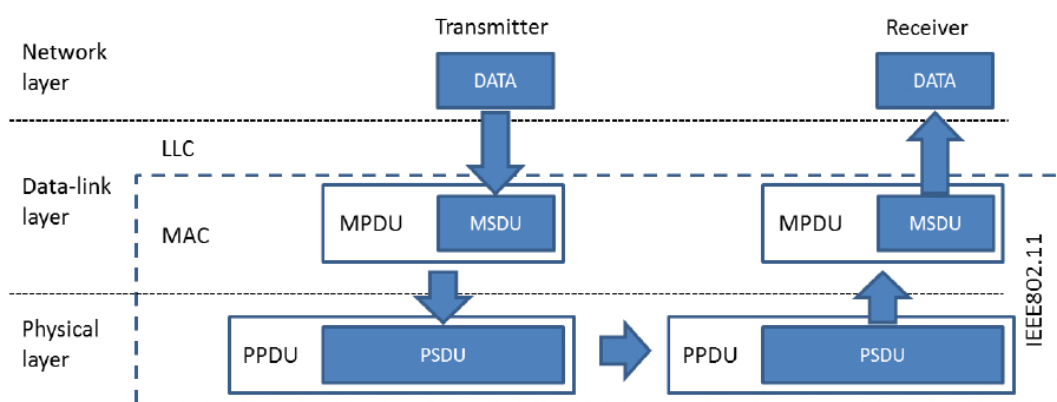
Αφού αναγνωριστεί το αντικείμενο, πραγματοποιείται η αντιστοίχιση προτύπων (template matching) προκειμένου να γίνει επαλήθευση των αποτελεσμάτων και να προσδιοριστεί η θέση και ο προσανατολισμός της κάμερας. Τα δεδομένα που προκύπτουν από την αντιστοίχιση προτύπων χρησιμοποιούνται ως είσοδος στην ικνηλασία αντικειμένου (object tracking) που πραγματοποιείται από το τερματικό. Τα χαρακτηριστικά που εξάγονται από τη ροή βίντεο και τους χαρακτηριστικούς δείκτες, προσδιορίζουν την πληροφορία που θα σταλεί στο χρήστη και θα ενσωματωθεί στην οπτική της κάμεράς του (annotation



rendering).

## 4.2 Μαθηματική περιγραφή της χωρητικότητας δικτύου Wi-Fi

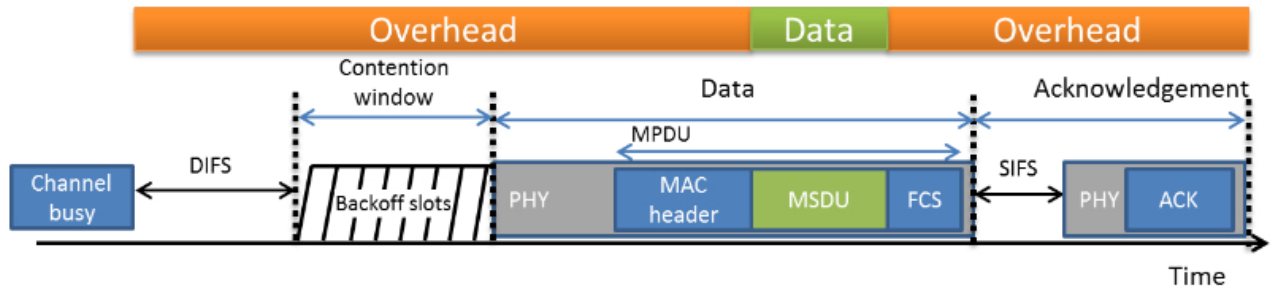
Τα πακέτα που διακινούνται μέσω ενός δικτύου IEEE 802.11, εκτός από το ωφέλιμο φορτίο (data), φέρουν πρόσθετες πληροφορίες σχετικές με την τηλεπικοινωνιακή κίνηση στο δίκτυο. Οι πληροφορίες αυτές χαρακτηρίζονται ως πλεονάζουσες (overhead), αλλά είναι απαραίτητες για την ομαλή κυκλοφορία εντός του δικτύου. Τα πακέτα που διακινούνται στο επίπεδο MAC ονομάζονται MPDU (MAC Protocol Data Unit) και αποτελούνται από τρία στοιχεία: την επικεφαλίδα MAC (MAC header), το ωφέλιμο φορτίο (MAC Service Data Unit - MSDU) και το FCS (Frame Check Sequence) που χρησιμοποιείται για τον έλεγχο σφαλμάτων. Τα πακέτα που διακινούνται στο φυσικό στρώμα καλούνται PPDU (Physical Protocol Data Unit) και αποτελούνται από την επικεφαλίδα φυσικού στρώματος και τη μονάδα PSDU (Physical Service Data Unit), στην οποία έχει ενσωματωθεί η MPDU.



Σχήμα 4.3 Ενθυλάκωση πακέτων στο πρότυπο IEEE 802.11

Σε συνδυασμό με τα πλαίσια RTS/CTS, το σχήμα μετάδοσης CSMA/CA, παρέχει ελεγχόμενη χρήση ενός καναλιού. Εντούτοις, κάθε πλαίσιο που μεταδίδεται περιλαμβάνει σημαντικό overhead, με αποτέλεσμα τη συμφόρηση στο κανάλι σε περιόδους υψηλής τηλεπικοινωνιακής κίνησης. Το πρότυπο 802.11n εισήγαγε για πρώτη φορά την τεχνική συνάθροισης πακέτων (packet aggregation) με σκοπό τη μείωση του overhead στο επίπεδο MAC. Η τεχνική αυτή επιτρέπει τη συσσωμάτωση πολλών μονάδων MSDU σε ένα πλαίσιο με την ίδια επικεφαλίδα MAC, ενώ η ίδια τεχνική μπορεί να εφαρμοστεί και στο φυσικό στρώμα, με πολλές MSDU μονάδες να ενσωματώνονται σε πλαίσιο με κοινή επικεφαλίδα φυσικού στρώματος.

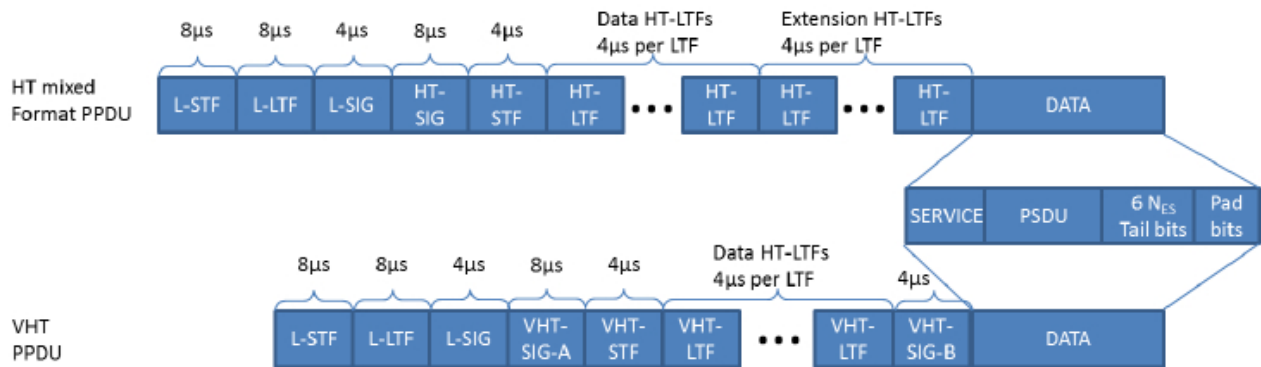
Μολονότι η τεχνική συνάθροισης πακέτων μειώνει αισθητά το overhead, εισάγεται σημαντική καθυστέρηση στο σύστημα, αφού ο αποστολέας πρέπει να περιμένει τη συγκέντρωση πολλών πακέτων για να μεταδώσει το πλαίσιο συνάθροισης. Επίσης, προκαλούνται πρόσθετες καθυστερήσεις αφού το μεγάλο μήκος πλαισίου χρησιμοποιεί τους πόρους του καναλιού επί περισσότερο χρόνο σε σχέση με τα τυπικά πακέτα.



Σχήμα 4.4 Σχήμα μετάδοσης προτύπου 802.11

#### 4.2.1 Πακέτα φυσικού στρώματος

Τα πλαίσια φυσικού στρώματος του προτύπου IEEE 802.11 ξεκινούν με ένα προοίμιο, το οποίο συγχρονίζει τη μετάδοση και ελέγχει τη λειτουργία του φυσικού στρώματος. Στο Σχ. 4.5 απεικονίζονται οι μορφές πλαισίων φυσικού στρώματος για τα πρότυπα 802.11n και 802.11ac. Όπως φαίνεται από το Σχ.4.5, η ελάχιστη διάρκεια του προοιμίου και για τα δύο πρότυπα είναι 40μs.



Σχήμα 4.5 Πλαίσια φυσικού στρώματος για τα πρότυπα 802.11n και 802.11ac

Για τη διάρκεια μετάδοσης κάθε πλαισίου στο πρότυπο 802.11ac ισχύουν οι ακόλουθες σχέσεις, σύμφωνα με τα [39], [40]:

$$TXTIME = T_{LEG\_PREAMBLE} + T_{L\_SIG} + T_{VHT\_SIG-A} + T_{VHT\_PREAMBLE} + T_{VHT\_SIG-B} + T_{SYML} * \left( \frac{T_{SYMS} * N_{SYM}}{T_{SYML}} \right) \quad (4.1)$$

$$T_{LEG\_PREAMBLE} = T_{L\_STF} + T_{L\_LTF} \quad (4.2)$$

$$T_{VHT\_PREAMBLE} = T_{VHT\_STF} + N_{VHTLTF} * T_{VHT\_LTF} \quad (4.3)$$

$$N_{SYM} = m_{STBC} * \frac{(8 * DATALENGTH + N_{SERVICE} + N_{tail} * N_{ES})}{(m_{STBC} * N_{DBPS})} \quad (4.4)$$

Η παράμετρος  $N_{SYM}$  αντιπροσωπεύει τον αριθμό των συμβόλων που χρειάζονται για τη μετάδοση του πλαισίου. Στον υπολογισμό του  $N_{SYM}$  υπεισέρχεται ο παράγοντας  $N_{DBPS}$ , ο οποίος δηλώνει τον αριθμό των bits ανά σύμβολο και υπολογίζεται βάσει του σχήματος διαμόρφωσης του προτύπου και του εύρους των καναλιών.

#### 4.2.2 Εκτίμηση διεκπεραιωτικής ικανότητας των χρηστών

Οι μέγιστες θεωρητικές τιμές ρυθμού μετάδοσης δεδομένων, όπως ορίζονται για κάθε πρότυπο IEEE 802.11, δεν μπορούν να επιτευχθούν στην πράξη. Αυτό οφείλεται σε μεγάλο βαθμό στο overhead που εισάγεται στο επίπεδο MAC. Συνήθως, το ποσοστό του overhead κυμαίνεται στο 30-40% επί της συνολικής χωρητικότητας του καναλιού, ενώ για τα πρότυπα 802.11a/b/g το ποσοστό μπορεί να υπερβαίνει το 50%. Η διεκπεραιωτική ικανότητα των χρηστών μειώνεται περαιτέρω αναλόγως με το θόρυβο που εισάγεται στο δίκτυο, τη διακαναλική παρεμβολή και την απόστασή τους από τα σημεία πρόσβασης. Οι παράγοντες αυτοί μπορούν επιφέρουν μείωση της διεκπεραιωτικής ικανότητας περίπου 40% σε περιπτώσεις δικτύων υψηλής πυκνότητας. Στον Πιν.4.1 παρουσιάζεται εκτίμηση του τελικού throughput των χρηστών, μετά τη μείωση λόγω overhead (30%) και παρεμβολών (40%), για το πρότυπο 802.11ac.

Εύρος ζώνης (MHz)	Χωρικά ρεύματα	Διαμόρφωση	Μέγιστος ρυθμός μετάδοσης (Mbps)	Διεκπεραιωτική ικανότητα (Mbps)
20	1	256-QAMr3/4	86.7	36.4
40	1	256-QAMr3/4	180	75.6
20	2	256-QAMr3/4	173.3	72.8
40	2	256-QAMr3/4	360	151.2
20	3	256-QAMr5/6	288.9	121.3
40	3	256-QAMr5/6	600	252

Πίνακας 4.1 Διεκπεραιωτική ικανότητα προτύπου 802.11ac σε περιβάλλον υψηλής πυκνότητας

#### 4.2.3 Εκτίμηση παραμέτρων σημείων πρόσβασης

Για τον υπολογισμό των AP που απαιτούνται για την εξυπηρέτηση των χρηστών σε ένα δίκτυο υψηλή πυκνότητας, χρειάζεται να προσδιοριστούν οι εξής παράμετροι:

- Ο τύπος των εφαρμογών που θα τρέξουν στα τερματικά και οι απαιτήσεις τους σε ταχύτητα μετάδοσης. Στην προκειμένη περίπτωση όπου μελετούνται οι AR εφαρμογές, εξετάζονται υπηρεσίες βίντεο HD που απαιτούν ταχύτητες έως 5Mbps.
- Ο αριθμός των χρηστών που χρησιμοποιούν ταυτόχρονα το δίκτυο.
- Η διεκπεραιωτική ικανότητα των AP.

Βάσει των παραμέτρων αυτών υπολογίζεται η συνολική διεκπεραιωτική ικανότητα της εφαρμογής με βάση τη σχέση:

$$\text{Αριθμός χρηστών που χρησιμοποιούν ταυτόχρονα το δίκτυο} \times \text{Throughput εφαρμογής} = \text{Αθροιστικό throughput εφαρμογής} \quad (4.5)$$

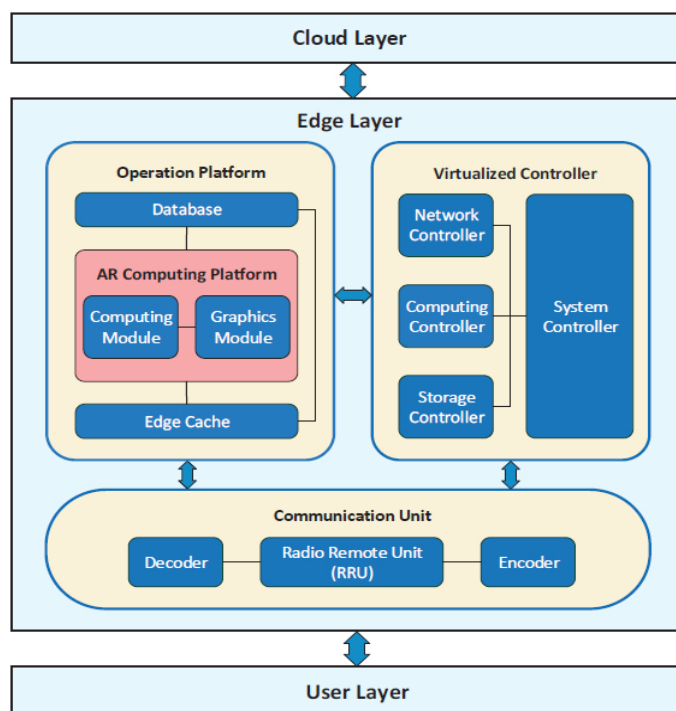
Γνωρίζοντας την αθροιστική διεκπεραιωτική ικανότητα που απαιτείται για μια εφαρμογή, μπορεί να υπολογιστεί ο αριθμός των AP:

$$\text{Αριθμός AP} = \text{Αθροιστικό throughput εφαρμογής} / \text{Throughput AP} \quad (4.6)$$

Προφανώς οι υπολογισμοί αυτοί βασίζονται σε ομοιόμορφη κατανομή των χρηστών μεταξύ των AP. Στην πραγματικότητα οι χρήστες μετακινούνται εντός της περιοχής κάλυψης του δικτύου οπότε είναι αναγκαία πρόσθετα AP για την εγγυημένη εξυπηρέτηση των χρηστών.

### 4.3 Η τεχνολογία MEC στις AR εφαρμογές

Σε ένα σύστημα MEC που αποσκοπεί στην εξυπηρέτηση AR εφαρμογών, διακρίνονται τρία επίπεδα: το επίπεδο των χρηστών, το επίπεδο edge και το επίπεδο cloud. Όπως φαίνεται στο Σχ.4.6, στο επίπεδο χρηστών βρίσκονται πολλαπλές AR συσκευές, οι οποίες συνδέονται με το επίπεδο edge μέσω ασύρματων συνδέσεων. Το επίπεδο cloud αποτελείται από απεριόριστους αποθηκευτικούς και υπολογιστικούς πόρους. Η αρχιτεκτονική MEC εισάγει το επίπεδο edge, το οποίο μεσολαβεί μεταξύ των χρηστών και του cloud, ώστε να παρέχει ταχύτερα τους απαιτούμενους πόρους στις εφαρμογές.



Σχήμα 4.6 Αρχιτεκτονική MEC για τις AR εφαρμογές

Συγκεκριμένα, οι χρήστες των AR συσκευών αποστέλλουν αίτημα στον εξυπηρετητή cloud, το οποίο περιέχει τη ροή βίντεο από το περιβάλλον τους. Ο εξυπηρετητής εκτελεί τους απαραίτητους υπολογισμούς, ενώ επικοινωνεί με τον cloud εξυπηρετητή για να αποκτήσει δεδομένα που δεν διαθέτει ήδη. Κατόπιν, απαντά στο τερματικό με τα δεδομένα επαύξησης.

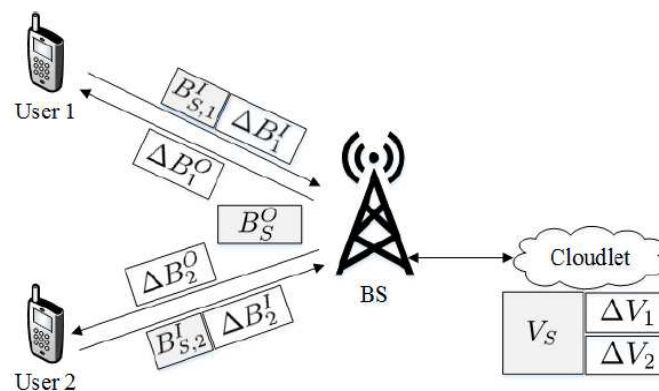
### 4.3.1 Μοντέλο βελτιστοποίησης των πόρων

Σε περιβάλλον υψηλής πυκνότητας χρηστών, όπου πολλοί χρήστες χρησιμοποιούν κοινούς πόρους δικτύου, παρατηρείται ότι οι διεργασίες που ανατίθενται στο δίκτυο έχουν κοινές εισόδους, εξόδους και υπολογιστικές εργασίες. Αυτό οφείλεται στον τοπικό χαρακτήρα που χαρακτηρίζει τις AR εφαρμογές, αντιστοίχως με το χώρο στον οποίο εφαρμόζονται. Για παράδειγμα, οι χρήστες AR εφαρμογών σε ένα πολυκατάστημα είναι πιθανό να αποστέλλουν και να ζητούν από το δίκτυο κοινές πληροφορίες που αφορούν την τιμή ενός προϊόντος.

Στην τυπική περίπτωση όπου δεν εφαρμόζεται διαμοιρασμός πόρων, για κάθε χρήστη του δικτύου ισχύουν τα εξής:

- Uplink: Μεταφορά  $B^i$  bits εισόδου από κάθε χρήστη προς τον εξυπηρετητή cloud.
- Επεξεργασία στο cloud: Ο εξυπηρετητής cloud επεξεργάζεται τα δεδομένα εισόδου εκτελώντας  $V$  κύκλους CPU.
- Downlink: Μεταφορά  $B^o$  bits εξόδου από τον εξυπηρετητή προς το χρήστη.

Στο Σχ.4.7 αποτυπώνεται η περίπτωση όπου υπάρχει διαμοιρασμός πόρων μεταξύ των εργασιών που γίνονται για την εξυπηρέτηση των AR εφαρμογών. Συγκεκριμένα, στη δεδομένη περίπτωση ισχύουν τα εξής:



Σχήμα 4.7 Διαμοιρασμός δεδομένων και εργασιών

- Διαμοιραζόμενη μεταφορά στη διεύθυνση uplink: Σε αυτήν την περίπτωση, παρατηρείται διαμοιρασμός πόρων  $B^i$  bits στη διεύθυνση uplink, ενώ τα μοναδικά δεδομένα που αποστέλλει κάθε χρήστης είναι  $\Delta B^i = B^i - B_S^i$ .

- Διαμοιραζόμενη επεξεργασία στο cloud: Οι εργασίες επεξεργασίας δεδομένων μπορεί να είναι κοινές για πολλούς χρήστες, θεωρώντας  $V_s$  διαμοιραζόμενους κύκλους CPU και  $\Delta V = V - V_s$  ξεχωριστούς για κάθε χρήστη.
- Διαμοιραζόμενη μεταφορά στη διεύθυνση downlink: Κάποια από τα bits εξόδου χρειάζονται να μεταφερθούν σε πολλούς χρήστες, με τα ξεχωριστά bits εξόδου που λαμβάνει έκαστος να είναι  $\Delta B^o = B^o - B_s^o$ .

#### 4.4 Εξυπηρέτηση AR εφαρμογών σε στάδια

Στις περιοχές όπου λαμβάνουν χώρα ιδιαίτερος πολυπληθή γεγονότα, προκύπτει η ανάγκη ύπαρξης ενός ασύρματου δικτύου το οποίο θα παρέχει στους χρήστες εγγυημένη πρόσβαση στο διαδίκτυο. Οι χώροι που φιλοξενούν γεγονότα μεγάλης προσέλευσης μπορεί να είναι εμπορικά κέντρα, στάδια, μουσεία, συναυλιακοί χώροι κ.ά. Στο παρόν κεφάλαιο εξετάζονται παράμετροι τηλεπικοινωνιακής κίνησης σε στάδια κατά τη διάρκεια αθλητικού γεγονότος με σκοπό την εξυπηρέτηση AR εφαρμογών.

Η στενή σχέση που έχουν αναπτύξει οι άνθρωποι με τις έξυπνες κινητές συσκευές τους έχει οδηγήσει στην ανάπτυξη εφαρμογών με σκοπό την καλύτερη εξυπηρέτηση των θεατών ενός αθλητικού γεγονότος. Παράλληλα, η εξέλιξη στις τεχνολογίες δικτύων και στις δυνατότητες των συσκευών οδήγησε στο σχεδιασμό εφαρμογών που αποσκοπούν στη βελτιωμένη εμπειρία του χρήστη. Σε ένα στάδιο, οι θεατές έχουν πρόσβαση στο Διαδίκτυο για την αγορά και επικύρωση των εισιτηρίων τους, την αγορά προϊόντων μέσω εφαρμογών, την πληροφόρηση σχετικά με το αθλητικό γεγονός, το διαμοιρασμό περιεχομένου σε πλατφόρμες κοινωνικής δικτύωσης κ.ά. Οι AR εφαρμογές που έχουν αναπτυχθεί για αθλητικά γεγονότα επιτρέπουν στο χρήστη να λαμβάνει πληροφορίες επαύξησης, όπως στατιστικά παικτών, ιστορικό αποτελεσμάτων κ.ά μέσω της κάμερας της συσκευής του. Ανεξαρτήτως της τεχνολογίας δικτύου που χρησιμοποιείται για την κάλυψη των αναγκών των χρηστών, οι διαθέσιμοι πόροι πρέπει να είναι σε θέση να εξυπηρετήσουν τις απαιτήσεις σε υψηλό εύρος ζώνης και χαμηλή καθυστέρηση.

##### 4.4.1 Σενάριο εξυπηρέτησης AR εφαρμογών σε δίκτυο Wi-Fi

Στην παρούσα ενότητα, επιχειρείται ο υπολογισμός της από άκρο σε άκρο καθυστέρησης κατά την εκτέλεση AR εφαρμογών με την τεχνολογία Wi-Fi σε χώρους σταδίων.

Αρχικά, θεωρείται κλειστό γήπεδο χωρητικότητας 20000 θέσεων και εξετάζεται η επίδοση του δικτύου σε περίπτωση μέγιστης προσέλευσης. Από τους 20000 χρήστες, εκτιμάται ότι το 97% φέρει κάποια έξυπνη συσκευή, ήτοι 19400 χρήστες. Το ποσοστό των χρηστών που είναι συνδεδεμένοι στο Wi-Fi δίκτυο εκτιμάται στο 80% (15520 χρήστες), ενώ από αυτούς μόνο το 30% υποτίθενται ενεργοί (4656 χρήστες).

Γίνεται η υπόθεση ότι τα τερματικά τρέχουν AR εφαρμογή, η οποία απαιτεί τη λήψη βίντεο HD με διεκπεραιωτική ικανότητα 3Mbps. Από τη σχέση (4.5) προκύπτει ότι η αθροιστική διεκπεραιωτική ικανότητα της εφαρμογής ανέρχεται στα 13968Mbps.

Συνολικοί χρήστες (100%)	20000
Χρήστες με συσκευή Wi-Fi (97%)	19400
Συνδεδεμένοι χρήστες (80%)	15520
Ενεργοί χρήστες (30%)	4656

Πίνακας 4.2 Πλήθος χρηστών που σχετίζονται με το δίκτυο Wi-Fi

Σχετικά με την επιλογή του τύπου των AP, εφόσον τοποθετούνται σε περιβάλλον υψηλής πυκνότητας χρηστών, είναι προτιμότερο να υποστηρίζουν κανάλια των 20 ή 40MHz. Καίτοι το πρότυπο 802.11ac υποστηρίζει επίσης κανάλια των 80 και 160MHz που προσφέρουν μεγαλύτερο throughput, δεν ενδείκνυται η εφαρμογή τους σε περίπτωση πυκνών δικτύων, καθώς μειώνεται το πλήθος των διαθέσιμων καναλιών. Στον Πιν.4.3 παρουσιάζεται ο αριθμός των AP που απαιτούνται για την κάλυψη των αναγκών της συγκεκριμένης AR εφαρμογής, βάσει της σχέσης (4.6) για διάφορους τύπους του προτύπου 802.11ac.

Τύπος AP	Απαιτούμενος συνολικός αριθμός AP
802.11ac/ 20MHz/ 2 spatial streams (ss)	191
802.11ac/ 20MHz/ 3 ss	115
802.11ac/ 40MHz/ 1 ss	184
802.11ac/ 40MHz/ 2 ss	92

Πίνακας 4.3 Αριθμός AP για διάφορους τύπους του προτύπου 802.11ac

Για τη διευκόλυνση των υπολογισμών έγιναν οι εξής δύο υποθέσεις:

- Οι συσκευές του δικτύου υποστηρίζουν τα αντίστοιχα χωρικά ρεύματα που διαθέτουν AP.
- Τα AP είναι διπλής ζώνης συχνότητας.

Αφού έχει εξασφαλισθεί η απαιτούμενη διεκπεραιωτική ικανότητα για κάθε χρήστη, μένει να υπολογιστεί ο χρόνος μετάδοσης των πλαισίων για μια AR εφαρμογή. Ο χρήστης της εφαρμογής που σχετίζεται με ένα AP, αποστέλλει αίτημα στο σημείο πρόσβασης για να ξεκινήσει τη μετάδοση. Αφού το AP εγκρίνει το αίτημα, ο χρήστης προωθεί στο δίκτυο πακέτα της ροής βίντεο που συλλαμβάνει η κάμερά του. Η επεξεργασία των δεδομένων πραγματοποιείται από κάποιον cloud εξυπηρετητή, ενώ η παροχή των απαιτούμενων πληροφοριών πραγματοποιείται από κάποια βάση δεδομένων, με την οποία επικοινωνεί ο εξυπηρετητής. Κατόπιν, επιστρέφεται στο χρήστη η ζητούμενη πληροφορία, με τη μορφή εικόνας ή βίντεο. Σημειώνεται ότι η παρούσα μελέτη επικεντρώνεται στη διάρκεια μετάδοσης των μηνυμάτων εντός του δικτύου χωρίς να λαμβάνει υπόψη την υπολογιστική ικανότητα των τερματικών και του δικτύου.

Θεωρείται η μετάδοση HD 60 fps (frames per second) βίντεο αποτελούμενο από πλαίσια μήκους 1500byte. Στα πλαίσια εισάγεται επικεφαλίδα MAC ίση με 34byte. Επιλέγεται το πρότυπο μεταφοράς 802.11ac με κανάλια των 20MHz και τρία χωρικά ρεύματα. Γίνεται, επίσης, η υπόθεση ότι όλες οι συσκευές του δικτύου είναι συμβατές με τον τύπο των AP. Σύμφωνα με τον Πίν.4.2, σε κάθε AP αντιστοιχούν  $15520/115 = 134$  συνδεδεμένοι χρήστες ενώ οι ενεργοί εκτιμάται πως είναι το 30% των συνδεδεμένων χρηστών, ήτοι 40. Η ζώνη συχνοτήτων των 5GHz ορίζει μικρές τιμές καθυστέρησης ζεύξης. Όμως το φορτίο του δικτύου εξαιτίας των πολλαπλών χρηστών οδηγεί σε ανταγωνισμό για το μέσο. Επιλέγεται προσεγγιστικά καθυστέρηση ζεύξης 20ms.

Ο σχεδιασμός του δικτύου αναφορικά με τον αριθμό των AP που μελετήθηκε προηγουμένως, εξασφαλίζει στους 40 ενεργούς χρήστες την απαιτούμενη διεκπεραιωτική ικανότητα 3Mbps, ενώ η αντίστοιχη τιμή uplink ανέρχεται στο 1Mbps.

Η συνολική καθυστέρηση μετάδοσης του πλαισίου είναι:

$$20\text{ms} + \frac{1500\text{byte} * 8}{1\text{Mbps}} = 31.71\text{ms}$$

Στην αντίθετη κατεύθυνση, ο εξυπηρετητής αποστέλλει πλαίσια μήκους 1500bytes, που φθάνουν με ρυθμό μετάδοσης 3Mbps. Η καθυστέρηση μετάδοσης σε αυτήν την περίπτωση υπολογίζεται ομοίως  $20\text{ms} + \frac{1500\text{byte} * 8}{3\text{Mbps}} = 23.9\text{ms}$ .

Η συνολική καθυστέρηση για κάθε χρήστη και τη μεταφορά ενός μόνο πλαισίου βίντεο προκύπτει 55.61ms. Στον υπολογισμό αυτό, δεν έχουν συμπεριληφθεί καθυστερήσεις επεξεργασίας, αλλά μόνο διάδοσης της πληροφορίας.

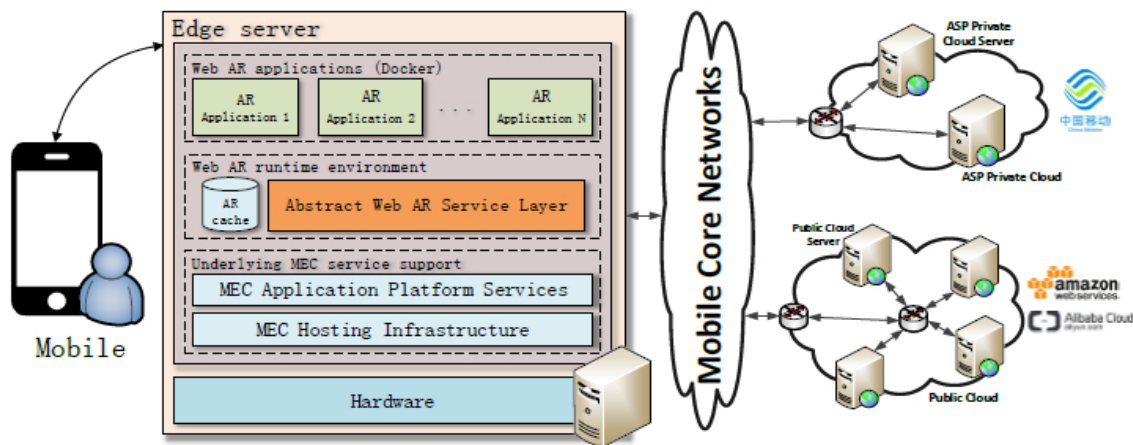
#### 4.4.2 Σενάριο εξυπηρέτησης AR εφαρμογών σε σύστημα MEC

Στην περίπτωση εξυπηρέτησης των AR εφαρμογών από το δίκτυο MEC, οι χρήστες αποστέλλουν αίτημα το οποίο περιέχει δεδομένα βίντεο στον εξυπηρετητή MEC. Ο εξυπηρετητής αναλαμβάνει να εκτελέσει τις κατάλληλες διεργασίες, ενώ επικοινωνεί με τον cloud εξυπηρετητή για να αποκτήσει δεδομένα που δεν διαθέτει ήδη. Αφού ενημερωθεί ο MEC εξυπηρετητής, αποστέλλει στο χρήστη τα δεδομένα επαύξησης.

Θεωρούνται πλαίσια βίντεο 1500byte, καθυστέρηση ζεύξης μεταξύ εξυπηρετητών cloud και MEC 10ms.

Για να υπάρχει αντιστοιχία με την προηγούμενη μέθοδο, επιλέγεται σαφώς μεγαλύτερος ρυθμός μετάδοσης δεδομένων, καθώς σε αυτήν την περίπτωση δεν υπάρχει ομαδοποίηση των χρηστών και εξυπηρέτηση από διαφορετικά σημεία. Όλοι οι χρήστες επικοινωνούν με τον ίδιο MEC εξυπηρετητή, έχοντας ταχύτητες LTE της τάξης των 150Mbps στη διεύθυνση downlink και 50Mbps στη διεύθυνση uplink. Η καθυστέρηση ζεύξης μεταξύ των χρηστών και του MEC εξυπηρετητή είναι πρακτικά μηδενική. Σε αυτή την περίπτωση, οι χρήστες αντιλαμβάνονται πρακτικά μόνο την καθυστέρηση που εισάγεται για την ανταλλαγή πληροφοριών μεταξύ του cloud και του MEC εξυπηρετητή.

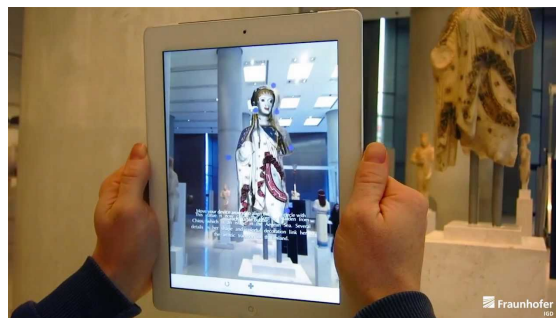




Σχήμα 4.8 Κατανομή εργασιών στο MEC εξυπηρετητή

#### 4.5 AR εφαρμογές σε χώρους μουσείων

Η τεχνολογία της επαυξημένης πραγματικότητας εφαρμόζεται σήμερα επιτυχώς σε αρχαιολογικούς χώρους και μουσεία, παρέχοντας στους χρήστες των AR εφαρμογών οπτικοακουστική εμπειρία υψηλής ποιότητας. Οι επισκέπτες των μουσείων έχουν τη δυνατότητα να αλληλεπιδράσουν με τα εκθέματα μέσω των AR εφαρμογών, λαμβάνοντας πρόσθετες πληροφορίες σε μορφή εικόνας ή βίντεο. Με αυτό τον τρόπο ο χρήστης της AR εφαρμογής μπορεί να λάβει πληροφορίες σχετικές με την προέλευση, την κατασκευή και τη χρήση των αντικειμένων, να δει προσομοιώσεις των εκθεμάτων στο περιβάλλον προέλευσής τους ή ακόμα να δει μέσω της οθόνης του τα εκθέματα να κινούνται στο χώρο του μουσείου.



Σχήμα 4.9 Εφαρμογή AR σε εκθέματα μουσείων

Το δίκτυο εξυπηρέτησης στο οποίο συνδέονται οι επισκέπτες πρέπει να είναι ικανό να εξυπηρετήσει τους χρήστες ανεξαρτήτως προσέλευσης. Ενδεικτικά, ο αριθμός των επισκεπτών του Μουσείου της Ακρόπολης είναι κατά μέσο όρο 4000 ημερησίως, ενώ τους θερινούς μήνες ο αριθμός των επισκεπτών διπλασιάζεται, φθάνοντας σε 1000 επισκέπτες ανά ώρα.

Για τη μελέτη της απόδοσης του δικτύου στην εξυπηρέτηση των επισκεπτών ενός μουσείου,

θεωρείται AR εφαρμογή, η οποία σαρώνοντας με την κάμερα της συσκευής το έκθεμα, εμφανίζει στο χρήστη πληροφορίες σχετικές με αυτό σε μορφή εικόνας. Συγκεκριμένα, ο χρήστης σαρώνει το αντικείμενο και αποστέλλει στο δίκτυο ροή βίντεο που περιέχει το συγκεκριμένο έκθεμα. Ο εξυπηρετητής δικτύου εκτελεί την απαραίτητη επεξεργασία για την εξαγωγή των χαρακτηριστικών της εικόνας και επιστρέφει στο χρήστη εικόνα, που τοποθετείται ως επίστρωση στη ροή βίντεο της κάμεράς του. Το βίντεο που αποστέλλει ο χρήστης στο δίκτυο συνήθως υπόκειται σε προεπεξεργασία στο τερματικό του χρήστη. Καίτοι η διαδικασία αυτή απαιτεί χρόνο, εντούτοις έχει ως αποτέλεσμα τη συρρίκνωση του βίντεο που θα αποσταλεί στο δίκτυο λόγω της συμπίεσής του. Με τον τρόπο αυτό, μειώνεται η καθυστέρηση μετάδοσης καθώς και η συμφόρηση στο δίκτυο που προκαλείται λόγω των πολλαπλών, μεγάλων πακέτων της ροής βίντεο.

Ως υπόθεση της εργασίας θεωρείται ότι από τους 1000 επισκέπτες που υποτίθεται πως συνυπάρχουν στο μουσείο, το 1/8 κάνει ταυτόχρονη χρήση μιας AR εφαρμογής, ήτοι 125 επισκέπτες.

#### 4.5.1 Διαστασιολόγηση εξυπηρέτησης AR εφαρμογής σε δίκτυο Wi-Fi

Θεωρείται ότι οι επισκέπτες του μουσείου εξυπηρετούνται από δίκτυο Wi-Fi, το οποίο είναι σχεδιασμένο ώστε να καλύπτει τις ανάγκες σε διεκπεραιωτική ικανότητα της συγκεκριμένης AR εφαρμογής, με ρυθμό uplink για κάθε χρήστη 1Mbps και downlink 3Mbps. Η προεπεξεργασία πλαισίου που πραγματοποιείται στο τερματικό του χρήστη, μπορεί να συρρικνώσει ένα HD πλαίσιο βίντεο 1920x1080 σε μέγεθος 480x270.

Για ένα βίντεο 30fps, πρέπει να είναι εγγυημένη η απόκριση του δικτύου σε διάστημα μικρότερο του 1s. Συγκεκριμένα, η αποστολή 30 πλαισίων από το χρήστη προς τον εξυπηρετητή, η επεξεργασία τους και η απόκριση του δικτύου πρέπει να γίνεται εντός ενός δευτερολέπτου, ώστε να μη γίνεται αντιληπτή η καθυστέρηση της εφαρμογής από το χρήστη καθώς αυτός κινείται στο χώρο. Σε διαφορετική περίπτωση, η πληροφορία επαύξησης φθάνει με καθυστέρηση στο χρήστη και μπορεί να μη συμβαδίζει με το αντίστοιχο περιβάλλον. Βάσει εμπειρικών μελετών, οι τιμές καθυστέρησης για τις απαιτούμενες λειτουργίες επεξεργασίας των AR εφαρμογών είναι οι εξής:

Εργασία	Χρόνος διεκπεραίωσης (ms)
Προεπεξεργασία εικόνας (συσκευή)	34.70
Ανίχνευση αντικειμένου	11.49
Εξαγωγή χαρακτηριστικών	47.41
Αναγνώριση αντικειμένου	92.37
Αντιστοίχιση προτύπων	9.22
Ιχνηλασία αντικειμένου (συσκευή)	15.11
Ενσωμάτωση πληροφορίας (συσκευή)	19.28

Πίνακας 4.4 Τιμές καθυστέρησης για τις εργασίες επεξεργασίας AR εφαρμογών

Η συνολική καθυστέρηση λόγω εργασιών επεξεργασίας προκύπτει 229.58ms. Στην καθυστέρηση αυτή πρέπει να προστεθεί η καθυστέρηση μετάδοσης στο δίκτυο, ώστε να προκύψει ο συνολικός χρόνος εκτέλεσης για τα 30 πλαίσια.

Έστω ότι ο χρήστης κάνει upload βίντεο διάρκειας 30s και ανάλυσης 480x270. Για τα δεδομένα αυτά, το εκτιμώμενο μέγεθος του βίντεο προκύπτει 2.7Mbytes, βάσει των διαστάσεων του βίντεο, της διάρκειάς του, του βάθους χρώματος και του βαθμού συμπίεσης.

Αν θεωρηθούν πακέτα μεγέθους 1500bytes, στα οποία ενθυλακώνονται τα πλαίσια βίντεο, τα συνολικά πακέτα που θα μεταδοθούν από το χρήστη είναι:

$$\frac{2.7 \text{ Mbytes}}{1500 \text{ bytes}} = 1887 \text{ πακέτα}$$

Γίνεται η υπόθεση ότι χρησιμοποιείται τεχνική packet aggregation με μέγιστο μέγεθος MPDU συσσώρευσης 65535 bytes. Αυτό σημαίνει ότι εισάγεται κεφαλίδα MAC κάθε 65535/1500 = 43 πακέτα και τα συνολικά πλαίσια MPDU που στέλνονται είναι 1887/43 = 43 πλαίσια. Εφόσον ο σχεδιασμός του Wi-Fi δικτύου έχει εξασφαλίσει σε κάθε χρήστη τους απαιτούμενους πόρους με ρυθμό uplink μετάδοσης 1Mbps και η καθυστέρηση που εισάγεται στη ζεύξη είναι 20 ms, η διάρκεια μετάδοσης του βίντεο προκύπτει:

$$\frac{1500 \text{ bytes} * 8}{1 \text{ Mbps}} * 1887 + 43 * 20 \text{ ms} = 22.973 \text{ s}$$

Για κάθε ομάδα 30 πλαισίων που αποστέλλεται στο δίκτυο, εκτελούνται από τον cloud εξυπηρετητή οι απαραίτητες ενέργειες επεξεργασίας. Κατόπιν, ο cloud εξυπηρετητής αποστέλλει ως απάντηση στο αίτημα του χρήστη τη ζητούμενη εικόνα προσαύξησης η οποία εμφανίζει τα στοιχεία του εκθέματος. Η εικόνα αποστέλλεται σε ανάλυση 1920x1080, με ενδεικτικό μέγεθος 600Kbytes, ενώ διαχωρίζεται σε πλαίσια των 1000bytes, με 34bytes overhead και ρυθμό downlink 3Mbps.

Ο αριθμός των πακέτων που αποστέλλονται από τον εξυπηρετητή προκύπτει:

$$\frac{600 \text{ Kbytes}}{1000 \text{ bytes}} = 614 \text{ πακέτα}$$

Εφαρμόζοντας και σε αυτή την περίπτωση την τεχνική συνάθροισης πακέτων κάθε MPDU μονάδα αποτελείται από 65535/1000=65 πακέτα και τα συνολικά πλαίσια που αποστέλλονται είναι 614/65 = 9 πλαίσια.

Η διάρκεια μετάδοσης υπολογίζεται ως:

$$\frac{1000 \text{ bytes} * 8}{3 \text{ Mbps}} * 614 + 9 * 20 \text{ ms} = 1.799 \text{ s}$$

#### 4.5.2 Διαστασιολόγηση εξυπηρέτησης AR εφαρμογής σε δίκτυο MEC

Στην περίπτωση της τεχνολογίας MEC, ο MEC εξυπηρετητής αναλαμβάνει την επεξεργασία της ροής βίντεο, επικοινωνώντας με τον cloud εξυπηρετητή μόνο σε περίπτωση που χρειάζεται να ενημερώσει το περιεχόμενό του. Ο MEC εξυπηρετητής που εγκαθίσταται κοντά σε ένα μουσείο διαθέτει όλες τις απαραίτητες πληροφορίες σχετικά με τα εκθέματα, ώστε η AR εφαρμογή να αντλεί τις ζητούμενες πληροφορίες απευθείας από αυτόν, αποφεύγοντας τη χρονοβόρα προσπέλαση στο cloud.

Επιλέγονται ταχύτητες του δικτύου LTE, 150Mbps downlink και 50 Mbps uplink. Όλοι οι επισκέπτες του μουσείου χρησιμοποιούν τους ίδιους πόρους του δικτύου για τη μετάδοση δεδομένων, ενώ τα μεγέθη των πακέτων βίντεο και εικόνας είναι ίδια με τα χρησιμοποιηθέντα στην ενότητα 4.5.1.

Για κάθε χρήστη, η αποστολή του βίντεο 30s προς τον εξυπηρετητή MEC έχει διάρκεια:

$$\frac{1500\text{bytes} * 8}{50\text{Mbps}} * 1887 = 442\text{ms}$$

Στην περίπτωση αυτή θεωρείται μηδενική καθυστέρηση στη ζεύξη μεταξύ του χρήστη και του MEC εξυπηρετητή. Η καθυστέρηση λόγω της επεξεργασίας βίντεο από το MEC εξυπηρετητή θεωρείται ίδια με αυτή του εξυπηρετητή cloud. Λόγω της εντοπιότητας που χαρακτηρίζει τα MEC συστήματα, θεωρείται ότι ο MEC εξυπηρετητής είναι εφοδιασμένος με όλες τις πληροφορίες σχετικές με το μουσείο, οπότε η προσπέλαση του cloud εξυπηρετητή σε αυτή την περίπτωση εξαλείφεται. Μετά την επεξεργασία των δεδομένων του βίντεο, ο εξυπηρετητής MEC αποστέλλει στο χρήστη την εικόνα επαύξησης, μεγέθους 600Kbytes. Η καθυστέρηση αποστολής της εικόνας είναι:

$$\frac{1000\text{bytes} * 8}{150\text{Mbps}} * 614 = 31.98\text{ms}$$

Τελικώς, παρατηρείται ότι στο σύστημα MEC εισάγονται ελάχιστες καθυστερήσεις στην επικοινωνία, ενώ το μεγαλύτερο μέρος της συνολικής καθυστέρησης για τις AR εφαρμογές εντοπίζεται στις διεργασίες επεξεργασίας των δεδομένων. Αντιθέτως, τα Wi-Fi συστήματα εισάγουν σημαντικά μεγαλύτερη καθυστέρηση εξαιτίας της επικοινωνίας με τον απομακρυσμένο cloud εξυπηρετητή.

# ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. Abrar Omar Alkhamisi, Muhammad Mostafa Monowar, "Rise of Augmented Reality : Current and Future Application Areas", International Journal of Internet and Distributes Systems, 2013
2. George Papagiannakis, Gurminder Singh, Nadia Magnenat-Thalmann, "A survey of mobile and wireless technologies for augmented reality systems", Comp. Anim. Virtual Worlds, 2008
3. Dimitris Chatzopoulos, Carlos Bermejo, Zhanpeng Huang, and Pan Hui, "Mobile Augmented Reality Survey: From Where We Are to Where We Go", IEEE Access, 2017
4. D.W.F. van Krevelen, R. Poelman, "A Survey of Augmented Reality Technologies, Applications and Limitations", The International Journal of Virtual Reality, 2010
5. en.wikipedia.org, Augmented reality, [https://en.wikipedia.org/wiki/Augmented\\_reality](https://en.wikipedia.org/wiki/Augmented_reality)
6. en.wikipedia.org, Google Glass, [https://en.wikipedia.org/wiki/Google\\_Glass](https://en.wikipedia.org/wiki/Google_Glass)
7. en.wikipedia.org, Head-up display, [https://en.wikipedia.org/wiki/Head-up\\_display](https://en.wikipedia.org/wiki/Head-up_display)
8. www.embedded-vision.com, Augmented Reality Finally Hits the Mass Market with Pokémon Go; What's Next?, <https://www.embedded-vision.com/industry-analysis/blog/augmented-reality-finally-hits-mass-market-pokémon-go-what's-next>
9. Μιχαήλ Ε. θεολόγου, Δίκτυα Κινητών & Προσωπικών επικοινωνιών, 2η Έκδοση, Εκδόσεις Τζιόλα, 2015
10. Andrew S. Tanenbaum, David J. Wetherall, Δίκτυα Υπολογιστών, 5η Αμερικανική Έκδοση, Εκδόσεις Κλειδάριθμος, 2011
11. James F. Kurose, Keith W. Ross, Δικτύωση Υπολογιστών, 6η Έκδοση, Εκδόσεις Μ. Γκιούρδας, 2013
12. <https://www.slideshare.net/mahinthjoe/lecture-13-1580906>
13. Aerohive Networks, High-Density Wi-Fi Design Principles, 2012
14. Huawei Technologies Co., WLAN High-Density Coverage Technology White Paper, 2014
15. Cisco, IEEE 802.11ax: The Sixth Generation of Wi-Fi, Technical White Paper, 2018
16. National Instruments, Introduction to 802.11ax High-Efficiency Wireless, 2017
17. Jinsoo Ahn, Young Yong Kim, Ronny Yongho Kim, "Virtual Reality-Wireless Local Area Network: Wireless Connection Oriented Virtual Reality Architecture for Next-Generation Virtual Reality Devices", 2018
18. Tristan Braud, Farshid Hassani Bijarbooneh, Dimitris Chatzopoulos and Pan HUI System and Media Laboratory, "Future Networking Challenges: The Case of Mobile Augmented Reality", 2017
19. Cedric Westphal, "Challenges in Networking to Support Augmented Reality and Virtual Reality", 2017

20. Rakesh Kumar Singh, Ranjan Singh, "4G LTE Cellular Technology: Network Architecture and Mobile Standards", 2016
21. Alcatel Lucent, The LTE Network Architecture, Strategic White Paper, 2009
22. Jim Zyren, Freescale semiconductor, Overview of the 3GPP Long Term Evolution Physical Layer, White Paper, 2007
23. Arif Ahmed, Ejaz Ahmed, "A Survey on Mobile Edge Computing", 2016
24. Dario Sabella, Alessandro Vaillant, Pekka Kuure, Uwe Rauschenbach, Fabio Giust, "Mobile Edge Computing Architecture - The role of MEC in the Internet of Things", 2016
25. ETSI GS MEC 012, Mobile Edge Computing (MEC); Radio Network Information API, V1.1.1, 2017-07
26. ETSI GS MEC 013, Mobile Edge Computing (MEC); Location API, V1.1.1, 2017-07
27. ETSI GS MEC 015, Mobile Edge Computing (MEC); Bandwidth Management API, V1.1.1 , 2017-10
28. ETSI White Paper NO. 11, Mobile Edge Computing A key kechnology towards 5G, First Edition- September 2015
29. ETSI White Paper No. 24, MEC Deployments in 4G and Evolution Towards 5G, First Edition - February 2018
30. Cisco, 5G Security Innovation with Cisco, Whitepaper, 2018
31. ETSI White Paper No. 28, MEC in 5G networks, First Edition - June 2018
32. Qualcomm Technologies, VR and AR pushing connectivity limits, October 2018
33. Wenciao Zhang, Bo Han, Pan Hui, "On the Networking Challenges of Mobile Augmented Reality", 2017
34. Ali Al-Shuwaili, Osvaldo Simeone, "Optimal Resource Allocation for Mobile Edge Computing-Based Augmented Reality Applications", 2016
35. Pei Ren, Xiuquan Qiao, Junliang Chen, Schahram Dustdar, "Poster: Mobile Edge Computing – a Booster for the Practical Provisioning Approach of Web-based Augmented Reality", 2018
36. Cisco, Cisco Connected Stadium Wi-Fi for Sports and Entertainment Venues, White Paper, 2011
37. Jinke Ren, Yuinhui He, Guan Huang, Guanding Yu, Yunlong Cai, Zhaoyang Zhang, "An Edge-Computing Based Architecture for Mobile Augmented Reality", 2018
38. The CHESS experience, The CHESS Project: Augmented Reality at the Acropolis Museum's Peplos Kore exhibit, <https://www.youtube.com/watch?v=K-A1ZC30OJE>
39. Eng Hwee Ong, Jarkko Knecht, Olli Alanen, Zheng Chang, Toni Huovinen, Timo Nihtila, IEEE 802.11ac: "Enhancements for Very High Throughput WLANs", 2011
40. Ekahau, Timo Vanhatupa, Wi-Fi Capacity Analysis for 802.11ac and 802.11n: Theory & Practice, 2015