



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΜΕΤΑΔΟΣΗΣ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΑΣ
ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΥΛΙΚΩΝ

Εφαρμογή του Mobile Edge Computing στις επικοινωνίες οχημάτων

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Πλούτων Γραμματικός

Επιβλέπων : Παναγιώτης Κωττής
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Οκτώβριος 2018



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΜΕΤΑΔΟΣΗΣ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΑΣ
ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΥΛΙΚΩΝ

Εφαρμογή του Mobile Edge Computing στις επικοινωνίες οχημάτων

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Πλούτων Γραμματικός

Επιβλέπων : Παναγιώτης Κωττής
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή την 6^η Νοεμβρίου 2018

.....
Παναγιώτης Κωττής
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

.....
Χρήστος Καψάλης
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

.....
Γεώργιος Φικιώρης
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Οκτώβριος 2018

.....
Πλούτων Γραμματικός

Διπλωματούχος Ηλεκτρολόγος Μηχανικός και Μηχανικός Υπολογιστών Ε.Μ.Π.

Copyright © Πλούτων Γραμματικός, 2018

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 τον συγγραφέα.

Οι απόψεις και τα συμπεράσματα που περιέχονται σε αυτό το έγγραφο εκφράζουν τον συγγραφέα και δεν πρέπει να ερμηνευθεί ότι αντιπροσωπεύουν τις επίσημες θέσεις του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου.

Περίληψη

Στην παρούσα εργασία, μελετάται η αξιοποίηση της τεχνολογίας Mobile Edge Computing (MEC) για την εξυπηρέτηση επικοινωνιών που περιλαμβάνουν οχήματα, γνωστών και ως V2X (Vehicle to Everything). Οι περιπτώσεις χρήσης V2X που αποσκοπούν στη βελτίωση της οδικής ασφάλειας έχουν ανάγκη από αξιόπιστη παράδοση μηνυμάτων μεταξύ οχημάτων με ελάχιστη καθυστέρηση. Οι τεχνολογίες που βασίζονται στο πρότυπο IEEE 802.11p αδυνατούν να ικανοποιήσουν αυτές τις απαιτήσεις, καθώς το πλήθος των συνδεδεμένων οχημάτων αυξάνεται. Επομένως, το ενδιαφέρον στρέφεται στην αξιοποίηση των ήδη ανεπτυγμένων δικτύων κινητών επικοινωνιών τέταρτης γενιάς (LTE). Όμως, παρά την ευρεία εξάπλωσή τους, τα συστήματα LTE χαρακτηρίζονται από υψηλή καθυστέρηση από άκρο σε άκρο, εξαιτίας της υποχρεωτικής μετάδοσης των μηνυμάτων από το δίκτυο κορμού. Το MEC αντιμετωπίζει αυτό το πρόβλημα, καθώς προσφέρει υπολογιστικούς, αποθηκευτικούς και δικτυακούς πόρους στο άκρο του δικτύου, δηλαδή πλησιέστερα στους τελικούς χρήστες.

Στο πρώτο κεφάλαιο, γίνεται επισκόπηση των επικοινωνιών V2X. Αρχικά, περιγράφεται η αρχιτεκτονική ενός ευφυούς συστήματος μεταφορών και παρουσιάζονται πιθανές εφαρμογές V2X. Στη συνέχεια, γίνεται αναφορά στις τεχνολογίες που έχουν προταθεί για την ενεργοποίηση των επικοινωνιών V2X και συγκρίνονται τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα αυτών.

Το δεύτερο κεφάλαιο είναι αφιερωμένο στα συστήματα LTE. Αφού ολοκληρωθεί η περιγραφή των δικτύων πρόσβασης και κορμού, μελετάται η δυνατότητα αξιοποίησης του LTE για επικοινωνίες μεταξύ οχημάτων και παροχής υπηρεσιών πολυεκπομπής.

Το τρίτο κεφάλαιο αποτελεί εκτενή αναφορά στο MEC με έμφαση στην αρχιτεκτονική ενός συστήματος MEC. Επιπλέον, περιγράφεται συνοπτικά η τεχνολογία NFV (Network Function Virtualization), η οποία θα φανεί χρήσιμη τόσο κατά την εφαρμογή του MEC στα συστήματα LTE, όσο και κατά την ανάπτυξη των δικτύων πέμπτης γενιάς (5G).

Το τέταρτο κεφάλαιο συνδυάζει τις γνώσεις που αποκτήθηκαν από τα δύο προηγούμενα, καθώς αφορά τους τρόπους εφαρμογής του MEC στα συστήματα τέταρτης και πέμπτης γενιάς. Το κεφάλαιο αυτό περιλαμβάνει, επίσης, μία συνοπτική περιγραφή των επερχόμενων δικτύων 5G.

Τα δύο τελευταία κεφάλαια είναι αφιερωμένα στην εξυπηρέτηση εφαρμογών V2X με τη χρήση του MEC. Στο πέμπτο κεφάλαιο, περιγράφονται οι σημαντικότερες περιπτώσεις χρήσης που αναμένονται να ωφεληθούν από το MEC, ενώ στο έκτο εξετάζεται η συμβολή του MEC στην επίδοση συγκεκριμένων εφαρμογών μέσω προσομοιώσεων.

Λέξεις κλειδιά: Επικοινωνίες οχημάτων, LTE, Mobile Edge Computing, Network Function Virtualization, 5G, προσομοίωση

Abstract

This thesis explores the exploitation of Mobile Edge Computing (MEC) for vehicular communications, also known as V2X (Vehicle to Everything). V2X use cases aiming towards improving road safety demand reliable and low latency message delivery among vehicles. As the number of connected vehicles increases, technologies that rely on the IEEE 802.11p standard cannot satisfy these requirements. Therefore, researchers focus on exploiting the already deployed 4th generation mobile networks (LTE). However, despite their widespread use, LTE systems are characterized by high end-to-end latency, since messages have to traverse the core network. MEC addresses this problem by offering computing, storage and network resources at the edge of the network, that is, closer to the end users.

The first chapter provides an overview of vehicular communications. Firstly, the architecture of an intelligent transport system is described and possible V2X applications are presented. Afterwards, the chapter mentions the technologies proposed towards enabling V2X communications and compares their advantages and drawbacks.

The second chapter is dedicated to LTE systems. After describing the access and core networks, the chapter focuses on the possibility of using LTE for vehicular communications and for providing multicast services.

The third chapter is an extensive reference to MEC with emphasis on the architecture of a MEC system. Moreover, NFV (Network Function Virtualization) is briefly described, since it will be useful both for implementing MEC in LTE systems and for the development of fifth generation networks (5G).

The fourth chapter combines the knowledge obtained from the previous two chapters, as it is related to the way in which MEC can be applied to 4th and 5th generation systems. This chapter also includes a brief description of upcoming 5G networks.

The last two chapters are dedicated to the way MEC can serve V2X applications. The fifth chapter describes the most important use cases expected to benefit from MEC, whereas the sixth chapter examines, based on simulations, the performance enhancement that MEC offers to particular V2X applications.

Key words: Vehicular communications, LTE, Mobile Edge Computing, Network Function Virtualization, 5G, simulation

Ευχαριστίες

Θα ήθελα να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα καθηγητή μου, κύριο Παναγιώτη Κωττή, για την πολύτιμη βοήθειά του κατά τη διάρκεια της εκπόνησης της παρούσας διπλωματικής εργασίας. Τον ευχαριστώ, επίσης, όπως άλλωστε και τους υπόλοιπους καθηγητές μου για τις γνώσεις με τις οποίες με εφοδίασαν τα χρόνια των σπουδών μου. Ένα ιδιαίτερο ευχαριστώ στο συνάδελφό μου, Στέφανο Μπακιρτζή, απόφοιτο του τμήματός μας, για την παροχή πληροφοριών απαραίτητων για την υλοποίηση της εργασίας και τη βοήθειά του στην επίλυση προβλημάτων που προέκυψαν κατά τη διάρκεια αυτής. Τέλος, ευχαριστώ την οικογένειά μου, που με στήριξε τόσο κατά τη διάρκεια της φοίτησής μου όσο και κατά τη συγγραφή της εργασίας μου.

Πίνακας περιεχομένων

Περίληψη.....	5
Abstract	6
Ευρετήριο Σχημάτων	12
Ευρετήριο Πινάκων	15
Κατάλογος Συντμήσεων	16
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: Επικοινωνίες V2X	19
1.1 Εισαγωγή	19
1.2 Αρχιτεκτονική ευφυούς συστήματος μεταφορών	19
1.3 Εφαρμογές V2X	21
1.3.1 Δείκτες Επίδοσης.....	21
1.3.2 Κατηγορίες εφαρμογών	22
1.3.2.1 Εφαρμογές οδικής ασφάλειας	23
1.3.2.2 Εφαρμογές διαχείρισης/αποδοτικότητας κυκλοφορίας	23
1.3.2.3 Εφαρμογές άνεσης και ψυχαγωγίας.....	25
1.3.2.4 Αυτοοδηγούμενα οχήματα	26
1.4 Συστήματα και πρότυπα για επικοινωνίες οχημάτων	28
1.4.1 Το πρότυπο IEEE 802.11p.....	28
1.4.1.1 Φυσικό στρώμα και MAC.....	28
1.4.1.2 Στοιβά πρωτοκόλλων	30
1.4.1.3 Πλεονεκτήματα και περιορισμοί	32
1.4.2 Κυψελωτά συστήματα	33
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ LTE.....	35
2.1 Εισαγωγή	35
2.2 Αρχιτεκτονική LTE.....	35
2.2.1 E-UTRAN	36
2.2.2 Evolved Packet Core - EPC.....	37
2.3 Στοιβά πρωτοκόλλων	39
2.4 Φυσικό στρώμα.....	41
2.4.1 Δομή πλαισίου	41
2.4.2 Σχήμα μετάδοσης	42
2.5 Χρήση του LTE σε επικοινωνίες V2X	44
2.6 Η τεχνολογία MBMS.....	47
2.6.1 Διάχυση δεδομένων με πολυεκπομπή	47
2.6.2 Αρχιτεκτονική E-MBMS	48

2.6.3 MBMS για επικοινωνίες V2X.....	50
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: Mobile Edge Computing.....	53
3.1 Εισαγωγή.....	53
3.2 Πλεονεκτήματα MEC.....	54
3.3 Περιπτώσεις χρήσης του MEC.....	54
3.3.1 Υπηρεσίες προσανατολιζόμενες στους καταναλωτές.....	55
3.3.2 Υπηρεσίες third-party.....	56
3.3.3 Υπηρεσίες βελτίωσης της απόδοσης του δικτύου.....	58
3.4 Network Function Virtualization.....	59
3.4.1 Πλεονεκτήματα NFV.....	59
3.4.2 Αρχιτεκτονική NFV.....	60
3.5 Αρχιτεκτονική MEC.....	62
3.5.1 Σκελετός αρχιτεκτονικής.....	62
3.5.2 Βασικές μονάδες και σημεία αναφοράς.....	63
3.5.2.1 Mobile Edge Platform.....	64
3.5.2.2 Διαχείριση host.....	66
3.5.2.3 Διαχείριση συστήματος.....	66
3.5.3 Υπηρεσίες MEC.....	67
3.5.3.1 Πληροφορίες ραδιοδικτύου.....	67
3.5.3.2 Υπηρεσίες τοποθεσίας.....	68
3.5.3.3 Διαχείριση εύρους ζώνης.....	68
3.5.4 Υποστήριξη κινητικότητας.....	69
3.5.5 Ασφάλεια και ρυθμιστικά ζητήματα.....	69
3.5.6 Ανάπτυξη του MEC σε περιβάλλον NFV.....	71
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: Εφαρμογή του MEC στα δίκτυα τέταρτης και πέμπτης γενιάς.....	73
4.1 Εισαγωγή.....	73
4.2 Εφαρμογή του MEC στο LTE.....	73
4.2.1 Bump in the wire.....	73
4.2.2 Κατανεμημένος EPC.....	75
4.2.3 Κατανεμημένες S/P-GW.....	76
4.2.4 Κατανεμημένη S-GW με τοπικό breakout.....	77
4.2.5 Διαχωρισμός επιπέδων ελέγχου και χρήση.....	77
4.3 Εισαγωγή στα δίκτυα πέμπτης γενιάς.....	78
4.3.1 Απαιτήσεις δικτύων 5G.....	78
4.3.2 Αρχιτεκτονική δικτύων 5G.....	80

4.3.2.1 NG-RAN.....	80
4.3.2.2 5G Core.....	81
4.4 Εφαρμογή του MEC στα δίκτυα 5G.....	84
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: Χρήση του MEC στις επικοινωνίες οχημάτων.....	89
5.1 Εισαγωγή.....	89
5.2 Επιχειρησιακά μοντέλα.....	90
5.3 Κατηγορίες εφαρμογών που θα επωφεληθούν από το MEC.....	91
5.3.1 Οδική Ασφάλεια.....	91
5.3.2 Διευκόλυνση.....	92
5.3.3 Εξελιγμένη υποβοηθούμενη οδήγηση.....	93
5.3.4 VRUs.....	94
5.4 Ζητήματα προς επίλυση.....	95
5.4.1 Διατήρηση του QoS κατά την κίνηση των οχημάτων.....	95
5.4.2 Συντονισμός τηλεπικοινωνιακής κίνησης στα οχήματα.....	96
5.4.3 Λειτουργία πολλαπλών παρόχων.....	97
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6: Αξιοποίηση του MEC για εφαρμογές οδικής ασφάλειας και κυκλοφοριακής αποτελεσματικότητας.....	99
6.1 Σενάρια προσομοίωσης.....	99
6.1.1 Γενικά στοιχεία.....	99
6.1.2 Προσομοίωση της λειτουργίας V2X με αποκλειστική χρήση του LTE (Μοντέλο LTE).....	101
6.1.3 Προσέγγιση της λειτουργίας V2X με χρήση MEC (Μοντέλο MEC).....	101
6.2 Αποτελέσματα προσομοιώσεων.....	103
6.2.1 Ενημέρωση της κυκλοφοριακής κατάστασης.....	103
6.2.2 Αποστολή μηνυμάτων έκτακτης ανάγκης.....	108
6.2.3 Επίδραση της πυκνότητας της κυκλοφοριακής κίνησης.....	112
6.2.4 Επίδραση της συχνότητας αποστολής μηνυμάτων – Χάρτες υψηλής ανάλυσης.....	116
6.3 Συμπεράσματα και μελλοντικές επεκτάσεις.....	118
Βιβλιογραφία και Αναφορές.....	121

Ευρετήριο Σχημάτων

Σχήμα 1.1 Αρχιτεκτονική υψηλού επιπέδου ενός συστήματος ITS.....	20
Σχήμα 1.2 Δυνατοί τρόποι επικοινωνίας V2X.....	20
Σχήμα 1.3 Αποστολή CAM και DENM με χρήση επικοινωνίας V2V	23
Σχήμα 1.4 Επίπεδα αυτοματοποιημένης οδήγησης σύμφωνα με την SAE και την NHTSA	27
Σχήμα 1.5 Τεχνολογίες που ενεργοποιούν την αυτόνομη οδήγηση	27
Σχήμα 1.6 Σύγκριση των απαιτήσεων των περιπτώσεων χρήσης V2X.....	28
Σχήμα 1.7 Δυνατοί τρόποι επικοινωνίας των σταθμών στο IEEE 802.11.....	29
Σχήμα 1.8 Στοίβα πρωτοκόλλων του DSRC.....	30
Σχήμα 1.9 Στοίβα πρωτοκόλλων του C-ITS	31
Σχήμα 2.1 Εκδόσεις του LTE και πρόσθετα χαρακτηριστικά κάθε έκδοσης	35
Σχήμα 2.2 Αρχιτεκτονική E-UTRAN	36
Σχήμα 2.3 Αρχιτεκτονική EPC.....	37
Σχήμα 2.4 Σύνδεση του E-UTRAN με τις μονάδες του EPC.....	38
Σχήμα 2.5 Λειτουργίες E-UTRAN και EPC.....	39
Σχήμα 2.6 Στοίβα πρωτοκόλλων UP.....	39
Σχήμα 2.7 Στοίβα πρωτοκόλλων CP	40
Σχήμα 2.8 Δομή πλαισίου FDD.....	41
Σχήμα 2.9 Δομή πλαισίου TDD.....	42
Σχήμα 2.10 LTE Resource grid	43
Σχήμα 2.11 Σύγκριση OFDMA και SC-FDMA	44
Σχήμα 2.12 Δυνατοί τρόποι επικοινωνίας V2V στο LTE	45
Σχήμα 2.13 Αρχιτεκτονική συστήματος LTE-V2X	46
Σχήμα 2.14 Επικοινωνία με RSU τύπου UE.....	46
Σχήμα 2.15 Επικοινωνία με RSU τύπου eNB.....	47
Σχήμα 2.16 Αρχιτεκτονική MBMS	48
Σχήμα 2.17 Αρχιτεκτονική UP για την MBMS	49
Σχήμα 2.18 Αρχιτεκτονική CP για την MBMS.....	50
Σχήμα 2.19 Εφαρμογή της MBMS σε επικοινωνίες οχημάτων	51
Σχήμα 2.20 Τοποθέτηση της MBMS στο ίδιο σημείο με τον eNB	51
Σχήμα 2.21 Τοποθέτηση της MBMS σε διαφορετικό σημείο από τον eNB	52
Σχήμα 3.1 Κεντρικό και edge cloud.....	53
Σχήμα 3.2 Επαυξημένη πραγματικότητα	55
Σχήμα 3.3 Ανάλυση ροής βίντεο	57
Σχήμα 3.4 Ευφυής επιτάχυνση βίντεο	58
Σχήμα 3.5 Αρχιτεκτονική NFV	60
Σχήμα 3.6 Γράφος προώθησης μίας δικτυακής υπηρεσίας	61
Σχήμα 3.7 Σκελετός αρχιτεκτονικής MEC.....	63
Σχήμα 3.8 Αρχιτεκτονική αναφοράς MEC.....	64
Σχήμα 3.9 Δομή των URI για το API της Mp1.....	65
Σχήμα 3.10 Αρχιτεκτονική MEC σε περιβάλλον NFV	71
Σχήμα 4.1 Τοποθέτηση του MEC host στη διεπαφή S1.....	73
Σχήμα 4.2 Bump in the wire	74
Σχήμα 4.3 Έλεγχος πακέτων UP από το MEC.....	75
Σχήμα 4.4 Έλεγχος του MEC από την P-GW.....	75
Σχήμα 4.5 Κατανεμημένος EPC	75

Σχήμα 4.6 Υλοποίηση του EPC ως VNFs	76
Σχήμα 4.7 Κατανεμημένες S/P-GW	76
Σχήμα 4.8 Κατανεμημένη S-GW	77
Σχήμα 4.9 CUPS	77
Σχήμα 4.10 Περιπτώσεις εφαρμογής των δικτύων επόμενης γενιάς.....	78
Σχήμα 4.11 Σύγκριση των ικανοτήτων που ορίζουν τα IMT-2020 και IMT-Advanced	79
Σχήμα 4.12 Αρχιτεκτονική NG-RAN	80
Σχήμα 4.13 5G non-standalone	81
Σχήμα 4.14 5G standalone	81
Σχήμα 4.15 Αρχιτεκτονική βασισμένη στις υπηρεσίες	82
Σχήμα 4.16 Αρχιτεκτονική βασισμένη στα σημεία αναφοράς	82
Σχήμα 4.17 Λειτουργίες του NG-RAN και του 5G	83
Σχήμα 4.18 Ένταξη του MEC στο 5G	84
Σχήμα 4.19 Αρχιτεκτονική συστήματος 5G για ταυτόχρονη πρόσβαση σε δύο δίκτυα δεδομένων.....	85
Σχήμα 4.20 Πρόσβαση του δικτύου 5G σε δύο δίκτυα δεδομένων με χρήση μοναδικής συνόδου	85
Σχήμα 4.21 Έκθεση δυνατοτήτων του συστήματος MEC	86
Σχήμα 4.22 Κατανεμημένος EPC στο 5G	87
Σχήμα 4.23 Κατανεμημένη SGW με LBO στο 5G.....	87
Σχήμα 4.24 CUPS στο 5G	88
Σχήμα 5.1 MEC και τεχνολογίες πρόσβασης σε συστήματα V2X.....	89
Σχήμα 5.2 Οδική ασφάλεια	92
Σχήμα 5.3 Διαχείριση κυκλοφορίας	93
Σχήμα 5.4 Ενημέρωση-Διασκέδαση-Τηλεματική.....	93
Σχήμα 5.5 Υποβοηθούμενη οδήγηση.....	94
Σχήμα 5.6 Εντοπισμός VRUs.....	95
Σχήμα 5.7 Πρόβλεψη χρονικής στιγμής μεταπομπής.....	96
Σχήμα 5.8 Πρόωρη μεταβίβαση της κατάστασης της εφαρμογής	96
Σχήμα 5.9 Κοινή χρήση δικτυακής υποδομής.....	97
Σχήμα 5.10 Ανεξάρτητη δικτυακή υποδομή για κάθε MNO.....	98
Σχήμα 6.1 Περιβάλλον προσομοίωσης	99
Σχήμα 6.2 Μοντέλο LTE	101
Σχήμα 6.3 Μοντέλο MEC	102
Σχήμα 6.4 Μέση καθυστέρηση δεδομένων κυκλοφορίας στη ζεύξη DL συναρτήσει του πλήθους των πεζών χρηστών	104
Σχήμα 6.5 Μέση καθυστέρηση δεδομένων κυκλοφορίας στη ζεύξη UL συναρτήσει του πλήθους των πεζών χρηστών	105
Σχήμα 6.6 Μέσο PDR στη ζεύξη DL συναρτήσει του πλήθους των πεζών χρηστών	106
Σχήμα 6.7 Μέση καθυστέρηση ανανέωσης δεδομένων του τοπικού server συναρτήσει του πλήθους των πεζών χρηστών	107
Σχήμα 6.8 Καθυστέρηση μηνυμάτων έκτακτης ανάγκης συναρτήσει του πλήθους των πεζών χρηστών	111
Σχήμα 6.9 Μέσο πλήθος παραληπτών του μηνύματος έκτακτης ανάγκης συναρτήσει του πλήθους των πεζών χρηστών	112
Σχήμα 6.10 Καθυστέρηση DL οχημάτων συναρτήσει της πυκνότητας των οχημάτων	113
Σχήμα 6.11 Καθυστέρηση UL οχημάτων συναρτήσει της πυκνότητας των οχημάτων	113

Σχήμα 6.12 Καθυστέρηση μηνυμάτων έκτακτης ανάγκης συναρτήσει της πυκνότητας της κυκλοφοριακής κίνησης.....	115
Σχήμα 6.13 Καθυστέρηση DL πεζών χρηστών συναρτήσει της πυκνότητας των οχημάτων	116
Σχήμα 6.14 Καθυστέρηση DL οχημάτων συναρτήσει της συχνότητας αποστολής μηνυμάτων από τον V2X server.....	117
Σχήμα 6.15 Καθυστέρηση DL πεζών χρηστών συναρτήσει της συχνότητας αποστολής μηνυμάτων από τον V2X server.....	118

Ευρετήριο Πινάκων

Πίνακας 1.1 Τηλεπικοινωνιακές απαιτήσεις περιπτώσεων χρήσης οδικής ασφάλειας	24
Πίνακας 1.2 Τηλεπικοινωνιακές απαιτήσεις περιπτώσεων χρήσης διαχείρισης κυκλοφορίας.....	25
Πίνακας 1.3 Ενδεικτικές περιπτώσεις χρήσης σχετικές με την άνεση και την ψυχαγωγία των οδηγών και των επιβατών.....	26
Πίνακας 1.4 Ρυθμοί μετάδοσης, σχήματα διαμόρφωσης και ρυθμοί κώδικα στο 802.11p	29
Πίνακας 1.5 Σύγκριση IEEE 802.11p και LTE ως προς την υποστήριξη εφαρμογών V2X.....	34
Πίνακας 2.1 Δυνατοί τρόποι ρύθμισης ενός πλαισίου TDD	42
Πίνακας 2.2 Παράμετροι φυσικού στρώματος του LTE.....	44
Πίνακας 3.1 API της διεπαφής Mp1.....	65
Πίνακας 3.2 RNI API.....	67
Πίνακας 3.3 Location API.....	68
Πίνακας 3.4 Bandwidth Manager API	68
Πίνακας 4.1 Αντιστοίχιση μονάδων του EPC με τις δικτυακές λειτουργίες του 5GC.....	87
Πίνακας 6.1 Δεδομένα κυκλοφορίας	100
Πίνακας 6.2 Παράμετροι PHY και MAC της προσομοίωσης.....	100
Πίνακας 6.3 Μέση καθυστέρηση δεδομένων κυκλοφορίας στη ζεύξη DL	104
Πίνακας 6.4 Μέση καθυστέρηση δεδομένων κυκλοφορίας στη ζεύξη UL	105
Πίνακας 6.5 Μέσο PDR στη ζεύξη DL.....	106
Πίνακας 6.6 Μέσο PDR στη ζεύξη UL.....	106
Πίνακας 6.7 Μέση καθυστέρηση ανανέωσης δεδομένων του τοπικού server	107
Πίνακας 6.8 Καθυστέρηση και πλήθος παραληπτών μηνυμάτων έκτακτης ανάγκης, όταν υπάρχουν 60 πεζοί χρήστες.....	108
Πίνακας 6.9 Καθυστέρηση και πλήθος παραληπτών μηνυμάτων έκτακτης ανάγκης, όταν υπάρχουν 70 πεζοί χρήστες.....	109
Πίνακας 6.10 Καθυστέρηση και πλήθος παραληπτών μηνυμάτων έκτακτης ανάγκης, όταν υπάρχουν 80 πεζοί χρήστες.....	109
Πίνακας 6.11 Καθυστέρηση και πλήθος παραληπτών μηνυμάτων έκτακτης ανάγκης, όταν υπάρχουν 90 πεζοί χρήστες.....	110
Πίνακας 6.12 Καθυστέρηση και πλήθος παραληπτών μηνυμάτων έκτακτης ανάγκης, όταν υπάρχουν 100 πεζοί χρήστες	110
Πίνακας 6.13 Καθυστέρηση DL οχημάτων για τα τρία επίπεδα κίνησης.....	112
Πίνακας 6.14 Καθυστέρηση UL οχημάτων για τα τρία επίπεδα κίνησης.....	112
Πίνακας 6.15 PDR DL οχημάτων για τα τρία επίπεδα κίνησης.....	113
Πίνακας 6.16 Καθυστέρηση και πλήθος παραληπτών μηνυμάτων έκτακτης ανάγκης για μέτρια κίνηση	114
Πίνακας 6.17 Καθυστέρηση και πλήθος παραληπτών μηνυμάτων έκτακτης ανάγκης για υψηλή κίνηση.....	114
Πίνακας 6.18 Καθυστέρηση DL πεζών χρηστών για τα τρία επίπεδα κίνησης	115
Πίνακας 6.19 Καθυστέρηση DL οχημάτων συναρτήσει της συχνότητας αποστολής μηνυμάτων από τον V2X server	117
Πίνακας 6.20 PDR DL οχημάτων συναρτήσει της συχνότητας αποστολής μηνυμάτων από τον V2X server	117
Πίνακας 6.21 Καθυστέρηση DL πεζών χρηστών συναρτήσει της συχνότητας αποστολής μηνυμάτων από τον V2X server	118

Κατάλογος Συντμήσεων

3G/4G/5G – 3rd/4th/5th Generation
3GPP – 3rd Generation Partnership Project
5GAA – 5G Automotive Association
5GC – 5G Core
AMF – Access and Mobility Management Function
AP – Access Point
API – Application Programming Interface
APN – Access Point Name
AUSF – Authentication Server Function
BMSC – Broadcast Multicast Service Center
BSS – Basic Service Set
BTP – Basic Transport Protocol
CAM – Cooperative Awareness Message
CDN – Content Delivery Network
CFS – Customer Facing Service
C-ITS – Cooperative ITS
CN – Core Network
CP – Control Plane
CSMA/CA – Carrier Sense Multiple Access / Collision Avoidance
CUPS – Control User Plane Separation
D2D – Device to Device
DENM – Decentralized Environmental Notification Message
DL – Downlink
DN – Data Network
DNS – Domain Name System
DSRC – Dedicated Short Range Communication
E-MBMS – Evolved Multimedia Broadcast Multicast Service
eNB – evolved Node B
EPC – Evolved Packet Core
EPS – Evolved Packet System
ETSI – European Telecommunications Standards Institute
E-UTRAN – Evolved UMTS Radio Access Network
GTP – GPRS Tunneling Protocol
HARQ – Hybrid Automatic Repeat Request
HSS – Home Subscriber Server
HTTP – HyperText Transfer Protocol
IEEE – Institute of Electrical and Electronics Engineers
IoT – Internet of things
ISG – Industry Specification Group
ITS – Intelligent Transport System
LBO – Local BreakOut
LCM – LifeCycle Management
LMF – Location Management Function
LTE – Long Term Evolution
LTE-A – LTE-Advanced

MAC – Medium Access Control
MANO – Management and Orchestration
MBMS – Multimedia Broadcast Multicast Service
MBSFN – Multicast Broadcast Single Frequency Network
MCE – Multicast Coordination Entity
ME – Mobile Edge
MEC – Mobile/Multi-access Edge Computing
MEO – Mobile Edge Orchestrator
MEP – Mobile Edge Platform
MEPM – Mobile Edge Platform Manager
MME – Mobility Management Entity
MNO – Mobile Network Operator
NAS – Non Access Stratum
NEF – Network Exposure Function
NF – Network Function
NFV – Network Function Virtualization
NFVI – NFV Infrastructure
NFVO – NFV Orchestrator
NRF – NF Repository Function
OBU – On Board Unit
OCB – Outside the Context of a BSS
OFDM – Orthogonal Frequency Division Multiplexing
OFDMA – Orthogonal Frequency Division Multiple Access
OSS/BSS – Operations Support System/Business Support System
PCF – Policy Control Function
PCRF – Policy Control and Charging Rules Function
PDN – Packet Data Network
PDR – Packet Delivery Ratio
P-GW – Packet Gateway
PLMN – Public Land Mobile Network
PNF – Physical Network Function
QCI – QoS Class Identifier
QoE – Quality of Experience
QoS – Quality of Service
REST – Representational State Transfer
RLC – Radio Link Control
RNIS – Radio Network Information Service
RRC – Radio Resource Control
RSU – Road Side Unit
S-GW – Serving Gateway
S/P-GW – Serving/Packet Gateway
SBA – Service Based Architecture
SCTP – Stream Control Transmission Protocol
SDN – Software Defined Networking
SMF – Session Management Function
TCP – Transmission Control Protocol
UDP – User Datagram Protocol

UE – User Equipment
UL – Uplink
UMTS – Universal Mobile Telecommunications System
UP – User Plane
UPF – User Plane Function
V2I – Vehicle to Infrastructure
V2N – Vehicle to Network
V2P – Vehicle to Pedestrian
V2V – Vehicle to Vehicle
V2X – Vehicle to Everything
VI – Virtualization Infrastructure
VIM – VI Manager
VM – Virtual Machine
VNF – Virtual Network Function
VNFM – VNF Manager
VRU – Vulnerable Road User

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: Επικοινωνίες V2X

1.1 Εισαγωγή

Τα οδικά ατυχήματα αποτελούν ένα μείζον πρόβλημα για τις σύγχρονες κοινωνίες, καθώς είναι η αιτία για περισσότερους από 20000 θανάτους ετησίως, στις χώρες της Ευρωπαϊκής Ένωσης μόνο [1]. Ενώ στις αρχές του 21^{ου} αιώνα το ποσοστό θνησιμότητας μειωνόταν σταδιακά, έχει παραμείνει σχεδόν στάσιμο κατά τη διάρκεια της τρέχουσας δεκαετίας. Επομένως, τα μέτρα που έχουν ληφθεί για τη βελτίωση της ασφάλειας των οδηγών και των επιβατών δεν είναι επαρκή για την επίτευξη του στόχου που έχει τεθεί για μείωση των ατυχημάτων κατά το ήμισυ από το 2011 έως το 2020 [2].

Για το λόγο αυτό, προκειμένου να αποφευχθούν τα ατυχήματα, τα ίδια τα οχήματα πρέπει να διαθέτουν επίγνωση της κατάστασης που επικρατεί γύρω τους και να είναι σε θέση να ενημερώσουν έγκαιρα τους οδηγούς για επικείμενους κινδύνους. Για να είναι αυτό εφικτό, επιβάλλεται τα οχήματα να ανταλλάσσουν μηνύματα μεταξύ τους. Οι επικοινωνίες στις οποίες συμμετέχουν οχήματα χαρακτηρίζονται ως «επικοινωνίες οχήματος προς οτιδήποτε» (Vehicle to Everything – V2X), ενώ τα τηλεπικοινωνιακά συστήματα που περιλαμβάνουν οχήματα είναι γνωστά ως «ευφυή συστήματα μεταφορών» (Intelligent Transport System – ITS).

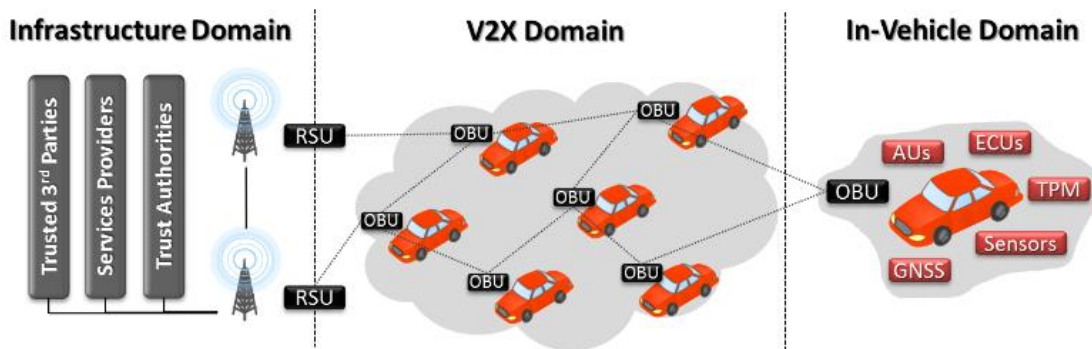
Οι επικοινωνίες V2X, όμως, δεν χρησιμοποιούνται αποκλειστικά για την ενίσχυση της οδικής ασφάλειας. Τα δεδομένα που ανταλλάσσουν τα οχήματα μπορούν να αξιοποιηθούν για τη βελτίωση της εμπειρίας των οδηγών, παρέχοντάς τους επιπλέον πληροφορίες για την κατάσταση της κυκλοφορίας ή για την ύπαρξη σημείων ενδιαφέροντος. Για την πραγματοποίηση των εφαρμογών V2X, απαιτείται η συνεργασία των τηλεπικοινωνιακών παρόχων με επιχειρήσεις άλλων τομέων, όπως κατασκευαστές αυτοκινήτων ή ειδικού εξοπλισμού. Επιπλέον, οι επικοινωνίες μεταξύ οχημάτων μπορούν να αποτελέσουν ένα ενδιάμεσο στάδιο προς την ενεργοποίηση της βιομηχανίας των αυτοοδηγούμενων οχημάτων, η οποία θέτει πρωτοφανείς προκλήσεις προς όλους τους ενδιαφερόμενους φορείς.

1.2 Αρχιτεκτονική ευφυούς συστήματος μεταφορών

Στη γενική του μορφή, ένα ITS περιλαμβάνει μία δικτυακή υποδομή και τα οχήματα, τα οποία αποτελούν τους χρήστες της υπηρεσίας. Σε ένα ITS, κάθε όχημα είναι εξοπλισμένο με ένα OBU (On Board Unit), δηλαδή μία συσκευή που παρέχει σε αυτό δυνατότητα επικοινωνίας με άλλα οχήματα, καθώς και με τη δικτυακή υποδομή. Ο κύριος ρόλος της αποστολής μηνυμάτων στα γειτονικά οχήματα είναι η ενημέρωση των οδηγών αυτών για την κυκλοφοριακή κατάσταση, με απώτερο σκοπό την αποφυγή ατυχημάτων και τη διευκόλυνση της διαδικασίας οδήγησης. Τα οχήματα μπορούν να επικοινωνούν και με τη δικτυακή υποδομή για την αποστολή δεδομένων κυκλοφορίας σε αυτήν και τη λήψη υπηρεσιών.

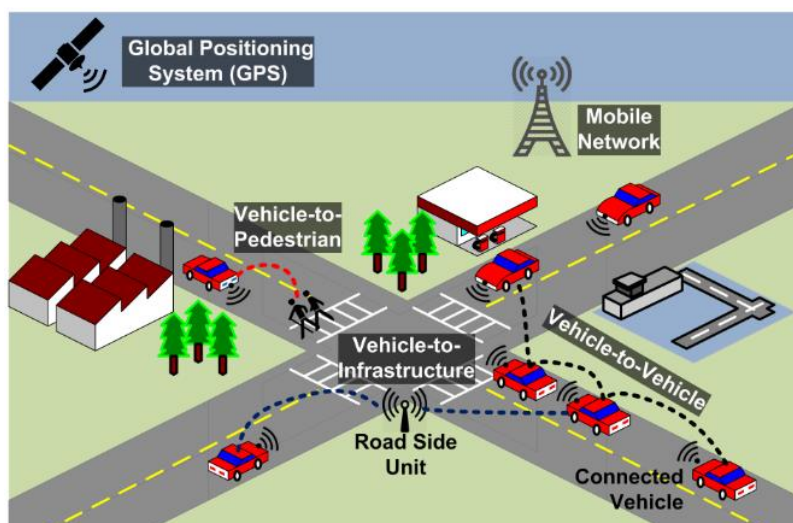
Ο εξοπλισμός των οχημάτων περιλαμβάνει και άλλες μονάδες, οι οποίες συμβάλλουν στην αποτελεσματική διαδικασία της επικοινωνίας. Τα ECUs (Electronic Control Units) είναι υπεύθυνα για τη συλλογή και αποθήκευση δεδομένων του ίδιου του οχήματος,

(μέγεθος, θέση, ταχύτητα κλπ.) και του περιβάλλοντος αυτού (πλήθος γειτονικών οχημάτων και κατάσταση του δρόμου) σε συνεργασία και με τους διάφορους αισθητήρες που διαθέτει το όχημα. Το AU (Application Unit) είναι υπεύθυνο για την εκτέλεση εφαρμογών από άκρη σε άκρη είτε μεταξύ γειτονικών οχημάτων είτε μεταξύ ενός οχήματος και κάποιου παρόχου υπηρεσιών, ο οποίος έχει πρόσβαση στη δικτυακή υποδομή του ITS. Προκειμένου να εξασφαλιστεί η ασφάλεια της επικοινωνίας, το όχημα πρέπει να διαθέτει μία μονάδα που εκτελεί λειτουργίες επιβεβαίωσης χρηστών και παρόχων, η οποία καλείται TPM (Trusted Platform Module). Τέλος, τα οχήματα κάνουν χρήση ενός παγκοσμίου συστήματος πλοήγησης μέσω δορυφόρου (Global Navigation Satellite System – GNSS), για τον ακριβή προσδιορισμό της θέσης αυτών.



Σχήμα 1.1 Αρχιτεκτονική υψηλού επιπέδου ενός συστήματος ITS [4]

Η πρόσβαση των οχημάτων στη δικτυακή υποδομή είναι εφικτή μέσω κάποιων μονάδων, τοποθετημένων στην άκρη του οδοστρώματος, οι οποίες ονομάζονται RSUs (Road Side Units). Ο ρόλος των RSUs είναι να συλλέγουν δεδομένα που αποστέλλουν τα οχήματα. Τα μηνύματα αυτά μπορούν, κατόπιν επεξεργασίας, να προωθηθούν σε άλλα οχήματα ή σε κάποιον πάροχο υπηρεσιών ή έμπιστο τρίτο συνεργάτη (third party), με σκοπό οι τελευταίοι να προσφέρουν νέες υπηρεσίες στα οχήματα. Με βάση την τεχνολογία που χρησιμοποιείται για την ασύρματη πρόσβαση στη δικτυακή υποδομή, τα RSUs μπορούν να εκτελούν και άλλες λειτουργίες πλην αυτών που σχετίζονται με τις επικοινωνίες V2X. Χαρακτηριστικό παράδειγμα αποτελεί η εγκατάσταση λειτουργιών RSU στους ήδη υπάρχοντες σταθμούς βάσης των κυψελωτών συστημάτων 3G/4G.



Σχήμα 1.2 Δυνατοί τρόποι επικοινωνίας V2X [4]

Στο Σχ. 1.2, απεικονίζονται οι δυνατοί τρόποι επικοινωνίας μεταξύ των οντοτήτων του συστήματος ITS. Οι επικοινωνίες V2X διαιρούνται στις ακόλουθες κατηγορίες:

- **Επικοινωνία οχήματος με όχημα** (Vehicle to Vehicle – V2V): Σε αυτήν την περίπτωση, δύο ή περισσότερα οχήματα επικοινωνούν μεταξύ τους, χωρίς τη μεσολάβηση κάποιας άλλης οντότητας (πχ. RSU). Ο τρόπος αυτός προτιμάται για εφαρμογές οδικής ασφάλειας, όπως την ειδοποίηση του οδηγού για τα γειτονικά οχήματα με σκοπό την αποφυγή συγκρούσεων, προειδοποίηση για προσπέραση ή αλλαγή λωρίδας κλπ.
- **Επικοινωνία οχήματος με υποδομή** (Vehicle to Infrastructure – V2I): Η επικοινωνία μεταξύ οχημάτων είναι εφικτή μόνο με τη μεσολάβηση των RSUs. Ο τρόπος επικοινωνίας V2I μπορεί να χρησιμοποιηθεί τόσο σε εφαρμογές ασφάλειας, όπως ευρυεκπομπή ενός μηνύματος έκτακτης ανάγκης, όσο και για τη βελτίωση της κυκλοφορίας. Η τελευταία επιτυγχάνεται με τη συλλογή δεδομένων κυκλοφορίας από τα RSUs και την ενημέρωση ενός απομακρυσμένου εξυπηρετητή. Στην περίπτωση όπου τα RSUs ανταλλάσσουν πληροφορίες με άλλες δικτυακές μονάδες, πρόκειται για επικοινωνία οχήματος με δίκτυο (Vehicle to Network – V2N).
- **Επικοινωνία οχήματος με πεζό** (Vehicle to Pedestrian – V2P): Οι πεζοί και οι ποδηλάτες εμφανίζονται στη βιβλιογραφία ως ευάλωτοι χρήστες (Vulnerable Road Users – VRUs). Οι εφαρμογές αυτού του τύπου αποσκοπούν στην προστασία των VRUs από τα οχήματα. Ένα όχημα μπορεί να πληροφορηθεί για τη θέση ενός VRU είτε με απευθείας επικοινωνία του OBU του οχήματος και της συσκευής που διαθέτει ο VRU είτε με την παρεμβολή ενός RSU. Ο δεύτερος τρόπος επικοινωνίας είναι πιο εφικτός στην περίπτωση που οι πεζοί είναι ήδη χρήστες κάποιας άλλης δικτυακής υπηρεσίας.

1.3 Εφαρμογές V2X

1.3.1 Δείκτες Επίδοσης

Προκειμένου να θεωρείται αξιόπιστη, κάθε πιθανή εφαρμογή επικοινωνίας μεταξύ οχημάτων έχει διαφορετικές απαιτήσεις. Για την αξιολόγηση της ποιότητας υπηρεσίας, έχουν οριστεί διάφοροι δείκτες (Key Performance Indicators – KPIs), οι οποίοι ποσοτικοποιούν την επίδοση των εφαρμογών. Οι συχνότερα χρησιμοποιούμενοι KPIs είναι οι εξής [5]:

- **Καθυστέρηση από άκρο σε άκρο** (ms): Η μέγιστη ανεκτή καθυστέρηση που υφίσταται ένα μήνυμα από τη στιγμή που παράγεται στον πομπό μέχρι να γίνει αντιληπτό από το δέκτη. Στις απευθείας επικοινωνίες μεταξύ οχημάτων, είναι πρακτικά ίση με την καθυστέρηση διάδοσης πάνω από τη ραδιοδιεπαφή. Στις περιπτώσεις στις οποίες παρεμβάλλεται η δικτυακή υποδομή, η καθυστέρηση αυτή περιλαμβάνει τη μετάδοση από το όχημα προς την υποδομή (uplink) και την αντίστροφη κατεύθυνση (downlink).
- **Αξιοπιστία** (%): Μετράται με το μέγιστο ανεκτό ποσοστό απωλειών πακέτων (Packet Loss Ratio – PLR) ή αντίστοιχα το ελάχιστο ποσοστό παράδοσης (Packet Delivery Ratio – PDR) στο στρώμα εφαρμογής. Ένα πακέτο θεωρείται ότι χάνεται αν δεν φθάσει στον προορισμό εντός χρονικού διαστήματος ίσου με τη μέγιστη ανεκτή καθυστέρηση.

- **Ρυθμός μετάδοσης (kbrps/Mbrps):** Ο ελάχιστος απαιτούμενος ρυθμός μετάδοσης bit ώστε να λειτουργεί σωστά η εφαρμογή
- **Εμβέλεια επικοινωνίας (m):** Η μέγιστη απόσταση, εντός της οποίας η μετάδοση μηνυμάτων είναι εφικτή με την επιθυμητή αξιοπιστία
- **Κινητικότητα κόμβων (km/h):** Η μέγιστη ταχύτητα κίνησης των κόμβων του δικτύου, κατά την οποία επιτυγχάνεται η δεδομένη αξιοπιστία
- **Πυκνότητα κόμβων (οχήματα/km²):** Το μέγιστο πλήθος οχημάτων που μπορεί να εξυπηρετήσει το σύστημα υπό δεδομένο PDR
- **Ακρίβεια θέσης (cm):** Το μέγιστο ανεκτό σφάλμα στον προσδιορισμό της θέσης ενός χρήστη

Ανάλογα με το είδος της εφαρμογής, μπορούν να λαμβάνονται υπόψη ένας ή περισσότεροι KPIs. Για παράδειγμα, οι εφαρμογές που βασίζονται σε επικοινωνίες V2V έχουν υψηλές απαιτήσεις σε καθυστέρηση και αξιοπιστία, ενώ οι επικοινωνίες V2I που αποσκοπούν στη βελτίωση της κυκλοφοριακής κίνησης βασίζονται στην επιτυχή παράδοση πακέτων σε ευρεία περιοχή κάλυψης.

1.3.2 Κατηγορίες εφαρμογών

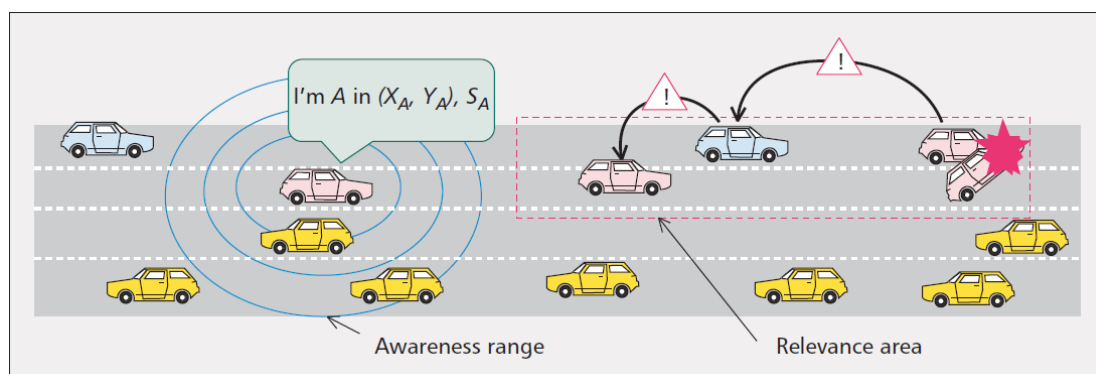
Οι περιπτώσεις χρήσης (use cases), στις οποίες εφαρμόζονται οι επικοινωνίες οχημάτων, διαίρονται σύμφωνα με τον ETSI [6] στις ακόλουθες κατηγορίες:

- **Ασφάλεια – Υποβοηθούμενη οδήγηση (Security – Assisted Driving):** Αποσκοπούν στην αποφυγή οδικών ατυχημάτων με έγκαιρη ενημέρωση των οδηγών για την κυκλοφοριακή και οδική κατάσταση μέσω μηνυμάτων που αποστέλλονται από γειτονικά οχήματα ή από κάποιο RSU. Επίσης, παρέχουν στους οδηγούς χρήσιμες πληροφορίες, προκειμένου να διευκολύνουν τη διαδικασία οδήγησης. Σε αυτήν την κατηγορία, περιλαμβάνονται και όσες περιπτώσεις χρήσης σχετίζονται με την προστασία των πεζών.
- **Κυκλοφοριακή αποτελεσματικότητα (Traffic Efficiency):** Στόχος αυτής της κατηγορίας είναι η διαχείριση της κυκλοφοριακής κίνησης. Κατά κύριο λόγο, ένας εξυπηρετητής συλλέγει δεδομένα είτε από τα ίδια τα οχήματα είτε από αισθητήρες που είναι τοποθετημένοι επί του οδοστρώματος, οι οποίοι διαθέτουν πληροφορίες για τη θέση και την ταχύτητα των οχημάτων. Αφού τα επεξεργαστεί, ο εξυπηρετητής ενημερώνει τους οδηγούς για την κυκλοφοριακή κατάσταση που επικρατεί εντός μίας περιοχής, με χρήση, για παράδειγμα, γραπτού κειμένου ή χαρτών υψηλής ανάλυσης.
- **Άλλες εφαρμογές:** Περιλαμβάνουν τις περιπτώσεις χρήσης που δεν σχετίζονται άμεσα με τη βελτίωση της κυκλοφοριακής κατάστασης. Στόχος τους είναι η ενίσχυση της εμπειρίας του οδηγού, μέσω ενημερώσεων για σημεία ενδιαφέροντος και χώρους στάθμευσης ή κατανάλωση υπηρεσιών πολυμέσων.

Τα τελευταία χρόνια, έχει εκδηλωθεί ιδιαίτερο ενδιαφέρον για νέες κατηγορίες εφαρμογών, με εξαιρετικά υψηλότερες τηλεπικοινωνιακές απαιτήσεις από όσες περιπτώσεις έχουν εξεταστεί έως τώρα. Αυτές περιλαμβάνουν τα τηλεχειριζόμενα (tele-operated) και αυτοοδηγούμενα (self-driving) αυτοκίνητα. Στις παραγράφους 1.3.2.1-4 παρουσιάζονται οι κυριότερες περιπτώσεις χρήσης κάθε κατηγορίας και συγκρίνονται οι απαιτήσεις αυτών ως προς τους KPIs της παραγράφου 1.3.1.

1.3.2.1 Εφαρμογές οδικής ασφάλειας

Για την προειδοποίηση των οδηγών για επερχόμενους κινδύνους, έχουν οριστεί δύο τύποι μηνυμάτων. Τα πρώτα μηνύματα, επονομαζόμενα CAMs (Cooperative Awareness Messages) [7], εκπέμπονται περιοδικά από ένα όχημα προς τα γειτονικά του. Τυπικές πληροφορίες που ενδεχομένως περιλαμβάνονται σε ένα CAM είναι η θέση, η ταχύτητα και το μέγεθος του οχήματος-αποστολέα. Η μετάδοση μπορεί να γίνει είτε απευθείας μεταξύ των οχημάτων είτε μέσω της δικτυακής υποδομής. Τα μηνύματα τύπου DENM (Decentralized Environmental Notification Messages) [8] παράγονται από μία οντότητα του ITS κατόπιν κάποιου γεγονότος, όπως ατύχημα ή ανίχνευση οδικού κινδύνου. Ο σκοπός τους είναι να ενημερώσουν έγκαιρα τα οχήματα εντός μιας συγκεκριμένης περιοχής για το είδος, την τοποθεσία και τη χρονική στιγμή ανίχνευσης του συμβάντος.



Σχήμα 1.3 Αποστολή CAM και DENM με χρήση επικοινωνίας V2V [9]

Στον Πιν. 1.1, αναφέρονται οι κυριότερες περιπτώσεις χρήσης που σχετίζονται με την οδική ασφάλεια καθώς και οι τηλεπικοινωνιακές απαιτήσεις αυτών. Εκτός από τις απαιτήσεις κάθε περίπτωσης, οι μεταδόσεις μηνυμάτων ασφαλείας έχουν ανάγκη από όσο το δυνατόν καλύτερη αξιοπιστία (>99%).

1.3.2.2 Εφαρμογές διαχείρισης/αποδοτικότητας κυκλοφορίας

Η πλειονότητα των περιπτώσεων διαχείρισης κυκλοφορίας βασίζεται στην εκπομπή μηνυμάτων I2V (Infrastructure to Vehicle). Τα RSUs συλλέγουν τα περιοδικά μηνύματα που εκπέμπουν τα οχήματα και τα προωθούν σε κάποιο απομακρυσμένο κέντρο δεδομένων (data center), αφού ενδεχομένως τα φιλτράρουν. Ο εξυπηρετητής της εφαρμογής επεξεργάζεται τα δεδομένα των οχημάτων μαζί με όσα λαμβάνει από διάφορους αισθητήρες και εκπέμπει χρήσιμες πληροφορίες προς τα οχήματα που βρίσκονται εντός μίας γεωγραφικής περιοχής. Όπως φαίνεται στον Πιν. 1.2, οι περιπτώσεις χρήσης αυτού του τύπου θέτουν χαλαρότερες απαιτήσεις καθυστέρησης, συγκριτικά με τις εφαρμογές της προηγούμενης παραγράφου. Όσο ταχύτερα μεταφέρονται, όμως, τα δεδομένα στον κεντρικό εξυπηρετητή, τόσο περισσότερο επίκαιρες θα είναι οι κυκλοφοριακές πληροφορίες που αυτός θα παράγει. Επιπλέον, υπάρχει ανάγκη για επαρκή περιοχή κάλυψης της υπηρεσίας από τα RSUs.

Περίπτωση χρήσης	Περιγραφή	Απαιτήσεις
Μηνύματα έκτακτης ανάγκης	Αποστολή DENMs για την ενημέρωση των υπόλοιπων οχημάτων για γεγονότα όπως απότομο φρενάρισμα, σύγκρουση ή άλλου κινδύνου επί του οδοστρώματος.	Ελάχιστη συχνότητα αποστολής μηνυμάτων: 10Hz
		Μέγιστη καθυστέρηση: 50-100ms
		Ακρίβεια θέσης οχημάτων: <1m
Οχήματα έκτακτης ανάγκης	Οι οδηγοί πληροφορούνται για την ύπαρξη οχήματος έκτακτης ανάγκης, από τα CAMs που αυτό εκπέμπει.	Ελάχιστη συχνότητα αποστολής CAMs από το όχημα έκτακτης ανάγκης: 10Hz
		Μέγιστη καθυστέρηση: 100ms
Προειδοποίηση για ύπαρξη VRUs	Οι οδηγοί των οχημάτων αποκτούν επίγνωση για την ύπαρξη πεζών.	Ελάχιστη συχνότητα αποστολής CAMs από τους VRUs: 1Hz
		Μέγιστη καθυστέρηση: 100ms
Υποβοηθούμενη αλλαγή λωρίδας	Ο οδηγός διευκολύνεται κατά την αλλαγή λωρίδας από μηνύματα που ανταλλάσσονται μεταξύ γειτονικών οχημάτων.	Ελάχιστη συχνότητα αποστολής CAMs: 10Hz
		Μέγιστη καθυστέρηση: 100ms
		Ακρίβεια σχετικής θέσης οχημάτων: 2m
See-Through	Ένα φορτηγό παρέχει βίντεο πραγματικού χρόνου για την κατάσταση του δρόμου στους οδηγούς με περιορισμένο οπτικό πεδίο.	Απαιτούμενος ρυθμός μετάδοσης: 10 Mbps
		Μέγιστη καθυστέρηση: 50ms

Πίνακας 1.1 Τηλεπικοινωνιακές απαιτήσεις περιπτώσεων χρήσης οδικής ασφάλειας

Μία άλλη κατηγορία εφαρμογών αποδοτικότητας κυκλοφορίας, οι οποίες μάλιστα σχετίζονται και με την ασφάλεια των οδηγών, περιλαμβάνει το συνεργαζόμενο προσαρμοσμένο έλεγχο πορείας (Cooperative Adaptive Cruise Control – CACC) [11] και τη «διμοιρία» (platoon) οχημάτων [12]. Ο ρόλος αυτών είναι αφενός η αύξηση του ρυθμού διέλευσης των οχημάτων και της ασφάλειας μεταφοράς και αφετέρου η μείωση της κατανάλωσης καυσίμων και εκπομπής καυσαερίων. Η τεχνολογία CACC συμπληρώνει την ACC (Adaptive Cruise Control), η οποία μεταβάλλει την ταχύτητα του οχήματος σύμφωνα με τις ενδείξεις των αισθητήρων αυτού, με κατάλληλη συνεργασία των γειτονικών οχημάτων. Με την εφαρμογή της τεχνολογίας platooning, τα οχήματα μιας λωρίδας συνεργάζονται αποτελεσματικά, με σκοπό τη διατήρηση όσο το δυνατόν μικρότερης απόστασης μεταξύ τους.

Περίπτωση χρήσης	Περιγραφή	Απαιτήσεις
Όρια ταχύτητας	Ένα RSU ευρυεκπέμπει τα τοπικά όρια ταχύτητας.	Ελάχιστη συχνότητα αποστολής μηνυμάτων: 1-10Hz ανάλογα με την τεχνολογία ευρυεκπομπής
Φωτεινοί σηματοδότες	Ευρυεκπομπή μηνυμάτων για την κατάσταση των σηματοδοτών και το χρόνο παραμονής σε αυτήν.	Ελάχιστη συχνότητα αποστολής μηνυμάτων: 2Hz
		Μέγιστη καθυστέρηση: 100ms
		Ακρίβεια θέσης: <5m
Πληροφορίες κίνησης	Πληροφορεί τα επικείμενα οχήματα για την κατάσταση της κίνησης και προτείνει εναλλακτικές διαδρομές.	Ελάχιστη συχνότητα αποστολής μηνυμάτων: 1-10Hz
		Μέγιστη καθυστέρηση: 500ms
Διαχείριση διασταύρωσης	Ανταλλαγή μηνυμάτων V2V ή V2I για τη βελτιστοποίηση της διερχόμενης κίνησης σε μια διασταύρωση.	Ελάχιστη συχνότητα αποστολής μηνυμάτων: 1Hz
		Μέγιστη καθυστέρηση: 500ms
		Ακρίβεια θέσης: <5m
Συλλογή διοδίων	Ένα RSU διαθέτει δυνατότητα ελέγχου της πρόσβασης κατά τη συλλογή διοδίων.	Συχνότητα αποστολής μηνυμάτων: 1Hz
		Μέγιστη καθυστέρηση: 200ms
Συνεργαζόμενος Προσαρμοσμένος Έλεγχος Πορείας (CACC)	Ανταλλαγή CAMs μεταξύ οχημάτων με σκοπό τη βελτίωση της τρέχουσας τεχνολογίας ACC.	Ελάχιστη συχνότητα αποστολής CAMs: 2Hz
		Μέγιστη καθυστέρηση: 100ms
Platooning	Ανταλλαγή CAMs μεταξύ οχημάτων, ώστε αυτά να λειτουργούν με ασφάλεια ως «διμοιρία» σε μία συγκεκριμένη λωρίδα. Οι τηλεπικοινωνιακές απαιτήσεις εξαρτώνται από την πυκνότητα των οχημάτων.	Ελάχιστη συχνότητα αποστολής CAMs: 10Hz
		Μέγιστη καθυστέρηση: 10-100ms
		Ακρίβεια σχετικής θέσης οχημάτων: 30cm-2m

Πίνακας 1.2 Τηλεπικοινωνιακές απαιτήσεις περιπτώσεων χρήσης διαχείρισης κυκλοφορίας

1.3.2.3 Εφαρμογές άνεσης και ψυχαγωγίας

Τα οχήματα επικοινωνούν με τα RSUs με σκοπό τη λήψη υπηρεσιών ή την απόκτηση τοπικών πληροφοριών. Οι υπηρεσίες προσφέρονται είτε από το ίδιο το RSU, σε περιπτώσεις όπου αυτό είναι τοποθετημένο σε κάποιο σημείο ενδιαφέροντος, είτε από κά-

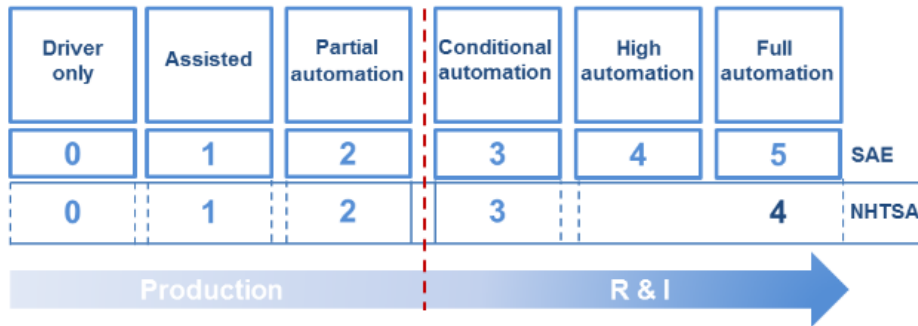
ποιον πάροχο υπηρεσιών (πχ. για κατανάλωση περιεχομένου πολυμέσων). Εφόσον σε τέτοιες περιπτώσεις η ασφάλεια των οδηγών δεν τίθεται ως ζήτημα, οι εφαρμογές άνεσης και ψυχαγωγίας δεν θέτουν υψηλές τηλεπικοινωνιακές απαιτήσεις. Τυπικές επιθυμητές τιμές των KPIs είναι 1Hz ελάχιστη συχνότητα αποστολής μηνυμάτων από τα RSUs και 500ms μέγιστη καθυστέρηση.

Περίπτωση χρήσης	Περιγραφή	Πρόσθετες Απαιτήσεις
Γνωστοποίηση σημείου ενδιαφέροντος	Πληροφορεί τους οδηγούς για την παρουσία τοπικών υπηρεσιών ή/και σημείων ενδιαφέροντος.	
Αυτόματος έλεγχος πρόσβασης σε parking	Ένα όχημα παρέχει την ταυτότητά του στο RSU που είναι τοποθετημένο στην είσοδο ενός parking, προκειμένου να εξουσιοδοτηθεί η πρόσβασή του.	
Τοπικό ηλεκτρονικό εμπόριο	Ένα RSU μπορεί να διαθέτει ικανότητα επεξεργασίας τοπικών ηλεκτρονικών συναλλαγών για αγορά προϊόντων και υπηρεσιών από τους οδηγούς.	Ενισχυμένη ασφάλεια για ηλεκτρονικές συναλλαγές
Μεταφόρτωση πολυμέσων	Παροχή πρόσβασης από το RSU σε έναν WEB server για κατανάλωση περιεχομένου πολυμέσων από τους οδηγούς.	Ενισχυμένη ασφάλεια, που επιβάλλεται από τη DRM (Digital Rights Management)
Μεταφόρτωση και ανανέωση χάρτη	Ένα RSU παρέχει στοιχεία του τοπικού χάρτη της περιοχής με ή χωρίς τη χρήση του διαδικτύου.	Ενισχυμένη ασφάλεια, που επιβάλλεται από τη DRM

Πίνακας 1.3 Ενδεικτικές περιπτώσεις χρήσης σχετικές με την άνεση και την ψυχαγωγία των οδηγών και των επιβατών

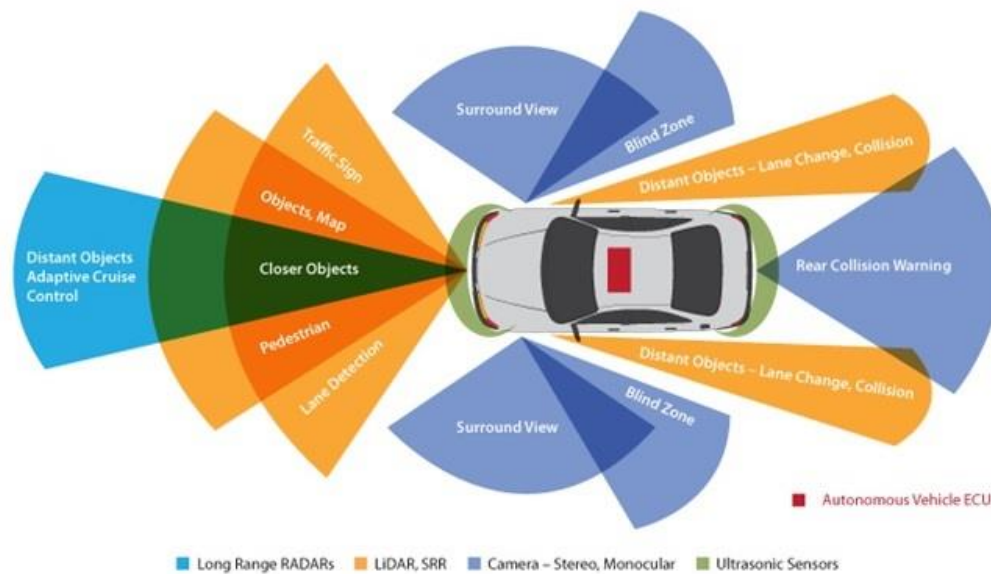
1.3.2.4 Αυτοοδηγούμενα οχήματα

Με τον όρο «αυτοοδηγούμενα» (self-driving) ή «αυτόνομα» (autonomous), αναφερόμαστε στα οχήματα τα οποία δεν απαιτούν την ύπαρξη του οδηγού για να λειτουργήσουν. Σύμφωνα με τη SAE International (Society of Automobile Engineers) [13], η μετάβαση προς την πλήρως αυτόματη οδήγηση θα γίνει σε στάδια, τα οποία αναφέρονται στο Σχ. 1.4. Ανάλογο είναι και το σχέδιο δράσης της NHTSA (National Highway Traffic Safety Administration) [14] στις ΗΠΑ. Οι κυριότεροι Ευρωπαϊκοί προμηθευτές της αυτοκινητοβιομηχανίας εκτιμούν ότι υψηλά επίπεδα αυτοματοποιημένης οδήγησης θα έχουν επιτευχθεί έως το 2020, ενώ πλήρως αυτόνομα οχήματα θα έχουν γίνει διαθέσιμα έως το 2025 [15].



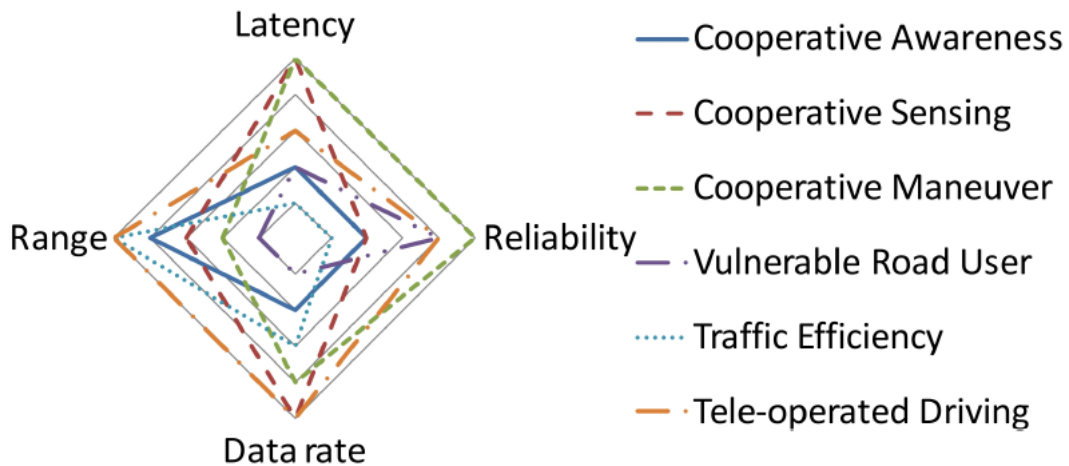
Σχήμα 1.4 Επίπεδα αυτοματοποιημένης οδήγησης σύμφωνα με την SAE και την NHTSA [15]

Για την υποστήριξη αυτόματης οδήγησης, είναι σαφές ότι απαιτείται εξαιρετικά αξιόπιστη επικοινωνία με ελάχιστη καθυστέρηση, εφόσον η ασφάλεια του οδηγού βασίζεται αποκλειστικά στο ίδιο το όχημα. Επιπλέον, η ανταλλαγή μηνυμάτων μεταξύ των οντοτήτων του ITS πρέπει να είναι απόλυτα ασφαλής, καθώς οποιαδήποτε κακόβουλη παρεμβολή δύναται να επηρεάσει τη λειτουργία του οχήματος και να οδηγήσει σε οδικό ατύχημα.



Σχήμα 1.5 Τεχνολογίες που ενεργοποιούν την αυτόνομη οδήγηση [https://www.financialexpress.com/auto/car-news/tata-elxsi-autonomai-puts-india-on-the-map-of-driverless-cars/705551/]

Για να επιτευχθούν οι στόχοι που θέτει αυτή η τεχνολογία, τα αυτόνομα οχήματα πρέπει να διαθέτουν αυξημένη αντίληψη του περιβάλλοντος χώρου. Επομένως, ενσωματώνουν πληθώρα τεχνολογιών, όπως radar μεγάλης εμβέλειας, υπερηχητικούς αισθητήρες, LiDAR (Light Detection And Ranging) ή κοινές κάμερες. Οι πληροφορίες που λαμβάνει το όχημα από τους διάφορους αισθητήρες τροφοδοτούνται σε μία μηχανή λογισμικού προς επεξεργασία, η οποία δημιουργεί ένα περιβάλλον αντίληψης προς όλες τις κατευθύνσεις.



Σχήμα 1.6 Σύγκριση των απαιτήσεων των περιπτώσεων χρήσης V2X [16]

1.4 Συστήματα και πρότυπα για επικοινωνίες οχημάτων

1.4.1 Το πρότυπο IEEE 802.11p

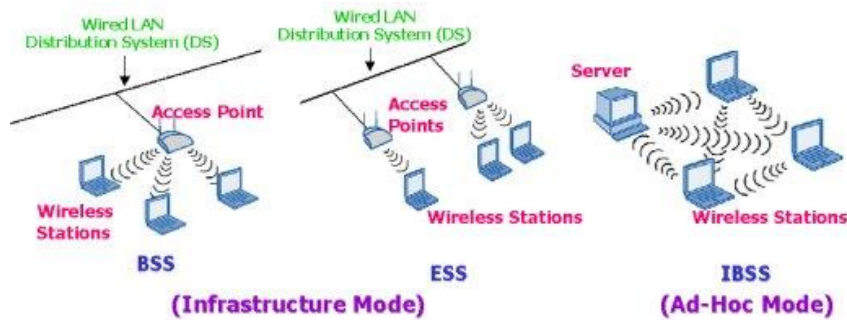
Η πρώτη προσπάθεια για προτυποποίηση των επικοινωνιών μεταξύ οχημάτων χρονολογείται στις αρχές του 21^{ου} αιώνα, όταν η FCC (Federal Communications Commission) κατοχύρωσε 75MHz στη ζώνη των 5.9GHz για την ανάπτυξη συστημάτων ITS. Αντίστοιχες ενέργειες πραγματοποιήθηκαν στην Ευρώπη το 2008, όταν ο ETSI ανακοίνωσε την κατανομή φάσματος εύρους 30MHz στην ίδια ζώνη για τον ίδιο σκοπό. Καίτοι τα ερευνητικά προγράμματα για την ανάπτυξη προτύπων σε Ευρώπη και ΗΠΑ διεξήχθησαν παράλληλα, ήταν μεταξύ τους ανεξάρτητα. Ως αποτέλεσμα, προέκυψαν δύο οικογένειες προτύπων ITS, το DSCR (Dedicated Short Range Communication) στις ΗΠΑ και το C-ITS (Cooperative ITS) στην Ευρώπη.

Παρά τις διαφορές τους, τα δύο πρότυπα βασίζονται στην τεχνολογία IEEE 802.11p για την παροχή υπηρεσιών φυσικού (PHY) και MAC στρώματος στα πρωτόκολλα ανωτέρων στρωμάτων. Η ανάπτυξη του 802.11p ξεκίνησε από την ομώνυμη ομάδα εργασίας του IEEE το 2004 και η πρώτη έκδοση αυτού δημοσιεύθηκε το 2010. Αποτελεί τροποποίηση του προτύπου IEEE 802.11a, από το οποίο λαμβάνει βασικά χαρακτηριστικά, με σκοπό την προσαρμογή στις ανάγκες των επικοινωνιών μεταξύ οχημάτων.

1.4.1.1 Φυσικό στρώμα και MAC

Στα πρότυπα της σειράς IEEE 802.11, οι σταθμοί, για να επικοινωνήσουν μεταξύ τους, πρέπει αρχικά να σχηματίσουν ένα βασικό σύνολο υπηρεσιών (Basic Service Set – BSS). Οι σταθμοί επικοινωνούν είτε μέσω ενός σημείου πρόσβασης (Access Point – AP) είτε απευθείας μεταξύ τους με τον ad hoc τρόπο λειτουργίας, κατά τον οποίο αποτελούν ένα ανεξάρτητο BSS (Independent BSS – IBSS). Επίσης, είναι δυνατή η σύνδεση δύο ή περισσότερων BSSs, για τη δημιουργία ενός εκτεταμένου συνόλου υπηρεσιών (Extended Service Set – ESS). Κάθε BSS χρησιμοποιεί ένα αναγνωριστικό (BSS identifier – BSSID) που το ξεχωρίζει από τα γειτονικά τοπικά ασύρματα δίκτυα. Στον τρόπο επικοινωνίας με

υποδομή, το BSSID ταυτίζεται, συνήθως, με τη διεύθυνση MAC του AP, ενώ στον ad hoc τρόπο προέρχεται από μία τυχαία ακολουθία 48bits.



Σχήμα 1.7 Δυνατοί τρόποι επικοινωνίας των σταθμών στο IEEE 802.11

[<http://www.fedu.uec.ac.jp/~thavisak/Tech-Link/IEEE802.11b/IEEE80211b.htm>]

Η διαδικασία συσχέτισης ενός σταθμού με ένα BSS και επιβεβαίωσης αυτού εισάγει πρόσθετη καθυστέρηση, η οποία είναι ανεπιθύμητη στις επικοινωνίες οχημάτων. Για το λόγο αυτό, το 802.11p ορίζει ένα νέο τρόπο επικοινωνίας, κατά τον οποίο οι σταθμοί ανταλλάσσουν μηνύματα μεταξύ τους με ad hoc τρόπο, χωρίς να είναι μέλη ενός BSS (Outside the Context of a BSS – OCB). Τα μηνύματα που διακινούνται εκτός ενός BSS χρησιμοποιούν το wildcard BSSID (όλα τα bits 1). Επειδή οι λειτουργίες συσχέτισης σε BSS και επιβεβαίωσης χρηστών αφαιρούνται από το στρώμα MAC, η απαραίτητη ασφάλεια παρέχεται από πρωτόκολλα ανωτέρων στρωμάτων.

Το φυσικό στρώμα του 802.11p κληρονομεί στοιχεία από τις προδιαγραφές των υπόλοιπων προτύπων της σειράς 802.11. Συγκεκριμένα, λειτουργεί στη ζώνη των 5.9GHz σε διαύλους εύρους 10MHz. Για την αξιοποίηση υψηλών ρυθμών μετάδοσης σε περιβάλλον διαλείψεων, κάνει χρήση της τεχνικής OFDM, διαιρώντας το διαθέσιμο εύρος ζώνης των 10MHz σε 52 επιμέρους διαύλους, καθένας από τους οποίους φέρει ξεχωριστή πληροφορία. Το 802.11p υποστηρίζει οκτώ συνδυασμούς σχημάτων διαμόρφωσης και κωδικοποίησης και ισάριθμους εφικτούς ρυθμούς μετάδοσης.

Transfer rate [Mbit/s]	Modulation scheme	Coding rate	Data bits per OFDM symbol	Coded bits per OFDM symbol
3	BPSK	1/2	24	48
4,5	BPSK	3/4	36	48
6	QPSK	1/2	48	96
9	QPSK	3/4	72	96
12	16-QAM	1/2	96	192
18	16-QAM	3/4	144	192
24	64-QAM	2/3	192	288
27	64-QAM	3/4	216	288

Πίνακας 1.4 Ρυθμοί μετάδοσης, σχήματα διαμόρφωσης και ρυθμοί κώδικα στο 802.11p

[19]

Για τον έλεγχο πρόσβασης των σταθμών που επικοινωνούν με τον τρόπο OCB, αξιοποιείται ο αλγόριθμος ενισχυμένου συντονισμού κατανεμημένης πρόσβασης (Enhanced Distributed Coordination Access – EDCA) του προτύπου 802.11e. Ο EDCA κάνει χρήση της τεχνικής πολλαπλής πρόσβασης με ανίχνευση φέροντος και αποφυγή συγκρούσεων (Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance – CSMA/CA), προκειμένου να

καθοριστεί ποιος σταθμός θα αποκτήσει πρόσβαση στο ασύρματο μέσο. Κατά την CSMA/CA, κάθε σταθμός που προορίζει δεδομένα προς μετάδοση ανιχνεύει για πιθανή χρησιμοποίηση του καναλιού από άλλο σταθμό. Αν το κανάλι εντοπιστεί ως αδρανές για κάποιο χρονικό διάστημα, τότε ο σταθμός εκκινεί τη μετάδοση. Αν το κανάλι καταληφθεί κατά τη διάρκεια ανίχνευσης, τότε ο σταθμός αναβάλλει τη μετάδοσή του για ένα τυχαίο χρονικό διάστημα, μετά το πέρας του οποίου η διαδικασία επαναλαμβάνεται.

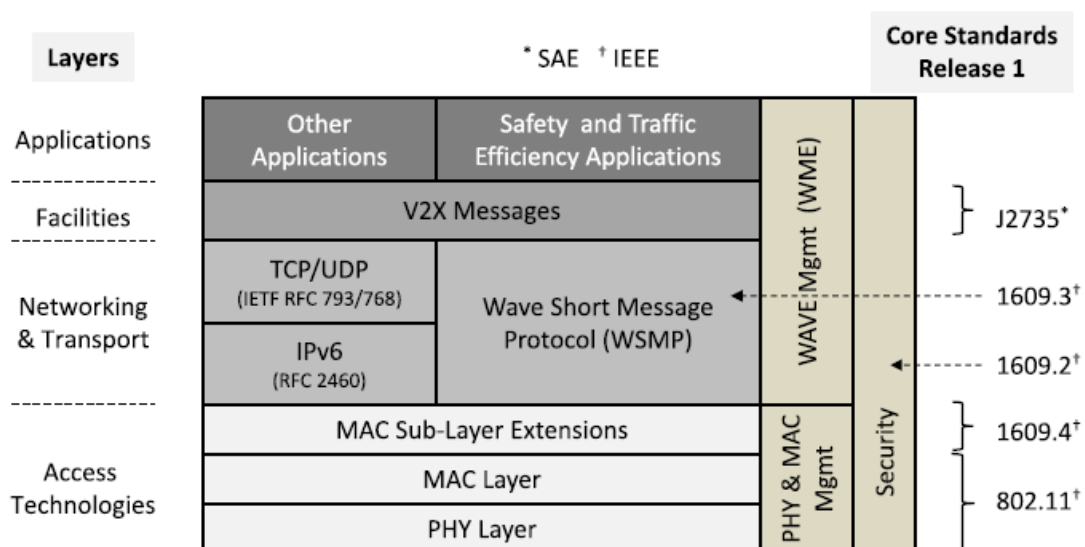
1.4.1.2 Στοιβά πρωτοκόλλων

Όπως προαναφέρθηκε, το IEEE 802.11p παρέχει τη λειτουργικότητα των κατωτέρων στρωμάτων στα πρότυπα DSRC και C-ITS. Τα ανώτερα στρώματα που εξυπηρετούν εφαρμογές V2X μπορούν να αντιστοιχισθούν στα εξής:

- **Στρώμα εφαρμογών** (applications): Αποτελεί επέκταση του επιπέδου 7 του μοντέλου OSI. Παρέχει τις υπηρεσίες ITS που χρειάζονται οι εφαρμογές.
- **Στρώμα λειτουργιών** (facilities): Το στρώμα αυτό χωρίζεται σε τρία μέρη για την υποστήριξη εφαρμογών, πληροφοριών και επικοινωνιών και εκτελεί λειτουργίες παρόμοιες με αυτές των στρωμάτων παρουσίασης και συνόδου του μοντέλου OSI.
- **Στρώμα δικτύωσης και μεταφοράς** (networking and transport): Έχει αντίστοιχο ρόλο με τα ομώνυμα στρώματα του μοντέλου OSI. Παράδειγμα αποτελεί η χρήση TCP/UDP πάνω από IPv4/v6.

Εκτός από αυτά, το εκάστοτε πρότυπο πρέπει να παρέχει λειτουργίες ασφάλειας, όπως η επιβεβαίωση των λαμβανόμενων μηνυμάτων, και διαχείρισης όλων των επιπέδων.

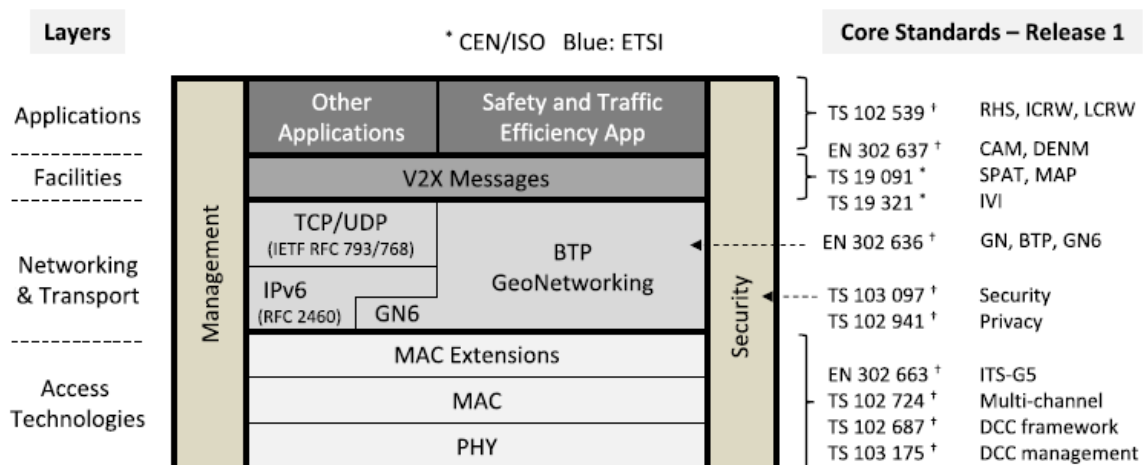
Στο Σχ. 1.8, απεικονίζεται η στοιβά πρωτοκόλλων για το πρότυπο DSRC στις ΗΠΑ. Το DSRC υποστηρίζει τη μεταφορά μηνυμάτων πάνω από TCP/UDP σε συνδυασμό με IPv6, αφού είναι τα συμβατικά πρωτόκολλα του διαδικτύου. Όμως, οι επικοινωνίες V2V και V2I έχουν διαφορετικές ανάγκες, οπότε για την υποστήριξη αυτών αναπτύχθηκε η σειρά πρωτοκόλλων IEEE 1609. Η εφαρμογή αυτών των πρωτοκόλλων πάνω από 802.11p ονομάζεται WAVE (Wireless Access in Vehicular Environments).



Σχήμα 1.8 Στοιβά πρωτοκόλλων του DSRC [17]

Το πρωτόκολλο του στρώματος δικτύου και μεταφοράς της σειράς WAVE είναι το WSMP (Wave Short Message Protocol), το οποίο ορίζεται στο IEEE 1609.3. Πρόκειται για ένα πρωτόκολλο δικτύου μοναδικού βήματος (single hop), που αποσκοπεί στην ελαχιστοποίηση του πλεονασμού (overhead) που προσθέτει η επικεφαλίδα. Παράλληλα, εκτελεί τις λειτουργίες του στρώματος μεταφοράς, όπως η πολυπλεξία μηνυμάτων V2X. Το πρότυπο 1609.4 παρέχει μια εκτεταμένη λειτουργικότητα διαχείρισης στο στρώμα MAC, η οποία δεν είναι διαθέσιμη από το 802.11p. Στο στρώμα λειτουργιών, το DSRC κάνει χρήση του πρωτοκόλλου SAE J2735, το οποίο καθορίζει τη σύνταξη των μηνυμάτων V2X. Τέλος, η ασφάλεια των επιμέρους στρωμάτων παρέχεται από το πρότυπο 1609.2 με κρυπτογράφηση των δεδομένων και χρήση πιστοποιητικών για την επιβεβαίωση των χρηστών.

Η αντίστοιχη στοίβα πρωτοκόλλων για το Ευρωπαϊκό C-ITS απεικονίζεται στο Σχ. 1.9. Η προτυποποίηση των πρωτοκόλλων και η σύνταξη των μηνυμάτων έχουν οριστεί σε αντίστοιχα έγγραφα του ETSI. Το ισοδύναμο πρότυπο του 802.11p, που καλύπτει τη λειτουργικότητα των στρωμάτων PHY και MAC, ονομάζεται ITS-G5 και ορίζεται στο [19]. Όπως και το WAVE, το ITS-G5 λειτουργεί περί τα 5.9GHz. Όμως, ορίζει ξεχωριστή ζώνη συχνοτήτων για κάθε είδος εφαρμογής, όπως και διαφορετικά επιτρεπτά χαρακτηριστικά εκπομπής για κάθε ζώνη.



Σχήμα 1.9 Στοίβα πρωτοκόλλων του C-ITS [17]

Στο στρώμα δικτύου και μεταφοράς, το C-ITS υποστηρίζει τη μεταφορά μηνυμάτων V2X πάνω από TCP/UDP και IPv6, αντίστοιχα με το DSRC. Ο συνδυασμός αυτός χρησιμοποιείται κυρίως για εφαρμογές που δεν σχετίζονται με την οδική ασφάλεια. Για τα υπόλοιπα μηνύματα, σχεδιάσθηκαν το πρωτόκολλο δικτύου GeoNetworking και το πρωτόκολλο μεταφοράς BTP (Basic Transport Protocol), τα οποία ορίζονται στη σειρά προδιαγραφών EN 302 636 του ETSI.

Το GeoNetworking παρέχει δρομολόγηση πακέτων σε δίκτυο ad hoc, χρησιμοποιώντας τις γεωγραφικές συντεταγμένες των χρηστών. Εκτός από τις μεταδόσεις unicast, οι σταθμοί ITS διαθέτουν δυνατότητα για προώθηση μηνυμάτων broadcast ή anycast προς τους κόμβους εντός μιας περιοχής, η οποία μπορεί να είναι κύκλος, ορθογώνιο ή έλλειψη. Σε αντίθεση με το WSMP, το οποίο επιτρέπει αποκλειστικά την επικοινωνία μοναδικού βήματος, το GeoNetworking υποστηρίζει την αναμετάδοση ενός λαμβανόμενου μηνύματος από ένα όχημα (πχ. DENM) εντός μίας γεωγραφικής περιοχής.

Το BTP παρέχει επικοινωνία από άκρο σε άκρο χωρίς σύνδεση, παρόμοια με το UDP, και αναθέτει γνωστές θύρες (well-known ports) σε συγκεκριμένες λειτουργίες του στρώματος λειτουργιών. Εναλλακτικά του BTP, μπορεί να χρησιμοποιηθεί ο συνδυασμός GeoNetworking και IPv6 (GN6), προκειμένου οι σταθμοί ITS να αποκτήσουν τη δυνατότητα σύνδεσης με δίκτυα IP, όπως το διαδίκτυο.

1.4.1.3 Πλεονεκτήματα και περιορισμοί

Το IEEE 802.11p διαθέτει κάποια χαρακτηριστικά που το καθιστούν κατάλληλο για επικοινωνίες V2X. Τα κυριότερα από αυτά είναι:

- Χάρη στον ad hoc τρόπο επικοινωνίας, τα οχήματα μπορούν να επικοινωνήσουν μεταξύ τους, δίχως να βρίσκονται στην περιοχή κάλυψης του δικτύου υποδομής. Επιπλέον, σε περιπτώσεις μη οπτικής επαφής μεταξύ των οχημάτων, η τοποθέτηση RSUs συντελεί στην αύξηση της εμβέλειας της επικοινωνίας.
- Η δυνατότητα επικοινωνίας μεταξύ των κόμβων του δικτύου χωρίς το σχηματισμό ενός BSS εξαλείφει την καθυστέρηση που οφείλεται στην ανταλλαγή πληροφοριών ελέγχου. Στην περίπτωση κατά την οποία στις επικοινωνίες V2X εφαρμοζόταν κάποιο άλλο πρότυπο της σειράς 802.11, η καθυστέρηση δημιουργίας του BSS θα ήταν σημαντικά υψηλή, καθώς η τοπολογία των κόμβων του δικτύου μεταβάλλεται συνεχώς.
- Η χρήση διαύλων σταθερού εύρους ζώνης 10MHz, συστημάτων απλής εισόδου-απλής εξόδου (Single Input Single Output – SISO) και συνελικτικού FEC μειώνει την πολυπλοκότητα και το κόστος του εξοπλισμού.

Παράλληλα, το 802.11p συνοδεύεται από κάποια εγγενή μειονεκτήματα, που περιορίζουν την επίδοση των εφαρμογών V2X. Οι κύριοι περιορισμοί είναι οι εξής:

- Η λογική ανίχνευσης του καναλιού πριν τη μετάδοση, που εφαρμόζει ο αλγόριθμος CSMA/CA, χειροτερεύει σημαντικά την καθυστέρηση και τη διεκπεραιωτική ικανότητα (throughput) με την αύξηση του πλήθους των χρηστών. Οι τιμές αυτών δύναται να γίνουν απαγορευτικές για τις επικοινωνίες V2X σε περιπτώσεις υψηλής πυκνότητας οχημάτων.
- Η εμβέλεια της επικοινωνίας είναι χαμηλή (έως μερικές εκατοντάδες μέτρα), λόγω της ζώνης συχνοτήτων (5.9GHz). Επιπλέον, εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από το περιβάλλον (πχ. μειώνεται περαιτέρω σε διασταυρώσεις).
- Η τοποθέτηση RSUs με σκοπό την κάλυψη μεγάλων περιοχών είναι μια δαπανηρή διαδικασία. Εξάλλου, τα κυψελωτά συστήματα παρέχουν ήδη επαρκή κάλυψη.
- Η χαμηλή πολυπλοκότητα του φυσικού στρώματος του 802.11p σημαίνει πως η φασματική του απόδοση είναι πολύ μικρότερη από αυτήν άλλων τεχνολογιών (πχ. LTE).

Τα μειονεκτήματα του 802.11p επιβραδύνουν τη διάδοσή του ως επικρατούσας τεχνολογίας για την υποστήριξη εφαρμογών V2X. Για την επίτευξη αξιόπιστων επικοινωνιών, μελετάται η αξιοποίηση των ήδη διαθέσιμων κυψελωτών συστημάτων.

1.4.2 Κυψελωτά συστήματα

Σε αντίθεση με τον ad hoc τρόπο επικοινωνίας του IEEE 802.11p, στα κυψελωτά συστήματα οι χρήστες ανταλλάσσουν μηνύματα αποκλειστικά με τη μεσολάβηση των σταθμών βάσης. Ένα τυπικό κυψελωτό σύστημα αποτελείται από το δίκτυο πρόσβασης (Access Network – AN), το οποίο παρέχει την ασύρματη διεπαφή μεταξύ των χρηστών και των σταθμών βάσης, και το δίκτυο κορμού (Core Network – CN), που συνδέει το AN με τα εξωτερικά δίκτυα και το διαδίκτυο. Η σύνδεση των σταθμών βάσης με τις μονάδες του δικτύου κορμού επιτυγχάνεται μέσω ασύρματων ή ενσύρματων ζεύξεων σημείου προς σημείο.

Το πλέον ευρέως διαδεδομένο κυψελωτό σύστημα είναι το LTE, για το οποίο γίνεται εκτενής αναφορά στο δεύτερο κεφάλαιο της εργασίας. Στην ορολογία του LTE, οι σταθμοί βάσης καλούνται eNBs (evolved Node B) και, μεταξύ άλλων, είναι υπεύθυνοι για το χρονοπρογραμματισμό των χρηστών και την κατανομή ασύρματων πόρων σε αυτούς. Εφόσον υπάρχει μία κεντρική οντότητα που διαχειρίζεται την πρόσβαση των χρηστών στο ασύρματο μέσο, αυτομάτως αίρονται οι περιορισμοί του 802.11p που οφείλονται στο CSMA/CA, καθώς με αυτόν τον τρόπο αποφεύγονται οι συγκρούσεις. Εκτός από αυτό, το LTE διαθέτει πρόσθετα χαρακτηριστικά που το καθιστούν αξιόλογο για επικοινωνίες V2X. Μερικά από αυτά είναι:

- Μπορεί να προσφέρει εγγυημένη ποιότητα υπηρεσίας (Quality of Service – QoS), όπως καθυστέρηση ή ρυθμό μετάδοσης, ακόμη και σε συνθήκες υψηλού φορτίου.
- Επιτρέπει τη μετάδοση σε περιβάλλον μη οπτικής επαφής με μεγαλύτερη εμβέλεια συγκριτικά με την απευθείας επικοινωνία μεταξύ συσκευών.
- Υπάρχει ήδη εκτενής διαθέσιμη υποδομή δικτύων LTE παγκοσμίως, οπότε το κόστος εγκατάστασης των εφαρμογών V2X είναι σημαντικά μικρότερο από αυτό που θα απαιτούσε η κάλυψη μιας περιοχής με RSUs.

Επειδή, όμως, το LTE σχεδιάσθηκε με σκοπό την ικανοποίηση κινητών ευρυζωνικών εφαρμογών, αδυνατεί να πετύχει τους στόχους που θέτουν κάποιες εφαρμογές V2X για τους εξής λόγους:

- Η καθυστέρηση που υφίστανται τα μηνύματα αυξάνεται με μεγαλύτερο πλήθος χρηστών ανά κυψέλη. Μολονότι το QoS παραμένει ικανοποιητικό για ευρυζωνικές εφαρμογές, η αύξηση της καθυστέρησης αποτελεί μείζον πρόβλημα για τις εφαρμογές V2X, ιδίως σε περιπτώσεις υψηλής κυκλοφοριακής κίνησης.
- Προκειμένου ένα μήνυμα να μεταδοθεί από κάποιο χρήστη στους υπόλοιπους, πρέπει να διασχίσει όλη την υποδομή του δικτύου κορμού. Η καθυστέρηση εξαρτάται και από την τηλεπικοινωνιακή κίνηση που εξυπηρετεί το δίκτυο κορμού.
- Το LTE δεν είναι κατάλληλο για μεταδόσεις μικρών μηνυμάτων, όπως τα CAMs ή DENMs, και δεν επιτυγχάνει βέλτιστη αξιοποίηση των πόρων του δικτύου σε τέτοιες περιπτώσεις.
- Το LTE εισάγει καθυστέρηση πριν τη μετάδοση δεδομένων, λόγω της διαδικασίας τυχαίας πρόσβασης των χρηστών στο ασύρματο μέσο και του χρονοπρογραμματισμού που επιβάλλει ο eNB. Αυτός ο περιορισμός έχει αντιμετωπιστεί από το 802.11p, με την εφαρμογή του τρόπου επικοινωνίας OCB.

- Η υπηρεσία LTE δεν είναι διαθέσιμη εκτός της περιοχής κάλυψης των eNBs, σε αντίθεση με τον ad hoc τρόπο επικοινωνίας μεταξύ οχημάτων που προσφέρει το 802.11p.

Για την αντιμετώπιση των ανωτέρω προβλημάτων, στις τελευταίες εκδόσεις του LTE προστέθηκε η δυνατότητα απευθείας επικοινωνίας μεταξύ συσκευών (Device to Device – D2D). Με αυτόν τον τρόπο, η επικοινωνία διατηρείται ακόμη και όταν οι χρήστες δεν βρίσκονται υπό την κάλυψη του δικτύου, ενώ παράλληλα τα μηνύματα που ανταλλάσσουν δεν διασχίζουν το δίκτυο κορμού. Οι ασύρματοι πόροι είτε κατανέμονται από τον eNB, σε περίπτωση κάλυψης, είτε επιλέγονται από τους ίδιους τους χρήστες. Το πρόβλημα της δεύτερης μεθόδου είναι ότι υπάρχει ενδεχόμενο σύγκρουσης των μεταδόσεων δύο χρηστών. Επιπλέον, η μετάδοση χωρίς τη μεσολάβηση του eNB δεν εγγυάται τη διατήρηση του επιθυμητού QoS. Παρά τις αδυναμίες των επικοινωνιών D2D, η υποστήριξη αυτών έχει συμπεριληφθεί στη νεότερη έκδοση του LTE, με σκοπό την απευθείας επικοινωνία V2V. Η συγκεκριμένη αρχιτεκτονική περιγράφεται στην παράγραφο 2.5.

	IEEE 802.11p	LTE
Τρόπος επικοινωνίας	V2V και V2I (με χρήση RSUs)	Κατεχοχήν V2I (V2V διαθέσιμο σε νεότερες εκδόσεις)
Ρυθμός μετάδοσης	Έως 27Mbps	Έως 100Mbps (Δυνατότητα αύξησης με χρήση MIMO ή Carrier Aggregation)
Ζώνη συχνοτήτων	5.9GHz	Φασματικές ζώνες από 700 έως 2600MHz
Εύρος ζώνης καναλιού	10MHz	1.4-20MHz για DL και UL
Εμβέλεια επικοινωνίας	Εξαρτάται από το περιβάλλον. Τυπικά 250-350m σε αυτοκινητόδρομο, 80m σε αστικό περιβάλλον	Έως και αρκετά km
Καθυστέρηση	Εξαρτάται από την πυκνότητα των οχημάτων	Εξαρτάται από το βαθμό χρησιμοποίησης του δικτύου κορμού
Εφικτές εφαρμογές	Συνεργατική επίγνωση	Συνεργατική επίγνωση και αποδοτικότητα κυκλοφορίας

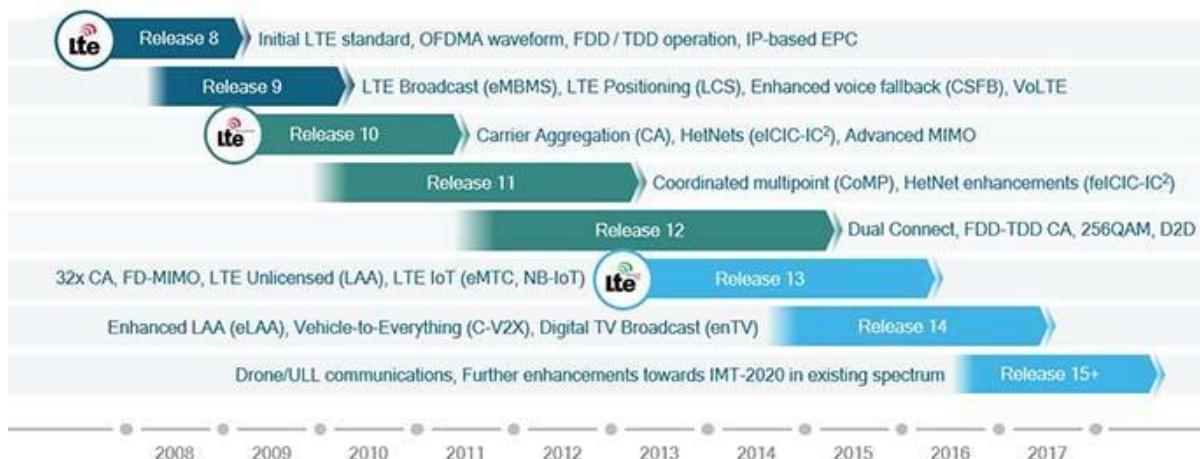
Πίνακας 1.5 Σύγκριση IEEE 802.11p και LTE ως προς την υποστήριξη εφαρμογών V2X

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ LTE

2.1 Εισαγωγή

Η τεχνολογία LTE (Long Term Evolution) αποτελεί εξέλιξη των συστημάτων τρίτης γενιάς (3G) της 3GPP. Οι πρώτες προδιαγραφές για το LTE ήταν μέρος της έκδοσης 8 της 3GPP, η οποία ολοκληρώθηκε το 2008 και τέθηκε σε εφαρμογή από το 2009, από όπου και γνώρισε ευρεία αποδοχή παγκοσμίως ως η τεχνολογία τέταρτης γενιάς (4G). Σκοπός αυτής της εξέλιξης, καθώς οι ανάγκες των χρηστών αυξάνονταν συνεχώς, ήταν η ικανοποίηση αυστηρών απαιτήσεων που είχαν τεθεί για υψηλούς ρυθμούς μετάδοσης (δεκάδων Mbrs), χαμηλή καθυστέρηση (μερικές δεκάδες ms) και ευέλικτη διαχείριση του φάσματος. Επειδή ο στόχος των συστημάτων τέταρτης γενιάς ήταν κυρίως η υποστήριξη υπηρεσιών δεδομένων, η αρχιτεκτονική LTE καταργεί την επικοινωνία με δίκτυα μεταγωγής κυκλώματος του 3G και επικεντρώνεται αποκλειστικά σε δίκτυα μεταγωγής πακέτου, δηλαδή δίκτυα IP. Ως εκ τούτου, τα συστήματα LTE αποκαλούνται “all-IP networks”.

Η εξέλιξη των συστημάτων LTE συνεχίστηκε και στις εκδόσεις 9 έως 14 της 3GPP. Οι εκδόσεις από τη 10 έως τη 12 εμφανίζονται στη βιβλιογραφία ως LTE-Advanced (LTE-A), ενώ οι εκδόσεις 13 και 14 αποκαλούνται LTE-Advanced pro. Οι νέες εκδόσεις, αν και δεν επιφέρουν σημαντικές αλλαγές στη βασική αρχιτεκτονική του δικτύου, προσφέρουν στο σύστημα νέες δυνατότητες, ικανές να υποστηρίξουν νέες υπηρεσίες, καθώς και υψηλότερους ρυθμούς μετάδοσης, με αποτέλεσμα οι εκδόσεις από τη 10 και μετά να θεωρούνται από κάποιους ως πραγματικά συστήματα 4G. Επιπλέον, δίνουν ώθηση για την ανάπτυξη των συστημάτων πέμπτης γενιάς (5G), τα οποία θα συμπεριλαμβάνονται στην έκδοση 15 της 3GPP και αναμένεται να πραγματοποιήσουν τις ανάγκες ακόμη περισσότερο απαιτητικών υπηρεσιών.



Σχήμα 2.1 Εκδόσεις του LTE και πρόσθετα χαρακτηριστικά κάθε έκδοσης
[www.qualcomm.com/news/onq/2017/08/02/understanding-3gpp-starting-basics]

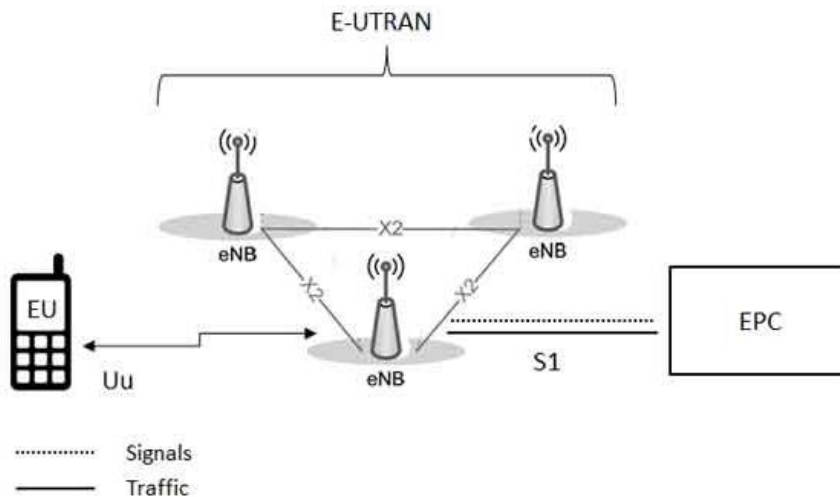
2.2 Αρχιτεκτονική LTE

Όπως και στα κυψελωτά δίκτυα δεύτερης και τρίτης γενιάς, το δίκτυο του συστήματος LTE χωρίζεται στο δίκτυο ραδιοπρόσβασης (Radio Access Network – RAN), το οποίο είναι υπεύθυνο για την επικοινωνία των τερματικών με τους σταθμούς βάσης και στο δίκτυο

κορμού (Core Network – CN), που συνδέει τους σταθμούς βάσης με τα εξωτερικά δίκτυα. Το RAN του LTE καλείται E-UTRAN (Evolved UTRAN) και το δίκτυο κορμού είναι ο EPC (Evolved Packet Core). Το LTE διαθέτει επίπεδη αρχιτεκτονική, υπό την έννοια ότι δεν απαιτεί κάποιον κεντρικό ελεγκτή για τους σταθμούς βάσης, όπως στην περίπτωση του RNC (Radio Network Controller) των συστημάτων τρίτης γενιάς.

2.2.1 E-UTRAN

Το E-UTRAN αποτελείται από τους σταθμούς βάσης που ονομάζονται eNB (evolved Node B) και τα τερματικά που στην ορολογία της 3GPP καλούνται UE (User Equipment). Τα UEs επικοινωνούν με κάποιον eNB μέσω της διεπαφής Uu, ενώ οι eNBs συνδέονται μεταξύ τους μέσω των διεπαφών X2 και με τον EPC μέσω της S1. Η διεπαφή Uu μεταφέρει δεδομένα χρήστη και σηματοδοσίας στις κατευθύνσεις Uplink (UL) και Downlink (DL), ενώ ο κύριος ρόλος της διεπαφής X2 είναι η σηματοδοσία και η προώθηση πακέτων μεταξύ γειτονικών eNBs σε περιπτώσεις μεταπομπής. Η διεπαφή S1 μεταφέρει τόσο δεδομένα χρήστη όσο και ελέγχου μεταξύ του E-UTRAN και του EPC.



Σχήμα 2.2 Αρχιτεκτονική E-UTRAN

[https://www.tutorialspoint.com/lte/lte_network_architecture.htm]

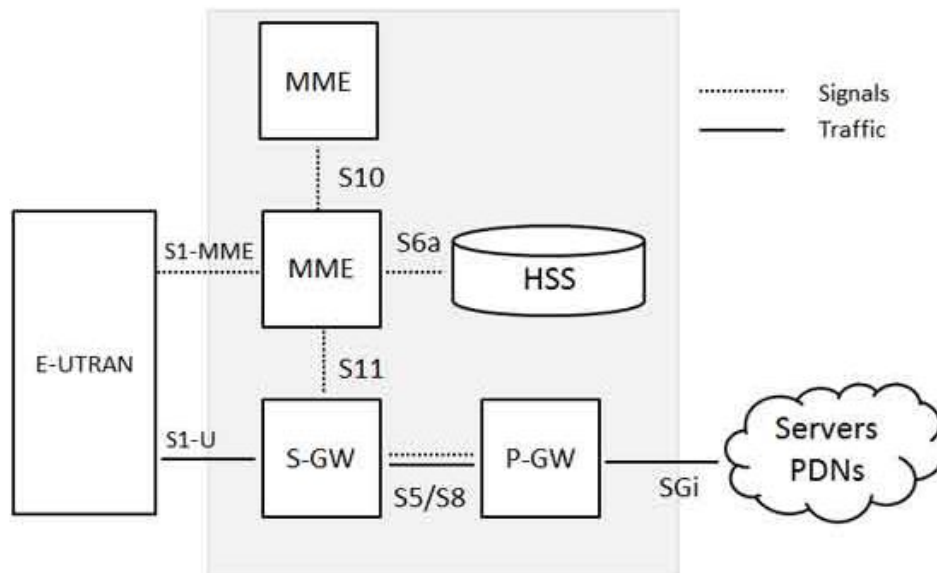
Όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, η αρχιτεκτονική LTE καταργεί το ρόλο του RNC, οπότε ένα μέρος της λειτουργικότητας αυτού έχει ανατεθεί στους eNBs. Οι βασικές λειτουργίες που εκτελεί ο eNB είναι οι εξής:

- Διαχείριση ραδιοπόρων (Radio Resource Management – RRM) και δυναμική κατανομή αυτών στα UEs
- Έλεγχος ραδιοκομιστών (Radio Bearer Control). Ένας κομιστής (bearer) αποτελεί ουσιαστικά μία σύνδεση μεταξύ δύο σημείων, η οποία καθορίζει ορισμένα επιθυμητά χαρακτηριστικά για την κίνηση που αφορά συγκεκριμένους χρήστες. Στο LTE, κομιστές μπορεί να ορίζονται μεταξύ ενός UE και του E-UTRAN, μεταξύ ενός eNB και του EPC ή μεταξύ του EPC και των εξωτερικών δικτύων.
- Έλεγχος ραδιοπρόσβασης (Radio Admission Control)
- Έλεγχος σύνδεσης κινητικότητας (Connection Mobility Control)
- Σηματοδοσία ελέγχου πάνω από τη ραδιοδιεπαφή

- Κρυπτογράφηση δεδομένων πάνω από τη ραδιοδιεπαφή
- Συμπύεση και κρυπτογράφηση επικεφαλίδων IP
- Χρονοπρογραμματισμός (Scheduling) και μετάδοση μηνυμάτων αναζήτησης και ευρυεκπομπής
- Μετρήσεις σχετικές με την κινητικότητα και το χρονοπρογραμματισμό και αναφορά αυτών

2.2.2 Evolved Packet Core - EPC

Τα κυριότερα 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) και ο οικείος εξυπηρετητής συνδρομητών (Home Subscriber Server – HSS). Ο τρόπος με τον οποίο συνδέονται οι ανωτέρω οντότητες μεταξύ τους και με το E-UTRAN απεικονίζεται στο Σχ. 2.3.



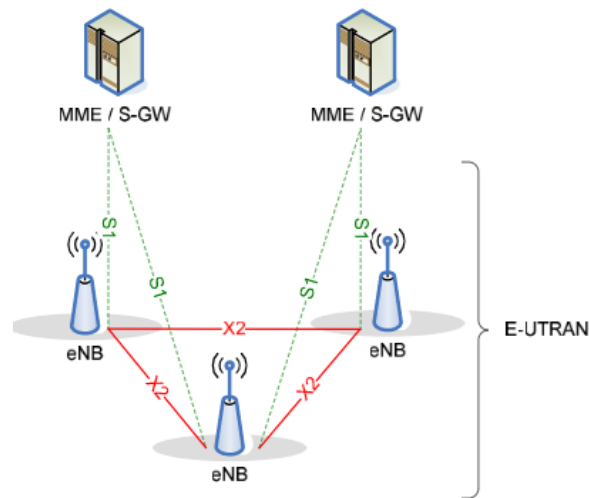
Σχήμα 2.3 Αρχιτεκτονική EPC

[www.tutorialspoint.com/lte/lte_network_architecture.htm]

Η διεπαφή S1, που συνδέει το E-UTRAN με τον EPC, χωρίζεται σε S1-MME και S1-U για την επικοινωνία των eNBs με την MME και τη S-GW αντίστοιχα. Η διεπαφή S1-U μεταφέρει δεδομένα του στρώματος χρήστη (User Plane – UP), ενώ από την S1-MME διέρχονται μηνύματα σηματοδότησης του στρώματος ελέγχου (Control Plane – CP). Επιπλέον, ένας eNB μπορεί να είναι συνδεδεμένος συγχρόνως με περισσότερες της μίας MME ή S-GW, όπως και μία MME/S-GW μπορεί να εξυπηρετεί περισσότερους από έναν eNB.

Η S-GW αποτελεί το σημείο σύνδεσης μεταξύ του E-UTRAN και του EPC για το UP. Ο κύριος ρόλος της είναι η δρομολόγηση και η προώθηση πακέτων από και προς τα τερματικά, στις κατευθύνσεις UL και DL αντίστοιχα. Επιπλέον, αποτελεί σημείο άγκυρα σε περίπτωση μεταπομπής μεταξύ δύο eNBs ή αλλαγής της τεχνολογίας πρόσβασης από LTE σε άλλο 3GPP πρότυπο. Άλλες λειτουργίες που εκτελεί η S-GW είναι η αναζήτηση (paging) ενός UE, όταν αυτή δέχεται δεδομένα DL, και η συμμετοχή στις χρεώσεις UL και DL ανά-

λογα με το UE, το δίκτυο δεδομένων (Packet Data Network – PDN) που το εξυπηρετεί και το QCI (QoS Class Identifier) που έχει οριστεί για αυτό.



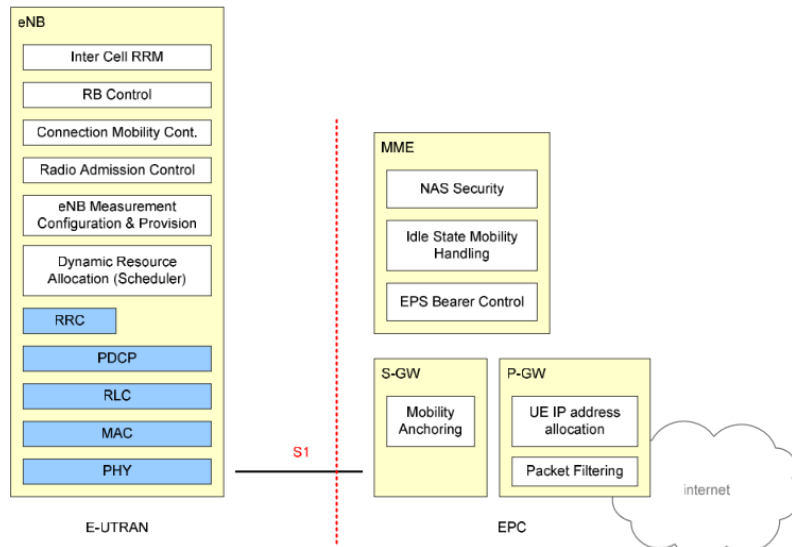
Σχήμα 2.4 Σύνδεση του E-UTRAN με τις μονάδες του EPC [20]

Η P-GW συνδέει τον EPC με τα εξωτερικά δίκτυα IP μέσω της διεπαφής SGi. Είναι η μονάδα που αποδίδει διευθύνσεις και προθέματα IP στα UEs, με σκοπό αυτά να αποκτήσουν πρόσβαση στο διαδίκτυο. Οι λειτουργίες που εκτελεί περιλαμβάνουν την επιβολή της εφαρμοζόμενης πολιτικής χρεώσεων, την εξασφάλιση της ποιότητας υπηρεσίας (Quality of Service – QoS) για κάθε χρήστη και το φιλτράρισμα των πακέτων IP της κατεύθυνσης DL στους διάφορους κομιστές ανάλογα με το QoS του καθενός. Αποτελεί, επίσης, σημείο άγκυρα μεταξύ δικτύων 3GPP και non-3GPP (πχ. Wi-MAX). Η διεπαφή που συνδέει τις S/P-GW είναι η S5 σε περίπτωση που οι δύο συσκευές βρίσκονται στο ίδιο δίκτυο ή η S8 αν ανήκουν σε διαφορετικό.

Η MME συνδέει το E-UTRAN με τον EPC σχετικά με τις λειτουργίες του CP. Επεξεργάζεται τη σηματοδότηση μεταξύ του UE και του EPC σχετικά με την κινητικότητα και την ασφάλεια της πρόσβασης στο E-UTRAN. Παράλληλα, είναι υπεύθυνη για λειτουργίες σχετικές με τη διαχείριση κομιστών, όπως η εγκατάσταση, συντήρηση και απελευθέρωση αυτών και για την επιλογή της S-GW που θα εξυπηρετήσει ένα UE είτε κατά την είσοδό του στο δίκτυο είτε σε περίπτωση μεταπομπής. Για την υποστήριξη κινητικότητας, η MME επικοινωνεί με κάποια S-GW μέσω της διεπαφής S11, κυρίως για χειρισμό των κομιστών δεδομένων κατά τη μεταπομπή μεταξύ δύο eNBs, ενώ συνδέεται και με άλλες MMEs με διεπαφές S10, οι οποίες παίζουν ρόλο κατά τη μεταπομπή ενός UE μεταξύ διαφορετικών MMEs. Τέλος, η MME αποτελεί το τερματικό άκρο του στρώματος μη πρόσβασης (Non Access Stratum – NAS) και ευθύνεται για την εξασφάλιση της ασφάλειας της πρόσβασης σε αυτό. Για το στρώμα NAS, όπως και για τα υπόλοιπα επίπεδα της στοίβας πρωτοκόλλων του LTE, γίνεται αναφορά στην παράγραφο 2.3.

Ο HSS αποτελεί μία βάση δεδομένων, η οποία περιέχει τα δεδομένα των συνδρομητών που εξυπηρετούνται από το δίκτυο, όπως το προφίλ QoS και πληροφορίες για τις P-GW και τις MME, με τις οποίες μπορεί να συνδεθεί το UE. Εκτός από αυτόν, το EPC περιλαμβάνει και άλλα στοιχεία σχετικά με τους συνδρομητές (τα οποία δεν απεικονίζονται στο Σχ. 2.3), όπως η μονάδα PCRF (Policy Control and Charging Rules Function),

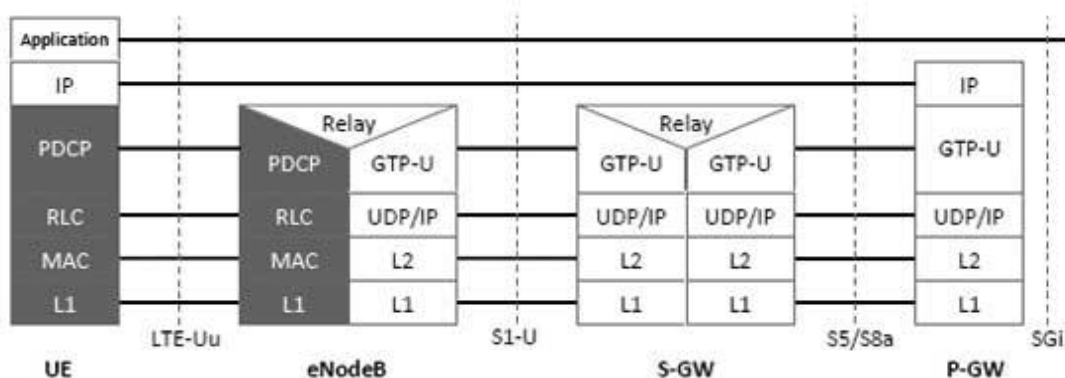
η οποία είναι υπεύθυνη για τον έλεγχο της εφαρμογής των πολιτικών χρέωσης των χρηστών. Οι προαναφερθείσες λειτουργίες συνοψίζονται στο Σχ. 2.5.



Σχήμα 2.5 Λειτουργίες E-UTRAN και EPC [20]

2.3 Στοιβά πρωτοκόλλων

Το LTE χρησιμοποιεί μία σειρά από πρωτόκολλα για την επικοινωνία του UE με τους eNBs και με τα στοιχεία του EPC, τα οποία μεταφέρουν είτε κίνηση του UP είτε του CP. Τα στρώματα για το UP είναι το PDCP (Packet Data Convergence Protocol), το RLC (Radio Link Control), το MAC (Medium Access Control) και το φυσικό στρώμα (Physical Layer). Για τη μεταφορά μηνυμάτων ελέγχου, χρησιμοποιούνται δύο ακόμη, το RRC (Radio Resource Control) και το NAS (Non Access Stratum). Όλα τα πρωτόκολλα τερματίζονται στον eNB, εκτός από το NAS που λειτουργεί μεταξύ του UE και της MME. Εκτός από αυτά, χρησιμοποιούνται επιπλέον πρωτόκολλα για την επικοινωνία του eNB με τον EPC, μέσω της διεπαφής S1.

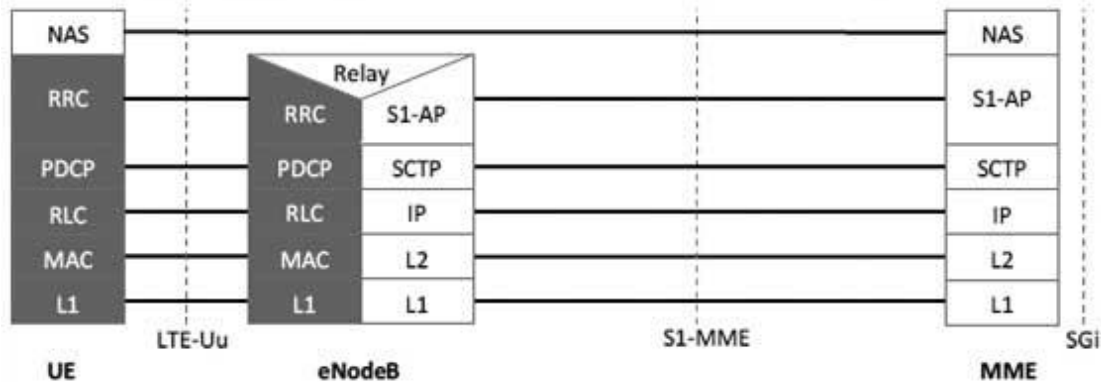


Σχήμα 2.6 Στοιβά πρωτοκόλλων UP

[https://www.tutorialspoint.com/lte/lte_radio_protocol_architecture.htm]

Τα πακέτα IP που προέρχονται από εξωτερικά δίκτυα, όπως το internet, ενθυλακώνονται σε πακέτα πρωτοκόλλου GTP-U (GPRS Tunneling Protocol for the User plane), το οποίο χρησιμοποιείται για τη μεταφορά αυτών μεταξύ των S/P-GW και του eNB. Στο CP, ο

eNB ανταλλάσει μηνύματα S1-AP (S1 Application Protocol) με την MME, τα οποία ενθυλακώνονται σε πακέτα SCTP (Stream Control Transmission Protocol) και μεταφέρουν μηνύματα σηματοδοσίας σχετικά με τη διαχείριση κινητικότητας. Η επιλογή του SCTP για τη μεταφορά μηνυμάτων του CP έγινε επειδή το συγκεκριμένο πρωτόκολλο διαθέτει μηχανισμούς αξιόπιστης μετάδοσης, αντίστοιχα με το TCP, κάτι που είναι απαραίτητο κατά την ανταλλαγή πληροφοριών σηματοδοσίας.



Σχήμα 2.7 Στοιβά πρωτοκόλλων CP

[https://www.tutorialspoint.com/lte/lte_radio_protocol_architecture.htm]

Το ανώτερο στρώμα στη στοίβα του CP μεταξύ eNB και UE είναι το RRC, το οποίο, κατά βάση, διαχειρίζεται τη σηματοδοσία σχετική με την πρόσβαση του UE στο E-UTRAN. Οι λειτουργίες του περιλαμβάνουν την ευρυεκπομπή δεδομένων του συστήματος, την αναζήτηση τερματικών, την καθιέρωση, ρύθμιση και συντήρηση των ραδιοκομιστών και τη διαχείριση των αναφορών και μετρήσεων των UEs. Επιπλέον, το RRC ευθύνεται για λειτουργίες ασφάλειας, όπως η διαχείριση κλειδιών, και λειτουργίες σχετικές με την κινητικότητα (μεταπομπή, επιλογή cell). Τα UEs μπορεί να βρίσκονται σε μία από δύο πιθανές καταστάσεις, όσον αφορά το RRC. Στην κατάσταση RRC_IDLE, οι λειτουργίες σχετικές με το UE που εκτελεί το E-UTRAN είναι κυρίως η αναζήτηση και η επιλογή κυψέλης. Σε αυτήν την κατάσταση, το τερματικό άκρο της σύνδεσης του UE από την πλευρά του EPC είναι η S-GW. Αντίθετα, όταν ένα UE βρίσκεται στην κατάσταση RRC_CONNECTED, τότε είναι εφικτή η μετάδοση δεδομένων από και προς αυτό, μέσω της P-GW.

Ο ρόλος του PDCP είναι η μεταφορά δεδομένων, IP για το UP και RRC για το CP, μέσω της διεπαφής Uu. Πραγματοποιεί συμπίεση των επικεφαλίδων IP και κρυπτογράφηση για την προστασία της ακεραιότητας των δεδομένων. Επιπλέον, είναι υπεύθυνο για τη σειριακή παράδοση των PDUs (Packet Data Unit) ανωτέρων στρωμάτων, καθώς και για την ανίχνευση αντιγράφων των SDUs (Service Data Unit) των κατωτέρων στρωμάτων.

Οι PDUs που προέρχονται από το PDCP μεταφέρονται μέσω του RLC στα κατώτερα στρώματα σε κατάλληλο μέγεθος. Το RLC χρησιμοποιεί τρεις τρόπους μετάδοσης: Acknowledged Mode (AM), Unacknowledged Mode (UM) και Transparent Mode (TM). Ανάλογα με τον τρόπο μετάδοσης, το RLC μπορεί να κάνει χρήση αναμεταδόσεων μέσω της τεχνικής ARQ (Automatic Repeat Request) για τον εντοπισμό και διόρθωση σφαλμάτων και την ανίχνευση αντιγράφων.

Το στρώμα MAC πραγματοποιεί την απεικόνιση μεταξύ των λογικών καναλιών, τα οποία μεταφέρουν πληροφορίες του RLC μεταξύ UE και eNB, και των καναλιών μεταφοράς, που περιέχουν πληροφορίες για τον τρόπο μεταφοράς των δεδομένων πάνω από τη ραδιοδιεπαφή. Οι κυριότερες λειτουργίες του είναι οι εξής:

- Η πολυπλεξία/αποπολυπλεξία των MAC SDUs μεταξύ λογικών καναλιών και καναλιών μεταφοράς
- Ο χρονοπρογραμματισμός των δεδομένων
- Η υλοποίηση της διαδικασίας τυχαίας πρόσβασης και ο καθορισμός της προτεραιότητας των UEs
- Η διόρθωση σφαλμάτων μέσω HARQ (Hybrid Automatic Repeat Request)

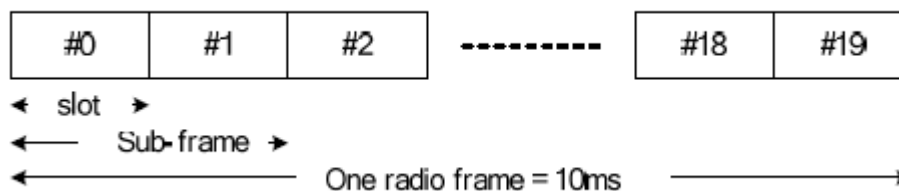
Το φυσικό στρώμα είναι υπεύθυνο για τη μετάδοση δεδομένων χρήστη και ελέγχου πάνω από τη ραδιοδιεπαφή. Χρησιμοποιεί κανάλια δεδομένων και ελέγχου για τη μεταφορά δεδομένων χρήστη και πληροφοριών ελέγχου της ραδιοδιεπαφής αντίστοιχα. Στην παράγραφο 2.4, γίνεται αναφορά στα βασικά χαρακτηριστικά του φυσικού στρώματος του LTE.

Τέλος, το NAS είναι το πρωτόκολλο που χρησιμοποιείται για την επικοινωνία του UE με τον EPC για τις λειτουργίες του CP. Το τερματικό άκρο αυτού του στρώματος, από την πλευρά του EPC, είναι η MME. Οι λειτουργίες του χωρίζονται σε διαχείριση κινητικότητας (EPS Mobility Management – EMM) και διαχείριση συνόδου (EPS Session Management – ESM). Η EMM περιλαμβάνει την αναζήτηση και ενημέρωση της περιοχής εντοπισμού, ενώ η ESM ευθύνεται για λειτουργίες σχετικές με τους κομιστές και την ενεργοποίηση/ απενεργοποίηση του UE.

2.4 Φυσικό στρώμα

2.4.1 Δομή πλαισίου

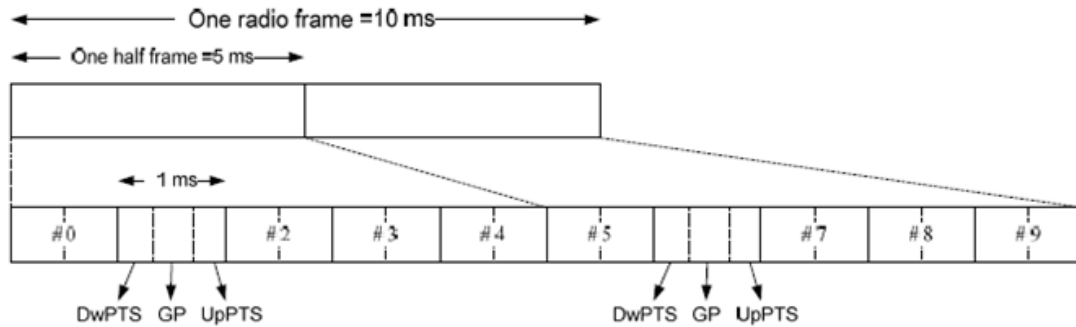
Οι πάροχοι υπηρεσιών LTE μπορούν να επιλέξουν μεταξύ δύο ειδών πλαισίων, που διαφοροποιούνται στον τρόπο με τον οποίο διαχωρίζεται η UL μετάδοση από την DL (duplexing). Στον FDD τρόπο (Frequency Division Duplexing), ανατίθεται μία ξεχωριστή φασματική ζώνη σε κάθε κατεύθυνση. Ένα πλαίσιο FDD διαρκεί 10ms και χωρίζεται σε δέκα υποπλαίσια (sub-frames), διάρκειας 1ms, τα οποία διαιρούνται περαιτέρω σε δύο σχισμές (slots), διάρκειας 0.5ms η κάθε μία.



Σχήμα 2.8 Δομή πλαισίου FDD [20]

Στον TDD τρόπο (Time Division Duplexing), η ίδια φασματική ζώνη ανατίθεται για τις μεταδόσεις UL και DL, ενώ αυτές διαχωρίζονται στο χρόνο. Το πλαίσιο, διάρκειας 10ms, χωρίζεται σε δύο ίσα μέρη, καθένα από τα οποία διαθέτει 8 σχισμές των 0.5ms για τη μετάδοση δεδομένων. Επιπλέον, μία σχισμή ανά μισό ή ολόκληρο πλαίσιο διαθέτει πληρο-

φορίες σχετικές με την ανάθεση των υπόλοιπων σχισμών στην κατεύθυνση UL ή DL. Οι σχισμές αυτές περιέχουν τρία πεδία: DwPTS (Downlink Pilot Time Slot), GP (Guard Period) και UpPTS (Uplink Pilot Time Slot), συνολικής διάρκειας 1ms. Οι τρόποι με τους οποίους μπορούν να ανατεθούν οι σχισμές ενός πλαισίου φαίνονται στον Πιν. 2.1. Από τους δύο τρόπους, αν και ο TDD χρειάζεται λιγότερο φάσμα, διότι εξαλείφει την περιοχή προστασίας μεταξύ UL και DL, ο τρόπος FDD έχει επικρατήσει, λόγω των χαλαρότερων απαιτήσεων συγχρονισμού.



Σχήμα 2.9 Δομή πλαισίου TDD [20]

Configuration	Switch-point periodicity	Subframe number									
		0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
0	5 ms	D	S	U	U	U	D	S	U	U	U
1	5 ms	D	S	U	U	D	D	S	U	U	D
2	5 ms	D	S	U	D	D	D	S	U	D	D
3	10 ms	D	S	U	U	U	D	D	D	D	D
4	10 ms	D	S	U	U	D	D	D	D	D	D
5	10 ms	D	S	U	D	D	D	D	D	D	D
6	5 ms	D	S	U	U	U	D	S	U	U	D

Πίνακας 2.1 Δυνατοί τρόποι ρύθμισης ενός πλαισίου TDD [20]

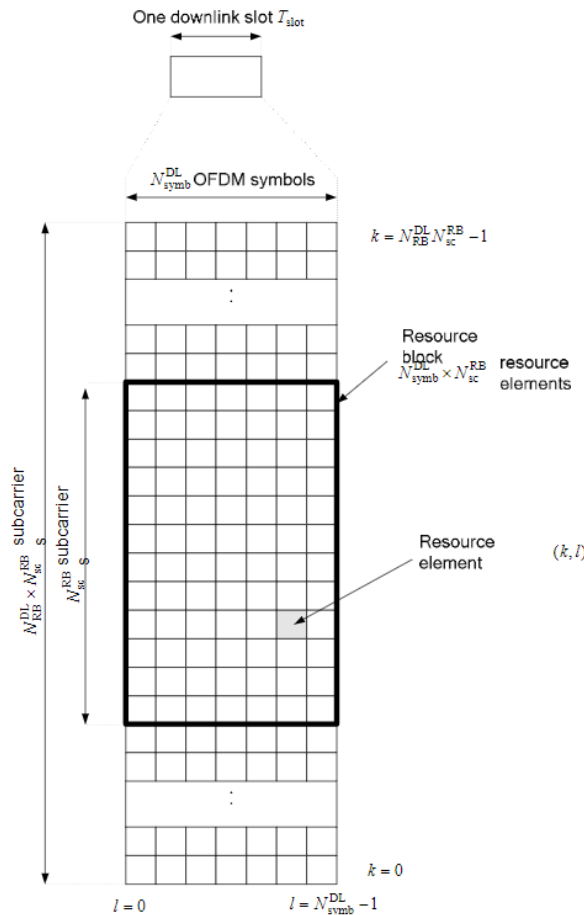
2.4.2 Σχήμα μετάδοσης

Για τη μετάδοση DL, χρησιμοποιείται η συμβατική OFDMA ως σχήμα πολλαπλής πρόσβασης. Το πλεονέκτημα αυτής έναντι των άλλων τεχνικών (TDMA, FDMA, CDMA) είναι ότι χωρίζει το συνολικό φάσμα σε μικρότερα τμήματα, καθένα από τα οποία αντιμετωπίζει ανεξάρτητες διαλείψεις από το δίαυλο. Με αυτόν τον τρόπο, μετριάζει την επίδραση του φαινομένου της πολυδιαδρομικής διάδοσης, που επικρατεί κυρίως σε αστικές περιοχές. Επιπλέον, χάρη στην ορθογωνιότητα μεταξύ των υποφερόντων, τα φάσματα αυτών μπορούν να επικαλύπτονται, οπότε, συγκριτικά με την απλή FDMA, εξοικονομείται φάσμα.

Το LTE υποστηρίζει μια ποικιλία επιλογών για το συνολικό εύρος ζώνης της υπηρεσίας, από 1.4 έως 20 MHz, ανά κατεύθυνση (για τον FDD τρόπο). Το φάσμα αυτό χωρίζεται σε υποφέροντα που απέχουν συνήθως 15 kHz, ενώ υποστηρίζεται και εύρος 7.5 kHz για υπηρεσίες πολυεκπομπής. Καθένα από αυτά διαμορφώνεται ανεξάρτητα από τα υπόλοιπα με ένα από τα σχήματα QPSK, 16QAM ή 64QAM και το άθροισμά τους παράγει ένα σύμβολο OFDM. Πριν από κάθε σύμβολο OFDM, προστίθεται ένα κυκλικό πρόθεμα (Cyclic Prefix – CP), δηλαδή μία επανάληψη των τελευταίων δειγμάτων του συμβόλου, το οποίο

εξαλείφει την επίδραση της διασυμβολικής παρεμβολής που οφείλεται στη διασπορά του διαύλου.

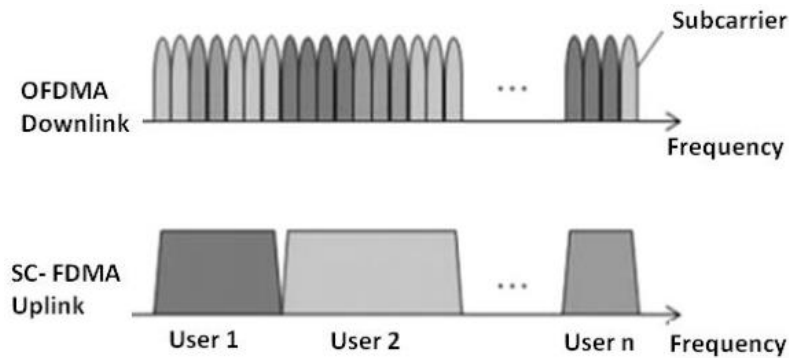
Η μικρότερη διακριτή μονάδα που μεταφέρει δεδομένα για το LTE είναι το RE (Resource Element), το οποίο αποτελείται από ένα υποφέρον σε διάρκεια ενός συμβόλου OFDM. Η μικρότερη μονάδα που μπορεί να ανατεθεί σε ένα χρήστη είναι το RB (Resource Block), που περιλαμβάνει 12 υποφέροντα των 15 kHz (ή 24 των 7.5 kHz) σε διάρκεια μίας σχισμής (0.5 ms). Το πλήθος των OFDM συμβόλων που περιλαμβάνονται σε μία σχισμή είναι 7 ή 6, ανάλογα με το αν χρησιμοποιείται κανονικό ή εκτεταμένο CP (για μεγαλύτερη προστασία). Τα RBs που ανατίθενται σε έναν χρήστη μπορεί είτε να είναι είτε όχι διαδοχικά στο χρόνο και τη συχνότητα, κάτι που σε κάθε περίπτωση αποφασίζεται από τον eNB.



Σχήμα 2.10 LTE Resource grid [21]

Το πρόβλημα με τη συμβατική OFDMA είναι ότι προκαλεί στα σύμβολα μεγάλο λόγο μέγιστης προς μέση ισχύ (Peak to Average Power Ratio – PAPR). Αυτό οφείλεται στη μικρή πιθανότητα να συμβάλουν όλα τα υποφέροντα προσθετικά, λόγω του μεγάλου πλήθους αυτών. Αν και αυτό δεν αποτελεί πρόβλημα για τους σταθμούς βάσης, στα κινητά τερματικά προκαλεί την ανάγκη για ενισχυτές που λειτουργούν σε μεγάλα εύρη PAPR, αυξάνοντας το απαιτούμενο κόστος των συσκευών. Επομένως, υιοθετήθηκε μια παραλλαγή της OFDM για το UL σχήμα μετάδοσης. Συγκεκριμένα, προηγείται μία βαθμίδα DFT του υπόλοιπου συστήματος OFDM, η οποία συντελεί στην εξάπλωση ενός συμβόλου σε εύρος πολλαπλών υποφερόντων. Η τεχνική αυτή καλείται DFTS-OFDM (DFT-Spread OFDM) ή SC-

FDMA (Single carrier-FDMA) και έχει αποδειχθεί πως επιτυγχάνει χαμηλότερες τιμές PAPR [22].



Σχήμα 2.11 Σύγκριση OFDMA και SC-FDMA [22]

Διαθέσιμο Εύρος Ζώνης (MHz)	1.4	3	5	10	15	20
Διάρκεια πλαισίου (ms)	10					
Διάρκεια υποπλαίσιο (ms)	1					
Εύρος υποδιαύλου (kHz)	15					
Πλήθος OFDM συμβόλων ανά υποπλαίσιο	Κανονικό CP 14 (7 ανά χρονοσχιμή)			Εκτεταμένο CP 12 (6 ανά χρονοσχιμή)		
Πλήθος RBs	6	15	25	50	75	100
Πλήθος υποφερόντων	72	180	300	600	900	1200
Χρησιμοποιούμενο εύρος ζώνης (MHz)	1.08	2.7	4.5	9	13.5	18
Συχνότητα δειγματοληψίας (MHz)	1.92	3.84	7.68	15.36	23.04	30.72
Μέγιστος ρυθμός μετάδοσης (Mbps) (SISO και κανονικό CP)	6.048	15.12	25.2	50.4	75.6	100.8

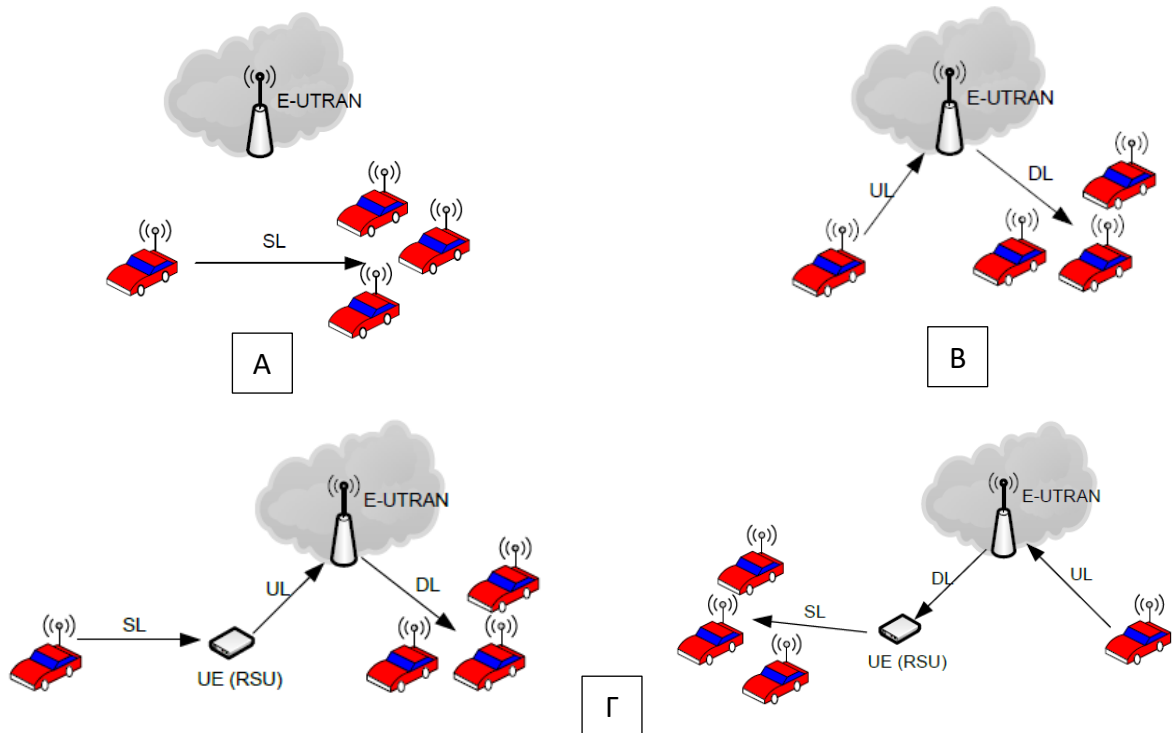
Πίνακας 2.2 Παράμετροι φυσικού στρώματος του LTE

2.5 Χρήση του LTE σε επικοινωνίες V2X

Αρχικά, το LTE σχεδιάσθηκε με σκοπό την εξυπηρέτηση εφαρμογών mobile broadband, καθώς αυτές ανταποκρίνονταν στις ανάγκες των χρηστών εκείνη την εποχή. Τα τελευταία χρόνια, έχουν προκύψει νέες κατηγορίες εφαρμογών, με διαφορετικές ανάγκες από αυτές των κοινών διαδικτυακών υπηρεσιών. Συγκεκριμένα, το LTE αποτελεί μία ελκυστική λύση για την εξυπηρέτηση εφαρμογών V2X, κυρίως λόγω της ευρείας εξάπλωσής του παγκοσμίως και της ήδη υπάρχουσας υποδομής που διαθέτουν οι πάροχοι δικτύου. Όμως, όπως αναφέρθηκε στην παράγραφο 1.4.2, οι αρχικές εκδόσεις του LTE εμφανίζουν προβλήματα, που δυσχεραίνουν την εφαρμογή του συστήματος σε τέτοιου είδους εφαρμογές, κυρίως λόγω της συγκεντρωτικής (centralized) φύσης της αρχιτεκτονικής κάθε κυψελωτού συστήματος.

Η 3GPP ενέταξε στις νεότερες εκδόσεις του LTE υποστήριξη υπηρεσιών V2X. Προκειμένου να αντιμετωπιστούν τα ανωτέρω προβλήματα, εισήχθη στην αρχιτεκτονική του LTE η δυνατότητα επικοινωνίας μεταξύ συσκευών (Device to Device – D2D). Η επικοινωνία μεταξύ δύο τερματικών μπορεί να γίνει είτε με τη μεσολάβηση ενός eNB, μέσω της διεπαφής Uu, είτε δίχως τη συμμετοχή αυτού, χρησιμοποιώντας τη νέα διεπαφή PC5. Η νεότερη αυτή έκδοση θέτει προδιαγραφές για τους τέσσερις γνωστούς τρόπους επικοινωνίας:

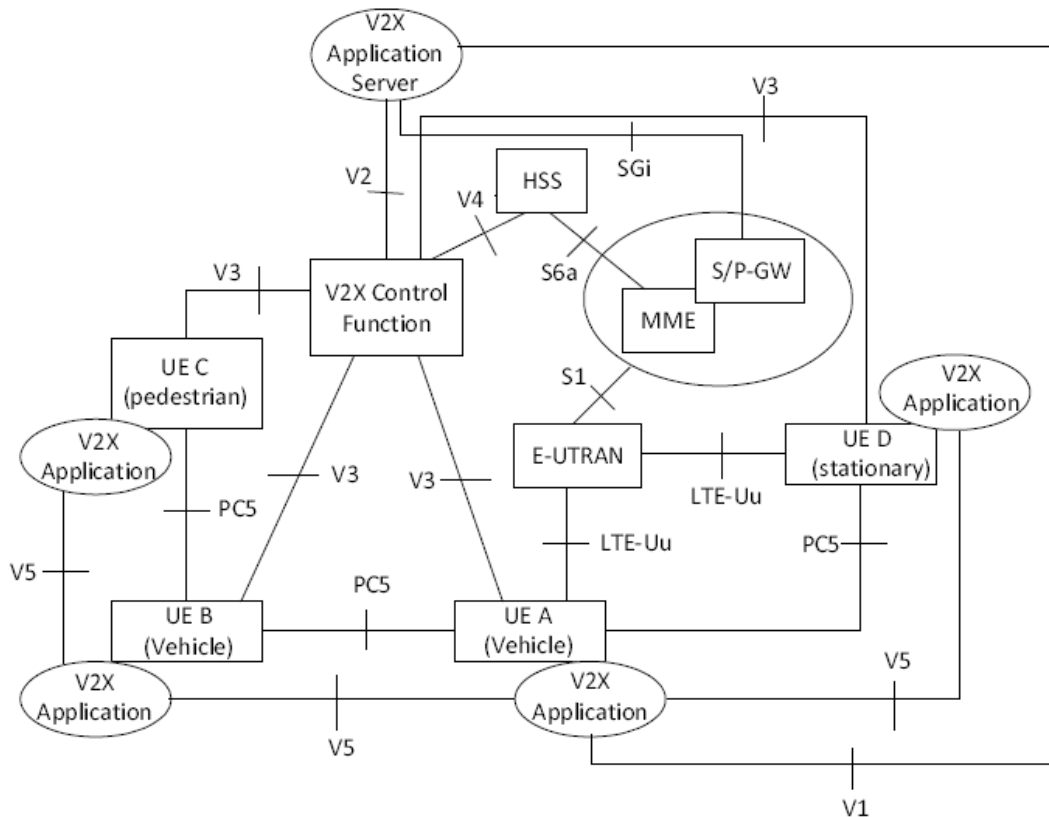
- Όχημα με όχημα (Vehicle-to-Vehicle – V2V)
- Όχημα με υποδομή (Vehicle-to-Infrastructure – V2I)
- Όχημα με δίκτυο (Vehicle-to-Network – V2N)
- Όχημα με πεζό (Vehicle-to-Pedestrian – V2P)



Σχήμα 2.12 Δυνατοί τρόποι επικοινωνίας V2V στο LTE: (A) Μέσω PC5, (B) μέσω Uu και (Γ) υβριδική χρήση των δύο τρόπων [23]

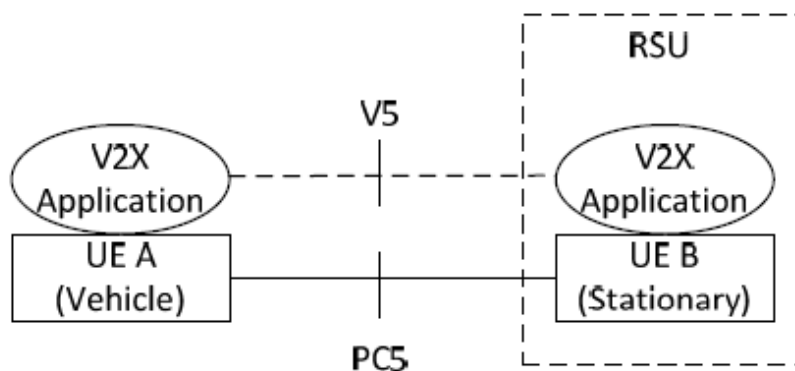
Οι επικοινωνίες V2V και V2P μπορούν να πραγματοποιηθούν είτε απευθείας μεταξύ δύο UEs (διεπαφή PC5) είτε με τη μεσολάβηση ενός eNB (διεπαφή Uu). Η επικοινωνία D2D επιφέρει μικρότερη καθυστέρηση στις μεταδόσεις μηνυμάτων, ενώ αποτελεί και τη μόνη λύση στην περίπτωση κατά την οποία τα οχήματα βρίσκονται εκτός κάλυψης του δικτύου. Αντίθετα, η μεσολάβηση του eNB πλεονεκτεί ως προς την κατανομή πόρων και την εξασφάλιση QoS. Σε κάποια σενάρια, είναι εφικτό να αξιοποιηθούν τόσο η διεπαφή PC5 όσο και η Uu. Πρόκειται για περιπτώσεις όπου ένα RSU διαθέτει δυνατότητα επικοινωνίας συγχρόνως με τα οχήματα και το E-UTRAN και μεσολαβεί είτε στις μεταδόσεις UL είτε DL, όπως απεικονίζεται στο Σχ. 2.12-Γ. Στα ανωτέρω σενάρια, τα οχήματα μπορούν να αντικατασταθούν από πεζούς χρήστες, για την υποστήριξη επικοινωνιών V2P. Όσον αφορά την ανταλλαγή μηνυμάτων με την υποδομή, οι επικοινωνίες V2I χρησιμοποιούν είτε την Uu

είτε την PC5 ανάλογα με το αν το στοιχείο της υποδομής είναι eNB ή RSU αντίστοιχα, ενώ οι V2N πραγματοποιούνται αποκλειστικά μέσω της Uu.

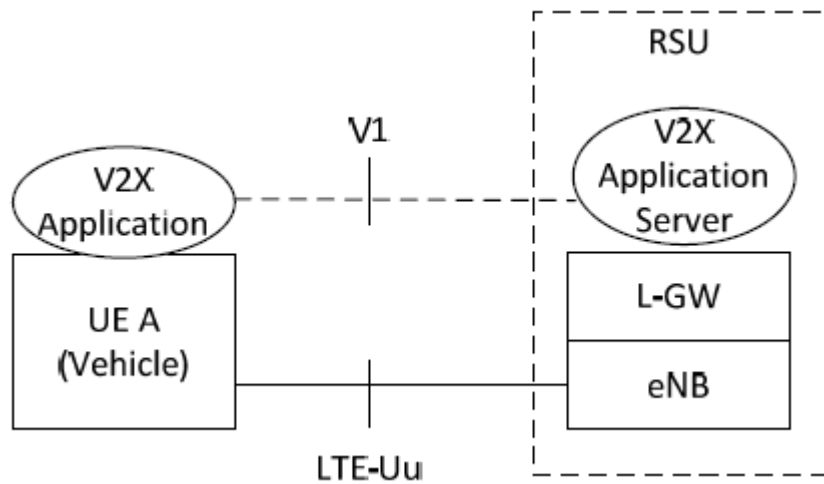


Σχήμα 2.13 Αρχιτεκτονική συστήματος LTE-V2X [24]

Όπως φαίνεται στο Σχ. 2.13, τα οχήματα επικοινωνούν μεταξύ τους και με τα RSUs μέσω διεπαφών PC5. Η σύνδεση τόσο των χρηστών όσο και των RSUs τύπου UE με το E-UTRAN πραγματοποιείται μέσω της Uu, όπως και στις προηγούμενες εκδόσεις του LTE. Οι δύο τρόποι επικοινωνίας απεικονίζονται στα Σχ. 2.14 και 2.15. Στην περίπτωση της επικοινωνίας D2D, οι εφαρμογές ανταλλάσσουν δεδομένα μεταξύ τους πάνω από μία εικονική διεπαφή V5. Μία εφαρμογή μπορεί, επίσης, να διατηρεί σύνδεση με κάποιον εξυπηρετητή V2X, μέσω μιας διεπαφής V1. Η προτεινόμενη αρχιτεκτονική περιλαμβάνει και τη λειτουργία ελέγχου V2X, η οποία συντονίζει όλες τις οντότητες του δικτύου.



Σχήμα 2.14 Επικοινωνία με RSU τύπου UE [24]



Σχήμα 2.15 Επικοινωνία με RSU τύπου eNB [24]

2.6 Η τεχνολογία MBMS

2.6.1 Διάχυση δεδομένων με πολυεκπομπή

Ένα από τα προς επίλυση ζητήματα, σχετικά με το συγκεντρωτικό τρόπο επικοινωνίας V2X, είναι το πώς θα πραγματοποιηθεί η διάχυση των δεδομένων προς τα οχήματα. Τα RSUs συλλέγουν πληροφορίες από τα αυτοκίνητα (πχ. σχετικές με τη θέση τους), τους αισθητήρες που βρίσκονται πάνω σε αυτά ή επί του οδοστρώματος, αλλά και από κεντρικούς εξυπηρετητές. Τα δεδομένα αυτά, μετά από ενδεχόμενη επεξεργασία, καλούνται να μεταδοθούν ταυτόχρονα και με αποδοτικό τρόπο στα οχήματα εντός συγκεκριμένης περιοχής. Το LTE υποστηρίζει κατεξοχήν unicast τρόπο επικοινωνίας, οπότε η διαχεόμενη πληροφορία πρέπει να μεταδοθεί σε ξεχωριστούς διαύλους για κάθε όχημα. Κάτι τέτοιο, όχι μόνο είναι δαπανηρό σε φάσμα, αλλά μπορεί να οδηγήσει σε απώλειες πακέτων, καθώς ο αριθμός των χρηστών αυξάνεται. Για την επίλυση αυτού του προβλήματος, θα μπορούσε να εξεταστεί η εφαρμογή πολυεκπομπής/ευρυεκπομπής στο σύστημα.

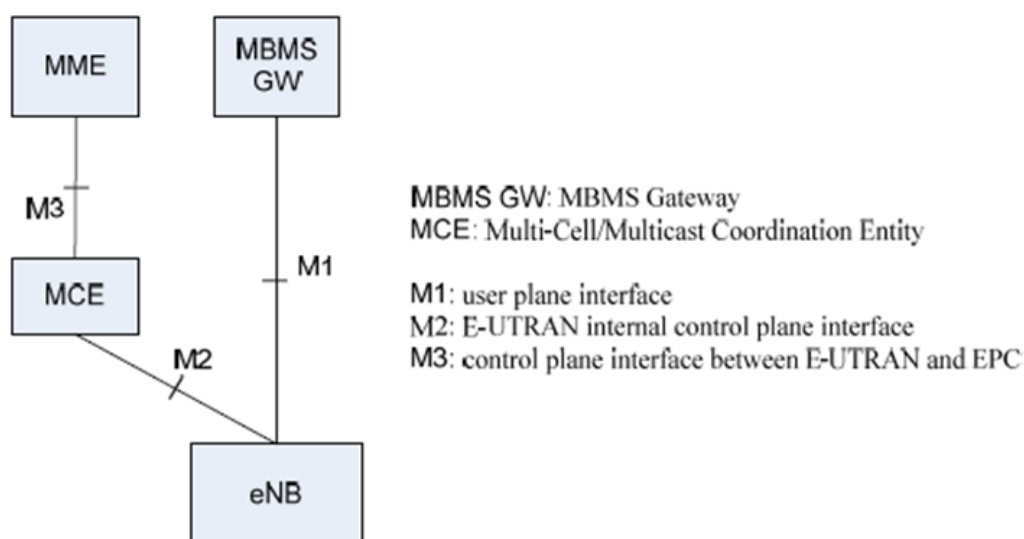
Η 3GPP συμπεριέλαβε από τις πρώτες εκδόσεις του LTE υποστήριξη πολυεκπομπής, η οποία ονομάζεται E-MBMS (Evolved Multimedia Broadcast Multicast Service). Η MBMS βασίζεται στην τεχνική πολυεκπομπής/ευρυεκπομπής με δίκτυα μοναδικής συχνότητας (Multicast Broadcast Single Frequency Network – MBSFN). Σύμφωνα με την MBSFN, πολλαπλές κυψέλες εκπέμπουν συγχρόνως πανομοιότυπες κυματομορφές, οι οποίες γίνονται αντιληπτές από τα UEs ως μία εκπομπή. Εντός μιας περιοχής κάλυψης, τα UEs λαμβάνουν το ίδιο σήμα από πολλαπλούς σταθμούς βάσης και επιλέγουν το ισχυρότερο από αυτά. Επομένως, στα SFNs καταργείται η ανάγκη κατανομής και διαχείρισης συχνοτήτων στους σταθμούς βάσης, αφού όλοι εκπέμπουν στην ίδια συχνότητα. Ένα ακόμη πλεονέκτημα αυτών των δικτύων είναι ότι οι κινούμενοι χρήστες δεν χρειάζεται να συντονιστούν σε διαφορετική συχνότητα κατά τη μεταπομπή μεταξύ σταθμών βάσης, όπως συμβαίνει στα δίκτυα πολλαπλών συχνοτήτων (Multi Frequency Networks – MFN). Από την άλλη πλευρά, προκειμένου να αντιλαμβάνονται οι χρήστες τις εκπομπές από πολλούς σταθμούς βάσης ως μία, είναι απαραίτητος ο ακριβής συγχρονισμός αυτών.

Οι ακόλουθες έννοιες ορίζονται σε ένα σύστημα MBMS:

- **Περιοχή συγχρονισμού MBSFN** (MBSFN Synchronization Area): Μια περιοχή, όπου οι eNBs μπορούν να συγχρονιστούν για την εκπομπή μηνυμάτων MBSFN. Μια περιοχή συγχρονισμού μπορεί να υποστηρίξει μία ή περισσότερες περιοχές MBSFN.
- **Περιοχή MBSFN** (MBSFN Area): Ένα σύνολο eNBs εντός μιας περιοχής συγχρονισμού, που συνεργάζονται για μία εκπομπή MBSFN. Κάθε περιοχή MBSFN διαθέτει ένα αναγνωριστικό (από 0 έως 255) για την αναγνώριση αυτής από τα τερματικά. Μία κυψέλη εντός μιας περιοχής συγχρονισμού μπορεί να αποτελεί μέλος πολλών περιοχών MBSFN (έως και 8).
- **Κυψέλη μετάδοσης και κοινοποίησης** (Transmitting and Advertising Cell): Μία κυψέλη, εντός μίας περιοχής MBSFN, η οποία συνεισφέρει στη μετάδοση MBSFN και επιπλέον κοινοποιεί τη διαθεσιμότητα της υπηρεσίας στα τερματικά εντός της περιοχής κάλυψης αυτής.
- **Κυψέλη αποκλειστικής μετάδοσης MBSFN** (MBSFN Area Transmitting-Only Cell): Μία κυψέλη η οποία συνεισφέρει στη μετάδοση MBSFN, χωρίς να κοινοποιεί τη διαθεσιμότητα αυτής.
- **Δεσμευμένη κυψέλη** (Reserved Cell): Μία κυψέλη που δε συμμετέχει στην εκπομπή MBSFN. Η κυψέλη αυτή μπορεί να εξυπηρετεί άλλες υπηρεσίες, αλλά επιβάλλονται σε αυτήν περιορισμοί στην ισχύ εκπομπής των πόρων που κατανέμονται σε υπηρεσίες MBSFN, ώστε να μην προκαλεί παρεμβολές στις κυψέλες που χρησιμοποιούν υπηρεσίες πολυεκπομπής.

2.6.2 Αρχιτεκτονική E-MBMS

Για την υποστήριξη υπηρεσιών MBMS, προστίθενται δύο μονάδες στην αρχιτεκτονική του LTE, η οντότητα συντονισμού πολυεκπομπής (Multicast Coordination Entity – MCE) και η πύλη MBMS (MBMS Gateway – MBMS GW). Οι μονάδες αυτές συνδέονται με ήδη υπάρχουσες οντότητες του δικτύου, όπως φαίνεται στο Σχ. 2.16:



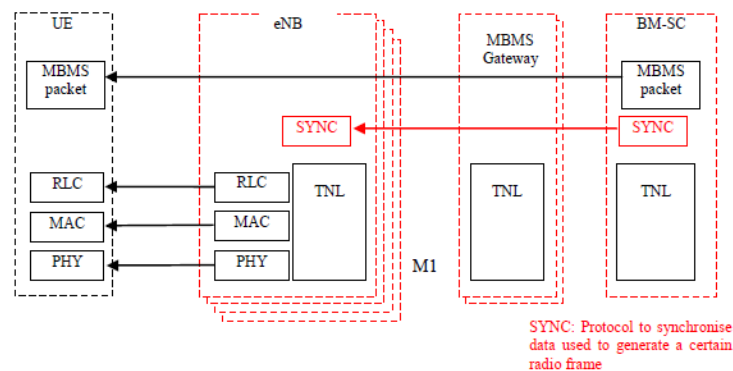
Σχήμα 2.16 Αρχιτεκτονική MBMS [25]

Ο ρόλος της MCE είναι η κατανομή των ραδιοπόρων που χρησιμοποιούνται για εκπομπές MBSFN στους eNBs. Κάθε eNB εξυπηρετείται από μόνο μία MCE, η οποία μπορεί είτε να βρίσκεται στο ίδιο σημείο με αυτόν είτε να εξυπηρετεί πολλαπλούς eNBs. Στην

περίπτωση της συγκεντρωτικής MCE, αυτή ελέγχει κάθε eNB μέσω μιας διεπαφής επιπέδου ελέγχου M2, ενώ οι λειτουργίες κατανομής πόρων και ρύθμισης, που σε άλλη περίπτωση είναι ευθύνη του eNB, τώρα εκτελούνται κεντρικά. Στην περίπτωση της συνεγκατάστασης των δύο οντοτήτων, δεν χρειάζεται η διεπαφή M2. Επιπλέον, η MCE συνδέεται με την MME που εξυπηρετεί το συγκεκριμένο eNB μέσω μιας διεπαφής επιπέδου ελέγχου M3 για τη σύνδεση του E-UTRAN με τον EPC, όσον αφορά τις υπηρεσίες MBMS.

Η E-MBMS GW είναι υπεύθυνη για τη μετάδοση των πακέτων MBMS σε κάθε eNB που διαθέτει την υπηρεσία. Φιλοξενεί το στρώμα PDCP του επιπέδου χρήστη, ενώ για την προώθηση των δεδομένων προς τους χρήστες, αξιοποιεί τη δυνατότητα πολυεκπομπής του πρωτοκόλλου IP. Επιπλέον, συνδέεται με το κέντρο υπηρεσιών ευρυεκπομπής/ πολυεκπομπής (Broadcast Multicast Service Center – BMSC), το οποίο λαμβάνει δεδομένα προς εκπομπή από εξωτερικά δίκτυα μέσω της P-GW.

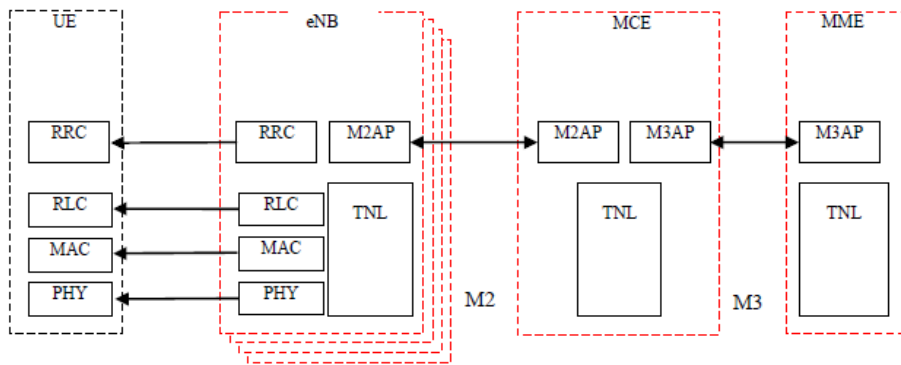
Στα Σχ. 2.17 και 2.18, απεικονίζεται με μεγαλύτερη λεπτομέρεια ο τρόπος επικοινωνίας των ανωτέρω οντοτήτων για την ανταλλαγή μηνυμάτων των UP και CP αντίστοιχα. Το πρωτόκολλο SYNC ορίζεται προκειμένου να συγχρονιστούν οι eNBs από το BM-SC κατά τη μετάδοση πλαισίων πολυεκπομπής. Για το σκοπό αυτό, το BM-SC προσθέτει σημάσεις χρόνου (timestamps) στα πακέτα SYNC, οι οποίες υποδηλώνουν τη χρονική στιγμή εκπομπής των δεδομένων από τους eNBs που ανήκουν σε μία περιοχή συγχρονισμού. Η διεπαφή M1 μεταφέρει πακέτα δεδομένων MBMS μεταξύ των eNBs και της MBMS GW με μη αξιόπιστο τρόπο πάνω από πρωτόκολλα GTP-U/UDP/IP, σε αντιστοιχία με την S1-U.



Σχήμα 2.17 Αρχιτεκτονική UP για την MBMS [25]

Για τις διεπαφές ελέγχου M2 και M3, ορίζονται αντίστοιχα πρωτόκολλα σηματοδότησης του στρώματος εφαρμογής, τα οποία καλούνται M2/3 AP (Application Protocol). Οι PDUs αυτών των πρωτοκόλλων μεταφέρονται πάνω από το συνδυασμό SCTP/IP, ο οποίος προσφέρει αξιόπιστη παράδοση αυτών. Οι λειτουργίες που παρέχει η M2 μεταξύ της MCE και των eNBs είναι οι εξής:

- Χειρισμός συνόδου MBMS: Περιλαμβάνει την έναρξη, τον τερματισμό και την ανανέωση μιας συνόδου MBMS από την MCE.
- Παροχή πληροφοριών χρονοπρογραμματισμού MBMS
- Διαχείριση διεπαφής M2: Περιλαμβάνει κατάλληλα μέσα για την επαναφορά (reset) της διεπαφής, το χειρισμό ενδείξεων σφαλμάτων και την αποκατάσταση της M2 σε περίπτωση αποτυχίας κάποιου τμήματος αυτής.



Σχήμα 2.18 Αρχιτεκτονική CP για την MBMS [25]

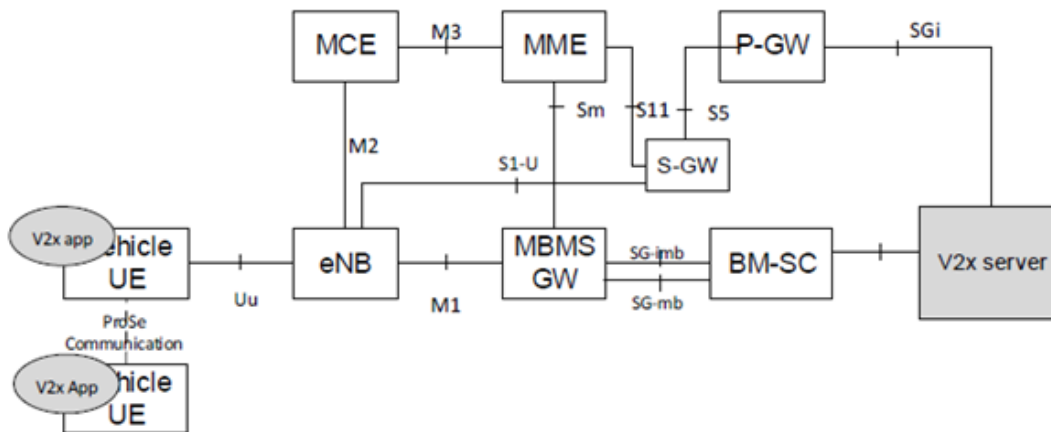
- Καταμέτρηση υπηρεσιών MBMS
- Αναβολή και συνέχιση υπηρεσιών MBMS: Η MCE έχει τη δυνατότητα, μέσω αυτής της λειτουργίας, να δώσει εντολή σε έναν eNB να αναβάλλει την παροχή υπηρεσιών MBMS. Η εντολή αυτή μπορεί να αφορά την απελευθέρωση των ασυρμάτων πόρων που χρησιμοποιούνται για υπηρεσίες MBMS, την έξοδο του eNB από μία ομάδα πολυεκπομπής IP ή την αναστολή μιας μετάδοσης MBSFN, διατηρώντας τις πληροφορίες αυτής στον eNB.

Οι λειτουργίες χειρισμού συνόδου και διαχείρισης διεπαφής ορίζονται αντίστοιχα και για την M3, μεταξύ της MCE και της MME. Σε αυτήν την περίπτωση, η έναρξη και ο τερματισμός συνόδου MBMS ξεκινά από την MME, η οποία παρέχει στην MCE πληροφορίες σχετικές με το QoS, την περιοχή εξυπηρέτησης και τη λίστα με τις διαθέσιμες κυψέλες.

2.6.3 MBMS για επικοινωνίες V2X

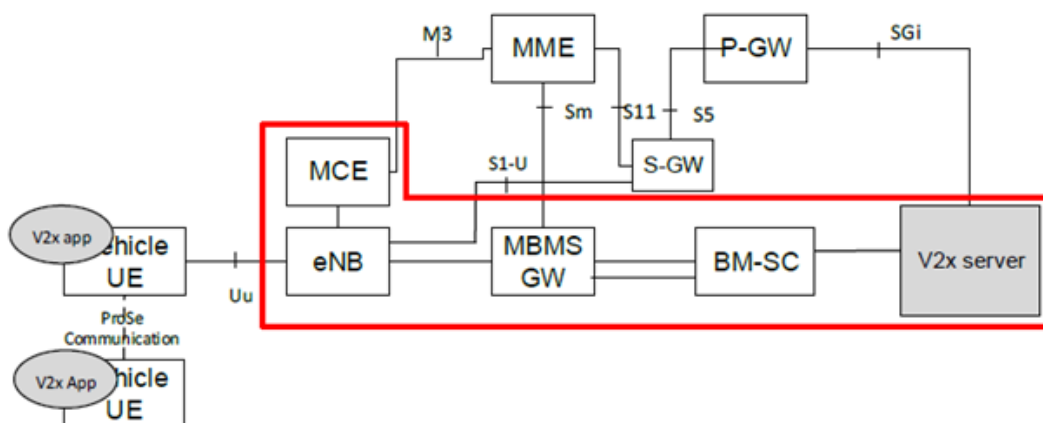
Για την εξυπηρέτηση εφαρμογών μεταξύ οχημάτων, χρησιμοποιείται ένας κεντρικός εξυπηρετητής V2X, ο οποίος σε πολλές περιπτώσεις καλείται να μεταδώσει μηνύματα προς τους eNBs που προορίζονται για πολυεκπομπή. Σε κάποιες εφαρμογές, τα UEs στέλνουν μηνύματα με προορισμό τον εξυπηρετητή V2X μέσω της διεπαφής Uu. Ο εξυπηρετητής συλλέγει δεδομένα κυκλοφοριακής κίνησης και μηνύματα συνεργαζόμενης επίγνωσης και, με βάση τις συντεταγμένες που λαμβάνει από τα UEs, καλείται να αποφασίσει την περιοχή, στην οποία πρέπει αυτά ή νέα μηνύματα να μεταδοθούν. Η μεταφορά της πληροφορίας αυτής γίνεται είτε μέσω της P-GW είτε μέσω του BM-SC.

Στο σενάριο του Σχ. 2.19, ο εξυπηρετητής V2X και οι μονάδες της MBMS βρίσκονται σε κεντρικό σημείο, εντός του δικτύου κορμού κάποιου παρόχου. Κάτι τέτοιο, όχι μόνο αυξάνει την καθυστέρηση που υφίστανται τα πακέτα δεδομένων και σηματοδοσίας, αλλά περιπλέκει και τη διαδικασία εύρεσης της περιοχής ευρυεκπομπής, αφού τα μηνύματα που λαμβάνει ο εξυπηρετητής προέρχονται από πολλαπλές περιοχές MBMS. Μία λύση αυτού του προβλήματος αποτελεί η τοπική MBMS, δηλαδή η μετακίνηση των λειτουργιών MBMS και του εξυπηρετητή V2X από το δίκτυο κορμού σε σημείο πλησιέστερα στους eNBs.



Σχήμα 2.19 Εφαρμογή της MBMS σε επικοινωνίες οχημάτων [23]

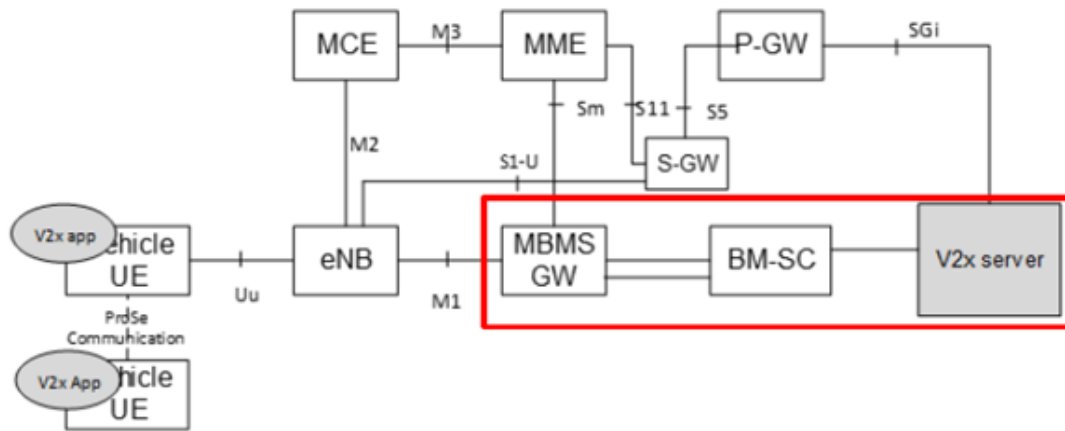
Οι μονάδες αυτές μπορούν είτε να συνεγκατασταθούν με κάποιον eNB είτε να τοποθετηθούν σε σημείο συνάθροισης πολλαπλών eNBs. Παρόλο που στην πρώτη περίπτωση η υφιστάμενη καθυστέρηση είναι η ελάχιστη δυνατή, η συνεγκατάσταση του MBMS με έναν eNB υστερεί από πλευράς διαχείρισης. Το κόστος υλοποίησης είναι, επίσης, υψηλότερο, αφού απαιτείται ένας εξυπηρετητής σε κάθε κυψέλη. Μια ακόμη πιθανή επιλογή είναι ο διαχωρισμός των λειτουργιών επιπέδου χρήστη και ελέγχου του MBMS. Οι λειτουργίες σχετικά με την προώθηση πακέτων μπορούν να μεταφερθούν πλησιέστερα στους eNBs, ενώ οι λειτουργίες σχετικά με τη διαχείριση των μονάδων MBMS παραμένουν στο δίκτυο κορμού του παρόχου.



Σχήμα 2.20 Τοποθέτηση της MBMS στο ίδιο σημείο με τον eNB [23]

Η υλοποίηση της τοπικής MBMS μπορεί να γίνει εφικτή σε συνδυασμό με την τεχνολογία Mobile Edge Computing (MEC), η οποία είναι το αντικείμενο του τρίτου κεφαλαίου. Το MEC είναι ωφέλιμο για εφαρμογές ευαίσθητες σε καθυστέρηση, διότι παρέχει υπολογιστικούς, αποθηκευτικούς και δικτυακούς πόρους στο RAN. Επιπλέον, ο συνδυασμός αυτού με την τεχνολογία NFV (παράγραφος 3.4), διευκολύνει την εγκατάσταση νέων λειτουργιών στο δίκτυο, όπως οι μονάδες του MBMS, και μειώνει το κόστος αγοράς νέου δικτυακού εξοπλισμού. Ειδικά για τις υπηρεσίες πολυεκπομπής, θα φανεί χρήσιμη η δυ-

νατότητα του MEC για παροχή υπηρεσιών βασισμένων στη θέση των χρηστών (παράγραφος 3.5.3.2).



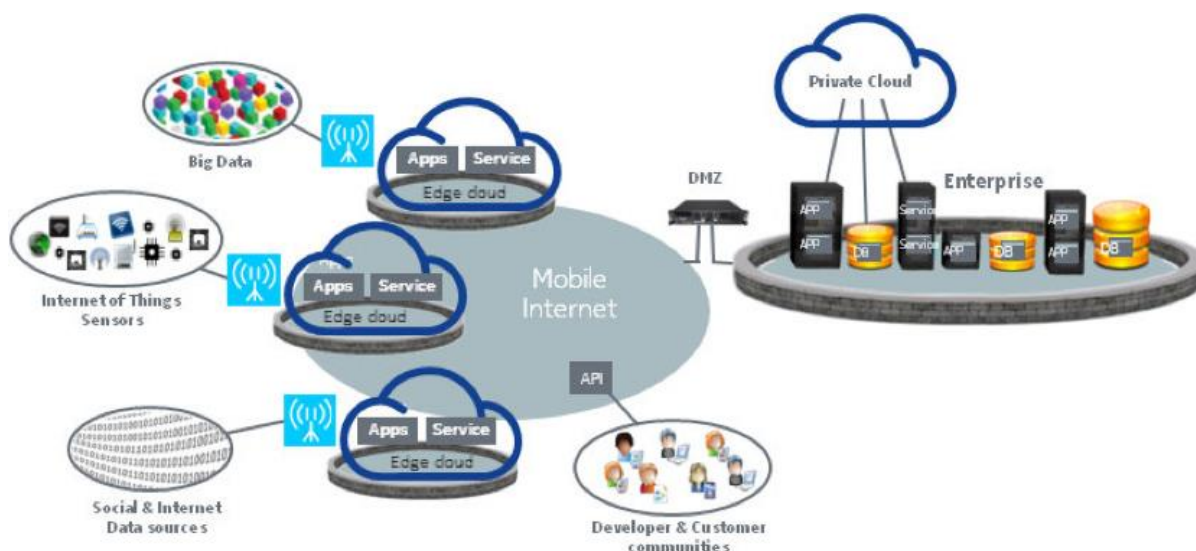
Σχήμα 2.21 Τοποθέτηση της MBMS σε διαφορετικό σημείο από τον eNB [23]

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: Mobile Edge Computing

3.1 Εισαγωγή

Ένα από τα προβλήματα των συμβατικών κυψελωτών συστημάτων είναι πως τα μηνύματα που ανταλλάσσονται μεταξύ δύο τερματικών διέρχονται υποχρεωτικά από το δίκτυο κορμού του συστήματος. Επιπλέον, οι περισσότερες σημερινές εφαρμογές κάνουν χρήση της τεχνικής cloud computing, χάρη στη δυνατότητά της να παρέχει πρακτικά απεριόριστους υπολογιστικούς και αποθηκευτικούς πόρους σε αυτές. Κάτι τέτοιο, όμως, αυξάνει περαιτέρω την καθυστέρηση που υφίστανται τα μηνύματα από άκρο σε άκρο, διότι οι εξυπηρετητές cloud βρίσκονται, συνήθως, σε απομακρυσμένα σημεία από τα υπόλοιπα στοιχεία του δικτύου. Καίτοι αυτό δεν αποτελεί μείζον πρόβλημα για τις υπηρεσίες mobile broadband, η εξάρτηση από το cloud δυσχεραίνει την ανάπτυξη νέων εφαρμογών που απαιτούν υψηλή αξιοπιστία και χαμηλή καθυστέρηση, καθώς και υπηρεσιών Internet of Things (IoT), οι οποίες χαρακτηρίζονται από εξαιρετικά υψηλό αριθμό συσκευών.

Για την αντιμετώπιση των ανωτέρω προβλημάτων, τα τελευταία χρόνια μελετάται η εφαρμογή της τεχνολογίας Mobile Edge Computing (MEC) στα κυψελωτά συστήματα. Η βασική ιδέα είναι η μετακίνηση των ικανοτήτων υπολογισμού από τα κεντρικά data centers στους κόμβους του RAN. Με αυτόν τον τρόπο, οι ακραίοι κόμβοι του δικτύου αποκτούν τη δυνατότητα να επέμβουν στη δρομολόγηση της κίνησης και να την προσαρμόσουν στην τρέχουσα κατάσταση του δικτύου, μειώνοντας παράλληλα την καθυστέρηση που εισάγει το δίκτυο κορμού. Το MEC, όμως, δεν καταργεί το ρόλο του cloud computing, αλλά αντίθετα τον συμπληρώνει. Οι κόμβοι με δυνατότητες MEC μπορούν να εξυπηρετούν άμεσα τις εφαρμογές για τις οποίες διαθέτουν τους απαραίτητους πόρους, ενώ αναθέτουν σε κάποιον εξυπηρετητή cloud την εξυπηρέτηση αυτών που είναι ανεκτικές σε καθυστέρηση.



Σχήμα 3.1 Κεντρικό και edge cloud

[<https://www.sdxcentral.com/mec/definitions/what-multi-access-edge-computing-mec>]

3.2 Πλεονεκτήματα MEC

Όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, το MEC συμβάλλει στη μείωση της συνολικής καθυστέρησης που αντιλαμβάνεται ο χρήστης. Εκτός από αυτό, όμως, συνεισφέρει και στη μείωση της συνολικής επιβάρυνσης του δικτύου κορμού, αφού μόνο ένα μέρος της συνολικής κίνησης διέρχεται από αυτό. Αυτοί οι παράγοντες όχι μόνο συντελούν στη βελτίωση της εμπειρίας του χρήστη, όσον αφορά τις εφαρμογές mobile broadband, αλλά επιτρέπουν και την ανάπτυξη νέων εφαρμογών, ευαίσθητων σε καθυστέρηση και απώλειες πακέτων.

Ένα ακόμη χαρακτηριστικό του MEC είναι πως οι ακραίοι κόμβοι μπορούν να φιλοξενούν υπηρεσίες βασισμένες στην τοποθεσία των κόμβων αυτών. Τέτοιες εφαρμογές θα μπορούσαν να αποθηκεύουν συγκεκριμένες πληροφορίες στους ακραίους κόμβους, οι οποίες ενδιαφέρουν μόνο χρήστες που βρίσκονται σε συγκεκριμένη γεωγραφική περιοχή. Επομένως, η επικοινωνία με το δίκτυο κορμού περιορίζεται στην ανανέωση των πληροφοριών από κάποιο data center και στη συγκεντρωτική αποστολή δεδομένων των χρηστών σε αυτό. Επιπλέον, το MEC διευκολύνει τον εντοπισμό της θέσης των τερματικών συσκευών και επιτρέπει την ανάπτυξη εφαρμογών που βασίζονται στη θέση των χρηστών. Τέλος, οι εφαρμογές που τρέχουν σε έναν κόμβο MEC έχουν πρόσβαση σε δεδομένα του δικτύου σε πραγματικό χρόνο (κατάσταση ραδιοδιαύλων, στατιστικά δικτύου, θέση συνδρομητών, φορτίο κυψέλης κλπ.) και μπορούν να τα αξιοποιήσουν προκειμένου να διαφοροποιήσουν τις υπηρεσίες που δέχεται κάθε χρήστης.

Εκτός από τη βελτίωση της εμπειρίας των χρηστών, η ανάπτυξη του MEC υπόσχεται και πολλά οικονομικά οφέλη για τους παρόχους δικτύων. Οι πάροχοι περιεχομένου έχουν τη δυνατότητα να αναπτύξουν γρήγορα νέες εφαρμογές, οι οποίες θα είναι διαθέσιμες είτε σε καταναλωτές είτε σε επιχειρήσεις μέσω του δικτύου κάποιου MNO (Mobile Network Operator). Η ανάπτυξη αυτή θα διευκολυνθεί από τον καθορισμό ανοιχτών προδιαγραφών, APIs (Application Programming Interfaces) και SDKs (Software Development Kits). Επιπλέον, οι MNOs θα μπορούν να παρέχουν το δίκτυό τους σε τρίτους συνεργάτες (Third Party), για τη φιλοξενία των δικών τους εφαρμογών. Το MEC θα παρέχει, επίσης, ευελιξία στους MNOs για τον τρόπο με τον οποίο κατανέμουν τους διαθέσιμους πόρους του συστήματος (αποθηκευτικούς, εύρος ζώνης, υπολογιστική ισχύ) στους διάφορους συνεργάτες τους.

3.3 Περιπτώσεις χρήσης του MEC

Το MEC είναι ικανό να ενεργοποιήσει την ανάπτυξη νέων καινοτόμων εφαρμογών, τις οποίες αδυνατούν να υποστηρίξουν τα σημερινά κυψελωτά συστήματα. Οι εφαρμογές αυτές εκμεταλλεύονται τη χαμηλή καθυστέρηση που εξασφαλίζει η τοποθέτηση τοπικών εξυπηρετητών και data centers πλησιέστερα στους τελικούς χρήστες, με σκοπό τη βελτίωση της ποιότητας υπηρεσίας (Quality of Experience – QoE) που αυτοί αντιλαμβάνονται. Επιπλέον, το MEC παρέχει τη δυνατότητα στους παρόχους δικτύων να προσφέρουν υπηρεσίες που σχετίζονται με τη θέση εγκατάστασης της εφαρμογής, με πιθανή μίσθωση πόρων σε τρίτους. Οι περιπτώσεις χρήσης που μπορούν να επωφεληθούν από την εφαρμογή του MEC κατανέμονται στις ακόλουθες κατηγορίες:

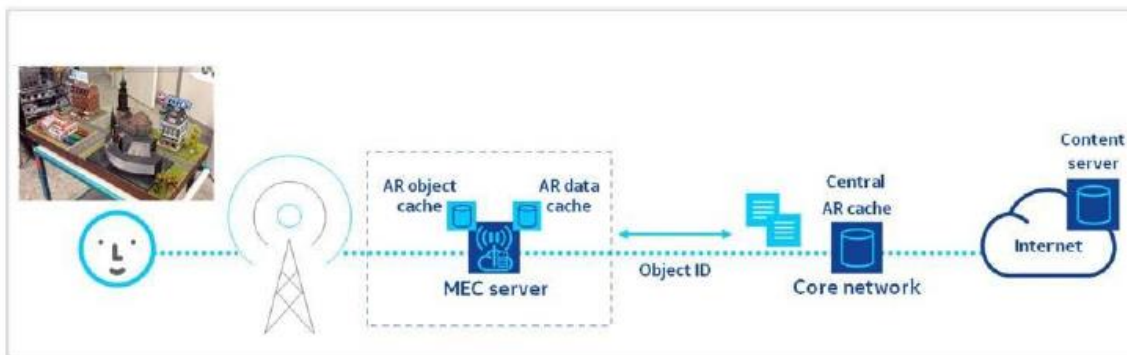
- **Υπηρεσίες προσανατολιζόμενες στους καταναλωτές:** καινοτόμες υπηρεσίες που ωφελούν άμεσα τον τελικό χρήστη.
- **Υπηρεσίες συνεργασίας με τρίτους:** αυτές οι υπηρεσίες δεν είναι, κατά κύριο λόγο, άμεσα ωφέλιμες για τους τελικούς χρήστες, αλλά επιφέρουν κέρδος στους διαχειριστές του συστήματος MEC μέσω συνεργασίας με τρίτους.
- **Βελτίωση της απόδοσης του δικτύου και του QoE:** οι εφαρμογές αυτού του τύπου δεν θεωρούνται τόσο καινοτόμες όσο αυτές που ανήκουν στις άλλες δύο κατηγορίες. Στόχος του MEC είναι η καλύτερη απόδοση του δικτύου κατά την παροχή αυτών των υπηρεσιών, επιτυγχάνοντας παράλληλα βελτίωση της εμπειρίας των χρηστών.

Στις επόμενες παραγράφους, γίνεται συνοπτική αναφορά σε συγκεκριμένα παραδείγματα εφαρμογών των τριών ανωτέρω κατηγοριών και διευκρινίζεται η συσχέτιση αυτών με το MEC.

3.3.1 Υπηρεσίες προσανατολιζόμενες στους καταναλωτές

i) Επαυξημένη (augmented) και εικονική (virtual) πραγματικότητα

Η επαυξημένη πραγματικότητα παρέχει στους χρήστες επιπλέον πληροφορίες σχετικές με το περιβάλλον στο οποίο αυτοί βρίσκονται. Για παράδειγμα, ένας χρήστης που επισκέπτεται ένα μουσείο ή παρακολουθεί κάποιο μουσικό ή αθλητικό γεγονός επιθυμεί να πληροφορηθεί για κάποιο σημείο ενδιαφέροντος, μέσω της φορητής του συσκευής. Η εφαρμογή επαυξημένης πραγματικότητας αναλύει την εικόνα που καταγράφει η κάμερα της συσκευής σε πραγματικό χρόνο και εμφανίζει σχετικές πληροφορίες, οι οποίες μπορεί να έχουν μορφή κειμένου, εικόνας ή βίντεο. Παρόμοια είναι και η εφαρμογή της εικονικής πραγματικότητας, με τη διαφορά ότι αυτή αντικαθιστά ολόκληρο το οπτικό πεδίο του χρήστη με ένα εικονικό περιβάλλον.



Σχήμα 3.2 Επαυξημένη πραγματικότητα [29]

Η κατανάλωση υπηρεσιών επαυξημένης και εικονικής πραγματικότητας απαιτεί την επεξεργασία υψηλού όγκου δεδομένων σε πραγματικό χρόνο, αφού το περιβάλλον που αντιλαμβάνεται ο χρήστης πρέπει να ανανεώνεται καθώς αυτός κινείται. Επομένως, η εξυπηρέτηση αυτών των εφαρμογών από κάποιον cloud server πιθανώς να μην επιτυγχάνει τις αυστηρές απαιτήσεις σε καθυστέρηση και ρυθμό μετάδοσης. Επειδή, όμως, οι πληροφορίες που αναζητούν οι χρήστες είναι άμεσα συσχετισμένες με μία περιοχή ενδιαφέροντος, η τοποθέτηση ενός εξυπηρετητή MEC σε αυτήν αποτελεί ιδανική επιλογή. Ο εξυπηρετητής MEC επεξεργάζεται τα δεδομένα που λαμβάνει από τις εφαρ-

μογές επαυξημένης πραγματικότητας και επιστρέφει σε αυτές πληροφορίες που είναι αποθηκευμένες σε ένα τοπικό data center. Επιπλέον, μπορεί να επικοινωνεί με κάποιον κεντρικό εξυπηρετητή περιεχομένου, προκειμένου να αποκτήσει τυχόν δεδομένα που δεν είναι άμεσα διαθέσιμα σε αυτόν.

ii) Υπηρεσίες cloud χαμηλής καθυστέρησης

Αυτές οι εφαρμογές απαιτούν την εξυπηρέτηση πολλαπλών, συνήθως, χρηστών με όσο το δυνατόν χαμηλότερη καθυστέρηση. Κατεξοχήν εφαρμογές αυτού του τύπου είναι τα διαδραστικά διαδικτυακά παιχνίδια, στα οποία η ελάχιστη και ίση καθυστέρηση μεταξύ των χρηστών είναι κρίσιμη για τη βελτίωση της εμπειρίας αυτών. Ένα άλλο παράδειγμα είναι η πρόσβαση σε μία απομακρυσμένη εικονική μηχανή, η οποία χρειάζεται υψηλότερη υπολογιστική ισχύ από αυτή που διαθέτει μία φορητή συσκευή.

Οι εφαρμογές αυτού του τύπου φιλοξενούνται, συνήθως, σε εξυπηρετητές εντός του διαδικτύου, οπότε δεν είναι εφικτή η ικανοποίηση των αναγκών τους. Η τοποθέτηση εξυπηρετητών MEC κοντά στους σταθμούς βάσης ενός κυψελωτού συστήματος διευκολύνει την κατανάλωση τέτοιων υπηρεσιών από κινούμενους χρήστες. Η εφαρμογή που τρέχει στη συσκευή ενός χρήστη μπορεί να αναθέτει ένα μέρος του υπολογιστικού φορτίου στον εξυπηρετητή MEC, ο οποίος επικοινωνεί παράλληλα με τον κεντρικό εξυπηρετητή, για την απόκτηση περαιτέρω δεδομένων. Επιπλέον, ο εξυπηρετητής MEC έχει τη δυνατότητα να διατηρεί τις απαιτήσεις των εφαρμογών σε καθυστέρηση, δίνοντας προτεραιότητα στους χρήστες που απομακρύνονται από αυτόν, ή μετακινώντας μία εφαρμογή σε κάποιον γειτονικό εξυπηρετητή, όταν το κρίνει απαραίτητο.

iii) Πρόταση υπηρεσιών βασισμένων στην τοποθεσία

Σε πολλές περιπτώσεις, το ενδιαφέρον των χρηστών σχετίζεται σε μεγάλο βαθμό με την περιοχή στην οποία βρίσκονται. Για παράδειγμα, υπάρχει μεγάλη πιθανότητα ένας επισκέπτης μουσείου να αναζητήσει περισσότερες πληροφορίες για ένα έκθεμα, ενώ ένας πελάτης πολυκαταστήματος για κάποιο προϊόν. Είναι λογικό, λοιπόν, ότι οι συχνότερες αναζητήσεις δεν χρειάζεται να υποστούν τη χρονοβόρα μεταφορά από το δίκτυο κορμού. Με την εγκατάσταση ενός εξυπηρετητή MEC πλησίον ενός πολυκαταστήματος, οι καταναλωτές μπορούν να ενημερώνονται κατά τη διάρκεια των αγορών τους για προϊόντα που πιθανώς να τους ενδιαφέρουν. Μάλιστα, οι προτάσεις είναι εξατομικευμένες για κάθε χρήστη, με βάση προσωπικές πληροφορίες (πχ. ιστορικό αναζήτησης) που στέλνουν οι συσκευές αυτών.

3.3.2 Υπηρεσίες third-party

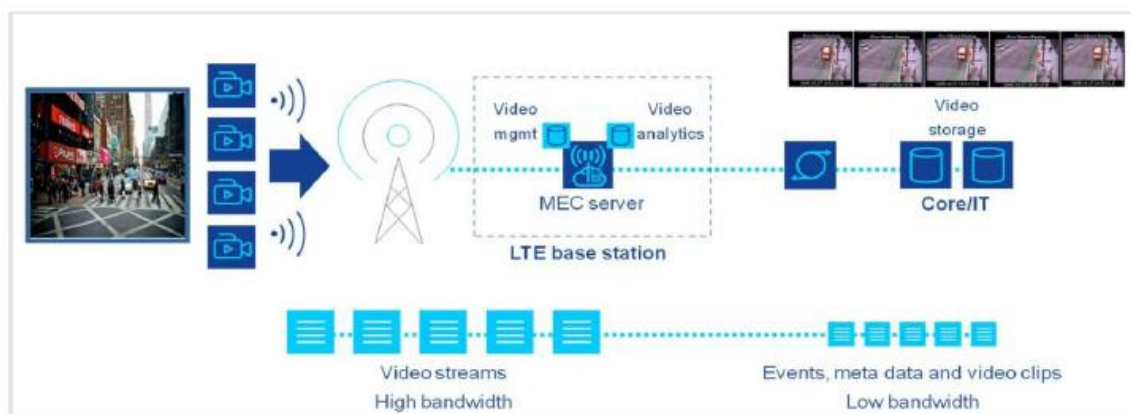
i) Ενεργός εντοπισμός της θέσης συσκευών

Αυτή η περίπτωση χρήσης συμβάλλει στην εύρεση της θέσης συσκευών, όταν δεν υπάρχει κάλυψη GPS στην περιοχή τους (πχ. σε εσωτερικούς χώρους). Ο εξυπηρετητής MEC φιλοξενεί εφαρμογές που εκτελούν αλγορίθμους εντοπισμού τοποθεσίας με βάση τις μετρήσεις που λαμβάνει το δίκτυο από τις συσκευές. Οι συντεταγμένες των χρηστών προωθούνται στον εξυπηρετητή ενός third-party, ο οποίος με τη σειρά του προσφέρει σε

αυτούς υπηρεσίες βασιζόμενες στη θέση τους. Οι πιθανές εφαρμογές αυτού περιλαμβάνουν την αποστολή διαφημίσεων, την παρακολούθηση και τη διαχείριση των επισκεπτών ενός χώρου, τις έξυπνες πόλεις κλπ.

ii) Ανάλυση ροής βίντεο

Σε αυτήν την ομάδα, εντάσσονται καινοτόμες εφαρμογές που βασίζονται στη συλλογή και ανάλυση υψηλού όγκου δεδομένων, όπως η καταγραφή ζωντανού βίντεο. Τέτοια παραδείγματα αφορούν την παρακολούθηση μίας περιοχής μέσω, για παράδειγμα, της καταγραφής και ταυτοποίησης των πινακίδων εισερχόμενων οχημάτων ή την εξουσιοδότηση πρόσβασης με χρήση αναγνώρισης προσώπου. Χωρίς τη χρήση του MEC, η ανάλυση της ροής βίντεο που καταγράφουν οι κάμερες ενός χώρου πρέπει να εκτελεστεί είτε σε κάποιο κεντρικό data center είτε από τις ίδιες τις κάμερες. Η πρώτη λύση επιβαρύνει σημαντικά το δίκτυο κορμού, ενώ η δεύτερη αυξάνει το κόστος του συστήματος παρακολούθησης. Αντίθετα, η εγκατάσταση ενός εξυπηρετητή MEC στον προς παρακολούθηση χώρο επιλύει και τα δύο ανωτέρω προβλήματα. Η επεξεργασία της καταγραφής των καμερών μπορεί να ανατεθεί εξ ολοκλήρου στον εξυπηρετητή MEC, ο οποίος με τη σειρά του προωθεί προς το δίκτυο κορμού μόνο απαραίτητα δεδομένα που εξάγει από τις ροές βίντεο, με πολύ χαμηλότερο ρυθμό μετάδοσης.



Σχήμα 3.3 Ανάλυση ροής βίντεο [29]

iii) Internet of Things

Οι υπηρεσίες IoT χαρακτηρίζονται από εξαιρετικά υψηλό αριθμό συσκευών με περιορισμένους πόρους, όπως ηλεκτρικές συσκευές, οχήματα ή άλλα αντικείμενα, που είναι εξοπλισμένα με αισθητήρες και διαθέτουν δυνατότητα επικοινωνίας. Το πλήθος των συνδεδεμένων IoT συσκευών αυξάνεται ραγδαία, με προβλέψεις για αύξηση από 8.4 δις το 2017 σε περισσότερες από 20 δις συσκευές έως το 2020 [31]. Στην περίπτωση που οι συσκευές διαθέτουν δυνατότητα επικοινωνίας μέσω κάποιου κυψελωτού συστήματος, τα δεδομένα που αυτές παράγουν επιβαρύνονται σημαντικά, λόγω της ανάγκης για συλλογή και επεξεργασία αυτών από μία κεντρική οντότητα.

Το MEC αποτελεί την ιδανική λύση για αυτό το σενάριο, παίζοντας το ρόλο της πύλης IoT (IoT gateway). Οι εξυπηρετητές MEC συλλέγουν τα δεδομένα που αποστέλλονται από όλες τις συσκευές εντός μίας περιοχής και προωθεί συγκεντρωτικά μηνύματα προς τις

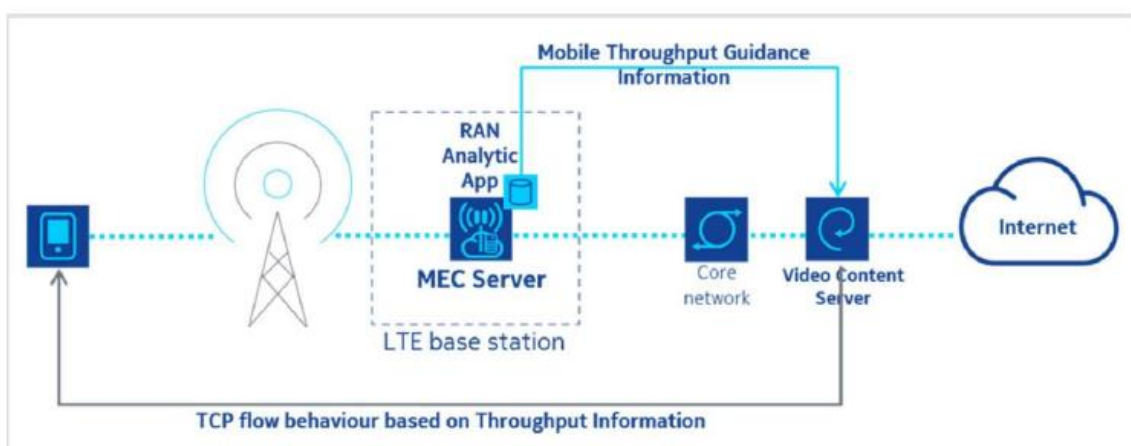
κεντρικές οντότητες του δικτύου. Μπορούν, επίσης, να αναλάβουν ένα μέρος της επεξεργασίας των δεδομένων, με την παροχή υπολογιστικής ισχύος και μνήμης στις εφαρμογές IoT, και να εξάγουν αναλυτικές μηνυμάτων. Οι αναλυτικές αυτές μπορούν να αποθηκευτούν σε βάσεις δεδομένων εντός των εξυπηρετητών MEC και να αξιοποιηθούν για τη βελτίωση της επίδοσης των εφαρμογών και των συσκευών.

3.3.3 Υπηρεσίες βελτίωσης της απόδοσης του δικτύου

i) Βελτιστοποίηση υπηρεσιών βίντεο

Η μεταφόρτωση πολυμεσικού περιεχομένου γίνεται, συνήθως, με χρήση του HTTP, το οποίο λειτουργεί πάνω από TCP. Το TCP χρησιμοποιεί μηχανισμούς ανίχνευσης της συμφόρησης του δικτύου, οι οποίοι, όμως, οδηγούν σε αναποτελεσματική χρησιμοποίηση των ασύρματων πόρων, όταν η μετάδοση πραγματοποιείται μέσω κυψελωτού συστήματος. Αυτό συμβαίνει γιατί το TCP θεωρεί ότι η συμφόρηση του δικτύου είναι η κύρια αιτία απωλειών πακέτων, όπως πράγματι συμβαίνει στα ενσύρματα δίκτυα. Αντίθετα, στα κυψελωτά δίκτυα, το μεγαλύτερο ποσοστό των απωλειών οφείλεται στις δυσμενείς συνθήκες του ραδιοδιαύλου και στη συνεχή μετακίνηση των χρηστών.

Το MEC μπορεί να συμβάλει στη βελτίωση τόσο της αξιοποίησης του δικτύου, όσο και του QoE των χρηστών. Στο Σχ. 3.4, απεικονίζεται ένας τρόπος αξιοποίησης του MEC για αυτό το σενάριο, που ονομάζεται «Ευφυής επιτάχυνση βίντεο» (Intelligent Video Acceleration). Ο εξυπηρετητής MEC φιλοξενεί μία εφαρμογή, η οποία εκτιμά σχεδόν σε πραγματικό χρόνο το διαθέσιμο throughput στη ραδιοδιεπαφή, με βάση πληροφορίες που λαμβάνει για την κατάσταση του ραδιοδικτύου. Ο εξυπηρετητής παροχής πολυμεσικού περιεχομένου αξιοποιεί τις πληροφορίες που λαμβάνει από αυτήν την εφαρμογή, προκειμένου να προσαρμόσει το ρυθμό μετάδοσης που λαμβάνει κάθε χρήστης. Κάτι τέτοιο επιτυγχάνεται με την προσαρμογή του μεγέθους του παραθύρου εκπομπής (συμφόρησης) του TCP ανάλογα με τις συνθήκες του ραδιοδιαύλου.



Σχήμα 3.4 Ευφυής επιτάχυνση βίντεο [29]

ii) Τοπική αποθήκευση περιεχομένου

Η ραγδαία εξάπλωση των διαφόρων «έξυπνων» φορητών συσκευών έχει οδηγήσει σε σημαντική αύξηση της ζήτησης υπηρεσιών βίντεο υψηλής ανάλυσης. Ένα σύνηθες

φαινόμενο είναι η μαζική αναζήτηση συγκεκριμένου περιεχομένου σε μία γεωγραφική περιοχή, λόγω της εξάπλωσης αυτού από τα μέσα κοινωνικής δικτύωσης. Σε αυτές τις περιπτώσεις, το δίκτυο αδυνατεί να παραδώσει το περιεχόμενο σε όλους τους χρήστες με εξασφαλισμένο QoS. Η προσωρινή αποθήκευση (caching) του πιο συχνά αναζητούμενου περιεχομένου σε ένα τοπικό data center μπορεί να μειώσει το βαθμό συμφόρησης του δικτύου κορμού και συγχρόνως να βελτιώσει την εμπειρία των καταναλωτών.

iii) Βελτιστοποίηση backhaul

Στα σημερινά συστήματα, το δίκτυο ραδιοπρόσβασης δεν διαθέτει γνώση για το δίκτυο οπισθόζευξης (backhaul) και αντίστροφα. Η μείωση της χωρητικότητας του δικτύου backhaul δεν γίνεται αντιληπτή από το δίκτυο πρόσβασης, ενώ παράλληλα το backhaul δεν έχει επίγνωση για τις τρέχουσες απαιτήσεις σε πόρους. Μία εφαρμογή που γίνεται εφικτή με τη χρήση του MEC θα συνδυάζει τις πληροφορίες που λαμβάνει για την κατάσταση των δικτύων πρόσβασης και backhaul, με σκοπό τη βέλτιστη αξιοποίηση των πόρων του τελευταίου. Η βελτιστοποίηση μπορεί να επιτευχθεί με διαμόρφωση της κίνησης που λαμβάνει κάθε εφαρμογή ή με κατάλληλη μεταβολή της ισχύος εκπομπής της μικροκυματικής ζεύξης, ανάλογα με την απαιτούμενη χωρητικότητα.

3.4 Network Function Virtualization

3.4.1 Πλεονεκτήματα NFV

Πριν προχωρήσουμε στην αρχιτεκτονική του συστήματος MEC, κρίνεται απαραίτητο να γίνει αναφορά στην τεχνολογία NFV (Network Function Virtualization), καθώς αποτελεί αναπόσπαστο τμήμα του MEC. Σε αντίθεση με τα τρέχοντα δίκτυα, τα οποία αποτελούνται κυρίως από φυσικές οντότητες, όπως εξυπηρετητές, μεταγωγείς και δρομολογητές, τα δίκτυα βασισμένα σε NFV αποσκοπούν στο διαχωρισμό των λειτουργιών του δικτύου από το υλικό (hardware) στο οποίο τρέχουν.

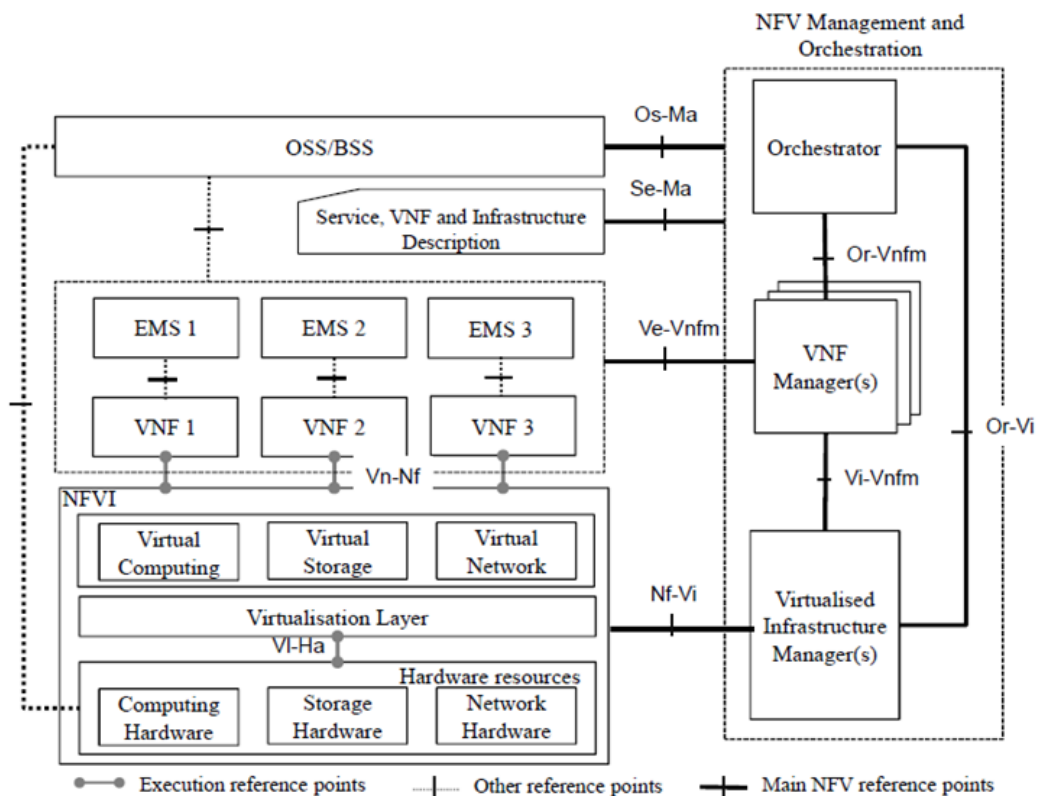
Οι διάφορες λειτουργίες που απαρτίζουν ένα δίκτυο NFV είναι αποκλειστικά οντότητες λογισμικού και ονομάζονται VNFs (Virtual Network Functions). Οι VNFs είναι στην ουσία συλλογή από μία ή περισσότερες εικονικές μηχανές (Virtual Machines – VMs) και μπορούν να τρέχουν είτε στην ίδια είτε σε διαφορετικές συσκευές, είτε ακόμη και σε δίκτυα διαφορετικών διαχειριστών. Ένα ακόμη χαρακτηριστικό των VNFs είναι ότι η λειτουργική τους συμπεριφορά είναι ανεξάρτητη από αυτή των φυσικών λειτουργιών του δικτύου (Physical Network Function – PNF), δηλαδή μία NF γίνεται αντιληπτή από εξωτερικές οντότητες με τον ίδιο τρόπο, ανεξαρτήτως του αν αυτή είναι VNF ή PNF. Επομένως, η τεχνολογία NFV επιτρέπει την ευκολότερη και οικονομικότερη ανάπτυξη και κλιμάκωση των δικτύων, αφού η προσθήκη νέων λειτουργιών σε αυτά μπορεί να γίνει με την ανάπτυξη και εγκατάσταση λογισμικού, χωρίς να είναι απαραίτητη η αγορά υλικού ειδικού σκοπού. Επιπλέον, η NFV προσφέρει στους διαχειριστές των δικτύων ευελιξία στον τρόπο ανάθεσης των VNFs στο hardware που αυτοί διαθέτουν, προκειμένου να βελτιστοποιήσουν την απόδοση του δικτύου, τοποθετώντας τις VNFs στα κατάλληλα σημεία. Τέλος, όπως και στην περίπτωση του MEC, η σύνταξη τυποποιημένων και ανοικτών προδιαγραφών μεταξύ των VNFs και της δικτυακής υποδομής θα επιτρέψει σε διαφορετικούς

πωλητές περιεχομένου να αναπτύξουν καινοτόμες υπηρεσίες και να επωφεληθούν από αυτές.

3.4.2 Αρχιτεκτονική NFV

Η ανάπτυξη ανοικτών προδιαγραφών για το NFV ξεκίνησε από τον ETSI το 2012, με την ίδρυση του NFV-ISG (Industry Specification Group) [32]. Αρχικός στόχος ήταν ο καθορισμός των περιπτώσεων εφαρμογής του NFV και των απαιτήσεων που πρέπει να ικανοποιεί, ενώ ακολούθησε η αρχιτεκτονική του συστήματος NFV. Τα επόμενα χρόνια, δημοσιεύθηκαν τρεις εκδόσεις για το NFV, η τελευταία εκ των οποίων είναι σε εξέλιξη αυτήν την περίοδο. Σκοπός τους είναι η ανάλυση των επιμέρους στοιχείων που απαρτίζουν ένα δίκτυο NFV, προκειμένου να εκπληρωθούν οι στόχοι που αρχικά τέθηκαν, καθώς και νέοι στόχοι που προκύπτουν συνεχώς από τις ανάγκες της βιομηχανίας.

Η αρχιτεκτονική που προτάθηκε από τον ETSI για την NFV αποτελείται από τρία μέρη: τις VNFs, την υποδομή NFV (NFV Infrastructure – NFVI) και τη διαχείριση και ενορχήστρωση NFV (NFV Management and Orchestration – NFV MANO). Μία ή περισσότερες VNFs ελέγχονται από ένα σύστημα διαχείρισης στοιχείων (Element Management System – EMS). Η NFVI περιλαμβάνει τους φυσικούς πόρους (υπολογιστικούς, αποθηκευτικούς, δικτυακούς) και τους αναθέτει στις VNFs μετά από μετατροπή αυτών σε εικονικούς πόρους. Η παροχή των πόρων στις VNFs γίνεται μέσω του στρώματος εικονικής παρουσίασης (Virtualization Layer). Η NFM MANO είναι υπεύθυνη για ολόκληρο το σύστημα NFV και καλύπτει τις λειτουργίες της διαχείρισης και ενορχήστρωσης του κύκλου ζωής (LifeCycle Management – LCM) των πόρων (φυσικών ή λογισμικού), καθώς και του κύκλου ζωής των VNFs (ενεργοποίηση και απενεργοποίηση αυτών).

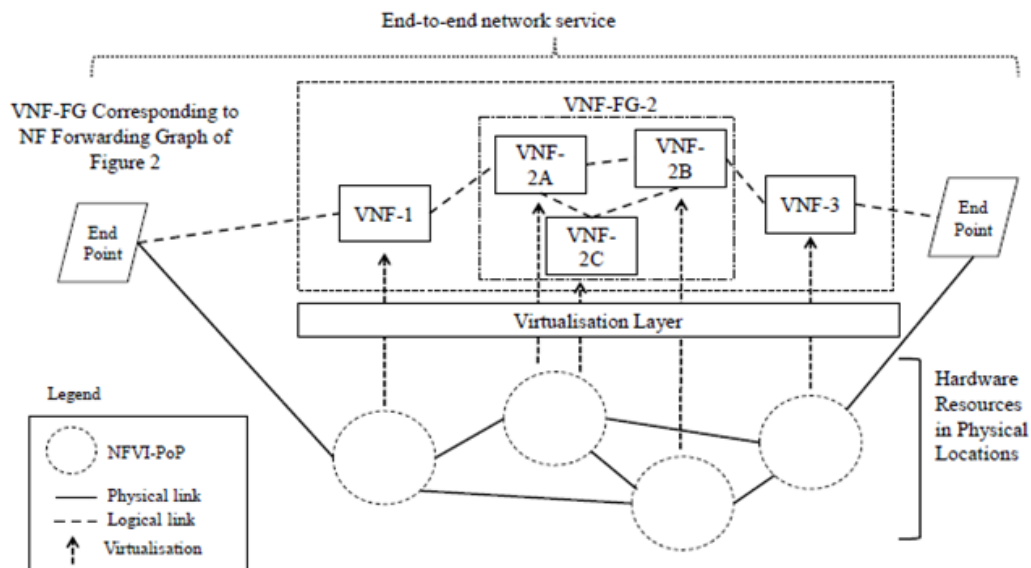


Σχήμα 3.5 Αρχιτεκτονική NFV [33]

Τα στοιχεία της NFVI επικοινωνούν μεταξύ τους και με τις VNFs μέσω κατάλληλων σημείων αναφοράς. Το στρώμα εικονικής παρουσίασης ελέγχει τους υλικούς πόρους μέσω της διεπαφής VI-Ha, η οποία δημιουργεί το φυσικό περιβάλλον εκτέλεσης των VNFs και συλλέγει πληροφορίες της κατάστασης του υλικού, που αξιοποιούνται από τη MANO του συστήματος. Το εικονικό περιβάλλον εκτέλεσης μιας VNF δημιουργείται μέσω μιας διεπαφής Vn-Nf, μεταξύ αυτής και της NFVI.

Η NFV MANO περιλαμβάνει τρία επιμέρους στοιχεία. Ο διαχειριστής εικονικής υποδομής (Virtualized Infrastructure Manager – VIM) ελέγχει και διαχειρίζεται την αλληλεπίδραση των VNFs με τους πόρους που παρέχει η NFVI σε αυτές. Για τον σκοπό αυτό, επικοινωνεί με την NFVI μέσω της διεπαφής Nf-Vi. Ο ρόλος της τελευταίας είναι η ανάθεση εικονικών πόρων στις VNFs σύμφωνα με τις αιτήσεις που λαμβάνει ο VIM από άλλες οντότητες, ενώ παράλληλα αυτή χρησιμοποιείται για ανταλλαγή πληροφοριών της κατάστασης και ρύθμισης των πόρων μεταξύ NFVI και MANO. Σε ένα σύστημα NFV, μπορεί να υπάρχουν περισσότεροι του ενός VIMs.

Ο διαχειριστής VNF (VNF Manager – VNFM) εκτελεί τις σχετικές λειτουργίες με τον κύκλο ζωής των VNFs. Σε συνεργασία με έναν VIM, μπορεί να ζητήσει τη δημιουργία των VMs και να ενεργοποιήσει την έναρξη και την αρχική ρύθμιση των VNFs. Η επικοινωνία του VNFM με τον VIM πραγματοποιείται μέσω της διεπαφής Vi-Vnfm, η οποία μεταφέρει τις αιτήσεις κατανομής πόρων από τον πρώτο, ενώ παράλληλα χρησιμοποιείται για την ανταλλαγή πληροφοριών κατάστασης και ρύθμισης των εικονικών πόρων. Οι πληροφορίες αυτές είτε παράγονται από τις VNFs και την NFVI για ειδοποιήσεις του συστήματος, είτε από τον VNFM για την τροποποίηση των VNFs με βάση τις αναφορές που λαμβάνει. Όπως και στην περίπτωση του VIM, ένα σύστημα NFV μπορεί να διαθέτει πολλούς VNFMs, καθένας από τους οποίους μπορεί να εξυπηρετεί μία ή περισσότερες VNFs.



Σχήμα 3.6 Γράφος προώθησης μίας δικτυακής υπηρεσίας [33]

Οι συνεχείς γραμμές αντιστοιχούν σε φυσικές συνδέσεις μεταξύ των υποδομών του δικτύου, ενώ οι διακεκομμένες αναπαριστούν λογικές συνδέσεις μεταξύ των VNFs. Ο τρόπος με τον οποίο οι NFs εφαρμόζονται στη φυσική υποδομή δεν είναι γνωστός στα ακραία σημεία.

Η τελευταία μονάδα του MANO είναι ο NFV Orchestrator (NFVO), ο οποίος συντονίζει τη λειτουργία ολόκληρου του δικτύου. Είναι υπεύθυνος για την πραγματοποίηση των δικτυακών υπηρεσιών στην NFVI και για τη διαχείριση των περιγραφέντων δικτυακών υπηρεσιών (Network Service Descriptors – NSDs), οι οποίοι ορίζουν την τοπολογία μιας υπηρεσίας. Μια υπηρεσία μπορεί να οριστεί ως ένα μονοπάτι (γράφος) που ενώνει πολλαπλές VNFs, ενώ το σύστημα δημιουργεί τη συνδεσιμότητα μεταξύ αυτών και της δικτυακής υποδομής. Ο NFVO συντονίζει τους δύο διαχειριστές της MANO και πραγματοποιεί τις σχετικές αιτήσεις με τον κύκλο ζωής των εικονικών πόρων και των VNFs προς τους VIM και VNFM αντίστοιχα. Επίσης, συμμετέχει στην ανταλλαγή και συλλογή πληροφοριών κατάστασης των πόρων και των VNFs. Οι αιτήσεις που διαχειρίζεται ο NFVO προέρχονται από το OSS/BSS (Operations Support System/Business Support System) του διαχειριστή του δικτύου, στο οποίο προωθούνται και όλες οι πληροφορίες που συλλέγονται από τα επιμέρους στοιχεία του δικτύου.

3.5 Αρχιτεκτονική MEC

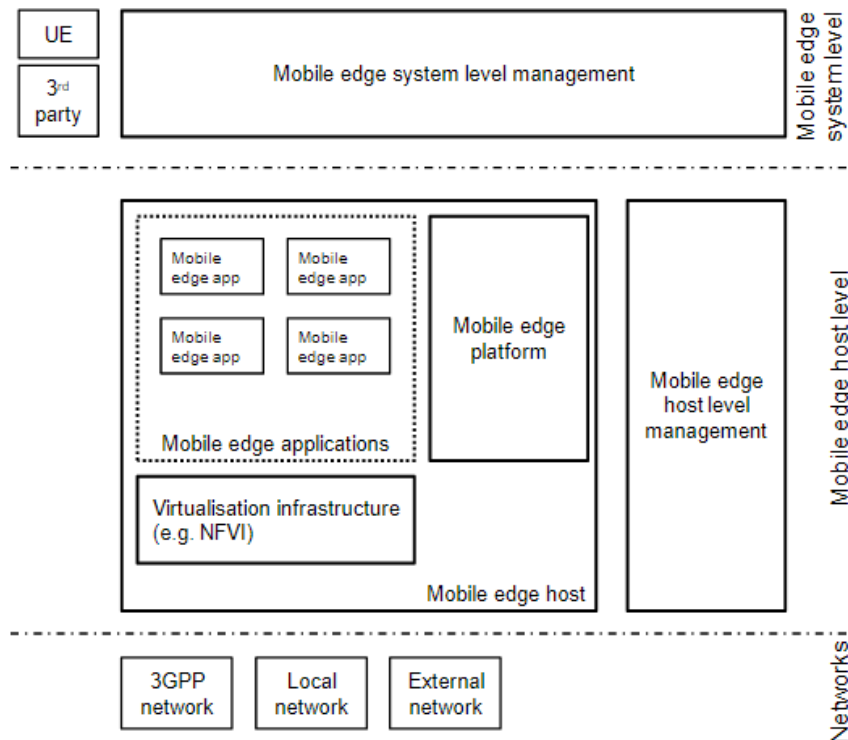
3.5.1 Σκελετός αρχιτεκτονικής

Η προτυποποίηση του MEC ξεκίνησε επίσης από τον ETSI με την ίδρυση του MEC ISG [36] το 2014. Στόχος αυτού του ISG είναι η δημιουργία ενός ανοικτού, τυποποιημένου περιβάλλοντος, που θα παρέχει δυνατότητες cloud computing στο RAN, και στο οποίο οι πάροχοι υπηρεσιών και περιεχομένου, καθώς και οι τρίτοι συνεργάτες θα μπορούν να εντάξουν αποτελεσματικά τις εφαρμογές που αναπτύσσουν. Οι πρώτες δημοσιεύσεις αφορούσαν τις απαιτήσεις που πρέπει να ικανοποιεί ένα σύστημα MEC, καθώς και την αρχιτεκτονική αναφοράς αυτού. Τα τελευταία δύο χρόνια, δημοσιεύονται συμπληρωματικές προδιαγραφές, οι οποίες ασχολούνται με συγκεκριμένα χαρακτηριστικά του συστήματος.

Ενώ αρχικά το MEC προοριζόταν για χρήση στα δίκτυα 3GPP, στην πορεία της έρευνας έγινε αντιληπτό ότι μπορεί να αξιοποιηθεί και σε άλλου είδους δίκτυα, όπως WiFi ή σταθερής ασύρματης πρόσβασης. Επομένως, το MEC μετονομάστηκε από «Mobile Edge Computing» σε «Multi-access Edge Computing», ώστε να εκφράζει ακριβέστερα τους στόχους του MEC ISG [37]. Στην παρούσα εργασία, εξετάζεται αποκλειστικά η εφαρμογή του MEC σε δίκτυα της 3GPP, οπότε οι δύο όροι θεωρούνται ισοδύναμοι.

Οι βασικές μονάδες που απαρτίζουν ένα σύστημα MEC κατά ETSI φαίνονται στο Σχ. 3.7. Το σύστημα αποτελείται ουσιαστικά από δύο τμήματα, το επίπεδο του host και το επίπεδο συστήματος. Το επίπεδο του host αποτελείται από τον ME (Mobile Edge) host και τη μονάδα διαχείρισης αυτού, ενώ το επίπεδο συστήματος είναι υπεύθυνο για τη διαχείριση ολόκληρου του συστήματος MEC. Στο σχήμα φαίνεται και ένα τρίτο επίπεδο που περιλαμβάνει τα εξωτερικά δίκτυα (όπως 3GPP, WiFi κλπ.), το οποίο όμως δεν αποτελεί μέρος του MEC. Το σκεπτικό με το οποίο αναπτύχθηκε το MEC είναι να μπορεί να εφαρμοστεί πάνω από οποιαδήποτε υποκείμενη δικτυακή υποδομή, ανεξάρτητα από το είδος αυτής. Επίσης, η παρουσία του MEC πρέπει να είναι διαφανής στην αρχιτεκτονική του υπάρχοντος δικτύου, υπό την έννοια ότι οι τερματικές συσκευές και τα υπόλοιπα στοιχεία του δικτύου (πχ. του EPC) δεν αντιλαμβάνονται την ύπαρξη του MEC. Η σύνδεση με τα

στοιχεία των εξωτερικών δικτύων δεν ορίζεται σε πρότυπα και μπορεί να γίνει με διάφορες επιλογές.

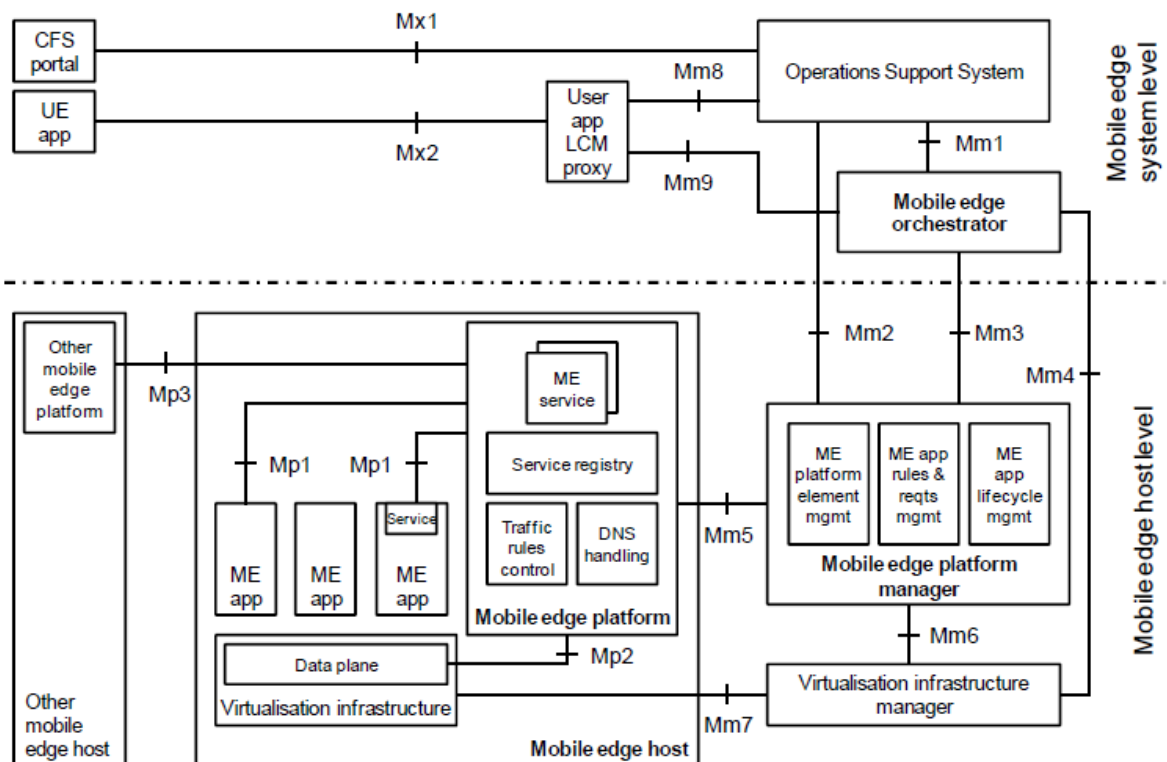


Σχήμα 3.7 Σκελετός αρχιτεκτονικής MEC [38]

Ο ME host είναι το στοιχείο του δικτύου στο οποίο τρέχουν οι εφαρμογές MEC. Οι ME hosts μπορούν να τοποθετηθούν σε διάφορα σημεία, όπως σε κόμβους ραδιοπρόσβασης ή σε σημεία συνάθροισης αυτών, σε gateways προς τα εξωτερικά δίκτυα ή σε καταναμμένα data centers. Οι εφαρμογές MEC είναι αποκλειστικά οντότητες λογισμικού, που τρέχουν πάνω από μία virtualization infrastructure, αντίστοιχα με την περίπτωση των VNFs πάνω από την NFVI. Σύμφωνα με τις απαιτήσεις που τέθηκαν από τον ETSI, το σύστημα MEC προσπαθεί να επαναχρησιμοποιήσει όσο το δυνατόν περισσότερο την NFVI που έχει οριστεί σε προηγούμενες προδιαγραφές, πιθανώς με κάποιες βελτιώσεις.

3.5.2 Βασικές μονάδες και σημεία αναφοράς

Στο Σχ. 3.8, απεικονίζεται με μεγαλύτερη λεπτομέρεια η αρχιτεκτονική ενός συστήματος MEC και έχουν σχεδιαστεί και τα σημεία αναφοράς μεταξύ των διαφόρων μονάδων αυτού. Στο σχήμα δεν φαίνεται η σύνδεση με τα εξωτερικά δίκτυα, αφού, όπως προαναφέρθηκε, αυτά δεν αποτελούν τμήμα του MEC. Ο ME host περιλαμβάνει τις ME εφαρμογές, την ME platform (MEP) και την υποδομή εικονικής παρουσίασης (Virtualization Infrastructure – VI). Το επίπεδο ελέγχου του host αποτελείται από δύο μονάδες, το διαχειριστή της υποδομής εικονικής παρουσίασης (VIM) και το διαχειριστή της ME platform (ME platform manager – MEPM). Οι κύριες μονάδες της διαχείρισης συστήματος είναι το Operations Support System (OSS) και ο ME orchestrator (MEO). Σε αυτό το επίπεδο περιλαμβάνονται και άλλα στοιχεία, που συμμετέχουν στην επικοινωνία του συστήματος MEC με τα εξωτερικά δίκτυα.

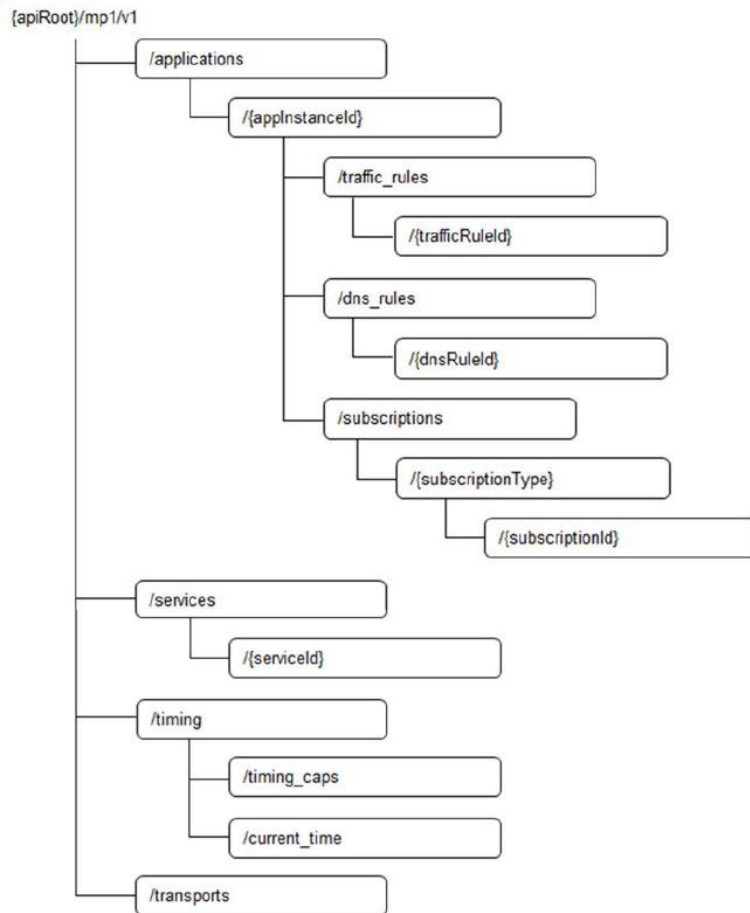


Σχήμα 3.8 Αρχιτεκτονική αναφοράς MEC [38]

3.5.2.1 Mobile Edge Platform

Η MEP εξασφαλίζει στον host την αναγκαία λειτουργικότητα για να τρέξουν οι εφαρμογές πάνω από την VI, η οποία παρέχει τους απαραίτητους πόρους (υπολογιστικούς, αποθηκευτικούς και δικτυακούς) σε αυτές. Η VI περιλαμβάνει το στρώμα δεδομένων του host, οπότε δρομολογεί κίνηση δεδομένων μεταξύ εφαρμογών, υπηρεσιών, εξυπηρετητών DNS και εξωτερικών δικτύων με βάση τους κανόνες κίνησης που λαμβάνει από την MEP. Οι εντολές της MEP προς το στρώμα δεδομένων της VI παρέχονται μέσω της διεπαφής Mp2. Η MEP προσφέρει, επίσης, υπηρεσίες προς κατανάλωση από τις εφαρμογές. Παράλληλα, οι εφαρμογές που τρέχουν στον host μπορούν να παρέχουν υπηρεσίες προς την MEP ή άλλες εφαρμογές. Η MEP διατηρεί ένα μητρώο υπηρεσιών (service registry), με πληροφορίες για όλες τις υπηρεσίες που είναι διαθέσιμες από αυτήν (όπως έκδοση, διαθεσιμότητα, κατάσταση υπηρεσίας), το οποίο χρησιμοποιείται από τις εφαρμογές, ώστε αυτές να ανακαλύψουν ή να διαφημίσουν άλλες υπηρεσίες.

Η MEP επικοινωνεί με τις εφαρμογές μέσω διεπαφών Mp1. Ένας από τους ρόλους της Mp1 είναι η παροχή της σχετικής με τις υπηρεσίες επικοινωνίας, συμπεριλαμβανομένων της εγγραφής και αναζήτησης υπηρεσιών. Οι άλλες λειτουργίες της περιλαμβάνουν την παροχή της πληροφορίας για τη διαθεσιμότητα των εφαρμογών, την εφαρμογή κανόνων κίνησης και DNS, παροχή πληροφορίας για την ώρα κ.α. Ο τρόπος με τον οποίο οι εφαρμογές επικοινωνούν με τη MEP μέσω της Mp1 ορίζεται στο [40]. Η ανταλλαγή των πληροφοριών γίνεται με τη χρήση ενός RESTful API, δηλαδή μέσω ερωτήσεων και απαντήσεων HTTP. Κάνοντας μία ερώτηση με μία από τις μεθόδους GET, POST, PUT, PATCH και DELETE, οι εφαρμογές μπορούν είτε να ζητήσουν κάποια πληροφορία από τη MEP είτε να δημιουργήσουν και να τροποποιήσουν κάποια εγγραφή. Οι εγγραφές σχετικές με τις εφαρμο-



Σχήμα 3.9 Δομή των URI για το API της Mp1 [40]

Λειτουργία	Μέθοδος
Ανάκτηση πληροφοριών για μία λίστα υπηρεσιών	GET
Δημιουργία μίας εγγραφής υπηρεσίας	POST
Ανάκτηση πληροφοριών για μία συγκεκριμένη υπηρεσία	GET
Ανανέωση μίας εγγραφής υπηρεσίας	PUT
Ανάκτηση πληροφοριών για μία λίστα από συνδρομές σε υπηρεσίες	GET
Δημιουργία μίας νέας συνδρομής σε υπηρεσία	POST
Ανάκτηση πληροφοριών για μία συνδρομή σε υπηρεσία	GET
Διαγραφή μίας εγγραφής συνδρομής	DELETE
Ανάκτηση πληροφοριών για μία λίστα κανόνων κίνησης	GET
Ανάκτηση πληροφοριών για έναν κανόνα κίνησης	GET
Ανανέωση μίας εγγραφής κανόνα κίνησης	PUT
Ανάκτηση πληροφοριών για μία λίστα κανόνων DNS	GET
Ανάκτηση πληροφοριών για έναν κανόνα DNS	GET
Ανανέωση μίας εγγραφής κανόνα DNS	PUT
Ανάκτηση πληροφοριών για τις ικανότητες συγχρονισμού	GET
Ανάκτηση πληροφορίας για την τρέχουσα ώρα	GET
Ανάκτηση πληροφοριών για τους διαθέσιμους τρόπους μεταφοράς	GET

Πίνακας 3.1 API της διεπαφής Mp1 [40]

γές και τις υπηρεσίες έχουν οριστεί ως τύποι δεδομένων, που βρίσκονται αποθηκευμένοι σε κάποιο URI (Uniform Resource Identifier) εντός της MEP και αναπαρίστανται, συνήθως, σε μορφή JSON ή YAML [44]. Στον Πιν. 3.1, παρουσιάζονται οι δυνατότητες που προσφέρει το Mpr1 API και οι μέθοδοι με τις οποίες μπορούν να πραγματοποιηθούν.

3.5.2.2 Διαχείριση host

Ο VIM έχει παρόμοιο ρόλο με την αντίστοιχη βαθμίδα του συστήματος NFV. Εκτελεί λειτουργίες σχετικές με τον κύκλο ζωής των εικονικών πόρων, όπως κατανομή αυτών στις εφαρμογές ή διαχείριση και απελευθέρωση αυτών και προετοιμάζει την VI, ώστε αυτή να τρέξει μια εικόνα λογισμικού. Επιπλέον, συλλέγει πληροφορίες επίδοσης και σφαλμάτων σχετικά με τους εικονικούς πόρους και τις προωθεί προς τη διαχείριση συστήματος για περαιτέρω επεξεργασία. Η διαχείριση της VI από τον VIM γίνεται από το σημείο αναφοράς Mm7. Τέλος, όταν υποστηρίζεται, ο VIM πραγματοποιεί την μετεγκατάσταση εφαρμογών είτε εντός του συστήματος MEC είτε σε συνεργασία με κάποιο cloud.

Ο MEPM παρέχει στην MEP λειτουργίες για τη διαχείριση των εφαρμογών. Διαχειρίζεται τον κύκλο ζωής των εφαρμογών και πληροφορεί τον MEO για γεγονότα σχετικά με αυτές. Εκτός από τις εφαρμογές, είναι υπεύθυνος για τη διαχείριση των σχετικών με αυτές κανόνων, όπως εξουσιοδότηση υπηρεσιών, κανόνες κίνησης και ρυθμίσεις DNS. Η ρύθμιση της MEP, των κανόνων και του κύκλου ζωής των εφαρμογών πραγματοποιείται μέσω του Mm5. Επίσης, ο MEPM επικοινωνεί με τον VIM μέσω του Mm6, από τον οποίο λαμβάνει αναφορές σφαλμάτων σχετικών με τους εικονικούς πόρους και μετρήσεις της επίδοσης του συστήματος.

3.5.2.3 Διαχείριση συστήματος

Ο MEO είναι ο πυρήνας της διαχείρισης του συστήματος MEC. Διατηρεί μία συνολική εικόνα του συστήματος με πληροφορίες σχετικές με την τοπολογία αυτού, τους hosts που περιλαμβάνει και τους πόρους και υπηρεσίες που διαθέτει καθένας εξ αυτών. Αυτό του επιτρέπει να επιλέγει τον κατάλληλο host για την έναρξη μίας εφαρμογής, βάσει εκτιμήσεων που κάνει για την καθυστέρηση και το διαθέσιμο εύρος ζώνης, ενώ διαθέτει και την ικανότητα να εκκινεί την μετεγκατάσταση εφαρμογών. Επιπλέον, είναι υπεύθυνος για την έναρξη και τον τερματισμό των εφαρμογών και διατηρεί καταγραφές για όλα τα διαθέσιμα πακέτα εφαρμογών του συστήματος. Επικοινωνεί με τον MEPM, μέσω του Mm3, για τη διαχείριση του κύκλου ζωής των εφαρμογών και την καταγραφή των διαθέσιμων υπηρεσιών και με τον VIM, μέσω του Mm4, με σκοπό τη διαχείριση των εικονικών πόρων του συστήματος και την παρακολούθηση των διαθέσιμων πόρων κάθε host.

Το OSS λαμβάνει αιτήσεις για την έναρξη και τον τερματισμό εφαρμογών είτε κατευθείαν από τα UEs, είτε μέσω της πύλης CFS (Customer Facing Service portal), αν αυτές προέρχονται από τρίτους συνεργάτες, και αποφασίζει ποιες θα κάνει αποδεκτές. Για την αποδοχή των αιτήσεων που προέρχονται από τα UEs συμμετέχει και η μονάδα πληρεξούσιου της διαχείρισης του κύκλου ζωής των εφαρμογών χρήστη (User App lifecycle management Proxy), η οποία ενημερώνει και τα UEs σχετικά με την κατάσταση των εφαρμογών. Το OSS μπορεί, επίσης, να λαμβάνει και αιτήσεις για μετεγκατάσταση εφαρμογών μεταξύ του συστήματος MEC και του εξωτερικού cloud, εφόσον κάτι τέτοιο

υποστηρίζεται από το σύστημα. Οι αιτήσεις που γίνονται αποδεκτές προωθούνται προς τον MEO, μέσω του Mm1, προκειμένου αυτός να ενεργοποιήσει τις ζητούμενες ενέργειες. Το OSS συμμετέχει και στη διαχείριση της επίδοσης, της ρύθμισης και της αναφοράς σφαλμάτων σχετικών με την MEP και για το σκοπό αυτό επικοινωνεί και με τον MERM μέσω του Mm2.

3.5.3 Υπηρεσίες MEC

Η MEP προσφέρει υπηρεσίες στις εφαρμογές προς χρήση, προκειμένου αυτές να αποκτήσουν απαραίτητες πληροφορίες ή λειτουργικότητα. Παράλληλα, οι εφαρμογές μπορούν να προσφέρουν άλλες υπηρεσίες στην MEP, τις οποίες αυτή αξιοποιεί, ώστε, στη συνέχεια, να προσφέρει βελτιωμένες υπηρεσίες. Επίσης, μια εφαρμογή μπορεί να κάνει συνδρομή σε μια υπηρεσία, ώστε να λαμβάνει πληροφορίες όταν τροποποιούνται τα δεδομένα που διαθέτει η MEP σχετικά με αυτήν. Οι τρεις βασικότερες υπηρεσίες που πρέπει να υποστηρίζει το MEC είναι οι πληροφορίες ραδιοδικτύου (Radio Network Information – RNI), οι υπηρεσίες τοποθεσίας (Location Services) και η διαχείριση εύρους ζώνης (Bandwidth Manager). Για κάθε μία από αυτές, έχει οριστεί από τον ETSI ένα RESTful API, το οποίο περιλαμβάνει τις λειτουργίες που πρέπει αυτές να υποστηρίζουν, αντίστοιχα με την επικοινωνία των εφαρμογών και της MEP της παραγράφου 3.5.2.1.

3.5.3.1 Πληροφορίες ραδιοδικτύου

Παρέχει στις εφαρμογές και την MEP πληροφορίες σχετικές με το ραδιοδίκτυο, οι οποίες μπορεί να αφορούν κυψέλη, UE, κλάση QCI κ.α. και μπορεί να ζητούνται για μία χρονική περίοδο. Πιθανές χρήσιμες πληροφορίες είναι:

- Cell-IDs των κυψελών που εξυπηρετεί ο host
- Τοποθεσία κάποιου συνδρομητή
- Ενημερώσεις σχετικές με την κατάσταση του δικτύου, όπως το τρέχον φορτίο μιας κυψέλης
- Μετρήσεις και στατιστικά σχετικά με το UP
- Πληροφορίες σχετικές με τα UEs (πχ. κυψέλη που το εξυπηρετεί, QoS συνδρομητή) που εξυπηρετούνται από τους κόμβους πρόσβασης που σχετίζονται με τον host καθώς και ενημέρωση για αλλαγές αυτών

Λειτουργία	Μέθοδος
Ανάκτηση τρέχουσας κατάστασης ραδιοκομιστών	GET
Ανάκτηση τρέχουσας κατάστασης των PLMN	GET
Ανάκτηση τρέχουσας κατάστασης του κομιστή S1	GET
Ανάκτηση πληροφοριών σχετικών με τους συνδρομητές	GET
Δημιουργία μίας νέας συνδρομής	POST
Τροποποίηση μίας συνδρομής	PUT
Διαγραφή μίας συνδρομής	DELETE
Αποστολή ειδοποιήσεων	POST

Πίνακας 3.2 RNI API [41]

Για την ανάκτηση και την τροποποίηση των ανωτέρω πληροφοριών, ο χρήστης της υπηρεσίας, που μπορεί να είναι είτε εφαρμογή είτε MEP, κάνει ερωτήσεις HTTP στον

εξυπηρετητή RNI. Οι λειτουργίες που υποστηρίζονται από το RNI API παρουσιάζονται στον Πιν. 3.2.

3.5.3.2 Υπηρεσίες τοποθεσίας

Παρέχει στις εφαρμογές και την MEP πρόσβαση σε πληροφορίες σχετικές με την τοποθεσία των χρηστών και των κόμβων του δικτύου πρόσβασης. Τέτοιου είδους πληροφορίες μπορεί να είναι:

- Η τοποθεσία συγκεκριμένων UEs που εξυπηρετούνται από τον host
- Κατάλογος που περιλαμβάνει όλα τα UEs που εξυπηρετούνται από τον host ή μία κατηγορία αυτών
- Πληροφορία για την τοποθεσία όλων των ραδιοκόμβων που σχετίζονται με τον host
- Κατάλογος των UEs που βρίσκονται σε συγκεκριμένη περιοχή
- Τα UEs που εισέρχονται σε και εξέρχονται από συγκεκριμένη περιοχή

Η υπηρεσία τοποθεσίας υποστηρίζει διαφορετικές μορφές αναπαράστασης της θέσης, όπως με γεωγραφικές συντεταγμένες ή με cell-ID.

Λειτουργία	Μέθοδος
Αναζήτηση τοποθεσίας UE	GET
Αναζήτηση πληροφοριών για κάποιο UE	GET
Δημιουργία συνδρομής στην υπηρεσία τοποθεσίας UE	POST
Δημιουργία συνδρομής στην υπηρεσία πληροφοριών UE	POST
Ακύρωση συνδρομής	DELETE
Αναζήτηση ραδιοκόμβου	GET

Πίνακας 3.3 Location API [42]

3.5.3.3 Διαχείριση εύρους ζώνης

Σε έναν host, τρέχουν πολλές εφαρμογές με διαφορετικές απαιτήσεις σε εύρος ζώνης ανά κατεύθυνση, άλλοτε στατικές και άλλοτε δυναμικές, ενώ κάποιες μπορεί να απαιτούν και συγκεκριμένη προτεραιότητα έναντι των υπόλοιπων εφαρμογών. Ο σκοπός της υπηρεσίας αυτής είναι η συλλογή όλων των απαιτήσεων σε εύρος ζώνης και η εκτέλεση κατάλληλων ενεργειών, προκειμένου να βελτιστοποιηθεί η χρήση αυτού. Οι λειτουργίες που υποστηρίζονται από την υπηρεσία αναγράφονται στον Πιν. 3.4.

Λειτουργία	Μέθοδος
Ανάκτηση πληροφοριών για μία λίστα εγγραφών κατανομής BW	GET
Δημιουργία μίας εγγραφής	POST
Ανάκτηση πληροφοριών για μία συγκεκριμένη εγγραφή	GET
Ανανέωση πληροφοριών για μία συγκεκριμένη εγγραφή	PUT
Τροποποίηση των πληροφοριών μίας εγγραφής μέσω αποστολής ανανεώσεων στη δομή δεδομένων	PATCH
Διαγραφή μίας εγγραφής	DELETE

Πίνακας 3.4 Bandwidth Manager API [43]

3.5.4 Υποστήριξη κινητικότητας

Στην περίπτωση κατά την οποία το MEC εφαρμόζεται πάνω από δίκτυο 3GPP, το UE μπορεί να πραγματοποιήσει μεταπομπή από έναν eNB σε άλλον. Για την υποστήριξη της μεταπομπής, είναι απαραίτητο το σύστημα MEC να διατηρεί τη συνδεσιμότητα του UE με τις εφαρμογές MEC που χρησιμοποιεί, ιδιαίτερα όταν οι δύο κυψέλες εξυπηρετούνται από διαφορετικό host. Κάποιες εφαρμογές, όπως αυτές που συλλέγουν δεδομένα κίνησης για ένα συγκεκριμένο host, δεν χρειάζεται να διατηρούν την επικοινωνία με το UE κατά την αλλαγή του host. Όσον αφορά τις υπόλοιπες, δηλαδή όσες επηρεάζονται από την κινητικότητα, υπάρχουν διαφορετικά σενάρια διατήρησης της συνδεσιμότητας:

- Διατήρηση της συνδεσιμότητας μεταξύ UE και εφαρμογής: καθώς το UE κινείται, η κίνηση μεταξύ αυτού και της εφαρμογής δρομολογείται προς τον host που το εξυπηρετεί κάθε φορά. Η λύση αυτή, όμως, μπορεί να οδηγήσει σε σημαντική αύξηση της καθυστέρησης, όταν το UE απομακρυνθεί πολύ από τον αρχικό host.
- Επανατοποθέτηση της κατάστασης της εφαρμογής: κατά την κίνηση του UE, μπορεί το σύστημα να ανιχνεύσει κάποιον νέο host, ο οποίος κρίνεται καταλληλότερος για την εξυπηρέτηση αυτού. Σε αυτήν την περίπτωση, η κατάσταση της εφαρμογής (δηλαδή τα δεδομένα που είναι αποθηκευμένα στη μνήμη της) μπορεί να τοποθετηθεί στην MEP του νέου host, ώστε το UE να εξυπηρετηθεί πλέον από αυτόν. Προκειμένου να γίνει ομαλότερη η μετάβαση του UE από τον ένα host στον άλλο, μια εφαρμογή μπορεί να τρέχει ταυτόχρονα και στους δύο για κάποιο χρονικό διάστημα, κατά το οποίο θα γίνεται ανταλλαγή πληροφοριών μεταξύ των δύο, μέχρι ολόκληρη η κατάστασή της να μεταφερθεί στον νέο host.
- Επανατοποθέτηση της εφαρμογής εντός του συστήματος ME: η εφαρμογή μεταφέρεται εξ ολοκλήρου σε άλλον host. Σε αυτήν την περίπτωση, η επανατοποθέτηση της εφαρμογής εκκινεί από τη διαχείριση του συστήματος και συγκεκριμένα από τον MEO.
- Επανατοποθέτηση της εφαρμογής μεταξύ του συστήματος ME και ενός εξωτερικού περιβάλλοντος cloud: εφόσον υποστηρίζεται, μια εφαρμογή μπορεί να μεταφερθεί από το ME προς κάποιο εξωτερικό cloud ή και αντίστροφα.

Η ανταλλαγή πληροφοριών μεταξύ δύο γειτονικών hosts για την υλοποίηση των ανωτέρω σεναρίων πραγματοποιείται μέσω της διεπαφής Mr3, που συνδέει τις MEPs αυτών.

3.5.5 Ασφάλεια και ρυθμιστικά ζητήματα

Ένα από τα χαρακτηριστικά του MEC είναι ότι επιτρέπει την εκτέλεση εφαρμογών που προέρχονται από διαφορετικούς παρόχους περιεχομένου πάνω από την ίδια δικτυακή υποδομή. Προκειμένου να τεθεί σε εφαρμογή ένα σύστημα MEC, συμμετέχουν φορείς, όπως πάροχοι δικτύου ή περιεχομένου, προγραμματιστές και πωλητές εφαρμογών, καθώς και διαφορετικοί κατασκευαστές MEPs. Αυτή η διαλειτουργικότητα εγείρει σημαντικά ζητήματα ασφαλείας, που αφορούν όλους τους συμμετέχοντες φορείς, και τα οποία καλούνται να επιλυθούν από τους διαχειριστές των συστημάτων MEC.

Καταρχάς, απαιτείται ο συντονισμός των οντοτήτων που αλληλεπιδρούν εντός του συστήματος MEC. Ο διαχειριστής του συστήματος πρέπει να φροντίσει για την απομόνωση μεταξύ των εφαρμογών που τρέχουν σε έναν host, δηλαδή των VMs που τις απαρτίζουν, ώστε όλες οι εφαρμογές να έχουν εξουσιοδοτημένη πρόσβαση στα δεδομένα των

άλλων. Επιπλέον, ένας από τους ρόλους της MEP είναι η επιβεβαίωση ότι κάθε VM έχει πρόσβαση μόνο στους πόρους και τις υπηρεσίες που του έχουν αποδοθεί, προκειμένου να μη γίνεται κατασπατάληση των πόρων από μια κακοσχεδιασμένη ή κακόβουλη εφαρμογή. Η πλειοψηφία των εφαρμογών MEC προέρχεται από εξωτερικές οντότητες, όπως από τρίτους συνεργάτες. Το σύστημα πρέπει να εξασφαλίζει, λοιπόν, ότι η εξωτερική πηγή είναι έμπιστη, όπως επίσης και ότι το λογισμικό της MEP και των εφαρμογών δεν τροποποιείται από κάποιον κακόβουλο.

Ένα ακόμη ζήτημα που αφορά αποκλειστικά το εσωτερικό του συστήματος MEC είναι η ακεραιότητα των οδηγιών που παράγονται από τον MEO. Οι φυσικές συνδέσεις του MEO με τους διάφορους hosts του συστήματος πιθανώς βρίσκονται εκτός του δικτύου του MNO, οπότε τα μηνύματα που ανταλλάσσονται μεταξύ αυτών είναι ευάλωτα σε επιθέσεις. Είναι, επομένως, αναγκαία η εξασφάλιση της ακεραιότητας αυτών των μηνυμάτων και της εμπιστευτικότητας μεταξύ των κεντρικών και των τοπικών μονάδων.

Με την έλευση του MEC, ο τερματισμός της συνδεσιμότητας IP και οι λειτουργίες DNS και παροχής περιεχομένου μεταφέρονται πλησιέστερα στους τελικούς χρήστες. Αυτή η μετάβαση συνοδεύεται από την εγκατάσταση κρυφών μνημών δεδομένων (data caches) με καταναμημένο τρόπο στα ακραία σημεία του δικτύου, οι οποίες διαθέτουν σημαντικά μικρότερη χωρητικότητα από αυτές ενός δικτύου παροχής περιεχομένου (Content Delivery Network – CDN). Εκτός από τις συνηθισμένες επιθέσεις που μπορεί να δεχθεί ένας εξυπηρετητής, οι τοπικές caches είναι ευάλωτες σε νέου είδους επιθέσεις. Για παράδειγμα, η περιορισμένη χωρητικότητα αυτών μπορεί να κορεστεί από κακόβουλες οντότητες, γεγονός που αυτομάτως τις καθιστά ανενεργές και δυσχεραίνει την ποιότητα της υπηρεσίας που λαμβάνουν οι χρήστες.

Παραβίαση του συστήματος μπορεί να προκύψει και από κενά ασφαλείας του RAN. Καίτοι το LTE προσφέρει ενισχυμένη ασφάλεια στις μεταδόσεις μεταξύ των UEs και των eNBs σε σχέση με τους προκατόχους του (GSM, UMTS), δεν παύει να είναι ευάλωτο σε φυσικές επιθέσεις. Στην περίπτωση κατά την οποία τα μηνύματα διέρχονται από το δίκτυο κορμού, αυτά είναι περαιτέρω προστατευμένα με χρήση κρυπτογράφησης μεταξύ του data center και του τελικού χρήστη. Αντίστοιχες λύσεις πρέπει να βρεθούν και για την επικοινωνία με τους MEC hosts, προκειμένου να περιοριστεί η επίδραση των φυσικών επιθέσεων.

Εκτός από την ακεραιότητα των μηνυμάτων δεδομένων, η εφαρμογή του MEC συνοδεύεται από νέες προκλήσεις όσον αφορά τη διαχείριση των λειτουργιών χρέωσης των χρηστών. Ενώ στα συμβατικά κυψελωτά συστήματα η κίνηση των χρηστών χρεώνεται από τις μονάδες του δικτύου κορμού, στην περίπτωση του MEC ένας μεγάλος όγκος δεδομένων διακινείται μεταξύ των UEs και των ακραίων κόμβων, χωρίς να διέλθει από τις μονάδες χρέωσης. Επειδή οι ακραίοι κόμβοι είναι περισσότερο ευάλωτοι σε επιθέσεις, υπάρχει κίνδυνος είτε για λανθασμένες χρεώσεις είτε για σκόπιμη παραποίηση αυτών. Μία πιθανή λύση για την εξασφάλιση της ακρίβειας των χρεώσεων είναι οι περιοδικές ερωτήσεις από το δίκτυο κορμού στα UEs για τον όγκο των δεδομένων που αυτά έχουν καταναλώσει. Εναλλακτικά, τα UEs θα μπορούσαν να ενημερώνουν τα ίδια τις μονάδες χρέωσης με περιοδικό τρόπο. Σε κάθε περίπτωση, απαιτείται περαιτέρω μελέτη από τους αρμόδιους φορείς για την εύρεση αξιόπιστων πολιτικών χρέωσης και των τρόπων με τους

αντιστοιχεί στην NFVI και ο VIM διαχειρίζεται τους πόρους αυτής. Η λειτουργικότητά της είναι ίδια με αυτήν που ορίζεται για την αντίστοιχη μονάδα της NFV, με τη MEP να αντιμετωπίζεται ως μία κοινή VNF.

Εκτός από αυτές, η υλοποίηση του MEC σε περιβάλλον NFV επιφέρει αλλαγές και στο τμήμα της διαχείρισης. Ο MEPM μετατρέπεται σε MEPM-NFV (MEPM-V) και αναθέτει το τμήμα του LCM σε έναν ή περισσότερους VNFMs. Μπορεί να υπάρχει ένας ή περισσότεροι VNFMs για το LCM των εφαρμογών και άλλος που να ασχολείται με την LCM της MEP. Ο MEO μετατρέπεται σε Mobile Edge Application Orchestrator (MEAO), ο οποίος συνεργάζεται με τον NFVO για την ενορχήστρωση των εικονικών πόρων και των εφαρμογών ME του συστήματος.

Η προτεινόμενη αρχιτεκτονική αξιοποιεί τα περισσότερα σημεία αναφοράς μεταξύ των μονάδων που ορίστηκαν για την NFV και το MEC. Προσθέτει, όμως, και ακόμη τρία από αυτά, για την επικοινωνία μεταξύ των αποκλειστικών μονάδων των δύο τεχνολογιών. Αυτά είναι:

- Mv1: συνδέει τον MEAO με τον NFVO.
- Mv2: συνδέει τον VNFM που είναι υπεύθυνος για το LCM των εφαρμογών με τον MEPM-V με σκοπό την ανταλλαγή ειδοποιήσεων σχετικών με τους πόρους μεταξύ των δύο.
- Mv3: συνδέει τον VNFM του LCM των εφαρμογών με τις εφαρμογές ME-NFV για την ανταλλαγή μηνυμάτων σχετικών με το LCM αυτών.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: Εφαρμογή του MEC στα δίκτυα τέταρτης και πέμπτης γενιάς

4.1 Εισαγωγή

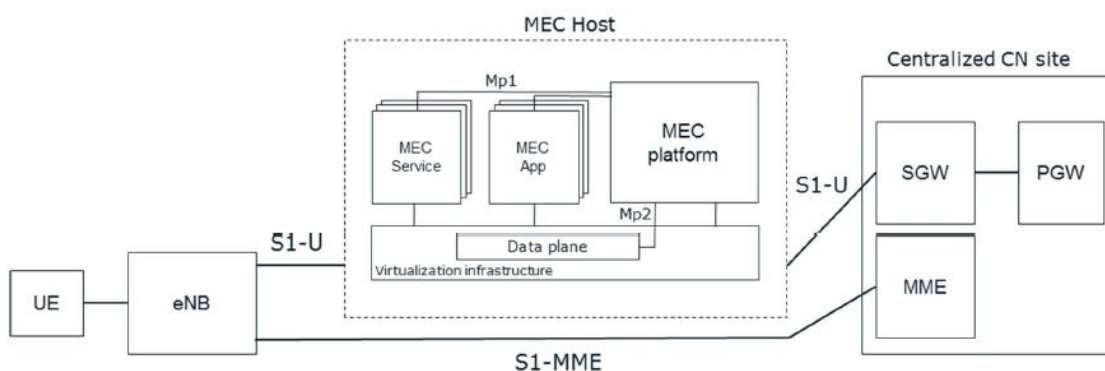
Η αρχιτεκτονική ενός συστήματος MEC, που παρουσιάστηκε στο κεφάλαιο 3, είναι ανεξάρτητη της δικτυακής υποδομής πάνω από την οποία εφαρμόζεται. Αν και το MEC έχει παρουσιαστεί ως θεμελιώδης τεχνολογία για την ανάπτυξη των δικτύων πέμπτης γενιάς (5G), η ολοκλήρωση αυτών δεν αποτελεί προϋπόθεση για την άφιξη του MEC στην αγορά. Οι MNOs μπορούν αρχικά να επενδύσουν στην εφαρμογή του MEC στο υπάρχον LTE δίκτυό τους και στη συνέχεια, αφού η τεχνολογία 5G έχει πλέον ωριμάσει, να το προσαρμόσουν κατάλληλα στις αλλαγές. Επιπλέον, χάρη στα εικονικά χαρακτηριστικά του MEC, η εξέλιξη αυτού κατά τη μετάβαση από τα δίκτυα LTE προς το 5G μπορεί να γίνει με αναβάθμιση του λογισμικού των επιμέρους στοιχείων, δηλαδή δεν θα απαιτηθεί πρόσθετο κόστος για την αγορά ειδικού εξοπλισμού.

4.2 Εφαρμογή του MEC στο LTE

Ο συνδυασμός του MEC και του LTE συνίσταται, αρχικά, στην επιλογή της τοποθεσίας των ME hosts. Διάφορες επιλογές είναι διαθέσιμες, όπως στο εσωτερικό δίκτυο μιας εταιρίας, σε σημείο συνάθροισης πολλαπλών eNBs ή και στο ίδιο σημείο με κάποιον eNB. Κάθε λύση έχει τα δικά της πλεονεκτήματα και η επιλογή αυτών εξαρτάται από την επιθυμητή εφαρμογή. Επίσης, αξίζει να μελετηθεί η δυνατότητα μετακίνησης κάποιων εκ των λειτουργιών του EPC από το δίκτυο κορμού του παρόχου προς τους hosts. Σύμφωνα με τον ETSI [48], τα πιθανά σενάρια εφαρμογής του MEC στο LTE μπορούν να χωριστούν στις κατηγορίες των παραγράφων 4.2.1-5.

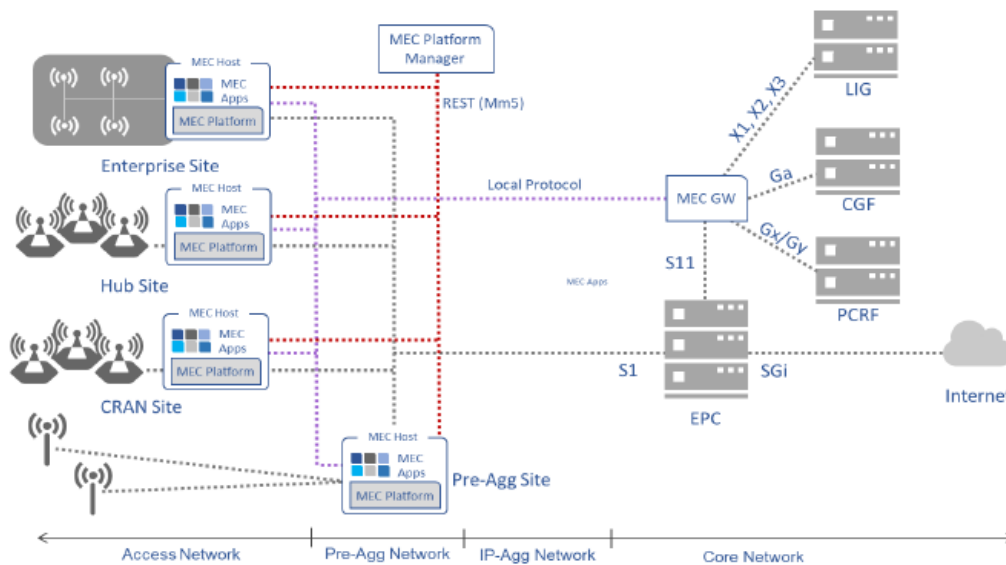
4.2.1 Bump in the wire

Περιλαμβάνει όλα τα πιθανά σενάρια εγκατάστασης του MEC host μεταξύ του eNB και του EPC. Σε μία περίπτωση αυτής της κατηγορίας, η MEP είναι ενσωματωμένη στον eNB και ο ρόλος της είναι η δρομολόγηση πακέτων IP μεταξύ των εφαρμογών MEC και της S-GW. Στις υπόλοιπες περιπτώσεις, η MEP τοποθετείται σε σημείο κοντά στον eNB και παρεμβάλλεται στη διεπαφή S1. Στο σχήμα 4.1, απεικονίζεται ο τρόπος επικοινωνίας των μονάδων του MEC με αυτές του LTE, όταν ο ME host παρεμβάλλεται της διεπαφής S1-U, ενώ μία πληρέστερη αναπαράσταση μπορεί να βρεθεί στο [50], όπου απεικονίζονται και οι μονάδες διαχείρισης του MEC.



Σχήμα 4.1 Τοποθέτηση του MEC host στη διεπαφή S1 [46]

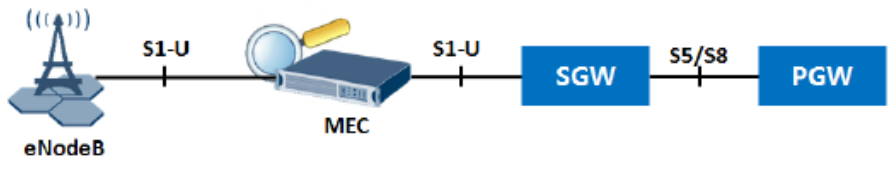
Τα πακέτα που διακινούνται στη διεπαφή S1-U διέρχονται από το στρώμα δεδομένων του ME host, το οποίο έχει τη δυνατότητα να επέμβει στην κίνησή τους, βάσει κανόνων που λαμβάνει από την MEP. Επειδή τα μηνύματα είναι ενθυλακωμένα σε πλαίσια GTP-U, το MEC πρέπει να διαθέτει δυνατότητα αναγνώρισης επικεφαλίδων GTP. Ο ME host έχει τη δυνατότητα να κατευθύνει τη διερχόμενη κίνηση μεταξύ των UEs, των εφαρμογών MEC και της S/P-GW ή να παράγει νέα μηνύματα προς αυτές τις μονάδες. Σε κάθε περίπτωση, οι eNBs και τα στοιχεία του EPC δεν αντιλαμβάνονται την ύπαρξη του MEC. Επειδή ένα μέρος των δεδομένων διακινείται μεταξύ των εφαρμογών δίχως να διέλθει πρώτα από τον EPC, ενδεχομένως να απαιτείται μία MEC-GW για τη διαχείριση των λειτουργιών χρέωσης και νόμιμης υποκλοπής, όπως φαίνεται στο Σχ. 4.2. Οι ενδιαφερόμενοι αναγνώστες παραπέμπονται στο [49], στο οποίο προτείνεται ένα παράδειγμα αυτού του τρόπου υλοποίησης και μελετάται η επίδοση αυτού.



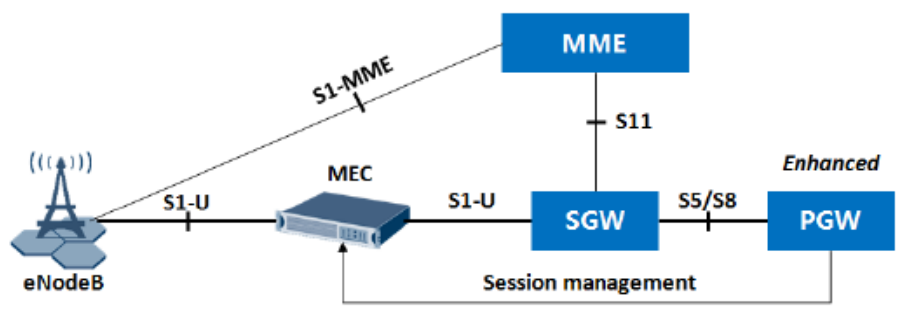
Σχήμα 4.2 Bump in the wire [48]

Η τοποθέτηση του MEC στη διεπαφή S1 παρουσιάζει κάποια εγγενή προβλήματα, όσον αφορά τη διαχείριση συνόδου μεταξύ eNB και S-GW. Οι eNBs διατηρούν μια συλλογή από πληροφορίες για κάθε UE που εξυπηρετούν, οι οποίες είναι απαραίτητες για τη διατήρηση της σύνδεσης του UE με το E-UTRAN [51]. Το σύνολο αυτό αποκαλείται “UE context” και περιλαμβάνει στοιχεία της κατάστασης και των δυνατοτήτων του UE, καθώς και πληροφορίες ασφάλειας. Το πρόβλημα προκύπτει από το γεγονός ότι το MEC απαιτεί τη γνώση του UE context, προκειμένου να πραγματοποιήσει αποτελεσματικά τη δρομολόγηση της κίνησης. Λόγω του ότι το MEC δεν γίνεται αντιληπτό από τις μονάδες του LTE, είναι αναγκαίες κάποιες βελτιώσεις της μεθόδου, ώστε το MEC να αποκτήσει τις πληροφορίες των UEs.

Μία πιθανή λύση είναι ο έλεγχος των πακέτων επιπέδου χρήστη από τη μονάδα MEC. Με αυτόν τον τρόπο, το MEC μπορεί να δημιουργήσει το UE context με βάση τις διευθύνσεις IP που περιέχονται στα πακέτα που διακινούνται στη διεπαφή S1-U. Μία άλλη λύση συνίσταται στον έλεγχο του MEC από την P-GW για τη δημιουργία, την ενημέρωση και τη διαγραφή του UE context. Η λύση αυτή απαιτεί, όμως, μία ακόμη διεπαφή μεταξύ P-GW και MEC.



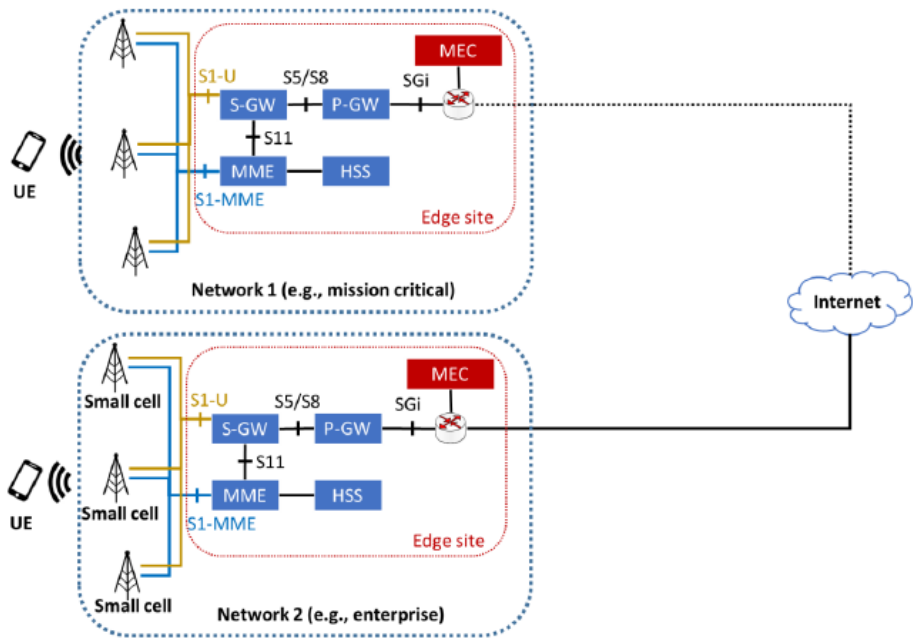
Σχήμα 4.3 Έλεγχος πακέτων UP από το MEC [48]



Σχήμα 4.4 Έλεγχος του MEC από την P-GW [48]

4.2.2 Κατανεμημένος EPC

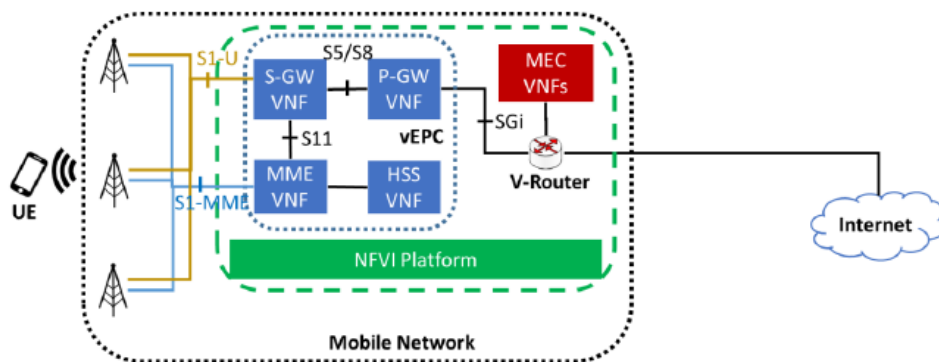
Η λύση αυτή αποσκοπεί στη μείωση της καθυστέρησης που υφίστανται τα πακέτα με εγκατάσταση των μονάδων του EPC στην άκρη του δικτύου. Το στρώμα δεδομένων του ME host παρεμβάλλεται της διεπαφής SGi και έχει τη δυνατότητα να δρομολογεί τα πακέτα μεταξύ της τοπικής P-GW και των εξωτερικών δικτύων. Ο HSS μπορεί να βρίσκεται είτε στο ME host, όπως απεικονίζεται στο Σχ. 4.5, είτε στο δίκτυο κορμού του MNO, όπως στο συμβατικό LTE. Η πρώτη περίπτωση ευνοεί εφαρμογές ευαίσθητες σε καθυστέρηση, διότι δεν απαιτεί σύνδεση με το δίκτυο κορμού για τη μεταφορά δεδομένων στο εσωτερικό του host, όμως η δεύτερη πλεονεκτεί στα θέματα ασφάλειας των δεδομένων των χρηστών.



Σχήμα 4.5 Κατανεμημένος EPC [48]

Το σενάριο αυτό απαιτεί λιγότερες αλλαγές, συγκριτικά με το “Bump in the wire”, στα ήδη υπάρχοντα δίκτυα LTE των MNOs, διότι αξιοποιεί τις τυποποιημένες μονάδες και διεπαφές που ορίζονται από την 3GPP. Επιπλέον, δεν παρουσιάζονται τα προβλήματα της διαχείρισης συνόδου που αναφέρθηκαν στην προηγούμενη παράγραφο, αφού ένα μέρος του EPC βρίσκεται εντός του ME host.

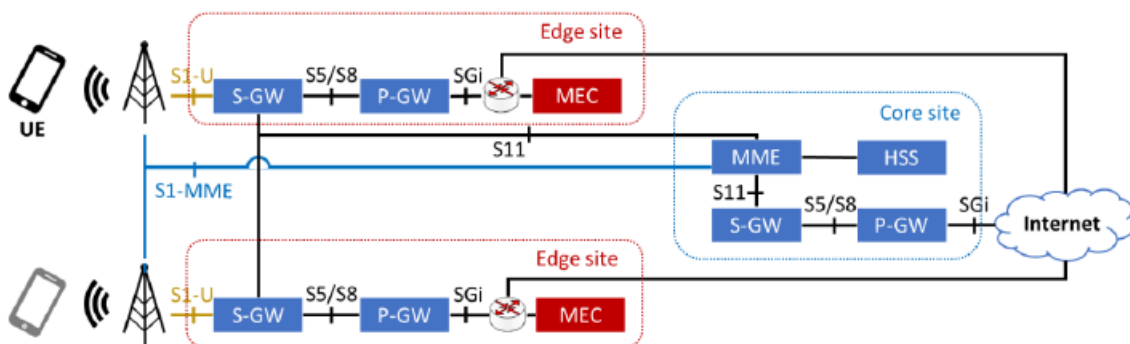
Η εφαρμογή του κατακευμαμένου EPC μπορεί να διευκολυνθεί σε μεγάλο βαθμό από την εφαρμογή και της τεχνολογίας NFV. Οι MNOs έχουν τη δυνατότητα να αναπτύξουν τις λειτουργίες του EPC ως VNFs, οι οποίες θα τρέχουν στην ίδια MEP και θα αποτελούν έναν εικονικό EPC (virtual EPC – vEPC). Η λύση αυτή δύναται να αποδειχθεί οικονομικά συμφέρουσα για τους MNOs, διότι επιτρέπει την ευκολότερη κλιμάκωση του δικτύου και την καλύτερη αξιοποίηση των πόρων αυτού.



Σχήμα 4.6 Υλοποίηση του EPC ως VNFs [48]

4.2.3 Κατακευμαμένες S/P-GW

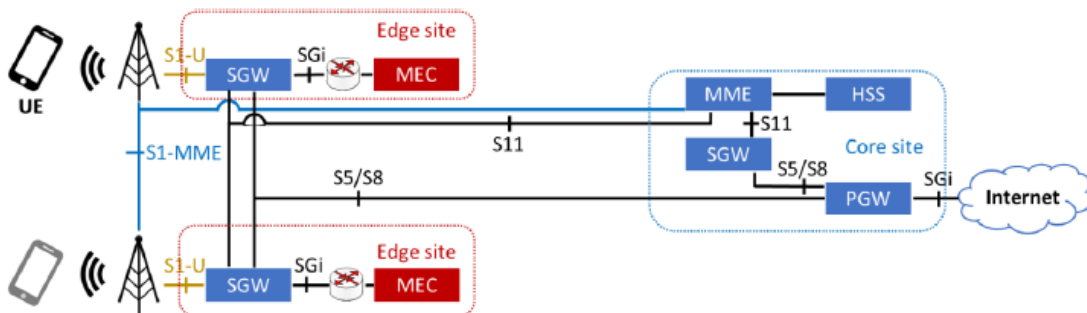
Σε αυτό το σενάριο, οι ME hosts περιλαμβάνουν μόνο τις S/P-GW, με σκοπό τη δρομολόγηση δεδομένων του UP μεταξύ των εφαρμογών MEC και των εξωτερικών δικτύων. Οι λειτουργίες του CP, όπως η MME και ο HSS, εκτελούνται στο δίκτυο κορμού του παρόχου. Η τοποθέτηση της MME σε κεντρικό σημείο επιτρέπει την καλύτερη διαχείριση αυτής, ενώ διευκολύνει και τη διαδικασία μεταπομπής ενός UE μεταξύ δύο ME hosts. Όπως και στην προηγούμενη περίπτωση, οι S/P-GW μπορούν να υλοποιηθούν ως VNFs.



Σχήμα 4.7 Κατακευμαμένες S/P-GW [48]

4.2.4 Κατανεμημένη S-GW με τοπικό breakout

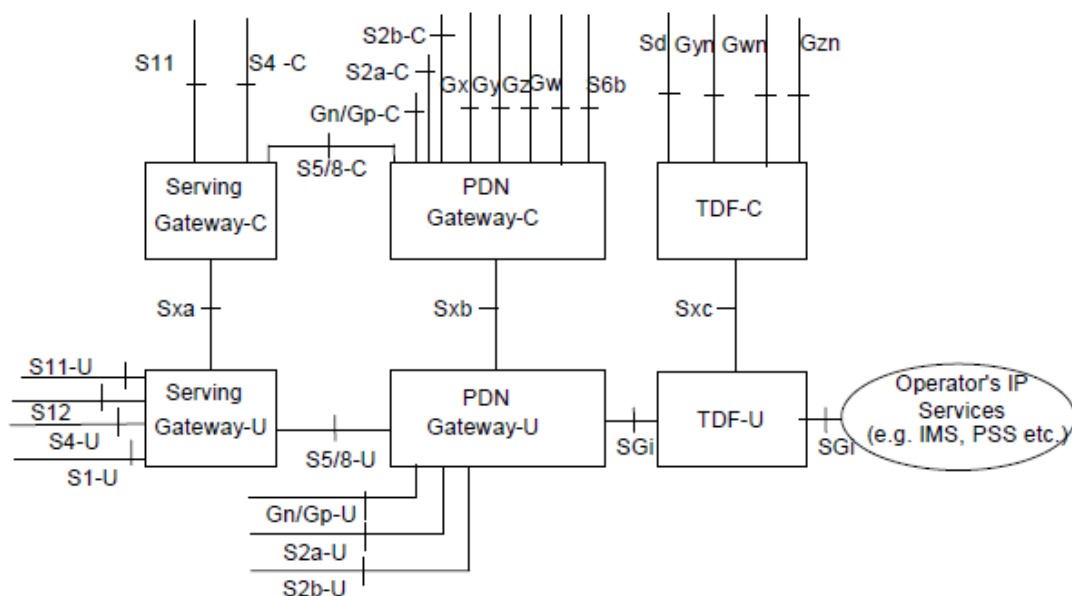
Σε αντίθεση με τις προηγούμενες περιπτώσεις, μόνο η S-GW τοποθετείται μαζί με τον ME host, ενώ η P-GW βρίσκεται σε κεντρικό σημείο. Η κίνηση μπορεί να δρομολογηθεί είτε προς το MEC, μέσω του τοπικού συστήματος «απόδρασης» (breakout), είτε προς το internet, μέσω της P-GW του δικτύου κορμού, με επιλεκτικό τρόπο. Η λύση αυτή παρέχει στον MNO τη δυνατότητα να εφαρμόσει φίλτρα στη μεταφερόμενη κίνηση, με βάση πληροφορίες όπως APN (Access Point Name), αναγνωριστικό χρήστη ή παραμέτρους του IP.



Σχήμα 4.8 Κατανεμημένη S-GW [48]

4.2.5 Διαχωρισμός επιπέδων ελέγχου και χρήστη

Οι ανωτέρω υλοποιήσεις αναμένεται να χρησιμοποιήσουν την τεχνική διαχωρισμού των στρωμάτων ελέγχου και χρήστη (Control/User Plane Separation – CUPS), η οποία ορίστηκε στην έκδοση 14 του LTE [52] και θα αποτελέσει βασικό στοιχείο των δικτύων 5G. Η CUPS αποσκοπεί στο διαχωρισμό των λειτουργιών που εκτελεί μία μονάδα του EPC για το CP και το UP σε δύο επιμέρους οντότητες. Τέτοιες μονάδες είναι, για παράδειγμα, οι S/P-GW και η λειτουργία ανίχνευσης κίνησης (Traffic Detection Function – TDF). Η TDF ορίστηκε στις νεότερες εκδόσεις του LTE [53] και ο ρόλος της είναι η ανίχνευση των πακέ-



Σχήμα 4.9 CUPS [52]

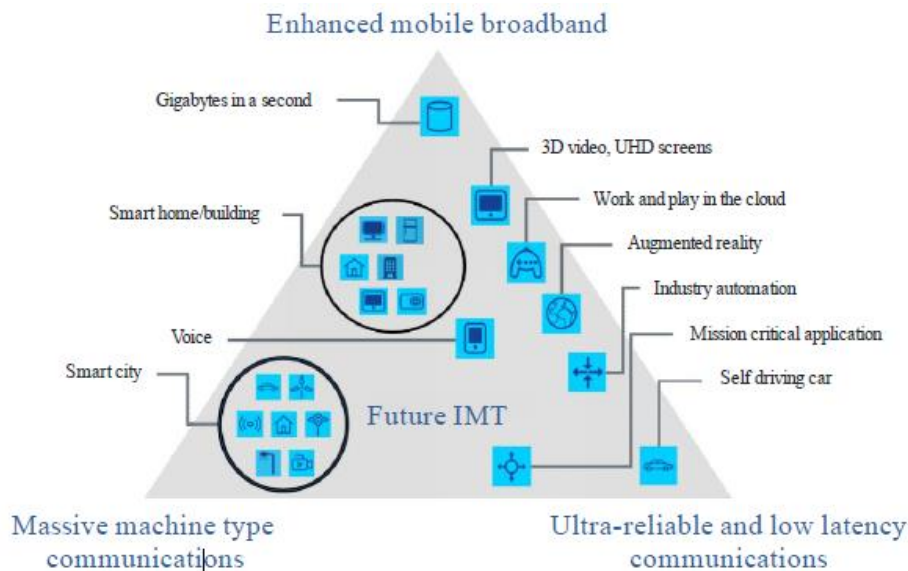
των με σκοπό τη χρέωση της κίνησης σε πραγματικό χρόνο, σε συνεργασία και με την PCRF. Η CUPS παρέχει μεγαλύτερη ευελιξία κατά την εφαρμογή του MEC στο LTE, αφού δίνει τη δυνατότητα στους MNOs να μεταφέρουν κάποιες από τις λειτουργίες του UP στην άκρη του δικτύου, ενώ διατηρούν αυτές του CP στο δίκτυο κορμού.

Ένα παράδειγμα εφαρμογής της CUPS απεικονίζεται στο Σχ. 4.9. Οι λειτουργίες του CP/UP κάθε μονάδας επικοινωνούν μέσω διεπαφών Sx. Οι ήδη υπάρχουσες διεπαφές μεταξύ των στοιχείων του EPC, όπως η S5/S8 και η SGi, μοιράζουν και αυτές τις λειτουργίες τους σε δύο επιμέρους διεπαφές. Σε αντίθεση με την αρχιτεκτονική αναφοράς του σχήματος, ο διαχειριστής του δικτύου δεν είναι υποχρεωμένος να εφαρμόσει CUPS σε όλες της μονάδες του EPC.

4.3 Εισαγωγή στα δίκτυα πέμπτης γενιάς

4.3.1 Απαιτήσεις δικτύων 5G

Τα δίκτυα πέμπτης γενιάς (5G) αναμένεται να αποτελέσουν το διάδοχο των δικτύων 4G, τα οποία συνήθως ταυτίζονται με τα δίκτυα LTE. Σκοπός της ανάπτυξης του 5G είναι η επίτευξη υψηλότερης απόδοσης σε ρυθμό μετάδοσης (M/Gbps), καθυστέρηση (ms) και πυκνότητα συσκευών (συσκευές/km²), συγκριτικά με το LTE και το νεότερο LTE-A. Σε αντίθεση με την ανάπτυξη του LTE, που αποσκοπούσε στην κάλυψη των αναγκών κινητών ευρυζωνικών εφαρμογών (mobile broadband), το 5G στοχεύει στην ικανοποίηση μιας ευρείας περιοχής εφαρμογών, οι οποίες διαθέτουν ποικίλες απαιτήσεις. Οι περιπτώσεις εφαρμογής του 5G μπορούν να χωριστούν σε τρεις κατηγορίες:



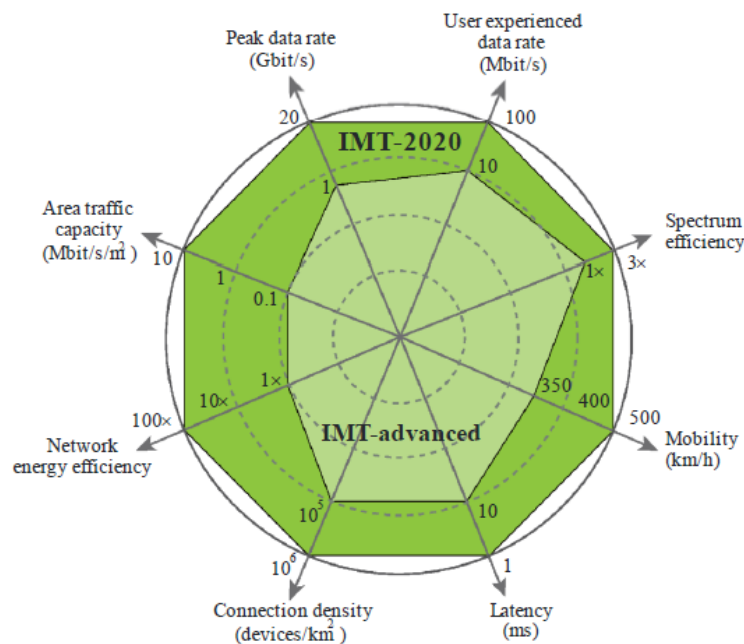
Σχήμα 4.10 Περιπτώσεις εφαρμογής των δικτύων επόμενης γενιάς [54]

- **enhanced Mobile Broadband – eMBB:** περιλαμβάνει τις εφαρμογές πρόσβασης των χρηστών σε δεδομένα και πολυμέσα με βελτιωμένη απόδοση σε σχέση με τις υπάρχουσες ευρυζωνικές εφαρμογές.
- **ultra-Reliable and Low Latency Communications – uRLLC:** αυτές οι περιπτώσεις έχουν υψηλές απαιτήσεις κυρίως σε καθυστέρηση και διαθεσιμότητα του συστή-

ματος. Παραδείγματα uRLLC είναι ο έλεγχος βιομηχανικής παραγωγής, οι απομακρυσμένες χειρουργικές επεμβάσεις, οι ασφαλείς μετακινήσεις και τα αυτο-οδηγούμενα αυτοκίνητα.

- **massive Machine Type Communications – mMTC:** χαρακτηρίζονται από εξαιρετικά υψηλό αριθμό συσκευών που επικοινωνούν μεταξύ τους. Οι κυρίαρχες απαιτήσεις τους αφορούν το κόστος και τη διάρκεια ζωής της μπαταρίας των συσκευών, ενώ η μετάδοση των μηνυμάτων είναι ανεκτική σε καθυστέρηση.

Οι απαιτήσεις που πρέπει τα δίκτυα επόμενης γενιάς να έχουν ικανοποιήσει ως το 2020 ορίστηκαν από την ITU στο IMT 2020 (International Mobile Telecommunications). Στο Σχ. 4.11, συγκρίνονται οι επιθυμητές ικανότητες που ορίζει το IMT-2020 σε σχέση με αυτές του IMT-Advanced, το οποίο δημοσιεύθηκε το 2008 και αφορούσε το 4G.



Σχήμα 4.11 Σύγκριση των ικανοτήτων που ορίζουν τα IMT-2020 και IMT-Advanced [54]

Οι κυριότερες από αυτές είναι:

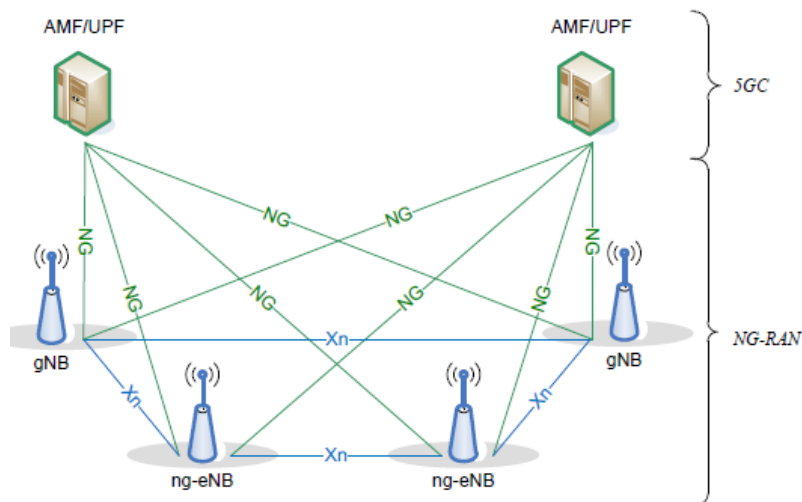
- Μέγιστος εφικτός ρυθμός μετάδοσης στην κατεύθυνση DL υπό ιδανικές συνθήκες: 20 Gbps
- Μέσος ρυθμός μετάδοσης που αντιλαμβάνονται οι χρήστες: 100 Mbps
- Φασματική απόδοση (bps/Hz) τριπλάσια από αυτήν του 4G
- Διατήρηση επικοινωνίας σε κινούμενα τερματικά με ταχύτητες έως και 500 km/h
- Καθυστέρηση που εισάγει το δίκτυο: 1 ms
- Πυκνότητα συσκευών: 10⁶ συσκευές/km²
- Ενεργειακή απόδοση του δικτύου (αφορά είτε τους κόμβους του RAN είτε τις τερματικές συσκευές και μετράται σε bit/Joule): 100 φορές μεγαλύτερη από αυτήν του 4G
- Πυκνότητα κίνησης: 10 Mbps/m²

4.3.2 Αρχιτεκτονική δικτύων 5G

Η ανάπτυξη των προδιαγραφών για τα δίκτυα 5G ξεκίνησε από την 3GPP με τη δημοσίευση της έκδοσης 15, η οποία βρίσκεται αυτήν την περίοδο σε εξέλιξη και αναμένεται ότι θα έχει ολοκληρωθεί έως το τέλος του 2018. Η έκδοση 15 αποτελεί ένα πρώτο βήμα προς την ένταξη των δικτύων 5G στην αγορά, όμως δεν ικανοποιεί όλους τους στόχους που τέθηκαν στο IMT-2020. Τα πραγματικά δίκτυα πέμπτης γενιάς θα περιλαμβάνονται στην έκδοση 16, η ολοκλήρωση της οποίας έχει προγραμματιστεί για το Δεκέμβριο του 2019.

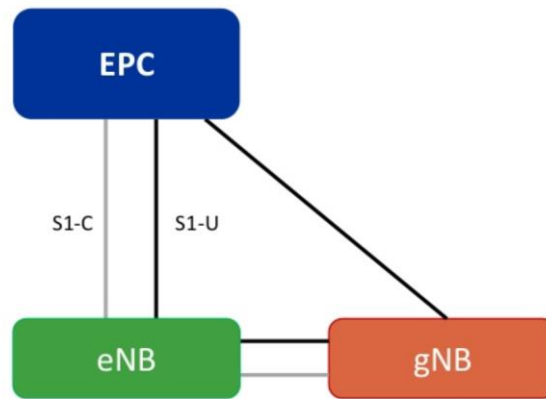
4.3.2.1 NG-RAN

Το δίκτυο πρόσβασης της προτεινόμενης αρχιτεκτονικής του 5G καλείται NG-RAN (Next Generation RAN). Το NG-RAN αποτελείται από δύο στοιχεία: τους gNB (next generation NodeB), οι οποίοι παρέχουν τον τερματισμό πρωτοκόλλων UP και CP νέας γενιάς προς τα UE, και τους ng-eNB (next generation eNB), που επικοινωνούν με πρωτόκολλα E-UTRAN του LTE. Οι gNB και ng-eNB επικοινωνούν μεταξύ τους μέσω διεπαφών Xn, οι οποίες έχουν αντίστοιχο ρόλο με τη X2 του E-UTRAN. Η διεπαφή NG συνδέει τους κόμβους του NG-RAN με τα στοιχεία του δικτύου κορμού (5G Core – 5GC) και χωρίζεται σε δύο επιμέρους διεπαφές, αντίστοιχα με την S1 του LTE. Η NG-U μεταφέρει δεδομένα του UP, πάνω από πρωτόκολλα GTP-U/UDP/IP, μεταξύ του NG-RAN και της UPF (User Plane Function), ενώ η NG-C ανταλλάσσει μηνύματα ελέγχου, πάνω από SCPT/IP, με την AMF (Access and Mobility Management Function).



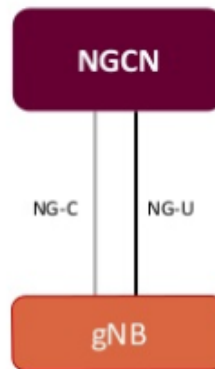
Σχήμα 4.12 Αρχιτεκτονική NG-RAN [55]

Η ανάπτυξη των δικτύων 5G αναμένεται να γίνει σε δύο φάσεις. Κατά την πρώτη φάση, η οποία αποτελεί τη μη αυτόνομη έκδοση του 5G (non-standalone), οι κόμβοι του NG-RAN επικοινωνούν με τον EPC, υποβοηθούμενοι από τους ήδη υπάρχοντες eNBs. Στη συνέχεια, θα εφαρμοστεί η αυτόνομη έκδοση (standalone), κατά την οποία οι κόμβοι gNB και ng-eNB θα επικοινωνούν με τον 5GC όπως υποδεικνύει η έκδοση 15.



Σχήμα 4.13 5G non-standalone

[<https://www.slideshare.net/3G4GLtd/5g-network-architecture-options>]



Σχήμα 4.14 5G standalone

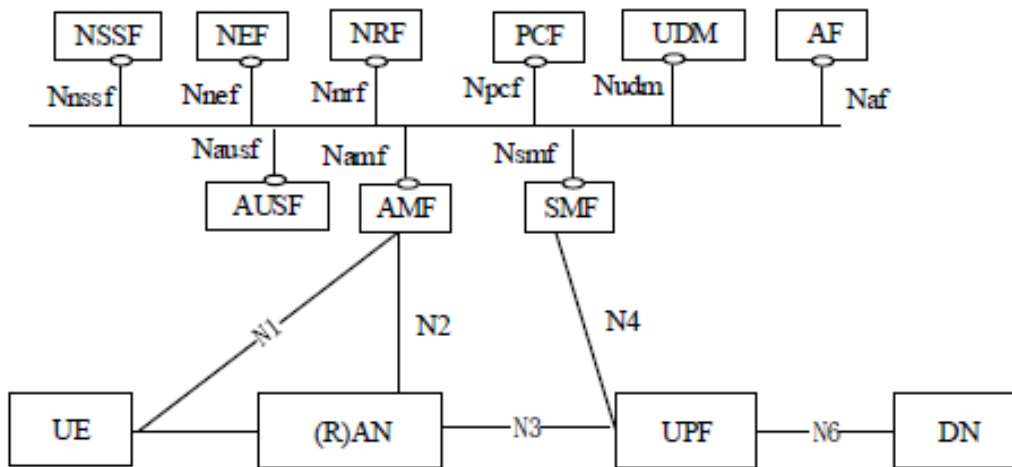
[<https://www.slideshare.net/3G4GLtd/5g-network-architecture-options>]

4.3.2.2 5G Core

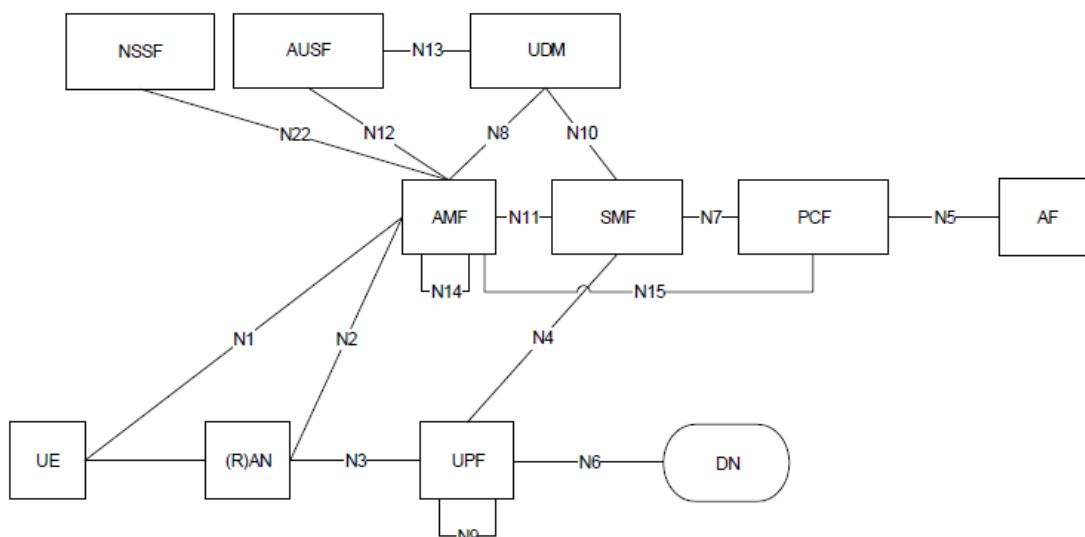
Το προτεινόμενο δίκτυο κορμού του 5G σχεδιάστηκε ώστε να αξιοποιεί σε μεγάλο βαθμό τις τεχνολογίες NFV και SDN. Αποτελείται ουσιαστικά από ένα σύνολο δικτυακών λειτουργιών (Network Functions – NFs), οι οποίες μπορούν να υλοποιηθούν ως VNFs. Αναθέτοντας σε κάθε NF συγκεκριμένες λειτουργίες, το 5GC εφαρμόζει την τεχνική διαχωρισμού των CP και UP (CUPS) και επιτρέπει σε αυτά να αναπτυχθούν ανεξάρτητα. Επίσης, παρέχει τη δυνατότητα για πρόσβαση σε τοπικές και κεντρικές υπηρεσίες. Οι λειτουργίες του UP μπορούν να τοποθετηθούν κοντά στο δίκτυο πρόσβασης, μειώνοντας με αυτόν τον τρόπο την καθυστέρηση που υφίστανται οι υπηρεσίες.

Τα συστήματα 3GPP προηγούμενων γενεών ορίζουν διεπαφές σημείου προς σημείο για τη σύνδεση των μονάδων του δικτύου κορμού μεταξύ τους και με το δίκτυο πρόσβασης. Αντίθετα, η αρχιτεκτονική του 5GC μπορεί να απεικονισθεί με δύο τρόπους: Στην πρώτη αναπαράσταση (βασισμένη στις υπηρεσίες, Service Based Architecture – SBA), κάθε NF που ανήκει στο 5GC επικοινωνεί με όλες τις υπόλοιπες μέσω μίας μοναδικής διεπαφής. Η διεπαφή αυτή χρησιμοποιείται για την παροχή υπηρεσιών στις υπόλοιπες NFs και την κατανάλωση υπηρεσιών που προσφέρονται από αυτές. Η δεύτερη μορφή (βασισμένη σε σημεία αναφοράς) ορίζει κατάλληλες διεπαφές σημείου προς σημείο μεταξύ δύο NFs του

5GC, αντίστοιχα με τα προηγούμενα συστήματα 3GPP. Οι δύο αναπαραστάσεις απεικονίζονται στα Σχ. 4.15 και 4.16, στα οποία αναγράφονται και τα σημεία αναφοράς μεταξύ του NG-RAN, του 5GC και των εξωτερικών δικτύων.



Σχήμα 4.15 Αρχιτεκτονική βασισμένη στις υπηρεσίες [56]

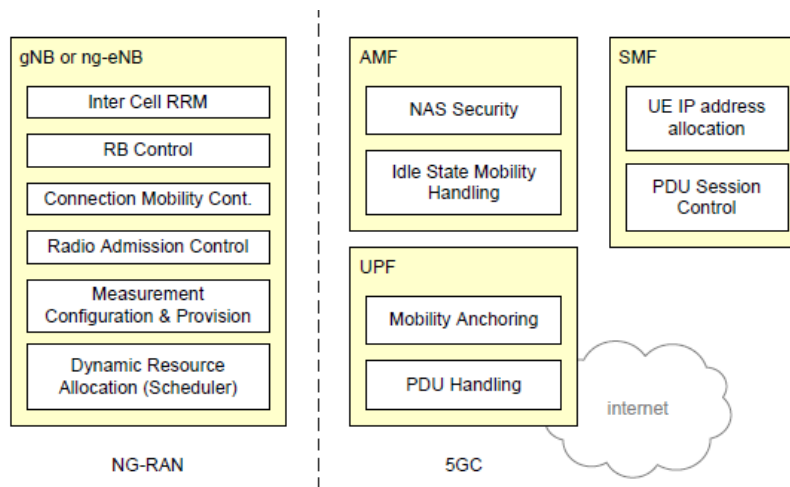


Σχήμα 4.16 Αρχιτεκτονική βασισμένη στα σημεία αναφοράς [56]

Οι κυριότερες NFs που αποτελούν το 5GC είναι οι ακόλουθες:

- **User Plane Function (UPF):** Ο ρόλος της είναι ανάλογος των S/P-GW του LTE, όσον αφορά το στρώμα δεδομένων. Συνδέει το RAN με τα δίκτυα δεδομένων (Data Network – DN) και αποτελεί σημείο άγκυρα για την κινητικότητα στο ίδιο ή μεταξύ διαφορετικών RANs. Οι λειτουργίες της περιλαμβάνουν, επίσης, επιθεώρηση των πακέτων για ανίχνευση εφαρμογών και διαχείριση του QoS για το UP.
- **Access and Mobility Management Function (AMF):** Αποτελεί το τερματικό άκρο σύνδεσης του RAN με το 5GC για το CP και το NAS. Εκτελεί λειτουργίες σχετικές με την εγγραφή των χρηστών, τη διαχείριση κινητικότητας και την ασφάλεια και εξουσιοδότηση της πρόσβασης.
- **Session Management Function (SMF):** Είναι υπεύθυνη για τη διαχείριση συνόδου (εγκατάσταση, τροποποίηση, απελευθέρωση), την κατανομή και διαχείριση διευ-

θύσεων IP στα UE και εκτελεί λειτουργίες σχετικές με το DHCP (client και server) και το Ethernet (πχ. ARP). Επίσης, συλλέγει δεδομένα κίνησης από την UPF, με σκοπό την αναφορά αυτών στις λειτουργίες χρέωσης.



Σχήμα 4.17 Λειτουργίες του NG-RAN και του 5GC [55]

- **Authentication Server Function (AUSF):** Εκτελεί λειτουργίες του εξυπηρετητή επιβεβαιώσεων των χρηστών, σε αντιστοιχία με τον HSS του EPC.
- **Unstructured Data Storage Function (UDSF):** αποθήκευση αδόμητων δεδομένων (πχ. UE context)
- **Network Exposure Function (NEF):** Εκθέτει τις διαθέσιμες δυνατότητες και γεγονότα σε άλλες NFs και παρέχει ασφαλή πρόσβαση σε αυτά από εφαρμογές εκτός του δικτύου 3GPP.
- **NF Repository Function (NRF):** Δίνει τη δυνατότητα στις άλλες NFs να ανακαλύψουν υπηρεσίες. Δέχεται αιτήσεις ανακάλυψης υπηρεσιών από τις NFs και παρέχει σε αυτές τις ζητούμενες πληροφορίες.
- **Network Slice Selection Function (NSSF):** Καθορίζει την AMF και τα τμήματα του δικτύου (network slices) που εξυπηρετούν το UE. Ένα τμήμα δικτύου αποτελεί ένα εικονικό δίκτυο που θα ικανοποιεί τις ανάγκες μίας κατηγορίας εφαρμογών, ανεξάρτητα από τα υπόλοιπα τμήματα [57].
- **Policy Control Function (PCF):** Υποστηρίζει ένα πλαίσιο κανόνων για τον έλεγχο της συμπεριφοράς του δικτύου. Για τον σκοπό αυτό, παρέχει κανόνες συμβολαίου στις λειτουργίες του CP, ώστε αυτές να τους εφαρμόσουν, και γνωστοποιεί πληροφορίες σχετικές με τους συνδρομητές, που λαμβάνει από τη UDM.
- **Unified Data Management (UDM):** Διαχειρίζεται πληροφορίες σχετικές με τους συνδρομητές. Είναι υπεύθυνη για τη διαχείριση των εγγραφών των UEs σε NFs που τα εξυπηρετούν, την εξουσιοδότηση πρόσβασης σε υπηρεσίες και την αναγνώριση των χρηστών μέσω πιστοποιητικών επιβεβαίωσης.
- **Unified Data Repository (UDR):** Αποθηκεύει δεδομένα που ανακτά από άλλες NFs. Συγκεκριμένα, ανταλλάσσει δεδομένα συνδρομητών με την UDM, συμβολαίων με την PCF και διαθέσιμων υπηρεσιών με την NEF.
- **Application Function (AF):** Αλληλεπιδρά με τις υπόλοιπες NFs του δικτύου κορμού με σκοπό την παροχή υπηρεσιών. Παραδείγματα αποτελούν η επίδραση της δρο-

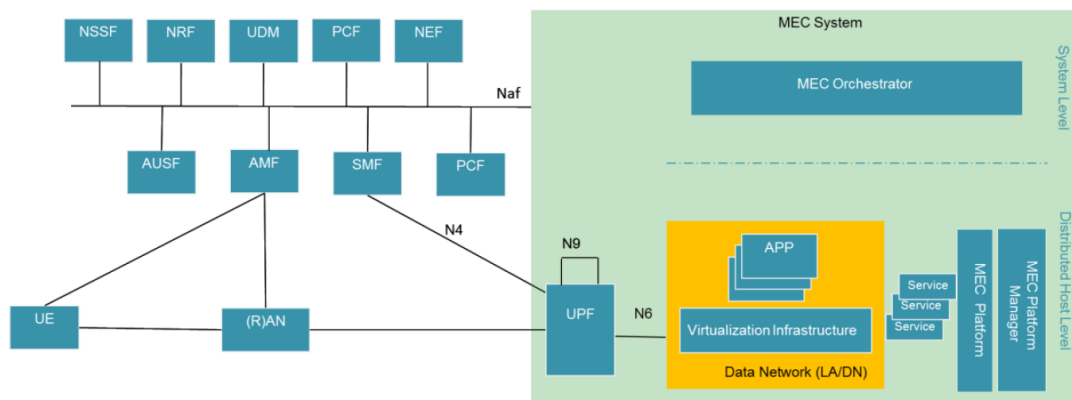
μολόγησης της κίνησης, η πρόσβαση στη λειτουργία έκθεσης των NFs και ο έλεγχος των πολιτικών χρέωσης, σε συνεργασία της AF με τις UPF, NEF και PCF αντίστοιχα. Οι AFs που θεωρούνται έμπιστες από τον διαχειριστή του δικτύου επικοινωνούν απευθείας με τις υπόλοιπες NFs του 5GC, ενώ οι υπόλοιπες διαφημίζουν τις υπηρεσίες τους μέσω της NEF.

- **Location Management Function (LMF):** Εκτιμά τη θέση των UEs με τη βοήθεια πληροφοριών που λαμβάνει από το ίδιο το UE και μετρήσεις του RAN.

4.4 Εφαρμογή του MEC στα δίκτυα 5G

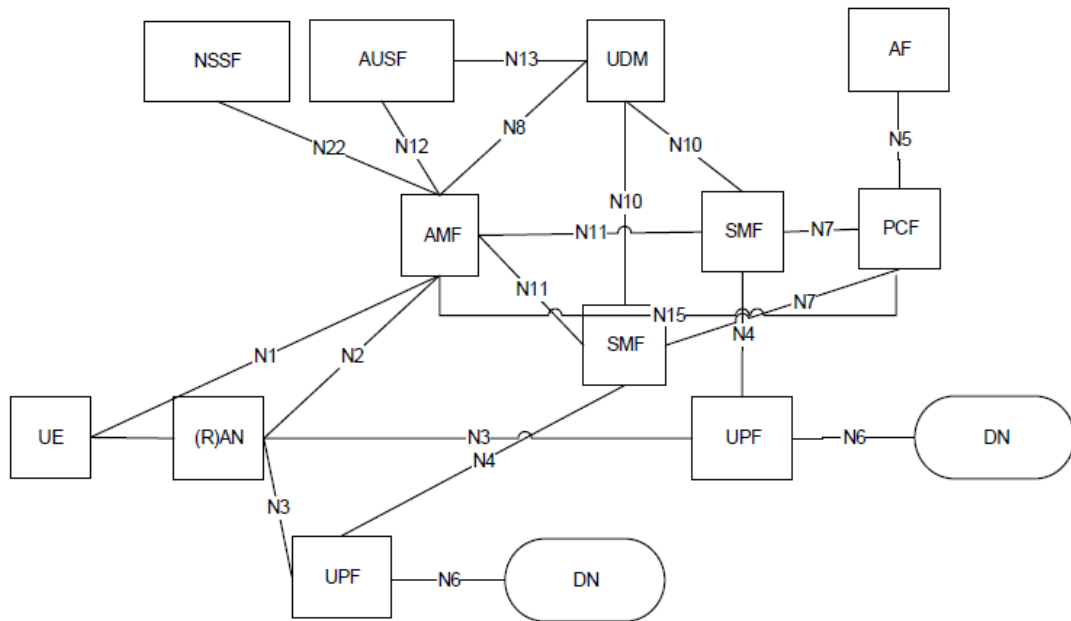
Η ανάπτυξη των προδιαγραφών του MEC από το ομώνυμο ETSI ISG ξεκίνησε ύστερα από μακροχρόνια διαθεσιμότητα των δικτύων LTE. Παρόλο που το MEC είναι σε μεγάλο βαθμό αυτόνομο, αφού καλύπτει τόσο τις λειτουργίες του στρώματος δεδομένων όσο και τις μονάδες διαχείρισης, η σχεδιάσή του ήταν μέχρι κάποιο βαθμό προσανατολισμένη στην αξιοποίηση αυτού στα δίκτυα LTE. Από την άλλη πλευρά, η σχεδίαση των δικτύων 5G από τη 3GPP έλαβε εξ αρχής υπόψη την υποστήριξη υπηρεσιών MEC από αυτά. Αυτό μπορεί να γίνει κατανοητό μετά από σύγκριση κάποιων εκ των NFs του 5GC με αντίστοιχες λειτουργίες του MEC κατά ETSI. Για παράδειγμα, οι διαθέσιμες υπηρεσίες του συστήματος 5G γνωστοποιούνται στις NFs μέσω της NRF, ο ρόλος της οποίας είναι παρόμοιος με το μητρώο υπηρεσιών που διαθέτει η MEP. Επιπλέον, όπως και το MEC, το 5GC υποστηρίζει την παροχή υπηρεσιών βασιζόμενων στην τοποθεσία των χρηστών, μέσω της LMF. Παράλληλα, στην αρχιτεκτονική SBA, οι NFs διαφημίζουν και καταναλώνουν υπηρεσίες κατόπιν μεμονωμένων αιτήσεων ή ύστερα από συνδρομή σε αυτές. Αυτός ο τρόπος επικοινωνίας βρίσκεται σε πλήρη αντιστοιχία με τα APIs που έχουν οριστεί για την παροχή υπηρεσιών στο MEC.

Όπως και στα δίκτυα LTE, η ενσωμάτωση του MEC στο 5G αφορά την επιλογή της θέσης εγκατάστασης των ME hosts και των NFs του 5GC. Ο διαχωρισμός των λειτουργιών του στρώματος δεδομένων (UPF) από αυτές του στρώματος ελέγχου (πχ. AMF, SMF) καθιστά εφικτή τη μεταφορά των πρώτων στους ME hosts για τον έλεγχο της κίνησης των δεδομένων μεταξύ του NG-RAN, του 5GC και των εξωτερικών δικτύων. Οι υπόλοιπες NFs μπορούν είτε να παραμείνουν στο δίκτυο κορμού είτε να υλοποιηθούν και αυτές εντός των hosts με τη μορφή VNFs. Στο Σχ. 4.18, απεικονίζεται ένας πιθανός τρόπος ενσωμάτωσης του MEC σε ένα δίκτυο 5G, για το οποίο χρησιμοποιείται ο τρόπος αναπαράστασης SBA.

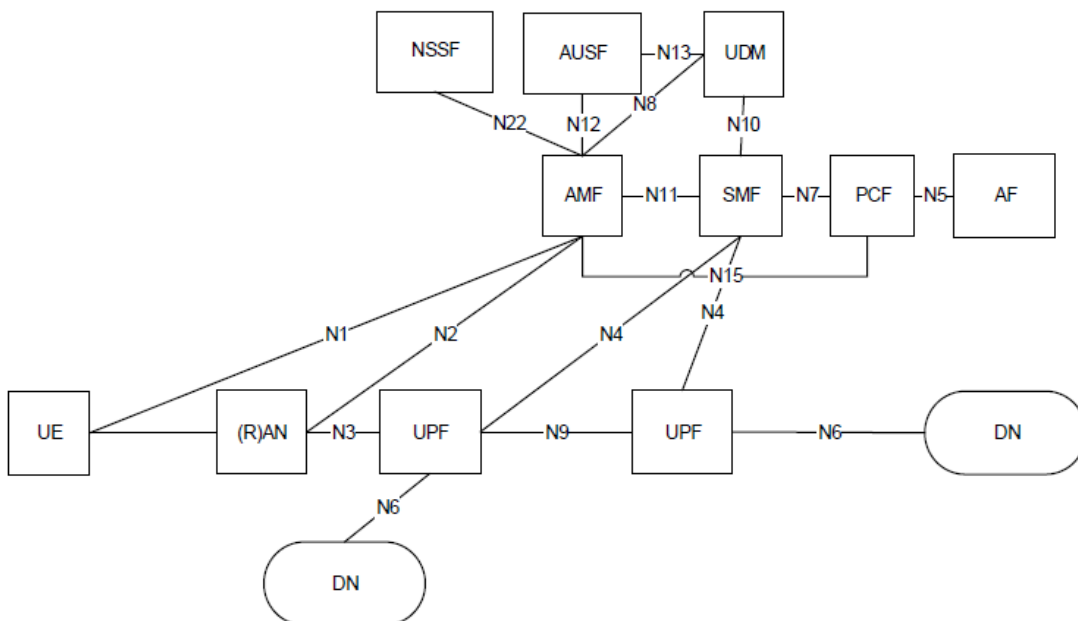


Σχήμα 4.18 Ένταξη του MEC στο 5G [58]

Σχετικά με τις λειτουργίες του στρώματος δεδομένων, το MEC παίζει το ρόλο του εξωτερικού δικτύου δεδομένων, οπότε ο ME host συνδέεται με την UPF μέσω της διεπαφής N6. Η διαφορά με το μεμονωμένο MEC είναι ότι, αντί οι κανόνες δρομολόγησης να προέρχονται από την MEP, μέσω της διεπαφής Mp2, ο ρόλος αυτός ανατίθεται στις NFs του 5G. Συγκεκριμένα, η UPF κατευθύνει την κίνηση δεδομένων χρήστη μεταξύ του δικτύου 5G και των εφαρμογών MEC, βάσει κανόνων που λαμβάνει από την SMF. Η κίνηση επηρεάζεται, επίσης, από την PCF, σύμφωνα με τους κανόνες χρέωσης των χρηστών.



Σχήμα 4.19 Αρχιτεκτονική συστήματος 5G για ταυτόχρονη πρόσβαση σε δύο δίκτυα δεδομένων [56]

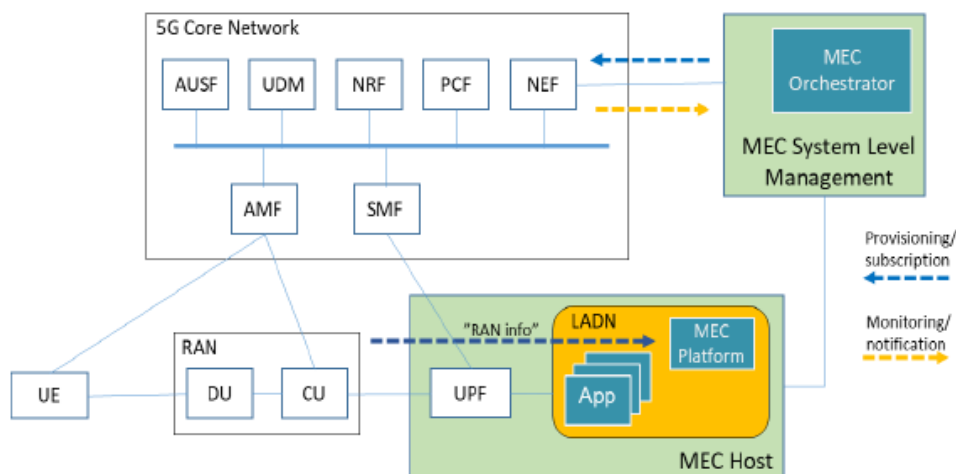


Σχήμα 4.20 Πρόσβαση του δικτύου 5G σε δύο δίκτυα δεδομένων με χρήση μοναδικής συνόδου [56]

Προκειμένου να διευκολυνθεί η εφαρμογή του MEC, το σύστημα 5G που προτάθηκε από την 3GPP υποστηρίζει την ταυτόχρονη πρόσβαση σε δύο δίκτυα δεδομένων (πχ. κεντρικό και τοπικό). Ένας τρόπος υλοποίησης αυτής της δυνατότητας φαίνεται στο Σχ. 4.19, όπου το σύστημα διαθέτει ένα ζευγάρι UPF-SMF για κάθε δίκτυο δεδομένων. Η μία UPF μπορεί να βρίσκεται εντός ενός ME host, ενώ η άλλη παραμένει στο δίκτυο κορμού, για την παροχή πρόσβασης στο Internet. Η επιλογή των κατάλληλων SMF-UPF για τη δρομολόγηση της κίνησης πραγματοποιείται από τις άλλες NFs. Για παράδειγμα, η επιλογή μπορεί να γίνει με βάση τη θέση του χρήστη, με τη βοήθεια της AMF. Μία εναλλακτική λύση αποτελεί η χρήση μοναδικής SMF (Σχ. 4.20). Σε αυτήν την περίπτωση, η SMF αναλαμβάνει το ρόλο της επιλογής της κατάλληλης UPF και της ρύθμισης των κανόνων δρομολόγησης μεταξύ αυτών. Η ανταλλαγή δεδομένων μεταξύ των UPFs πραγματοποιείται μέσω μιας διεπαφής N9.

Στην αρχιτεκτονική του Σχ. 4.18, οι λειτουργικές μονάδες του MEC, όπως ο MEO και η MEP, συμπεριφέρονται ως AFs, οπότε επικοινωνούν με το 5GC με τη διεπαφή Naf του Σχ.4.15. Ο σκοπός αυτής της υλοποίησης είναι η διαφήμιση υπηρεσιών στο σύστημα 5G, προερχόμενων από εφαρμογές που τρέχουν εντός του Host. Ο MEO μπορεί να εκθέσει τις δυνατότητες του συστήματος MEC είτε απευθείας στις άλλες NFs του 5GC είτε μέσω της NEF. Η επιλογή εξαρτάται από το αν το σύστημα MEC θεωρείται αξιόπιστο από τον MNO που διαχειρίζεται το σύστημα 5G, αλλά και από την απαιτούμενη ασφάλεια των πληροφοριών. Οι υπηρεσίες που πιθανότατα θα εκτίθενται μέσω της NEF περιλαμβάνουν την παρακολούθηση της κατάστασης των UEs και τον έλεγχο των πολιτικών χρεώσεων. Επίσης, είναι δυνατή η τοποθέτηση μίας NEF εντός του host, η οποία θα προσφέρει χαμηλή καθυστέρηση κατά τη γνωστοποίηση τοπικών πληροφοριών ραδιοπρόσβασης στις εφαρμογές MEC.

Η διαφήμιση υπηρεσιών από τις AFs του MEC αξιοποιείται για την επιρροή της δρομολόγησης της κίνησης. Μία AF, όπως ο MEO, στέλνει αιτήσεις στην PCF με πληροφορίες σχετικές με την κίνηση που πρόκειται να τροποποιηθεί. Οι πληροφορίες μπορούν να περιλαμβάνουν αναγνωριστικά του είδους της κίνησης, των UEs προορισμού και των κανόνων δρομολόγησης που αφορούν ένα δίκτυο δεδομένων. Οι αιτήσεις που λαμβάνει η PCF, είτε μέσω της διεπαφής N5 (Σχ. 4.16, 4.19, 4.20) είτε μέσω της NEF, μετατρέπονται σε



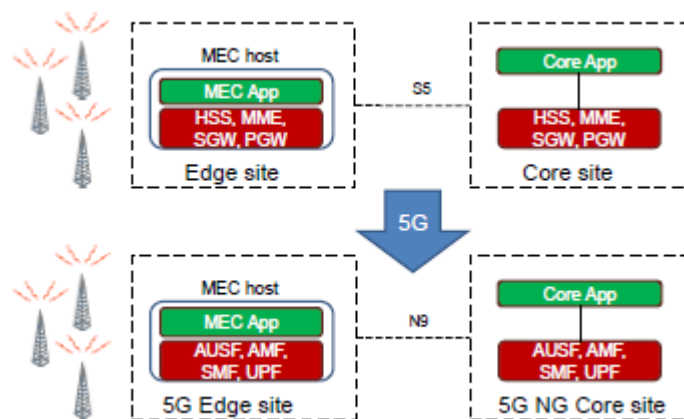
Σχήμα 4.21 Έκθεση δυνατοτήτων του συστήματος MEC [58]

κανόνες, που αφορούν συγκεκριμένη σύνοδο. Οι κανόνες αυτοί προωθούνται στην αντίστοιχη SMF και αξιοποιούνται από αυτήν για την επιλογή της κατάλληλης UPF για τη δρομολόγηση των δεδομένων.

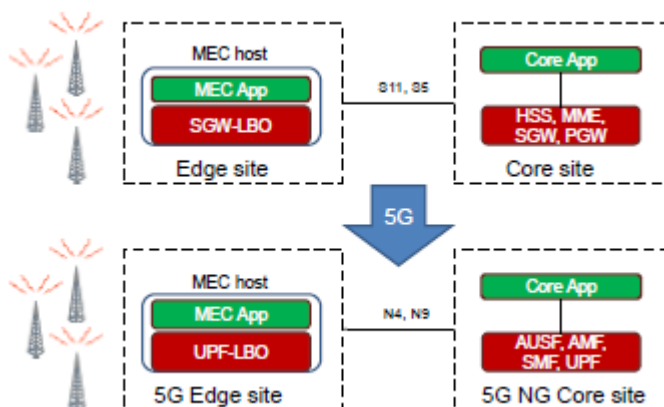
Όπως προαναφέρθηκε, οι MNOs δεν είναι υποχρεωμένοι να αναμένουν την ολοκλήρωση του 5G, προκειμένου να συμπεριλάβουν το MEC στο δίκτυό τους. Η ένταξη του MEC στο 5G μπορεί να επιτευχθεί με αναβάθμιση των λειτουργιών του δικτύου 4G, κάποιες από τις οποίες θα έχουν ήδη ενσωματωθεί στους MEC hosts. Οι πιθανοί τρόποι αναβάθμισης των σεναρίων που παρουσιάστηκαν στην παράγραφο 4.2 απεικονίζονται στα Σχ. 4.22-4.24, ενώ στον Πιν. 4.1, δίνεται η αντιστοίχιση μεταξύ των μονάδων του EPC και των NFs του 5GC.

Μονάδα EPC	Δικτυακή λειτουργία 5GC
HSS	AUSF
MME	AMF
CP των S/P-GW	SMF
UP των S/P-GW	UPF
PCRF	PCF

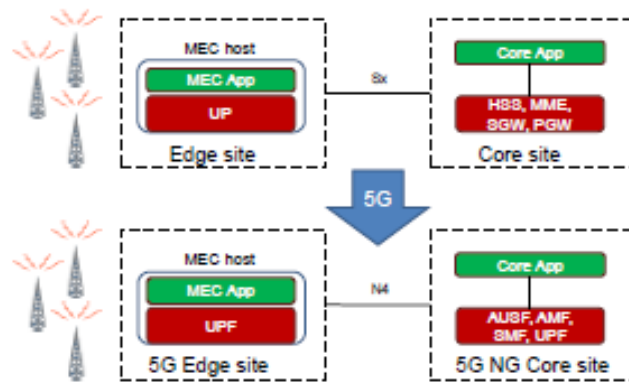
Πίνακας 4.1 Αντιστοίχιση μονάδων του EPC με τις δικτυακές λειτουργίες του 5GC



Σχήμα 4.22 Κατανεμημένος EPC στο 5G [48]



Σχήμα 4.23 Κατανεμημένη SGW με LBO στο 5G [48]



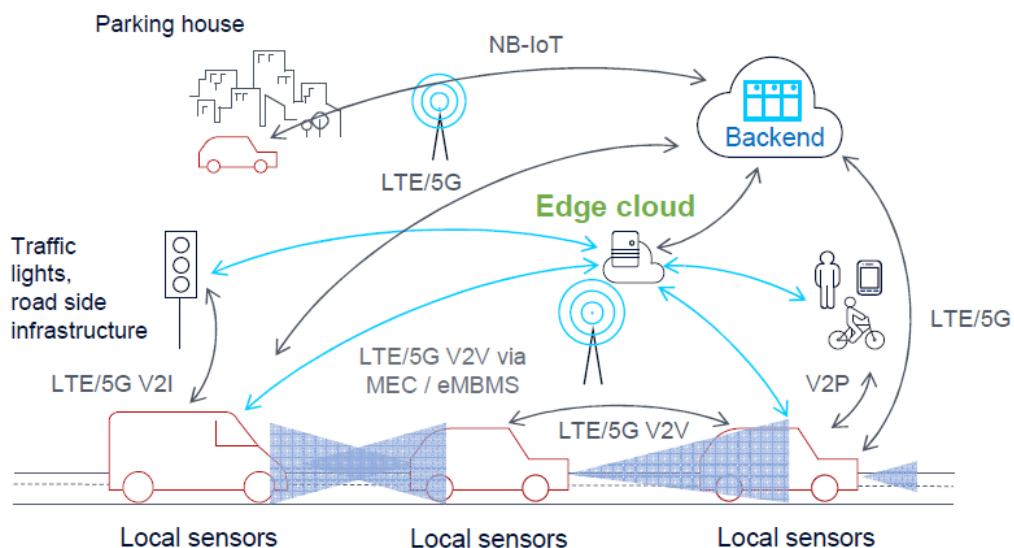
Σχήμα 4.24 CUPS στο 5G [48]

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: Χρήση του MEC στις επικοινωνίες οχημάτων

5.1 Εισαγωγή

Η διαρκής έρευνα σχετικά με την αγορά των έξυπνων συσκευών και του IoT έχει οδηγήσει σε αύξηση του πλήθους των οχημάτων με δυνατότητα πρόσβασης στο Internet. Σε κάποιες ανεπτυγμένες οικονομίες, μάλιστα, το ποσοστό των συνδεδεμένων οχημάτων αναμένεται να αγγίξει το 100% εντός της επόμενης πενταετίας [59]. Οι κατασκευαστές αυτοκινήτων και ειδικού εξοπλισμού θα αυξήσουν τα έσοδά τους, ιδιαίτερα μετά την έλευση των δικτύων πέμπτης γενιάς, μέσω της αγοράς των αυτόνομων οχημάτων. Από τις υπάρχουσες τεχνολογίες ασύρματης πρόσβασης, το LTE αποτελεί την καταλληλότερη επιλογή, καθώς έχει αποδειχθεί πως προσφέρει βελτιωμένο QoS (καθυστέρηση, throughput, PDR) σε περιπτώσεις υψηλής κινητικότητας, συγκριτικά με το IEEE 802.11p [60].

Παρά την ευρεία εξάπλωσή του, το LTE αδυνατεί να ικανοποιήσει τις απαιτητικές ανάγκες της πλειοψηφίας των εφαρμογών οδικής ασφάλειας και υποβοηθούμενης οδήγησης, καθώς το πλήθος των συνδεδεμένων οχημάτων αυξάνεται. Η αύξηση της τηλεπικοινωνιακής κίνησης που διακινείται μεταξύ των OBUs των οχημάτων και των αισθητήρων επί του οδοστρώματος οδηγεί σε χειροτέρευση της καθυστέρησης που υφίστανται τα μηνύματα έκτακτης ανάγκης, η οποία οφείλεται στο δίκτυο κορμού του παρόχου. Παράλληλα, οι επικοινωνίες V2X επιβαρύνονται σημαντικά από τους υπόλοιπους χρήστες που εξυπηρετεί μία κυψέλη, οι οποίοι, κατά κύριο λόγο, χαρακτηρίζονται από πολύ υψηλότερο τηλεπικοινωνιακό φορτίο σε σχέση με τα οχήματα. Επομένως, το LTE κρίνεται ακατάλληλο για την υποστήριξη οποιασδήποτε μορφής αυτόνομης ή ημιαυτόνομης οδήγησης, για τις οποίες θα χρειαστούν είτε νέες τεχνολογίες πρόσβασης είτε επεκτάσεις του LTE.



Σχήμα 5.1 MEC και τεχνολογίες πρόσβασης σε συστήματα V2X [63]

Ο συνδυασμός του MEC με το LTE μπορεί να αποτελέσει το ενδιάμεσο στάδιο για την ικανοποίηση μιας πληθώρας εφαρμογών V2X, πριν δηλαδή την άφιξη των δικτύων 5G στην αγορά. Η τοποθέτηση των ME hosts επιτρέπει σε εφαρμογές V2X να τρέχουν σε ση-

μεία πλησιέστερα στα RSUs, τα οχήματα και τους αισθητήρες και να ανταλλάσσουν δεδομένα μεταξύ αυτών με εξαιρετικά χαμηλή καθυστέρηση και υψηλή αξιοπιστία. Το MEC θα συμβάλει, επίσης, στη μείωση του φορτίου που διακινείται από το δίκτυο κορμού, χάρη στην ικανότητα των hosts να αναλύουν τις τοπικές πληροφορίες που συλλέγουν από τις διάφορες οντότητες του συστήματος και να αποστέλλουν μόνο συγκεντρωτικά μηνύματα στο κεντρικό cloud. Επιπλέον, η παροχή υπηρεσιών βασισμένων στη θέση των χρηστών θα διευκολύνει την ανάπτυξη εφαρμογών που αφορούν μια συγκεκριμένη περιοχή, όπως τη λήψη χαρτών υψηλής ανάλυσης και την ενημέρωση αυτών σε πραγματικό χρόνο. Η τοπική πληροφορία μπορεί να μεταδοθεί μεταξύ γειτονικών hosts, δίχως να περάσει από το δίκτυο κορμού του παρόχου, ώστε να είναι διαθέσιμη στους οδηγούς καθώς αυτοί κινούνται.

5.2 Επιχειρησιακά μοντέλα

Η ανάπτυξη των συστημάτων MEC απαιτεί το συντονισμό μεταξύ διαφορετικών οργανισμών και τη συνεργασία πολλαπλών ενδιαφερομένων φορέων, προκειμένου η τεχνολογία MEC να ενταχθεί στην αγορά και οι τελευταίοι να επωφεληθούν από αυτήν. Αναφορικά με την προτυποποίηση του MEC, κυρίαρχο ρόλο παίζουν ο ETSI, με τη σύνταξη ανοιχτών προδιαγραφών, καθώς και η 3GPP, η οποία είναι υπεύθυνη για την αρμονική ένταξη του MEC στα δίκτυα 5G. Ειδικά για τις επικοινωνίες μεταξύ οχημάτων, σχηματίστηκε η 5GAA (5G Automotive Association), με μέλη σημαντικές εταιρείες τηλεπικοινωνιών και κατασκευαστές ηλεκτρονικού εξοπλισμού και οχημάτων. Σκοπός της 5GAA είναι να γεφυρώσει το χάσμα μεταξύ της βιομηχανίας των οχημάτων και των τηλεπικοινωνιών και να συμβάλει στην παγκόσμια ανάπτυξη των ευφυών συστημάτων μεταφοράς [61]. Μεταξύ άλλων, έχει δημοσιεύσει δύο white papers, στα οποία αναγνωρίζει την υπεροχή των κυψελωτών δικτύων της 3GPP έναντι των ανταγωνιστών [62] και το ρόλο του MEC στις επικοινωνίες οχημάτων [63].

Οι βασικοί συμμετέχοντες στις επικοινωνίες V2X και στην εφαρμογή του MEC σε αυτές είναι οι MNOs και οι κατασκευαστές αυτοκινήτων και ηλεκτρονικού εξοπλισμού. Η συνεργασία αυτών έχει οδηγήσει σε πρότυπες δοκιμές αξιοποίησης του MEC [65, 66, 67], κατά τις οποίες επιτεύχθηκε καθυστέρηση μεταξύ δύο οχημάτων χαμηλότερη από 20ms, αποτέλεσμα μη εφικτό από τα σημερινά δίκτυα LTE. Άλλοι φορείς που θα συμβάλουν στην παροχή υπηρεσιών στους καταναλωτές είναι οι πάροχοι υπηρεσιών cloud (Cloud Service Providers – CSP), οι προγραμματιστές εφαρμογών και πλατφόρμων λογισμικού, καθώς και επιχειρήσεις άμεσα συσχετιζόμενες με τα οχήματα, όπως μεταφορικές εταιρίες, υπηρεσίες ραδιοταξί και τα μέσα μαζικής μεταφοράς. Ανάλογα με την επιθυμητή εφαρμογή, η συνεργασία των ανωτέρω επιχειρήσεων μπορεί να γίνει με βάση ένα από τα εξής μοντέλα:

- **Επιχείρηση προς επιχείρηση** (Business-to-business – B2B): Οι MNOs μισθώνουν το δίκτυό τους σε παρόχους εφαρμογών, οι οποίες μπορεί να αξιοποιούν μία υπηρεσία cloud. Οι υπηρεσίες που παρέχουν οι εφαρμογές στους καταναλωτές-επιβάτες γίνονται διαθέσιμες σε αυτούς μέσω της συνεργασίας των κατασκευαστών οχημάτων με κάποιον CSP.
- **Επιχείρηση προς καταναλωτή** (Business-to-consumer – B2C): Οι κατασκευαστές οχημάτων δίνουν εξατομικευμένες υπηρεσίες στους επιβάτες, αξιοποιώντας την υποδομή των MNOs και των CSPs.

- **Επιχείρηση προς επιχείρηση προς καταναλωτή** (Business-to-Business-to-Consumer – B2B2C): Όπως και στο προηγούμενο μοντέλο, οι χρήστες λαμβάνουν υπηρεσίες απευθείας από τους κατασκευαστές αυτοκινήτων. Οι πάροχοι εφαρμογών χρησιμοποιούν τους πόρους που διαθέτουν οι ΜΝΟs και, μέσω του δικτύου αυτών, μισθώνουν τις εφαρμογές στους κατασκευαστές οχημάτων.
- **Καταναλωτής προς καταναλωτή** (Consumer-to-consumer – C2C): Σε αυτήν την περίπτωση, τα οχήματα ανταλλάσσουν πληροφορίες μεταξύ τους, χωρίς τη μεσολάβηση κάποιου τρίτου φορέα.

Εκτός από τους κλάδους επιχειρήσεων που αναφέρθηκαν, σημαντικό ρόλο για την εναρμόνιση της αλληλεπίδρασης αυτών παίζουν οι ρυθμιστικοί φορείς και οι τοπικές αρχές για την έγκριση των παρεχόμενων υπηρεσιών και τον έλεγχο της τήρησης της κείμενης νομοθεσίας.

5.3 Κατηγορίες εφαρμογών που θα επωφεληθούν από το MEC

Η διαθεσιμότητα υπηρεσιών cloud στην άκρη του δικτύου έχει τη δυνατότητα να βελτιώσει σημαντικά την επίδοση της πλειοψηφίας των εφαρμογών V2X που παρουσιάστηκαν στην παράγραφο 1.3.2. Συγκεκριμένα, οι οργανισμοί προτυποποίησης (ETSI, 5GAA) έχουν ξεχωρίσει τέσσερις κατηγορίες περιπτώσεων χρήσης, οι οποίες συσχετίζονται σε μεγάλο βαθμό με το MEC. Αυτές είναι:

- Οδική ασφάλεια (Road Safety)
- Διευκόλυνση (Convenience)
- Εξελιγμένη υποβοηθούμενη οδήγηση (Advance Driving Assistance)
- Ευάλωτοι χρήστες (Vulnerable Road Users)

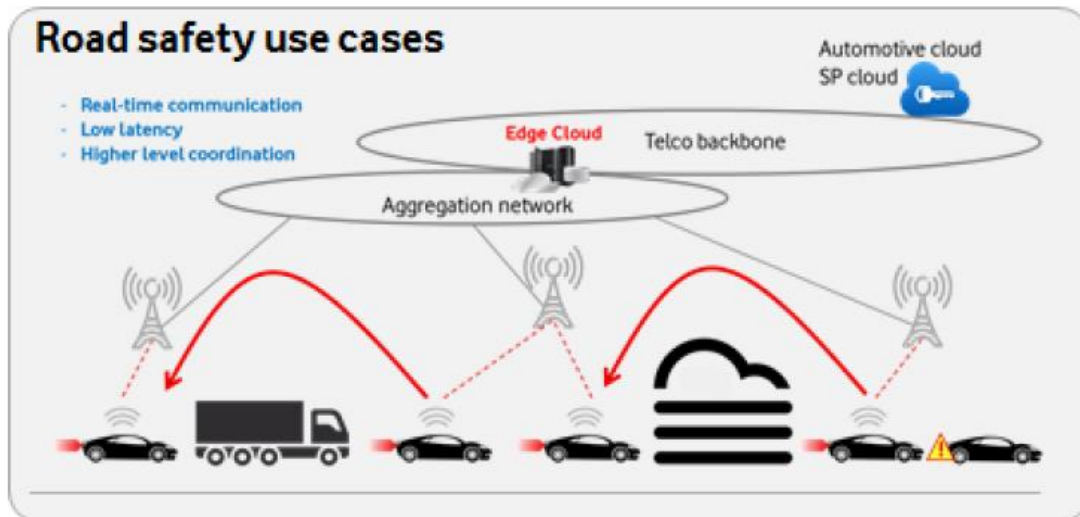
Στις παραγράφους 5.3.1-4 γίνεται αναφορά σε συγκεκριμένα παραδείγματα που ανήκουν στις ανωτέρω κατηγορίες και αποσαφηνίζεται η συσχέτιση αυτών με το MEC.

5.3.1 Οδική Ασφάλεια

Οι εφαρμογές οδικής ασφάλειας θέτουν τις αυστηρότερες απαιτήσεις καθυστέρησης, οπότε είναι και αυτές που επιβαρύνονται περισσότερο από τη διέλευση των μηνυμάτων από το δίκτυο κορμού. Οι κυριότερες περιπτώσεις χρήσης που σχετίζονται με το MEC είναι η αποστολή μηνυμάτων έκτακτης ανάγκης και η υποβοηθούμενη διέλευση σε διασταύρωση (Intersection Movement Assist – IMA). Η IMA αποσκοπεί στην αποφυγή συγκρούσεων μεταξύ οχημάτων που πλησιάζουν μία διασταύρωση από κάθετες κατευθύνσεις, προειδοποιώντας τον έναν οδηγό σε περίπτωση που δεν έχει οπτική επαφή προς το άλλο όχημα. Μία άλλη εφαρμογή που μπορεί να ενταχθεί στην παρούσα κατηγορία είναι η διαχείριση διασταύρωσης με έλεγχο των φωτεινών σηματοδοτών, η οποία μπορεί να αποτρέψει τους πιθανούς κινδύνους που προκύπτουν από τη συσσώρευση οχημάτων σε μία ουρά. Η τελευταία περίπτωση, αν και δεν έχει ανάγκη από ισχυρά αξιόπιστη επικοινωνία, βασίζεται στον ακριβή προσδιορισμό της θέσης των χρηστών, όπως βέβαια και οι προηγούμενες εφαρμογές.

Είναι προφανές ότι όλες οι προαναφερθείσες περιπτώσεις χρήσης αφορούν τα οχήματα μίας συγκεκριμένης περιοχής, οπότε τα κρίσιμα δεδομένα δεν χρειάζεται να είναι διαθέσιμα στο κεντρικό cloud. Ένας ME host, εγκατεστημένος σε σημείο συνάντησης, έχει τη δυνατότητα να προωθήσει προειδοποιητικά μηνύματα σε ένα σύνολο οχημάτων

με ελάχιστη καθυστέρηση, ακόμη και αν αυτά εξυπηρετούνται από διαφορετικό σταθμό βάσης. Επιπλέον, μια εφαρμογή που τρέχει στο edge cloud μπορεί να εκτελεί αλγόριθμους πρόβλεψης κινδύνων σύγκρουσης ή κυκλοφοριακής συμφόρησης σε μια λωρίδα, με βάση πληροφορίες για τη θέση και την ταχύτητα των οχημάτων που λαμβάνει από τα ίδια και τους αισθητήρες. Η εύρεση της θέσης των κινούμενων χρηστών θα γίνει πιο αποτελεσματική, με αξιοποίηση του Location API που έχει οριστεί για το MEC.

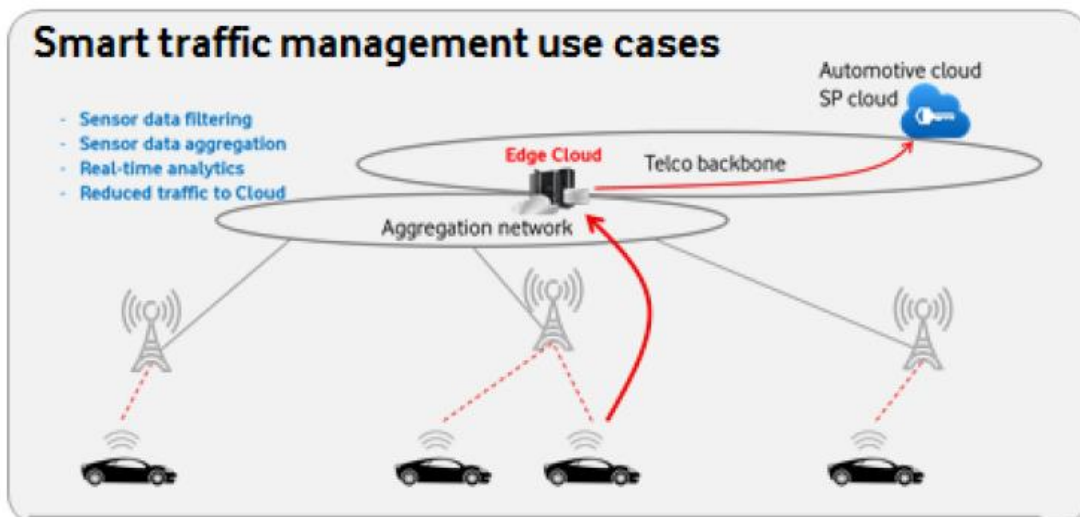


Σχήμα 5.2 Οδική ασφάλεια [68]

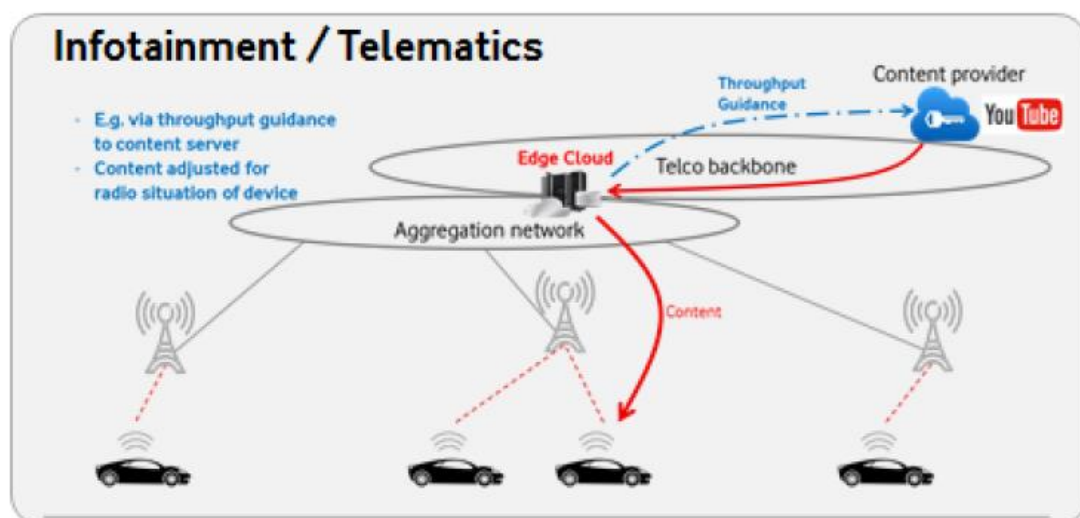
5.3.2 Διευκόλυνση

Αυτή η κατηγορία αφορά κυρίως ενημερώσεις λογισμικού και υπηρεσίες τηλεματικής. Αυτές οι περιπτώσεις χρήσης θέτουν χαλαρότερες απαιτήσεις για το δίκτυο σε σχέση με τις υπόλοιπες εφαρμογές που εξετάζονται, ενώ είναι υποστηρίξιμες και από τις υπάρχουσες τεχνολογίες πρόσβασης. Η εφαρμογή του MEC, όμως, μπορεί να συμβάλει στη μείωση του φορτίου που διακινείται από το δίκτυο κορμού. Σε μια περίπτωση συλλογής δεδομένων κυκλοφορίας, ο MEC server λαμβάνει περιοδικά μηνύματα από τα οχήματα και τους αισθητήρες, τα φιλτράρει και αποστέλλει συγκεντρωτικά μηνύματα σε έναν απομακρυσμένο εξυπηρετητή, με πολύ μικρότερο ρυθμό μετάδοσης. Αντίστοιχο όφελος προκύπτει και κατά την κατεύθυνση downlink, αφού οι πληροφορίες κυκλοφοριακής κίνησης και οι ενημερώσεις λογισμικού αποθηκεύονται κοντά στους τελικούς χρήστες και αποστέλλονται σε αυτούς, ενδεχομένως με χρήση πολυεκπομπής.

Στις εφαρμογές που βελτιώνουν την εμπειρία των επιβατών ανήκουν και όσες σχετίζονται με την ενημέρωση και τη διασκέδαση (Infotainment). Επειδή πρόκειται κυρίως για κατανάλωση πολυμεσικού περιεχομένου, αυτές οι εφαρμογές δεν αφορούν αποκλειστικά τις επικοινωνίες οχημάτων. Η αποδοτικότητα αυτών βασίζεται στην παράδοση περιεχομένου στους τελικούς χρήστες με υψηλό throughput, χαμηλή καθυστέρηση και ελάχιστες απώλειες, καθώς αυτοί κινούνται. Αυτοί οι στόχοι μπορούν να επιτευχθούν με την τοπική αποθήκευση περιεχομένου και εφαρμογές όπως η ευφυής επιτάχυνση βίντεο και η καθοδήγηση throughput από τον MEC server.



Σχήμα 5.3 Διαχείριση κυκλοφορίας [68]



Σχήμα 5.4 Ενημέρωση-Διασκέδαση-Τηλεματική [68]

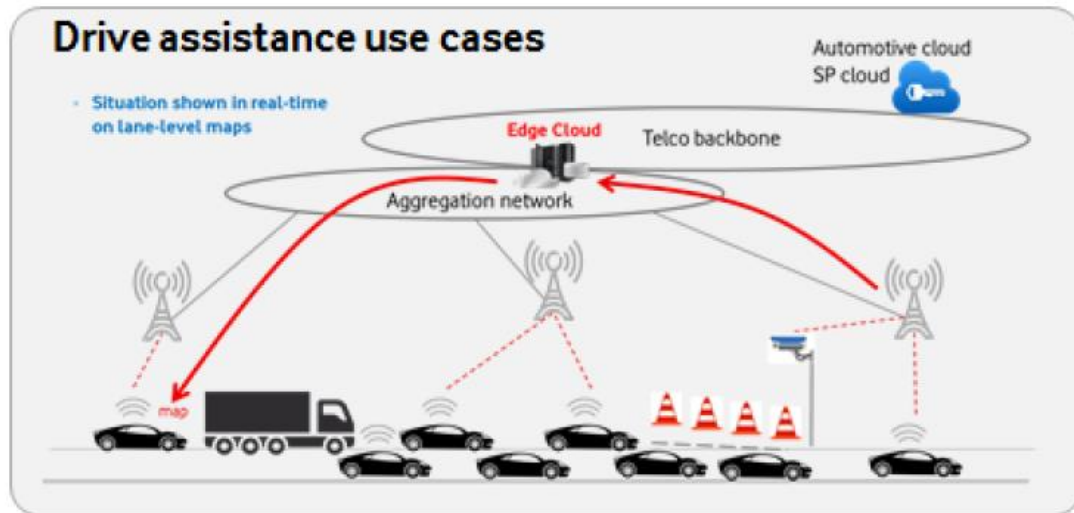
5.3.3 Εξελιγμένη υποβοηθούμενη οδήγηση

Οι εφαρμογές υποβοηθούμενης οδήγησης στοχεύουν στη βελτίωση της ροής της κυκλοφοριακής κίνησης, παρέχοντας στον οδηγό χρήσιμες πληροφορίες για την κατάσταση που επικρατεί γύρω από αυτόν. Σε αυτήν την κατηγορία εντάσσονται τρεις περιπτώσεις χρήσης, οι οποίες θέτουν τις μεγαλύτερες προκλήσεις για το MEC, καθώς απαιτούν τη μεταφορά υψηλού όγκου δεδομένων προς τα οχήματα με μεγάλη αξιοπιστία και χαμηλή καθυστέρηση ταυτόχρονα.

ι) Επίγνωση για την κατάσταση του δρόμου και χάρτες υψηλής ανάλυσης

Μέσω των υπηρεσιών τηλεματικής της προηγούμενης κατηγορίας, τα οχήματα ενημερώνονται για την κυκλοφοριακή κατάσταση με τη λήψη μιας ροής χαμηλού ρυθμού μετάδοσης. Αντίθετα, οι χάρτες υψηλής ανάλυσης παρέχουν στους οδηγούς πληροφορία για το γειτονικό τους περιβάλλον, συμπεριλαμβανομένων τυχόντων κινδύνων επί του οδοστρώματος, σε πραγματικό χρόνο. Επομένως, το εγγενές χαρακτηριστικό του MEC να

παρέχει στους χρήστες τοπική πληροφορία σε πραγματικό χρόνο το καθιστά κατάλληλο για την εξυπηρέτηση τέτοιων εφαρμογών. Προκειμένου να μειωθεί το απαιτούμενο εύρος ζώνης από την τεχνολογία ασύρματης πρόσβασης, το MEC μπορεί να συνδυαστεί με υπηρεσίες πολυεκπομπής, όπως η E-MBMS του LTE.



Σχήμα 5.5 Υποβοηθούμενη οδήγηση [68]

ii) See-through

Ένα σύνηθες πρόβλημα που αντιμετωπίζουν οι οδηγοί σε δρόμους μίας λωρίδας (ανά κατεύθυνση) είναι η μείωση του οπτικού τους πεδίου εξαιτίας ενός φορτηγού. Σε πολλές περιπτώσεις, η απόπειρα προσπέρασης θέτει σε κίνδυνο τόσο τον οδηγό του ίδιου του οχήματος όσο και αυτών της αντίθετης κατεύθυνσης. Η περίπτωση χρήσης «See-through» αποσκοπεί στη μείωση των ατυχημάτων κατά τη διαδικασία προσπέρασης. Ένα φορτηγό καταγράφει με χρήση κάμερας το οπτικό πεδίο του οδηγού του και το μοιράζεται σε πραγματικό χρόνο με τα οχήματα που βρίσκονται πίσω από αυτό. Αυτή η εφαρμογή θέτει, προφανώς, αυστηρές προϋποθέσεις για υψηλό ρυθμό μετάδοσης και χαμηλή καθυστέρηση, οπότε είναι αδύνατο να υλοποιηθεί χωρίς τη χρήση του MEC.

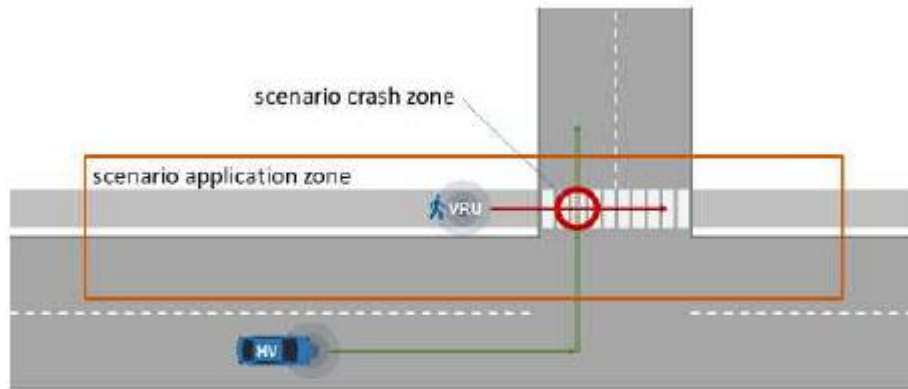
iii) Συνεργαζόμενη αλλαγή λωρίδας

Ο ρόλος της συνεργαζόμενης αλλαγής λωρίδας (Cooperative Lane Change) είναι παρόμοιος με αυτόν της προηγούμενης περίπτωσης. Αφορά κυρίως αυτόνομα ή ημιαυτόνομα οχήματα, τα οποία επιθυμούν να πραγματοποιήσουν προσπέραση ή να αλλάξουν λωρίδα. Το όχημα ή ο οδηγός αυτού λαμβάνει εντολές από τον MEC server, για να επιχειρήσει την επιθυμητή μετάβαση ή να την αναβάλει σε περίπτωση κάποιου διερχόμενου οχήματος.

5.3.4 VRUs

Οι VRUs, που αποτελούνται από τους πεζούς και τους ποδηλάτες, γνωστοποιούν την παρουσία τους στο δίκτυο με περιοδικά μηνύματα που αποστέλλουν οι φορητές συσκευές αυτών. Η πληροφορία αυτή αξιοποιείται από τα οχήματα για την αποφυγή ατυχημάτων που συμπεριλαμβάνουν πεζούς. Στο σενάριο του Σχ. 5.6, ο οδηγός ενός αυτοκινήτου επιθυμεί να πραγματοποιήσει στροφή σε ένα δρόμο, τον οποίο πρόκειται να

διασχίσει ένας πεζός. Επομένως, τόσο ο οδηγός όσο και ο πεζός χρήστης πρέπει να ενημερωθούν έγκαιρα για την ύπαρξη και την πρόθεση του άλλου. Όπως και στις εφαρμογές οδικής ασφάλειας, οι εφαρμογές που σχετίζονται με τους VRUs θα επωφεληθούν από τη μείωση της καθυστέρησης και τη βελτίωση του προσδιορισμού της θέσης των χρηστών που προσφέρει το MEC. Στο [69] συγκρίνεται η απόδοση ενός κυψελωτού συστήματος με και χωρίς την παρουσία του MEC σε μία περίπτωση αυτής της κατηγορίας.



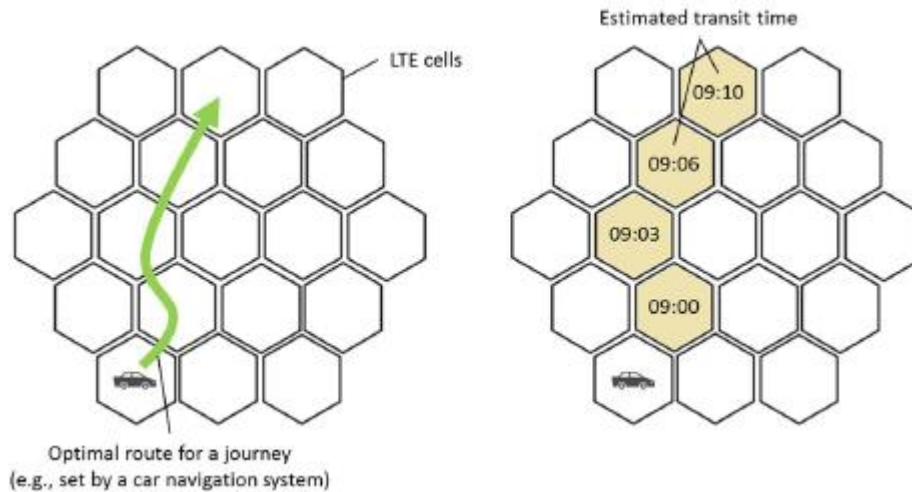
Σχήμα 5.6 Εντοπισμός VRUs [63]

5.4 Ζητήματα προς επίλυση

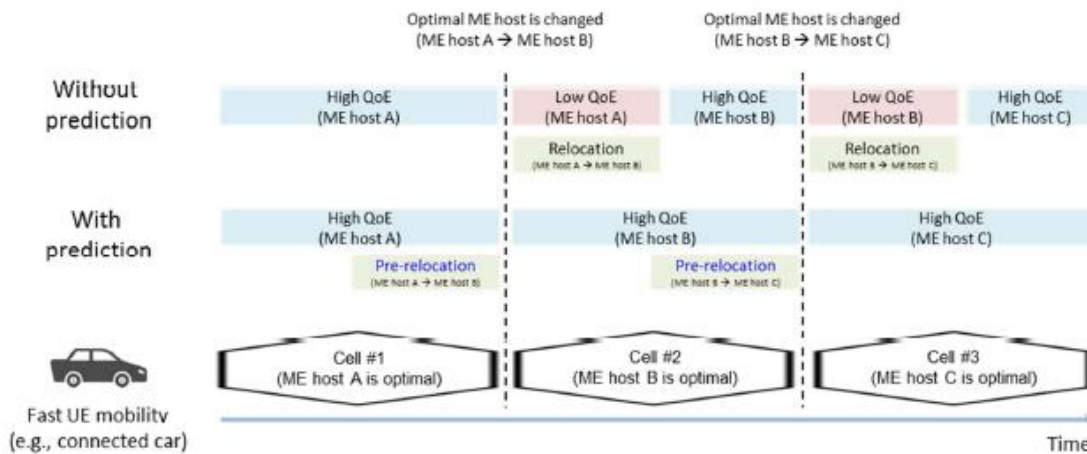
Ως γνωστόν, το MEC καλείται να εξυπηρετήσει πληθώρα καινοτόμων εφαρμογών με ποικίλες απαιτήσεις για QoS. Επομένως, είναι λογικό η αρχιτεκτονική του MEC και τα συμπληρωματικά APIs που ορίστηκαν από τον ETSI να μην μπορούν να αντεπεξέλθουν πλήρως στις προκλήσεις που θέτουν όλες οι δυνατές περιπτώσεις χρήσης. Ειδικά για τις επικοινωνίες V2X, το MEC ISG δημοσίευσε πρόσφατα μία μελέτη που εξετάζει βασικά ζητήματα και πιθανούς τρόπους αντιμετώπισης αυτών [68].

5.4.1 Διατήρηση του QoS κατά την κίνηση των οχημάτων

Μία επιθυμητή ιδιότητα που καθιστά τις εφαρμογές V2X αξιόπιστες είναι η διατήρηση του ζητούμενου QoS όταν τα οχήματα εισέρχονται στην περιοχή κάλυψης μιας νέας κυψέλης. Με την εφαρμογή του MEC, τίθεται επίσης το ζήτημα επιλογής του καταλληλότερου host για τη φιλοξενία των εφαρμογών μετά από την πραγματοποίηση μίας μεταπομπής. Σε περίπτωση που ένα όχημα κινείται με μεγάλη ταχύτητα, ενδεχομένως η επανατοποθέτηση της εφαρμογής να καθυστερήσει σημαντικά, με κίνδυνο την διακοπή της συνδεσιμότητας με το δίκτυο. Αυτό το πρόβλημα μπορεί να αντιμετωπιστεί με την πρόβλεψη της έναρξης της μεταπομπής [70]. Η εφαρμογή που τρέχει στη συσκευή του οχήματος ή στο MEC server εκτιμά τη χρονική στιγμή μετάβασης του οχήματος στη νέα κυψέλη και ξεκινά έγκαιρα τη μετεγκατάσταση των σχετικών δεδομένων στο γειτονικό host, εξασφαλίζοντας τη βελτιστοποίηση του QoS. Μία άλλη πιθανή λύση είναι η ταυτόχρονη εξυπηρέτηση ενός χρήστη από περισσότερους του ενός hosts, ώστε τα δεδομένα να έχουν ήδη μεταβιβαστεί πριν την έναρξη της μεταπομπής.



Σχήμα 5.7 Πρόβλεψη χρονικής στιγμής μεταπομπής [70]



Σχήμα 5.8 Πρόωρη μεταβίβαση της κατάστασης της εφαρμογής [70]

Ένα ακόμη χαρακτηριστικό που θα ήταν χρήσιμο για τις περιπτώσεις χρήσης υποβοηθούμενης οδήγησης είναι η πρόβλεψη της αξιοπιστίας του δικτύου. Για παράδειγμα, στην περίπτωση της συνεργαζόμενης αλλαγής λωρίδας ή του see-through, οι οδηγοί των οχημάτων πρέπει να γνωρίζουν εκ των προτέρων πως η επικοινωνία δεν θα διακοπεί κατά τη διάρκεια της προσπέρασης. Το Location API περιλαμβάνει ορισμένες λειτουργίες που διευκολύνουν την υλοποίηση των λύσεων της προηγούμενης παραγράφου, όπως η αποστολή ειδοποιήσεων κατά την αλλαγή κυψέλης. Αντίθετα, η παρούσα έκδοση του RNIS API δεν είναι επαρκής για την αποτελεσματική πρόβλεψη του QoS, οπότε είναι απαραίτητες ορισμένες επεκτάσεις αυτού.

5.4.2 Συντονισμός τηλεπικοινωνιακής κίνησης στα οχήματα

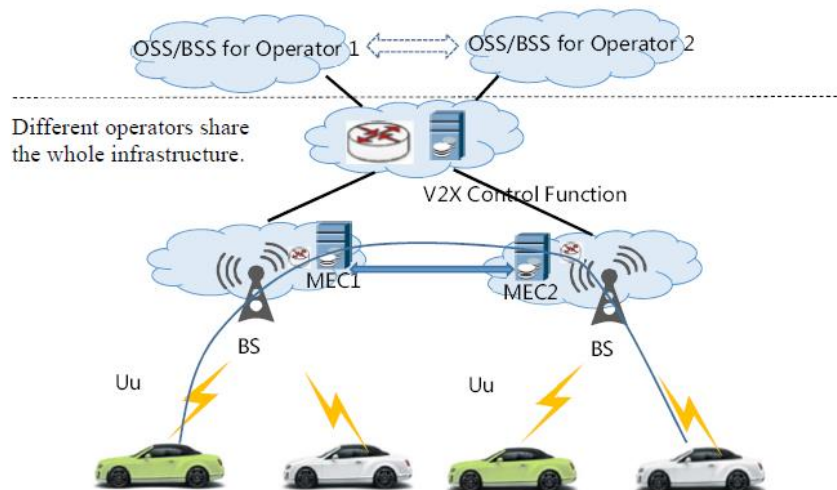
Τα οχήματα που θα αποκτήσουν συνδεσιμότητα μέσω των δικτύων LTE αναμένεται να γίνονται αποδέκτες διαφορετικών υπηρεσιών παράλληλα. Σε ένα πιθανό σενάριο, ένα όχημα καλείται να γνωστοποιήσει ένα γεγονός έκτακτης ανάγκης στη γειτονική του περιοχή, ενώ συγχρόνως όλα τα οχήματα ανταλλάσσουν περιοδικά μηνύματα με κάποιον εξυπηρετητή. Η αύξηση του πλήθους των οχημάτων ενδεχομένως να οδηγήσει σε

συμφόρηση του δικτύου, γεγονός που επιβραδύνει τη μετάδοση κρίσιμων μηνυμάτων. Για αυτόν το λόγο, θα ήταν χρήσιμο οι εφαρμογές MEC να προβλέπουν τη δικτυακή συμφόρηση και να δίνουν εντολή στους χρήστες να αναβάλουν την εκπομπή μηνυμάτων ανεκτικών σε καθυστέρηση. Η λειτουργία αυτή είναι επιτεύξιμη με την εκτέλεση κατάλληλων αλγορίθμων εκτίμησης του πλήθους των οχημάτων και του διαθέσιμου εύρους ζώνης, αξιοποιώντας και τα διάφορα APIs του MEC.

5.4.3 Λειτουργία πολλαπλών παρόχων

Σε πολλές περιπτώσεις, τα αυτοκίνητα και οι VRUs θα χρειαστεί να καταναλώσουν υπηρεσίες που προσφέρονται μέσω των δικτύων διαφορετικών MNOs. Τα CAMs και DENMs πρέπει να διαδίδονται με ελάχιστη καθυστέρηση σε οχήματα και πεζούς στη γειτονική περιοχή του αποστολέα, ακόμη και αν αυτοί είναι συνδρομητές σε άλλον πάροχο. Εκτός από τους λόγους ασφάλειας, η σύνδεση ενός χρήστη με τις υπηρεσίες V2X πρέπει να παραμένει αδιάλειπτη σε περίπτωση που αυτός μεταβεί σε μια περιοχή που εξυπηρετείται από διαφορετικούς παρόχους.

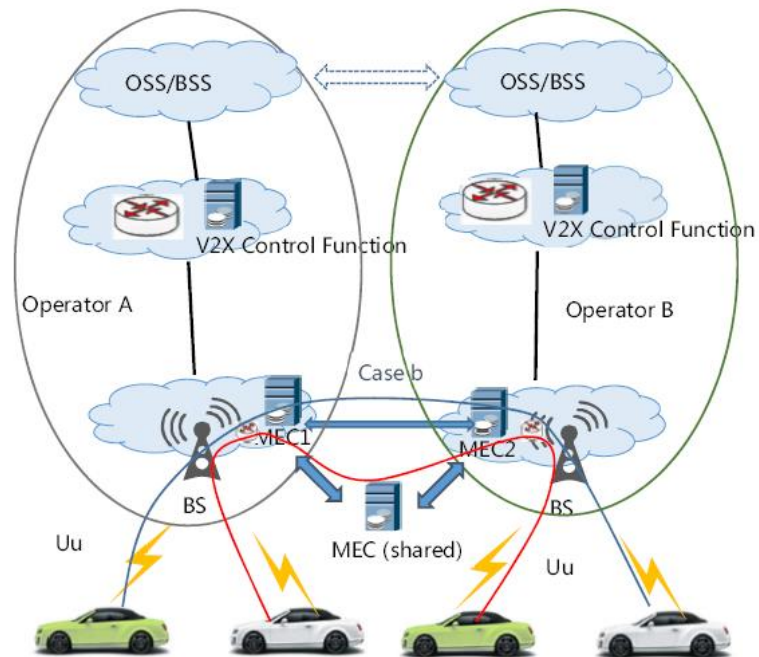
Στην παρούσα κατάσταση, προκειμένου να επικοινωνήσουν δύο χρήστες που ανήκουν σε διαφορετικό πάροχο, η τηλεπικοινωνιακή κίνηση διέρχεται υποχρεωτικά από ένα κεντρικό σημείο του δικτύου κορμού. Επομένως, για την εξυπηρέτηση εφαρμογών οδικής ασφάλειας και υποβοηθούμενης οδήγησης, είναι αναγκαίο να περιοριστεί η διαδρομή μεταξύ των δικτύων των MNOs. Η επικοινωνία μεταξύ γειτονικών συστημάτων MEC ορίζεται στις τρέχουσες προδιαγραφές, οπότε η λειτουργία πολλαπλών παρόχων αποτελεί περισσότερο επιχειρησιακό ζήτημα παρά τεχνολογικό.



Σχήμα 5.9 Κοινή χρήση δικτυακής υποδομής [68]

Στην περίπτωση του Σχ. 5.9, οι δύο MNOs διαθέτουν κοινή δικτυακή υποδομή, οπότε η παροχή υπηρεσιών V2X στους χρήστες συντονίζεται από μία και μόνη λειτουργία ελέγχου. Στο Σχ. 5.10, απεικονίζεται ένας εναλλακτικός τρόπος συνεργασίας, κατά τον οποίο οι πάροχοι διαχειρίζονται δύο ανεξάρτητα δίκτυα. Ο συντονισμός των λειτουργιών ελέγχου V2X επιτυγχάνεται είτε μέσω της επικοινωνίας των συστημάτων MEC των παρόχων είτε με κοινή χρήση του συστήματος MEC. Και στις δύο περιπτώσεις, η «οριζόντια» απόσταση που διανύουν τα μηνύματα περιορίζεται εντός του MEC. Προκειμένου να διεξαχθεί ομαλά

ο συντονισμός των συμμετεχόντων φορέων, απαιτούνται νέα επιχειρησιακά μοντέλα, η εφαρμογή των οποίων ενδεχομένως να διευκολυνθεί από τη σύνταξη κατάλληλου API για επικοινωνίες V2X.



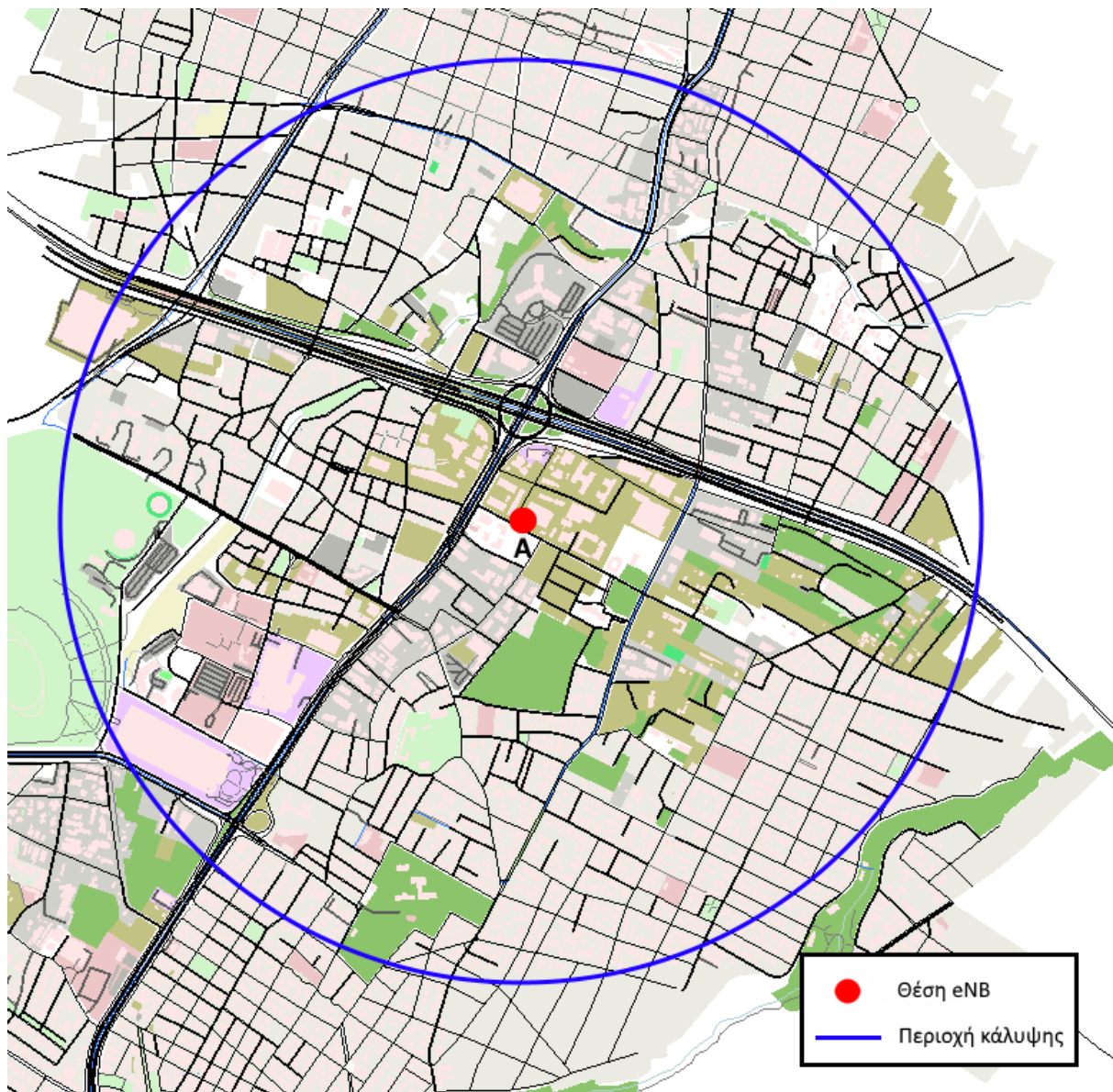
Σχήμα 5.10 Ανεξάρτητη δικτυακή υποδομή για κάθε MNO [68]

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6: Αξιοποίηση του MEC για εφαρμογές οδικής ασφάλειας και κυκλοφοριακής αποτελεσματικότητας

6.1 Σενάρια προσομοίωσης

6.1.1 Γενικά στοιχεία

Σε αυτό το κεφάλαιο, συγκρίνεται μέσω προσομοιώσεων η επίδοση του LTE με και χωρίς τη χρήση του MEC σε εφαρμογές οδικής ασφάλειας και παροχής δεδομένων κυκλοφορίας. Για την προσομοίωση της κυκλοφοριακής κίνησης, χρησιμοποιήθηκε ο εξομοιωτής SUMO (Simulation Of Urban Mobility) [71]. Συγκεκριμένα, εξετάστηκε ένα τμήμα της λεωφόρου Κηφισίας μήκους περίπου 2.5km, όπως απεικονίζεται στο Σχ. 6.1. Η προσομοίωση διαρκεί συνολικά 700 δευτερόλεπτα και περιλαμβάνει οχήματα κινούμενα από και



Σχήμα 6.1 Περιβάλλον προσομοίωσης

προς τις δύο κατευθύνσεις της λεωφόρου, ενώ η κίνηση που προέρχεται από παράπλευρους δρόμους αγνοήθηκε. Ως δεδομένα χρησιμοποιήθηκαν τρία επίπεδα κυκλοφοριακής κίνησης (χαμηλή, μέτρια και υψηλή), με χαρακτηριστικά που φαίνονται στον Πιν. 6.1.

	Χαμηλή κίνηση	Μέτρια κίνηση	Υψηλή κίνηση
Μέσο πλήθος συνδεδεμένων οχημάτων	127	304	510
Πυκνότητα οχημάτων (οχήματα/km)	50.8	121.6	204
Τυπική απόκλιση πλήθους οχημάτων	14	42	66
Τυπική απόκλιση % της μέσης τιμής	11	13.8	12.9

Πίνακας 6.1 Δεδομένα κυκλοφορίας

Τα δεδομένα κυκλοφορίας που προέκυψαν από το SUMO χρησιμοποιήθηκαν ως είσοδος στον εξομοιωτή δικτύων ns-3.28 [72], προκειμένου τα οχήματα να αποκτήσουν δυνατότητα επικοινωνίας. Για την προσομοίωση δικτύων LTE, αξιοποιήθηκε το module LENA (LTE-EPC Network simulAtor) [73] του ns3, το οποίο παρέχει τη δυνατότητα υλοποίησης σεναρίων με ακριβή αναπαράσταση της στοίβας πρωτοκόλλων του LTE και των λειτουργιών του EPC, με τον περιορισμό ότι το δίκτυο διαθέτει μοναδικό κόμβο S/P-GW. Στο σενάριο που προσομοιώθηκε, τοποθετήθηκε ένας eNB στο σημείο A του Σχ. 6.1, με ακτίνα κάλυψης 1250m, ενώ θεωρήθηκε ότι όλα τα οχήματα συμπεριφέρονται ως UEs. Τα οχήματα που εισέρχονται, από οποιαδήποτε διεύθυνση, στην περιοχή κάλυψης του eNB συνδέονται απευθείας σε αυτόν. Μόλις ένα όχημα εξέλθει από την περιοχή κάλυψης,

Μοντέλο διάδοσης	Απώλειες διάδοσης	$L=103.4+24.2\log_{10}(R)$ dB R σε km [74]
	Διαλείψεις	Rayleigh με ταχύτητα 60km/h και προφίλ καθυστέρησης ισχύος EVA από [75]
Παράμετροι LTE	Ελάχιστη Συχνότητα UL	1920 MHz
	Ελάχιστη Συχνότητα DL	2110 MHz
	Πλήθος RBs UL	100
	Πλήθος RBs DL	100
Παράμετροι eNB	Τύπος κεραίας	Ομοιοκατευθυντική
	Ισχύς εκπομπής	46 dBm
	Συντελεστής θορύβου	5 dB
	MAC scheduler	Round-Robin
Παράμετροι UEs	Τύπος κεραίας	Ομοιοκατευθυντική
	Ισχύς εκπομπής	26 dBm
	Συντελεστής θορύβου	9 dB

Πίνακας 6.2 Παράμετροι PHY και MAC της προσομοίωσης

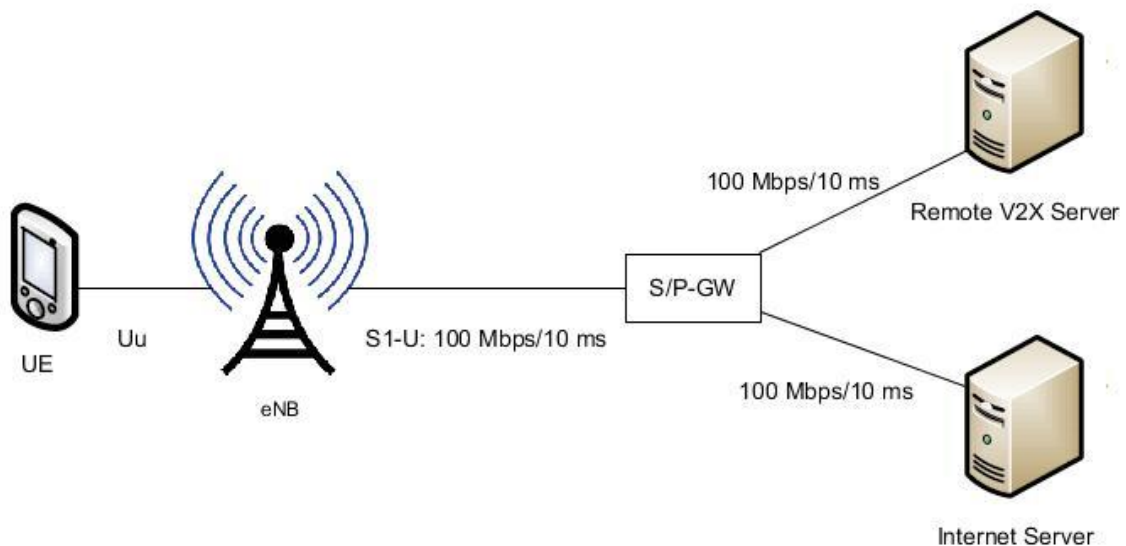
σταματούν οι σχετικές με αυτό μεταδόσεις. Στον Πιν. 6.2, δίνονται οι παράμετροι φυσικού στρώματος και MAC που χρησιμοποιήθηκαν κατά τις προσομοιώσεις.

Ένας από τους κύριους στόχους της εργασίας είναι να εξετασθεί η επίδραση που έχουν οι πεζοί χρήστες στις επικοινωνίες οχημάτων. Στην περίπτωση κατά την οποία κάποιος MNO παραχωρήσει το δίκτυό του για υλοποίηση εφαρμογών V2X, αυτό θα εξυπηρετεί ταυτόχρονα τους ήδη υπάρχοντες χρήστες υπηρεσιών mobile broadband, οι οποίοι χαρακτηρίζονται από πολύ υψηλότερη κίνηση σε σχέση με τα οχήματα. Για την προσομοίωση της κίνησης που προέρχεται από τους πεζούς χρήστες, τοποθετήθηκαν κόμβοι επί μίας ευθείας, σε σταδιακά αυξανόμενη απόσταση από τον eNB, από 100 έως 1000m. Κάθε χρήστης επικοινωνεί με έναν εξυπηρετητή του διαδικτύου, μέσω του μοναδικού eNB, καθ' όλη τη διάρκεια της προσομοίωσης. Οι χρήστες αποστέλλουν και λαμβάνουν κίνηση UDP σε τυχαία χρονικά διαστήματα και ο μέσος ρυθμός μετάδοσης αυτών είναι :

$$R_{user}^{UL} = 100 \text{ kbps} \text{ και } R_{user}^{DL} = 1 \text{ Mbps}$$

6.1.2 Προσομοίωση της λειτουργίας V2X με αποκλειστική χρήση του LTE (Μοντέλο LTE)

Το σενάριο που υλοποιήθηκε για την προσομοίωση του LTE απεικονίζεται στο Σχ. 6.2, όπου αναγράφονται η καθυστέρηση και ο μέγιστος ρυθμός μετάδοσης κάθε ζεύξης. Η S/P-GW συνδέεται μέσω ζεύξεων σημείου προς σημείο με τον εξυπηρετητή V2X, στον οποίο προωθεί όλα τα πακέτα που προέρχονται από τα οχήματα, καθώς και με τον εξυπηρετητή με τον οποίο επικοινωνούν οι πεζοί χρήστες. Οι ουρές των ζεύξεων είναι DropTail με χωρητικότητα 100 πακέτων.



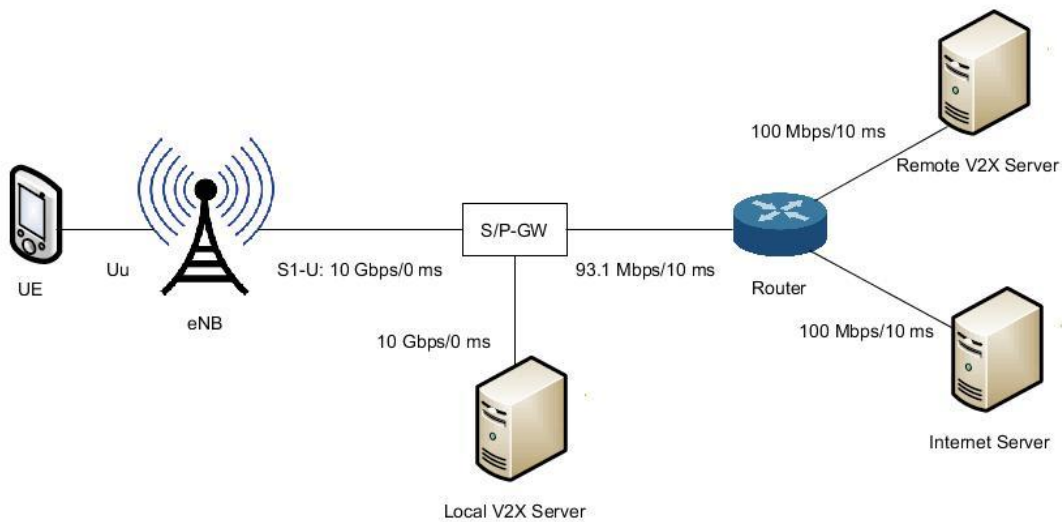
Σχήμα 6.2 Μοντέλο LTE

6.1.3 Προσέγγιση της λειτουργίας V2X με χρήση MEC (Μοντέλο MEC)

Το ns3 δεν διαθέτει μοντέλα για την προσομοίωση συστημάτων MEC, οπότε έπρεπε με κάποιον τρόπο να προσεγγιστεί η λειτουργία αυτού. Αρχικά, τοποθετήθηκε ένας ακόμη εξυπηρετητής V2X, που συνδέεται απευθείας με την S/P-GW με μία ζεύξη ρυθμού μετάδοσης 10 Gbps και μηδενικής καθυστέρησης. Αντίστοιχα χαρακτηριστικά χρησιμοποιή-

ήθηκαν και για τη ζεύξη S1-U. Με αυτόν τον τρόπο, οι δύο αυτές ζεύξεις μπορούν να θεωρηθούν ως εικονικές διεπαφές, που βρίσκονται στο ίδιο σημείο με τον eNB. Η δρομολόγηση της κίνησης ελέγχεται από έναν κόμβο, ο οποίος σε ένα πραγματικό σενάριο μπορεί να είναι ένας μεταγωγέας SDN υψηλής ταχύτητας, όπως προτείνεται στο [76]. Τα μηνύματα που προέρχονται ή προορίζονται για τα οχήματα ανταλλάσσονται μεταξύ του eNB και του τοπικού εξυπηρετητή V2X με πρακτικά μηδενική καθυστέρηση, ενώ δεν επηρεάζονται από την κίνηση των χρηστών, λόγω της υψηλής ταχύτητας των γραμμών.

Σε αντίθεση με το προηγούμενο μοντέλο, ο απομακρυσμένος V2X server δεν επικοινωνεί απευθείας με τα οχήματα. Ο ρόλος του είναι η περιοδική ανανέωση της πληροφορίας του τοπικού server, ώστε ο τελευταίος να αποκτήσει γνώση για την κατάσταση της κυκλοφορίας εκτός της περιοχής κάλυψης που μελετάται. Επιπλέον, ο τοπικός server αποστέλλει συγκεντρωτικά μηνύματα προς το δίκτυο κορμού, προκειμένου ο κεντρικός server να παράγει ακριβέστερα δεδομένα κυκλοφορίας αναφορικά με τη δεδομένη περιοχή.



Σχήμα 6.3 Μοντέλο MEC

Η πρόσβαση στις μονάδες του διαδικτύου γίνεται μέσω ενός δρομολογητή, ο οποίος παίζει το ρόλο της κεντρικής S/P-GW του δικτύου κορμού του MNO. Ο δρομολογητής συνδέεται με την τοπική S/P-GW με μία ζεύξη ίσης καθυστέρησης με αυτήν της S1-U του προηγούμενου σεναρίου (10ms). Η ταχύτητα αυτής της ζεύξης μειώθηκε σκόπιμα, όπως φαίνεται στο Σχ. 6.3, ώστε η συμπεριφορά της να πλησιάζει αυτήν της S1-U. Κάθε χρήστης ανταλλάσσει πακέτα με τον internet server μεγέθους 512 bytes, στα οποία προστίθενται 20 bytes η επικεφαλίδα IP και 8 bytes η επικεφαλίδα UDP. Η διεπαφή S1-U, όμως, προσθέτει σε όλα τα πακέτα επικεφαλίδες μεγέθους 40 bytes (20 IP + 8 UDP + 12 GTP [77]), οι οποίες αφαιρούνται κατά την έξοδο των πακέτων προς το εξωτερικό δίκτυο. Επομένως, προκειμένου η τηλεπικοινωνιακή κίνηση των πεζών χρηστών να μην επηρεάζεται στο δεύτερο σενάριο, η ταχύτητα της ζεύξης που συνδέει την S/P-GW με το δρομολογητή πρέπει να μειωθεί ως εξής:

$$R = 100 \text{ Mbps} \cdot \frac{512 + 20 + 8}{512 + 20 + 8 + 40} = 93.1 \text{ Mbps}$$

Με αυτήν την τροποποίηση, το σενάριο που υλοποιήθηκε προσεγγίζει την τοποθέτηση του MEC πάνω από τη διεπαφή S1-U της παραγράφου 4.2.1.

6.2 Αποτελέσματα προσομοιώσεων

6.2.1 Ενημέρωση της κυκλοφοριακής κατάστασης

Σε αυτό το σενάριο, συγκρίνεται η επίδοση των μοντέλων LTE και MEC των παραγράφων 6.1.2 και 6.1.3 κατά τη συλλογή και παροχή δεδομένων κυκλοφορίας από έναν εξυπηρετητή V2X συναρτήσει του πλήθους των πεζών χρηστών που κάνουν χρήση της υπηρεσίας LTE. Μόλις ένα όχημα εισέλθει στην περιοχή κάλυψης του eNB, αυτό εκκινεί τη μετάδοση πακέτων UDP μεγέθους $\text{Packet size}_{\text{UL}} = 300$ bytes δεδομένων, μετά από ένα τυχαίο χρονικό διάστημα, έως 100ms. Το μήνυμα αυτό θεωρείται ότι περιέχει πληροφορίες που αφορούν το ίδιο το όχημα, όπως θέση και ταχύτητα, αλλά και δεδομένα που λαμβάνει από τους αισθητήρες του. Η συχνότητα αποστολής μηνυμάτων από κάθε όχημα είναι $\text{Frequency}_{\text{UL}} = 10\text{Hz}$. Στην περίπτωση του LTE, τα μηνύματα προορίζονται για τον απομακρυσμένο εξυπηρετητή V2X, ενώ στο MEC κατευθύνονται προς τον αντίστοιχο τοπικό (έχει γίνει η υπόθεση ότι τα οχήματα έχουν ρωτήσει και λάβει τη διεύθυνση IP του τοπικού εξυπηρετητή). Οι τιμές που επιλέχθηκαν για τα μεγέθη πακέτων και τις συχνότητες αποστολής αυτών βρίσκονται εντός των ορίων που καθορίστηκαν από την 3GPP σε σχετική μελέτη [10]. Συγκεκριμένα, το τυπικό μέγεθος ενός μηνύματος που αποστέλλουν τα οχήματα ορίζεται στα 400 bytes (επιλέχθηκε μικρότερο λόγω της προσθήκης επικεφαλίδων), ενώ τα 10Hz αποτελούν τη μέγιστη τιμή για τη συχνότητα αποστολής μηνυμάτων.

Όταν ο αντίστοιχος εξυπηρετητής V2X αποκτήσει γνώση για την παρουσία ενός νέου οχήματος με τη λήψη του πρώτου πακέτου UL, προωθεί στο όχημα ένα πακέτο UDP μεγέθους $\text{Packet size}_{\text{DL}} = 1000$ bytes δεδομένων (το μέγιστο μέγεθος μηνυμάτων αυτού του τύπου είναι 1200 bytes [10]). Η συχνότητα αποστολής μηνυμάτων προς κάθε όχημα είναι $\text{Frequency}_{\text{DL}} = 1\text{Hz}$. Επομένως, τα οχήματα λαμβάνουν δεδομένα για την κατάσταση της κυκλοφορίας με μια ροή χαμηλού ρυθμού μετάδοσης, ο οποίος ενδεχομένως δεν είναι κατάλληλος για υπηρεσίες χαρτών υψηλής ανάλυσης.

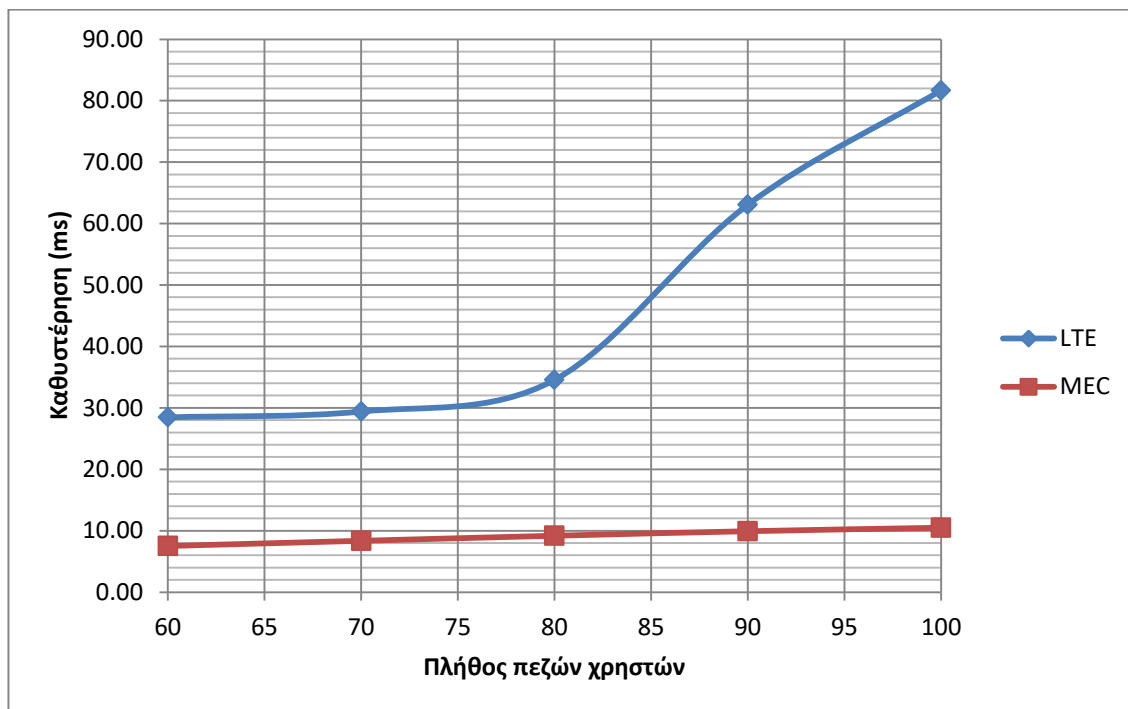
Στην περίπτωση του μοντέλου MEC, είναι ενεργές δύο ροές κίνησης μεταξύ του τοπικού και του απομακρυσμένου εξυπηρετητή V2X. Ο ρόλος της ζεύξης UL (τοπικός προς απομακρυσμένο) είναι η συγκεντρωτική αποστολή των μηνυμάτων που λαμβάνει ο τοπικός εξυπηρετητής από τα οχήματα, ενώ η DL αξιοποιείται για την ανανέωση των τοπικά αποθηκευμένων πληροφοριών. Οι ροές DL και UL στέλνουν πακέτα UDP μεγέθους $\text{Remote packet size}_{\text{DL}} = \text{Remote packet size}_{\text{UL}} = 1000$ bytes και οι συχνότητες αποστολής αυτών είναι $\text{Frequency}_{\text{DL}} = 1\text{Hz}$ και $\text{Frequency}_{\text{UL}} = 10\text{Hz}$. Ακολουθούν τα αποτελέσματα που προέκυψαν από τις προσομοιώσεις, συναρτήσει του πλήθους των πεζών χρηστών.

Στον Πιν. 6.3 και το Σχ. 6.4, αναγράφονται και απεικονίζονται αντίστοιχα οι τιμές της μέσης καθυστέρησης παράδοσης των περιοδικών μηνυμάτων που αποστέλλει ο V2X server (απομακρυσμένος ή τοπικός κατά περίπτωση) στα οχήματα για την περίπτωση της χαμηλής κίνησης του Πιν. 6.1. Αρχικά, είναι εμφανής η βελτίωση της καθυστέρησης που

επιτυγχάνεται με την εφαρμογή του MEC. Η μείωση αυτή αναμένεται να είναι τουλάχιστον 20ms, όση δηλαδή είναι η συνολική πρόσθετη καθυστέρηση που εισάγουν η S1-U και το δίκτυο κορμού. Όταν το πλήθος των πεζών χρηστών είναι μικρό, η μέση καθυστέρηση στα δύο σενάρια διαφέρει ελαφρώς περισσότερο των 20ms, καθώς το τηλεπικοινωνιακό φορτίο που αντιστοιχεί σε αυτούς είναι αρκετά μικρότερο από τη χωρητικότητα της S1-U. Όμως, όπως διαισθητικά αναμένεται, όσο περισσότεροι χρήστες επικοινωνούν με τον eNB τόσο μεγαλύτερη είναι η βελτίωση που προσφέρει το μοντέλο MEC. Όπως φαίνεται στο Σχ. 6.4, η καθυστέρηση που υφίστανται τα μηνύματα V2X στην περίπτωση του LTE αυξάνεται εντονότερα, για περισσότερους από 80 χρήστες. Το αποτέλεσμα αυτό οφείλεται στην παραμονή των πακέτων στις ουρές των ζεύξεων, λόγω της συμφόρησης της S1-U. Αντίθετα, ο αριθμός των πεζών χρηστών φαίνεται να επηρεάζει ελάχιστα τα μηνύματα V2X στο σενάριο με το μοντέλο MEC. Η ανεπαίσθητη αύξηση της καθυστέρησης που προέκυψε οφείλεται στο χρονοπρογραμματισμό του δικτύου ραδιοπρόσβασης. Βέβαια, οι απαιτήσεις που έχει θέσει η 3GPP για την καθυστέρηση παράδοσης δεδομένων κυκλοφορίας είναι αρκετά χαλαρές (500ms, βλ. Πιν. 1.2), οπότε προκύπτει το συμπέρασμα ότι οι εφαρμογές αυτού του τύπου μπορούν να εξυπηρετηθούν από τα υπάρχοντα συστήματα LTE, χωρίς χρήση MEC.

Πλήθος πεζών χρηστών	Καθυστέρηση μοντέλου LTE (ms)	Καθυστέρηση μοντέλου MEC (ms)
60	28.46	7.51
70	29.40	8.36
80	34.55	9.18
90	63.05	9.92
100	81.68	10.49

Πίνακας 6.3 Μέση καθυστέρηση δεδομένων κυκλοφορίας στη ζεύξη DL

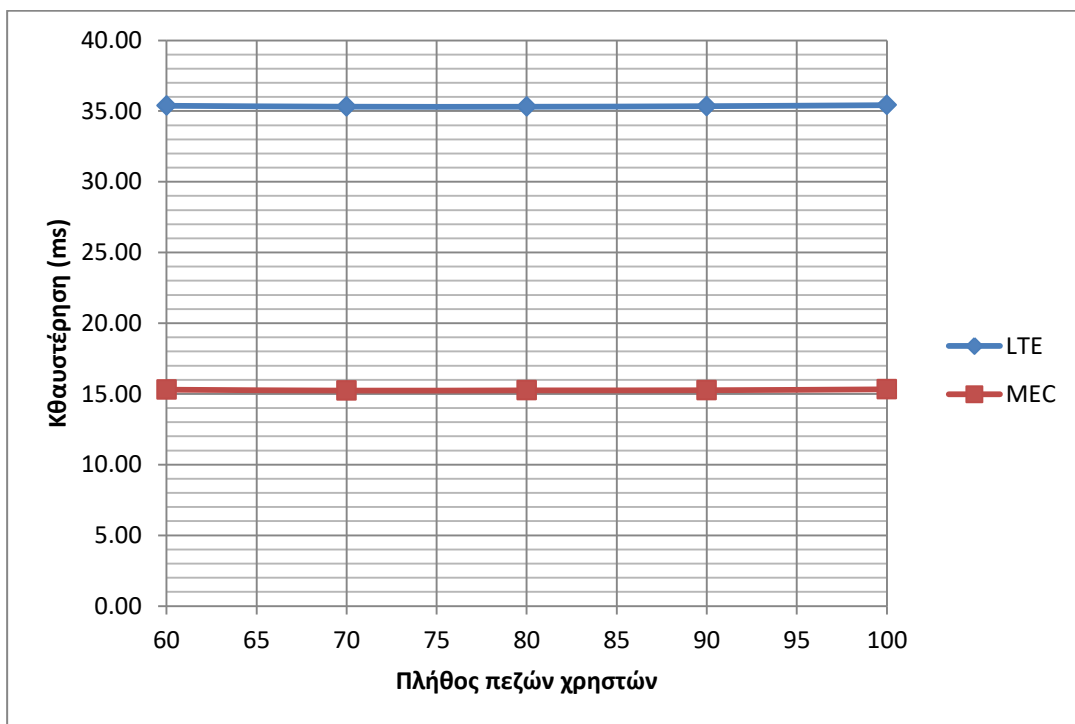


Σχήμα 6.4 Μέση καθυστέρηση δεδομένων κυκλοφορίας στη ζεύξη DL συναρτήσεως του πλήθους των πεζών χρηστών

Στον Πιν. 6.4, αναγράφονται οι μέσες καθυστερήσεις παράδοσης των μηνυμάτων που εκπέμπουν τα οχήματα προς τον V2X server (απομακρυσμένο ή τοπικό κατά περίπτωση). Σε αντίθεση με τη ζεύξη DL, αυτές οι τιμές δεν επηρεάζονται από τους πεζούς χρήστες και η διαφορά τους παραμένει σταθερή και ίση με 20ms. Αυτό είναι λογικό, αφού ο ρυθμός μετάδοσης με τον οποίο αποστέλλει δεδομένα κάθε χρήστης είναι πολύ μικρότερος από αυτόν στην κατεύθυνση DL, οπότε δεν επηρεάζει τις μεταδόσεις των οχημάτων.

Πλήθος πεζών χρηστών	Καθυστέρηση μοντέλου LTE (ms)	Καθυστέρηση μοντέλου MEC (ms)
60	35.38	15.30
70	35.31	15.23
80	35.31	15.25
90	35.35	15.26
100	35.42	15.32

Πίνακας 6.4 Μέση καθυστέρηση δεδομένων κυκλοφορίας στη ζεύξη UL



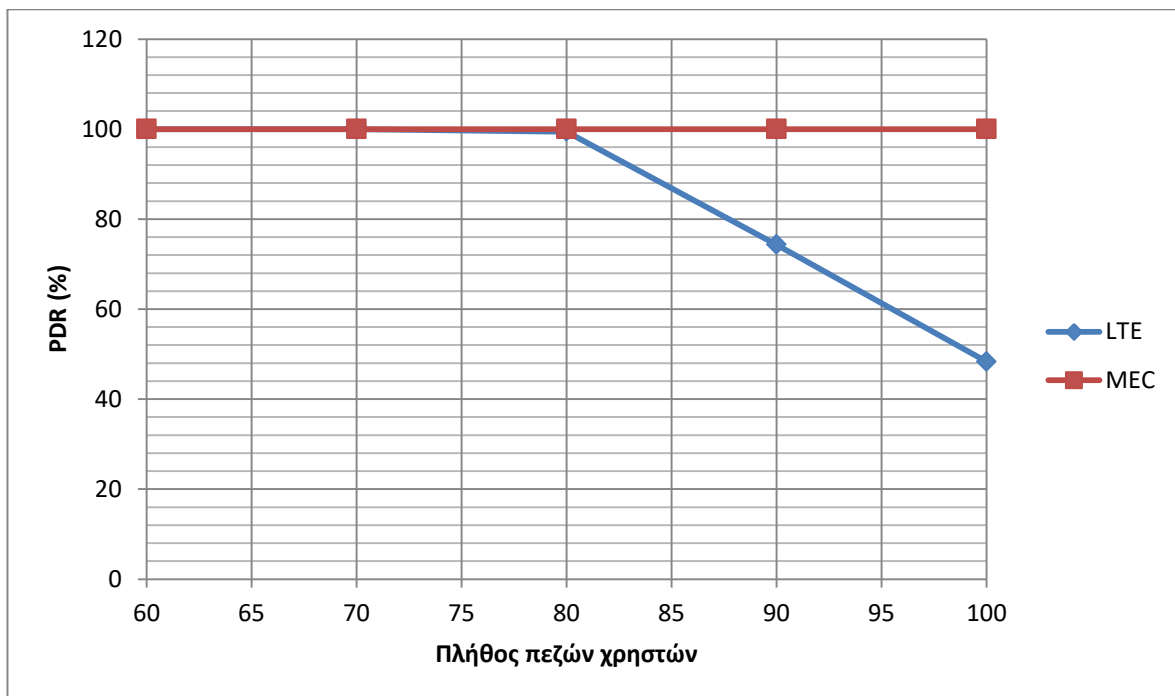
Σχήμα 6.5 Μέση καθυστέρηση δεδομένων κυκλοφορίας στη ζεύξη UL συναρτήσεως του πλήθους των πεζών χρηστών

Εκτός από την καθυστέρηση που εισάγει το δίκτυο, υπολογίστηκε και το ποσοστό παράδοσης πακέτων (PDR) από και προς τα οχήματα, το οποίο είναι εξίσου κρίσιμο μέγεθος για τις επικοινωνίες V2X. Σύμφωνα με τον Πιν. 6.5, οι απώλειες πακέτων στην κατεύθυνση DL για την περίπτωση του μοντέλου MEC είναι μηδενικές ανεξαρτήτως του πλήθους των πεζών χρηστών. Στο σενάριο που υλοποιήθηκε για την προσομοίωση του MEC, η μοναδική αιτία απωλειών πακέτων είναι το δίκτυο ραδιοπρόσβασης. Οι απώλειες είναι ελάχιστες, αφού η ισχύς εκπομπής του eNB είναι επαρκής, ενώ παράλληλα το LTE κάνει χρήση αναμεταδόσεων. Από την άλλη πλευρά, το PDR μειώνεται σε μη αποδεκτά επίπεδα στην περίπτωση του συμβατικού LTE, εξαιτίας της απόρριψης πακέτων από την ουρά της

S/P-GW. Στην κατεύθυνση UL (Πιν. 6.6), το ποσοστό παράδοσης αγγίζει το 100% και στα δύο σενάρια, λόγω της πολύ μικρότερης χρησιμοποίησης των ζεύξεων.

Πλήθος πεζών χρηστών	PDR μοντέλου LTE (%)	PDR μοντέλου MEC (%)
60	100	100
70	100	100
80	99.41	100
90	74.31	100
100	48.32	100

Πίνακας 6.5 Μέσο PDR στη ζεύξη DL



Σχήμα 6.6 Μέσο PDR στη ζεύξη DL συναρτήσει του πλήθους των πεζών χρηστών

Πλήθος πεζών χρηστών	PDR μοντέλου LTE (%)	PDR μοντέλου MEC (%)
60	99.98	99.98
70	99.98	99.98
80	99.98	99.98
90	99.98	99.98
100	99.98	99.98

Πίνακας 6.6 Μέσο PDR στη ζεύξη UL

Τα ανωτέρω αποτελέσματα υποδηλώνουν ότι το MEC επιτυγχάνει παράδοση των πακέτων από τον τοπικό V2X server στα οχήματα με μηδενικές απώλειες. Για να αποκτηθεί, όμως, πληρέστερη αντίληψη για την επίδοση του μοντέλου MEC, είναι απαραίτητο να εξετασθεί η ροή κίνησης μεταξύ των δύο V2X servers του Σχ. 6.3. Για την αξιολόγηση της ζεύξης με αποστολέα τον απομακρυσμένο και προορισμό τον τοπικό server, υπολογίστηκε το μέσο χρονικό διάστημα μεταξύ ανανεώσεων της τοπικής πληροφορίας, δηλαδή η ποσότητα

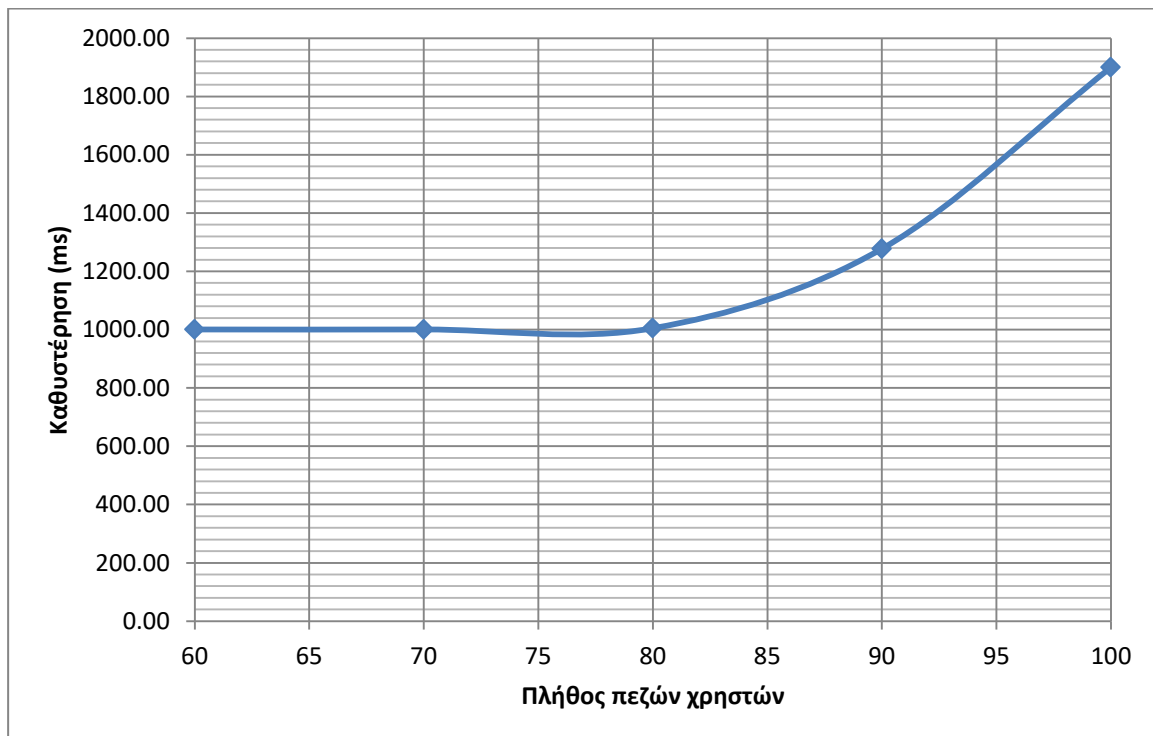
$$\overline{D}_{\text{renew}} = \frac{\sum_{i=1}^{N-1} (t_{i+1} - t_i)}{N - 1}$$

όπου N το πλήθος των ληφθέντων πακέτων από τον τοπικό V2X server και t_i η χρονική στιγμή άφιξης του i -οστού πακέτου σε αυτόν (ο αριθμός των χρονικών διαστημάτων μεταξύ πακέτων είναι $N - 1$).

Τα αποτελέσματα αναγράφονται στον Πιν. 6.7. Όταν το πλήθος των χρηστών παραμένει κάτω από ένα όριο, η περίοδος ανανέωσης των τοπικών δεδομένων είναι πρακτικά ίση με την περίοδο αποστολής μηνυμάτων από τον απομακρυσμένο server. Όσο, όμως, αυξάνεται η χρησιμοποίηση της ζεύξης S1-U, τα δεδομένα ανανεώνονται με αργότερο ρυθμό, εξαιτίας των αναπόφευκτων απωλειών πακέτων. Βέβαια, ο τοπικός server έχει τη δυνατότητα επεξεργασίας των πακέτων που λαμβάνει από τα οχήματα και μπορεί να παραδίδει ο ίδιος δεδομένα κυκλοφορίας σε αυτά με μηδενικές απώλειες. Επομένως, η επίδοση μιας εφαρμογής χρησιμοποιώντας το μοντέλο MEC θα επηρεαζόταν λιγότερο, σε σχέση με τη χρήση του συμβατικού μοντέλου LTE.

Πλήθος πεζών χρηστών	Καθυστέρηση (ms)
60	1000.60
70	1000.60
80	1004.83
90	1277.41
100	1899.94

Πίνακας 6.7 Μέση καθυστέρηση ανανέωσης δεδομένων του τοπικού server



Σχήμα 6.7 Μέση καθυστέρηση ανανέωσης δεδομένων του τοπικού server συναρτήσει του πλήθους των πεζών χρηστών

6.2.2 Αποστολή μηνυμάτων έκτακτης ανάγκης

Παράλληλα με την ενημέρωση των οδηγών για την κατάσταση της κυκλοφορίας, μελετήθηκε και η αποστολή μηνυμάτων DENM. Κατά τη διάρκεια της προσομοίωσης, ορίστηκαν 11 τυχαίες χρονικές στιγμές, στις οποίες ένα όχημα αποστέλλει ένα μήνυμα έκτακτης ανάγκης μεγέθους `EmergencyPacketSize = 800 bytes`. Μόλις ο εξυπηρετητής V2X του εκάστοτε χρησιμοποιούμενου σεναρίου λάβει αυτό το μήνυμα, εκπέμπει ένα μήνυμα ίσου μεγέθους προς όλα τα οχήματα εντός μίας περιοχής κάλυψης ακτίνας 500m περί το όχημα-αποστολέα. Για καθένα από αυτά τα γεγονότα, υπολογίζεται η μέση καθυστέρηση από άκρο σε άκρο (D_i), καθώς και το πλήθος των οχημάτων που έλαβαν το μήνυμα. Στη συνέχεια, προσδιορίζεται η μέση καθυστέρηση λήψης των μηνυμάτων έκτακτης ανάγκης για όλα τα γεγονότα και η τυπική απόκλιση αυτών από τη σχέση

$$\sigma_{\text{delay}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (D_i - \bar{D})^2}{n - 1}}$$

όπου \bar{D} η μέση τιμή της καθυστέρησης και n το πλήθος των μεταδόσεων ($n = 11$ για τις προσομοιώσεις). Στο σημείο αυτό, αξίζει να σημειωθεί ότι, σε ένα πραγματικό σενάριο, η αποστολή ενός μηνύματος DENM πιθανώς να συνεχίζει με περιοδικό τρόπο καθ' όλη τη διάρκεια του γεγονότος (πχ. μετά από σύγκρουση αυτοκινήτων). Στην παρούσα εργασία, εξετάστηκε αποκλειστικά η καθυστέρηση παράδοσης του πρώτου μηνύματος.

Αριθμός γεγονότος	LTE		MEC	
	Μέση καθυστέρηση (ms)	Πλήθος παραληπτών	Μέση καθυστέρηση (ms)	Πλήθος παραληπτών
1	67.96	51	26.48	51
2	71.39	52	27.16	52
3	71.74	69	28.00	69
4	69.50	42	26.15	42
5	68.69	61	29.19	61
6	80.48	58	32.98	58
7	65.03	61	25.41	61
8	78.02	56	28.74	56
9	69.14	52	33.04	52
10	70.83	45	25.38	45
11	68.81	49	24.91	49
Μέση τιμή	71.06	54	27.95	54
Τυπική απόκλιση	4.48		2.86	

Πίνακας 6.8 Καθυστέρηση και πλήθος παραληπτών μηνυμάτων έκτακτης ανάγκης, όταν υπάρχουν 60 πεζοί χρήστες

Αριθμός γεγονότος	LTE		MEC	
	Μέση καθυστέρηση (ms)	Πλήθος παραληπτών	Μέση καθυστέρηση (ms)	Πλήθος παραληπτών
1	75.04	51	34.06	51
2	69.96	52	32.00	52
3	82.07	69	31.25	69
4	84.55	42	35.55	42
5	68.89	61	32.59	61
6	75.21	58	28.22	58
7	70.36	61	29.93	61
8	71.36	56	29.55	56
9	74.48	52	45.12	52
10	68.00	45	26.27	45
11	68.76	49	23.31	49
Μέση τιμή	73.52	54	31.62	54
Τυπική απόκλιση	5.50		5.67	

Πίνακας 6.9 Καθυστέρηση και πλήθος παραληπτών μηνυμάτων έκτακτης ανάγκης, όταν υπάρχουν 70 πεζοί χρήστες

Αριθμός γεγονότος	LTE		MEC	
	Μέση καθυστέρηση (ms)	Πλήθος παραληπτών	Μέση καθυστέρηση (ms)	Πλήθος παραληπτών
1	73.08	51	26.48	51
2	97.87	52	27.16	52
3	79.41	69	28.00	69
4	75.40	42	26.15	42
5	69.80	61	29.19	61
6	72.93	58	32.98	58
7	70.31	61	25.41	61
8	73.38	56	28.74	56
9	77.10	52	33.04	52
10	71.24	45	25.38	45
11	68.27	49	24.91	49
Μέση τιμή	75.34	54	30.09	54
Τυπική απόκλιση	8.15		2.91	

Πίνακας 6.10 Καθυστέρηση και πλήθος παραληπτών μηνυμάτων έκτακτης ανάγκης, όταν υπάρχουν 80 πεζοί χρήστες

Αριθμός γεγονότος	LTE		MEC	
	Μέση καθυστέρηση (ms)	Πλήθος παραληπτών	Μέση καθυστέρηση (ms)	Πλήθος παραληπτών
1	124.87	23	31.73	51
2	118.12	52	31.13	52
3	122.46	33	36.65	69
4	80.48	42	31.19	42
5	72.16	61	36.03	61
6	119.02	58	30.36	58
7	78.11	61	29.75	61
8	120.19	27	30.54	56
9	120.39	46	29.69	52
10	70.36	45	33.16	45
11	69.04	49	27.41	49
Μέση τιμή	99.56	45	31.60	54
Τυπική απόκλιση	24.71		2.74	

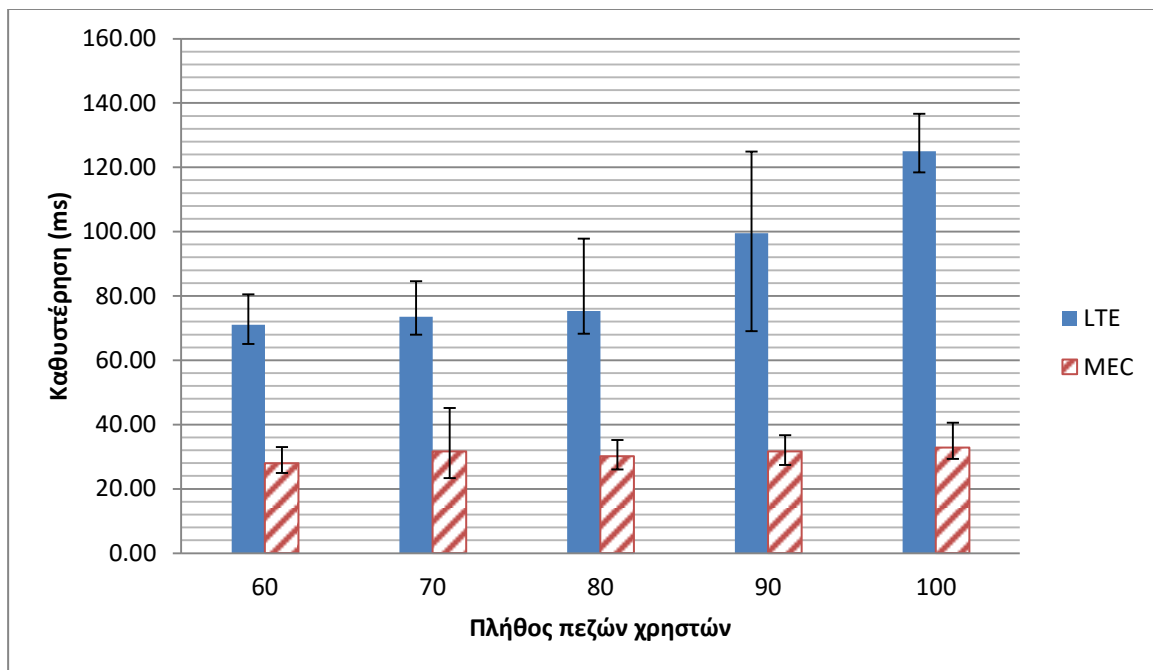
Πίνακας 6.11 Καθυστέρηση και πλήθος παραληπτών μηνυμάτων έκτακτης ανάγκης, όταν υπάρχουν 90 πεζοί χρήστες

Αριθμός γεγονότος	LTE		MEC	
	Μέση καθυστέρηση (ms)	Πλήθος παραληπτών	Μέση καθυστέρηση (ms)	Πλήθος παραληπτών
1	136.62	25	34.36	51
2	121.75	23	32.08	52
3	127.23	31	36.89	69
4	121.05	21	30.82	42
5	121.36	30	29.35	61
6	132.23	28	40.58	58
7	118.46	27	35.21	61
8	120.14	30	29.44	56
9	128.73	26	32.57	52
10	126.23	17	30.76	45
11	121.24	25	29.30	49
Μέση τιμή	125.00	26	32.85	54
Τυπική απόκλιση	5.72		3.60	

Πίνακας 6.12 Καθυστέρηση και πλήθος παραληπτών μηνυμάτων έκτακτης ανάγκης, όταν υπάρχουν 100 πεζοί χρήστες

Στο Σχ. 6.8, απεικονίζονται οι μέσες, ελάχιστες και μέγιστες τιμές των ανωτέρω αποτελεσμάτων. Δεδομένου ότι οι οδηγοί πρέπει να έχουν επαρκή χρόνο να αντιδράσουν, η μέγιστη αποδεκτή καθυστέρηση από άκρο σε άκρο των μηνυμάτων έκτακτης ανάγκης είναι 100ms (βλ. Πιν. 1.1). Οι προσομοιώσεις υποδηλώνουν ότι πέρα από ένα ποσοστό χρησιμοποίησης της ζεύξης, το μοντέλο LTE αδυνατεί να ικανοποιήσει αυτόν τον περιορισμό

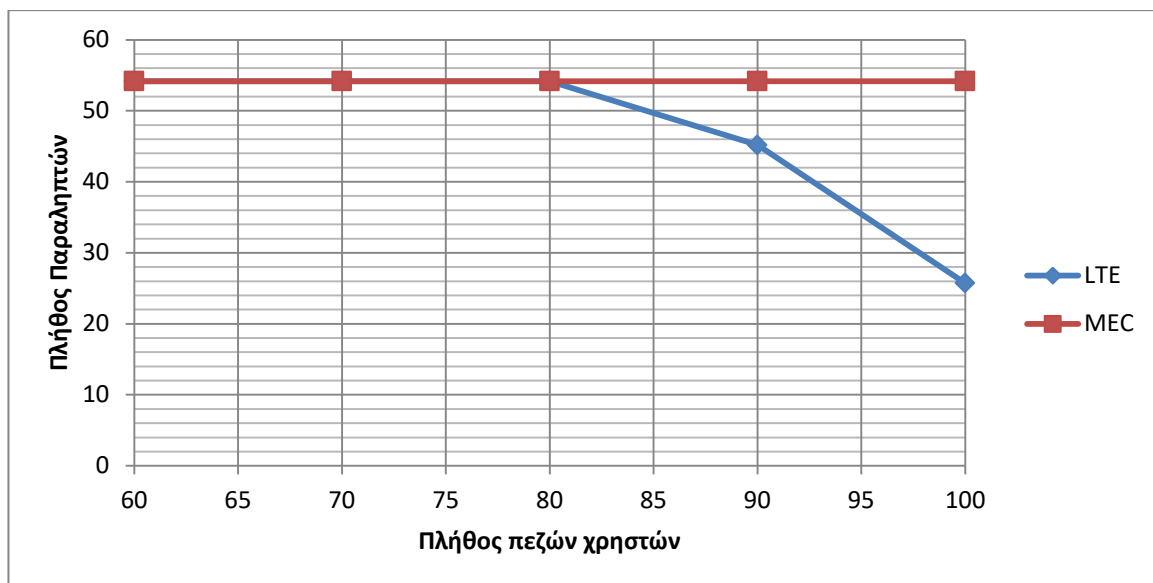
στην πλειοψηφία των μεταδόσεων. Επίσης, ενώ στην περίπτωση των 80 χρηστών η μέση καθυστέρηση παραμένει σε αποδεκτά επίπεδα, σε ένα συγκεκριμένο γεγονός αγγίζει το μέγιστο όριο (Πιν. 6.10, γεγονός 2). Η διασπορά των τιμών της καθυστέρησης οφείλεται στην τυχαιότητα της τηλεπικοινωνιακής κίνησης των πεζών χρηστών. Για παράδειγμα, οι 90 χρήστες συνεισφέρουν σε συνολική κίνηση, η οποία είναι άλλοτε μικρότερη και άλλοτε μεγαλύτερη από τη χωρητικότητα της S1-U, εξ ου και η μεγάλη διασπορά της καθυστέρησης σε αυτό το σενάριο. Από την άλλη πλευρά, η χρήση του μοντέλου MEC μπορεί να μειώσει την καθυστέρηση παράδοσης των μηνυμάτων σε αποδεκτά επίπεδα. Επιπλέον, με εξαίρεση μία ακραία περίπτωση (Πιν. 6.9, γεγονός 9), τα αποτελέσματα του μοντέλου MEC είναι πρακτικά ανεξάρτητα του πλήθους των χρηστών.



Σχήμα 6.8 Καθυστέρηση μηνυμάτων έκτακτης ανάγκης συναρτήσει του πλήθους των πεζών χρηστών

Όσον αφορά το πλήθος των αποδεκτών του μηνύματος έκτακτης ανάγκης (βλ. Σχ. 6.9), το μοντέλο MEC φαίνεται να επιτυγχάνει αξιόπιστη παράδοση σε όλες τις περιπτώσεις. Αντίθετα, η συμφόρηση του δικτύου, όταν χρησιμοποιείται αποκλειστικά το LTE, προκαλεί σημαντικές απώλειες πακέτων, οι οποίες είναι απαράδεκτες για εφαρμογές οδικής ασφάλειας.

Τέλος, αξίζει να σχολιασθεί περαιτέρω η επίδραση της καθυστέρησης που εισάγει το δίκτυο κορμού. Στις προσομοιώσεις που εκτελέστηκαν, η καθυστέρηση αυτή θεωρήθηκε σταθερή, υπόθεση που δεν αντιστοιχεί με ακρίβεια σε ένα πραγματικό σενάριο. Σε σχετική μελέτη επίδοσης του MEC στις επικοινωνίες οχημάτων [69], η συνεισφορά του δικτύου κορμού στη συνολική καθυστέρηση θεωρήθηκε ως τυχαία μεταβλητή με τιμές μεταξύ 15 και 35ms. Επομένως, η διαδρομή που διανύει ένα πακέτο ενδεχομένως να ξεπεράσει τα 20ms της προσομοίωσης (10ms backhaul συν 10ms CN), οπότε η απόδοση του μοντέλου LTE θα ήταν σαφώς χειρότερη.



Σχήμα 6.9 Μέσο πλήθος παραλληπτών του μηνύματος έκτακτης ανάγκης συναρτήσει του πλήθους των πεζών χρηστών

6.2.3 Επίδραση της πυκνότητας της κυκλοφοριακής κίνησης

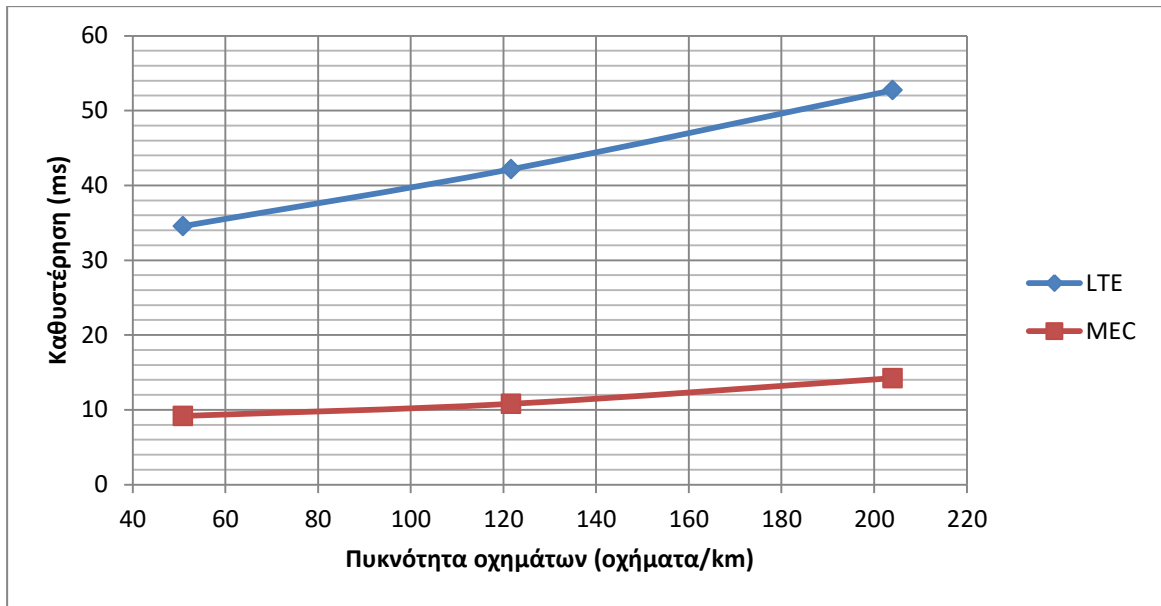
Σε αυτήν την παράγραφο, συγκρίνονται τα αποτελέσματα των προηγούμενων παραγράφων (χαμηλή κίνηση) με αυτά που προκύπτουν για τα άλλα δύο επίπεδα κυκλοφοριακής κίνησης του Πιν. 6.1. Το πλήθος των πεζών χρηστών που επηρεάζουν τη λειτουργία V2X θεωρήθηκε σταθερό και ίσο με 80, καθώς, από τις προσομοιώσεις, αυτό αποδείχθηκε ως το όριο πέρα από το οποίο η επίδοση του μοντέλου LTE είναι ανεπαρκής, ακόμη και με χαμηλή πυκνότητα οχημάτων. Στους Πιν. 6.13-6.15, αναγράφονται οι τιμές για τη μέση καθυστέρηση και το PDR των περιοδικών μηνυμάτων. Τα αποτελέσματα για το PDR στη ζεύξη UL δεν δίνονται, γιατί ήταν ταυτόσημα με αυτά του Πιν. 6.6. Η καθυστέρηση αποστολής και λήψης μηνυμάτων από τα οχήματα αυξάνει και στα δύο σενάρια, καθώς η πυκνότητα των οχημάτων μεγαλώνει, όμως εξακολουθεί να παραμένει σε αποδεκτά επίπεδα. Αντίστοιχα, το PDR στη ζεύξη DL για την περίπτωση του μοντέλου LTE μπορεί να μειώνεται, αλλά παραμένει αποδεκτό για την αξιόπιστη παράδοση δεδομένων κυκλοφορίας στα οχήματα.

Πυκνότητα κίνησης	Καθυστέρηση μοντέλου LTE (ms)	Καθυστέρηση μοντέλου MEC (ms)
Χαμηλή	34.55	9.18
Μέτρια	42.16	10.80
Υψηλή	52.72	14.23

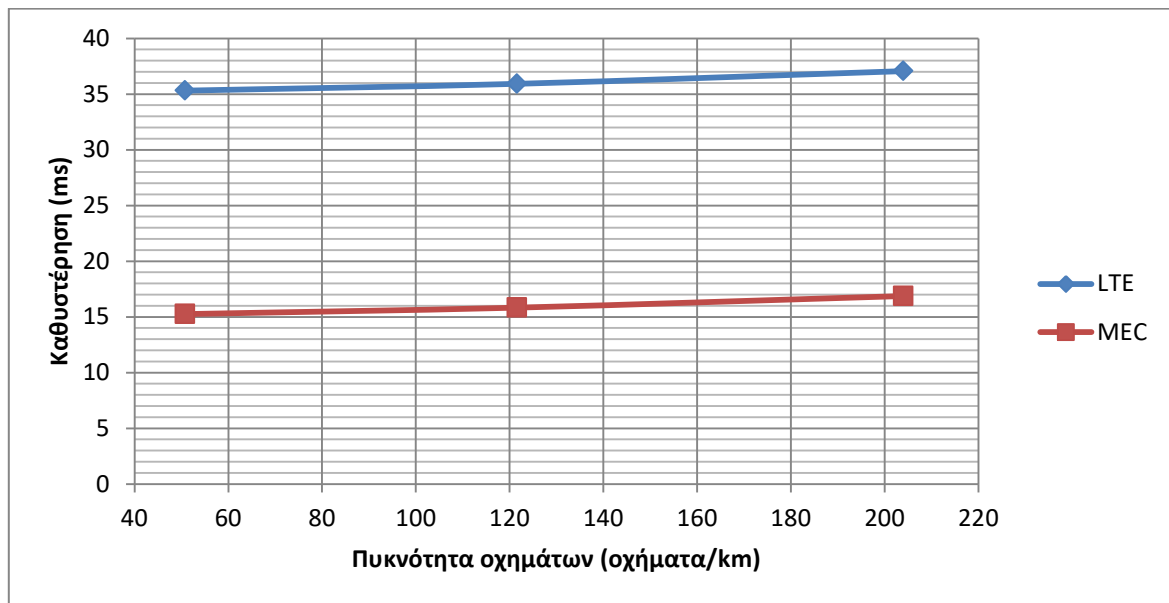
Πίνακας 6.13 Καθυστέρηση DL οχημάτων για τα τρία επίπεδα κίνησης

Πυκνότητα κίνησης	Καθυστέρηση μοντέλου LTE (ms)	Καθυστέρηση μοντέλου MEC (ms)
Χαμηλή	35.31	15.25
Μέτρια	35.92	15.83
Υψηλή	37.06	16.87

Πίνακας 6.14 Καθυστέρηση UL οχημάτων για τα τρία επίπεδα κίνησης



Σχήμα 6.10 Καθυστέρηση DL οχημάτων συναρτήσει της πυκνότητας των οχημάτων



Σχήμα 6.11 Καθυστέρηση UL οχημάτων συναρτήσει της πυκνότητας των οχημάτων

Πυκνότητα κίνησης	PDR μοντέλου LTE (%)	PDR μοντέλου MEC (%)
Χαμηλή	99.41	100
Μέτρια	98.20	100
Υψηλή	95.37	100

Πίνακας 6.15 PDR DL οχημάτων για τα τρία επίπεδα κίνησης

Στη συνέχεια, εξετάζονται τα αποτελέσματα σχετικά με τα μηνύματα έκτακτης ανάγκης για τις περιπτώσεις της μέτριας και της υψηλής κίνησης. Στο Σχ. 6.12, συγκρίνονται οι μέσες, ελάχιστες και μέγιστες τιμές της καθυστέρησης παράδοσης αυτών για τα τρία επίπεδα κίνησης και 80 πεζούς χρήστες. Καταρχήν, τόσο με χρήση του μοντέλου LTE όσο και

του μοντέλου MEC παρατηρείται μια αύξηση στη μέση τιμή της τάξης των 10-15ms από ένα επίπεδο κίνησης στο αμέσως μεγαλύτερο. Όμως, ενώ το μοντέλο MEC εξακολουθεί να πληρεί τις προδιαγραφές λειτουργίας V2X, στο LTE τα μηνύματα καθυστερούν περισσότερο από 100ms σε πολλές περιπτώσεις, ιδιαίτερα στην περίπτωση υψηλής κυκλοφοριακής πυκνότητας. Αναφορικά με το πλήθος των παραληπτών του μηνύματος, παρατηρού-

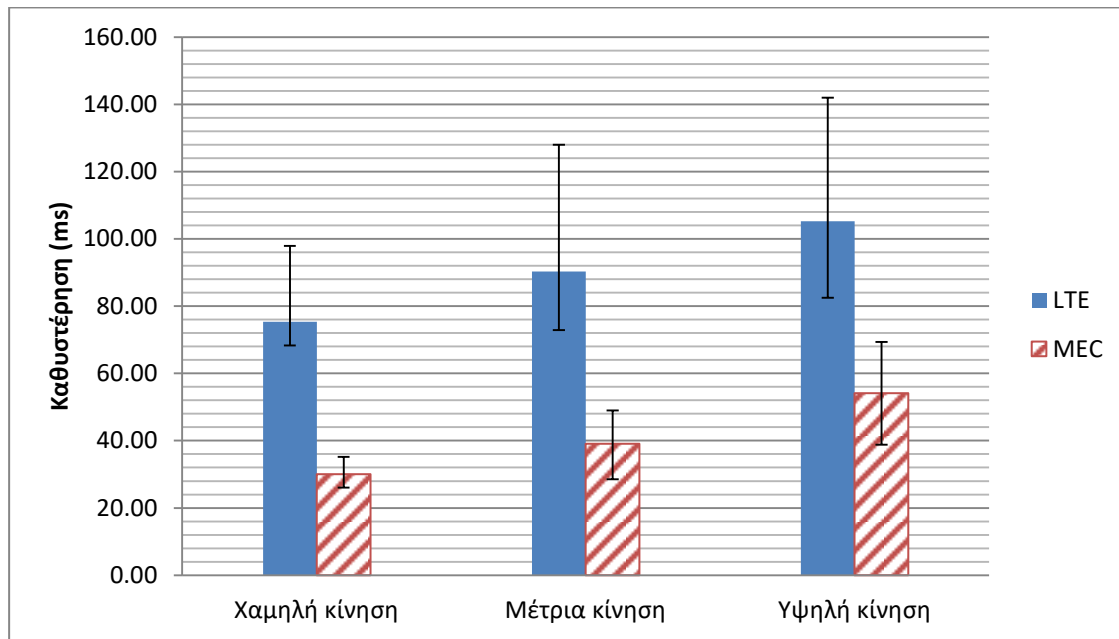
Αριθμός γεγονότος	LTE		MEC	
	Μέση καθυστέρηση (ms)	Πλήθος παραληπτών	Μέση καθυστέρηση (ms)	Πλήθος παραληπτών
1	83.46	68	40.74	68
2	94.35	98	39.89	98
3	128.00	51	34.76	108
4	89.39	130	40.34	130
5	72.85	79	30.29	79
6	83.65	93	37.96	93
7	75.16	93	28.52	93
8	119.93	141	48.80	142
9	75.95	81	37.48	81
10	87.16	201	49.03	201
11	83.32	123	42.16	123
Μέση τιμή	90.29	105	39.09	111
Τυπική απόκλιση	17.90		6.48	

Πίνακας 6.16 Καθυστέρηση και πλήθος παραληπτών μηνυμάτων έκτακτης ανάγκης για μέτρια κίνηση

Αριθμός γεγονότος	LTE		MEC	
	Μέση καθυστέρηση (ms)	Πλήθος παραληπτών	Μέση καθυστέρηση (ms)	Πλήθος παραληπτών
1	82.45	155	38.79	155
2	100.39	114	69.40	114
3	94.76	220	60.61	220
4	99.38	141	67.90	141
5	92.09	155	41.42	155
6	101.99	218	62.16	218
7	85.13	76	43.30	76
8	131.91	249	53.46	249
9	141.94	98	67.00	205
10	130.24	200	45.93	200
11	97.08	218	45.88	218
Μέση τιμή	105.21	168	54.17	177
Τυπική απόκλιση	20.06		11.60	

Πίνακας 6.17 Καθυστέρηση και πλήθος παραληπτών μηνυμάτων έκτακτης ανάγκης για υψηλή κίνηση

νται σημαντικές απώλειες πακέτων σε ορισμένα γεγονότα (Πιν. 6.16, γεγονός 3 και Πιν.6.17, γεγονός 9), οι οποίες οφείλονται στο αυξημένο φορτίο της S1-U και ενδεχομένως να είχαν σοβαρές συνέπειες σε ένα πραγματικό σενάριο.



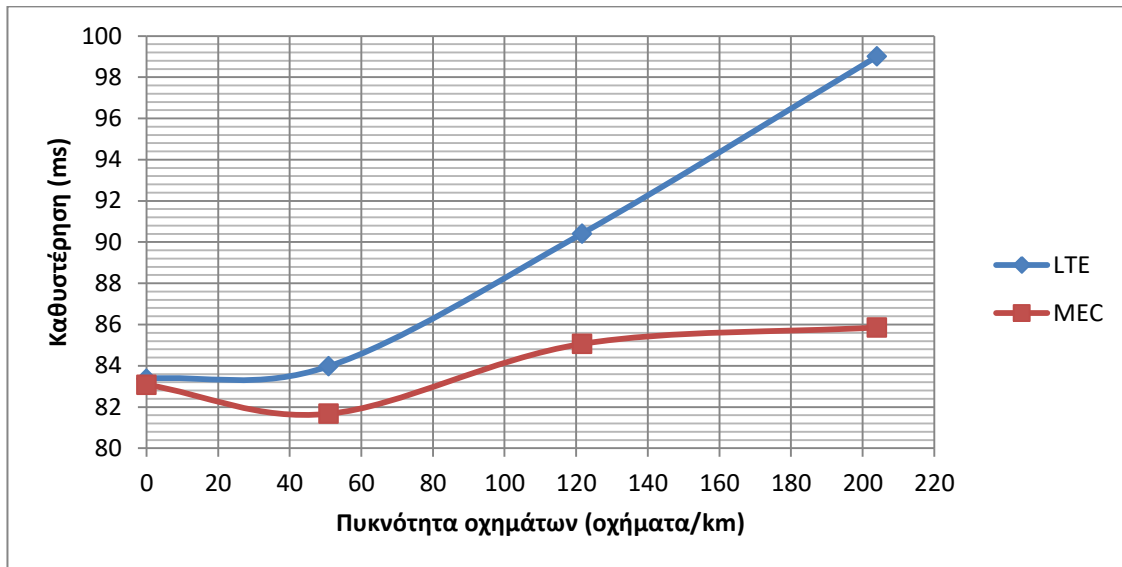
Σχήμα 6.12 Καθυστέρηση μηνυμάτων έκτακτης ανάγκης συναρτήσει της πυκνότητας της κυκλοφοριακής κίνησης

Ένα ακόμη φαινόμενο που μελετήθηκε είναι η επίδραση των συνδεδεμένων οχημάτων στην τηλεπικοινωνιακή κίνηση των πεζών χρηστών. Εκτός από τις υπόλοιπες προσομοιώσεις αυτής της παραγράφου, εκτελέστηκε και μία χωρίς την παρουσία οχημάτων. Τα αποτελέσματα για τη μέση καθυστέρηση λήψης πακέτων από πεζούς χρήστες παρουσιάζονται στον Πιν. 6.18 και το Σχ. 6.13. Όταν δεν επικοινωνούν τα οχήματα, η επίδοση των εφαρμογών των υπόλοιπων χρηστών προφανώς δεν επηρεάζεται από την ύπαρξη του MEC. Το αποτέλεσμα αυτό επιβεβαιώνει την ορθότητα του ισχυρισμού για την ταχύτητα της ζεύξης backhaul που έγινε στην παράγραφο 6.1.3. Όμως, όσο αυξάνεται το πλήθος των συνδεδεμένων οχημάτων, τόσο μεγαλύτερη είναι η βελτίωση που προσφέρει το μοντέλο MEC στην καθυστέρηση που αντιλαμβάνονται οι πεζοί χρήστες, λόγω της μείωσης της χωρητικότητας στην S1-U. Οι προσομοιώσεις υποδηλώνουν μια παράδοξη μείωση της καθυστέρησης στην περίπτωση του MEC μετά την προσθήκη οχημάτων, γεγονός που μπορεί να αποδοθεί στην τυχαία και προσεγγιστική φύση των μοντέλων. Επίσης, σημειώνεται ότι οι ακριβείς τιμές που προέκυψαν για την καθυστέρηση λήψης των πεζών χρηστών δεν ανταποκρίνονται στην πραγματικότητα, καθώς το μοντέλο που χρησιμοποιήθηκε για την προσομοίωση της κίνησης αυτών είναι αυθαίρετο. Όμως, η βελτίωση που προσφέρει το

Πυκνότητα κίνησης	Καθυστέρηση μοντέλου LTE (ms)	Καθυστέρηση μοντέλου MEC (ms)
Χωρίς οχήματα	83.37	83.08
Χαμηλή	83.97	81.67
Μέτρια	90.41	85.06
Υψηλή	99.00	85.86

Πίνακας 6.18 Καθυστέρηση DL πεζών χρηστών για τα τρία επίπεδα κίνησης

μοντέλο MEC τόσο στις επικοινωνίες V2X όσο και στις εφαρμογές που θα επηρεαστούν από αυτές είναι αδιαμφισβήτητη.



Σχήμα 6.13 Καθυστέρηση DL πεζών χρηστών συναρτήσει της πυκνότητας των οχημάτων

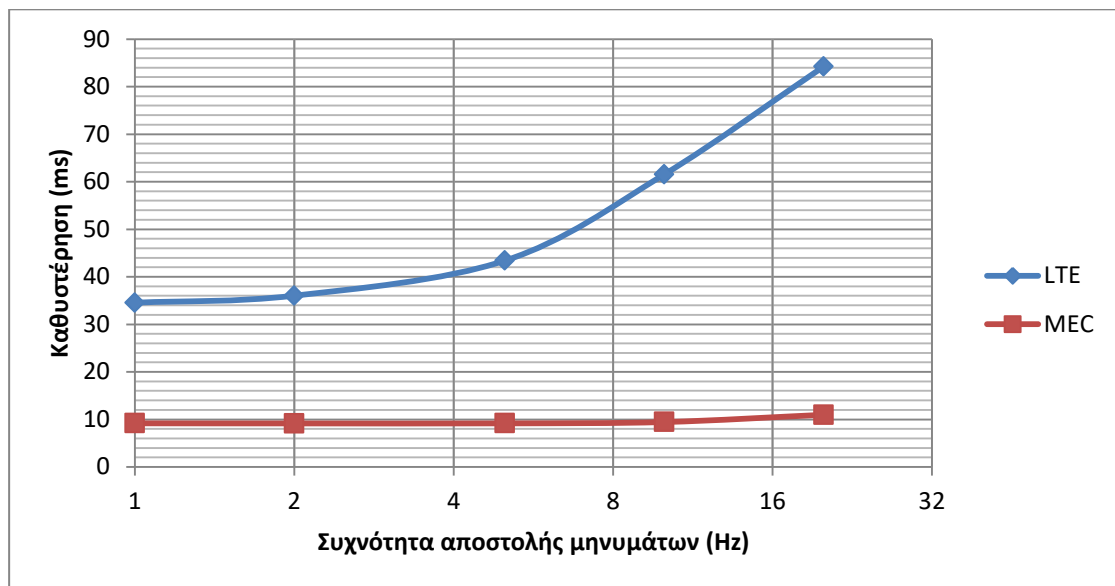
6.2.4 Επίδραση της συχνότητας αποστολής μηνυμάτων – Χάρτες υψηλής ανάλυσης

Η συχνότητα αποστολής μηνυμάτων από τον V2X server των προηγούμενων παραγράφων (1Hz) είναι επαρκής για την ενημέρωση των οδηγών για την κατάσταση της κυκλοφορίας μέσω γραπτού κειμένου. Σε περίπτωση, όμως, εξυπηρέτησης εφαρμογών παροχής χαρτών υψηλής ανάλυσης σε πραγματικό χρόνο, απαιτούνται υψηλότερες συχνότητες μετάδοσης μηνυμάτων. Σε ένα παράδειγμα που συμπεριλαμβάνεται σε μελέτη της 3GPP σχετική με μελλοντικές εφαρμογές V2X [78], κάθε όχημα λαμβάνει πακέτα μεγέθους 450 bytes με συχνότητα 50Hz, η οποία οδηγεί σε ρυθμό μετάδοσης 180kbps. Σε αυτήν την παράγραφο, μελετάται η επίδραση υψηλότερων ρυθμών μετάδοσης από τον V2X server στην επίδοση των εφαρμογών V2X και στις εφαρμογές που τρέχουν στις συσκευές των πεζών χρηστών. Το μέγεθος των μηνυμάτων στην κατεύθυνση DL διατηρήθηκε ίσο με 1000 bytes και το πλήθος των πεζών χρηστών θεωρήθηκε ίσο με 80. Η πυκνότητα της κυκλοφοριακής κίνησης είναι η «χαμηλή» του Πιν. 6.1.

Στον Πιν. 6.19, δίνονται τα αποτελέσματα για την καθυστέρηση που υφίστανται τα μηνύματα V2X συναρτήσει της συχνότητας αποστολής αυτών ή αντίστοιχα του ρυθμού μετάδοσης. Οι τιμές συγκρίνονται και στο Σχ. 6.14, στο οποίο ο οριζόντιος άξονας είναι σε λογαριθμική κλίμακα. Το MEC προσφέρει σαφώς καλύτερη επίδοση, η οποία μάλιστα επηρεάζεται ελάχιστα από το ρυθμό μετάδοσης. Η 3GPP δεν θέτει συγκεκριμένες προδιαγραφές για τη μέγιστη ανεκτή καθυστέρηση αυτής της εφαρμογής. Όμως, μικρότερες τιμές επιτυγχάνουν ακριβέστερη απεικόνιση των χαρτών, επειδή η ανανέωση αυτών γίνεται σε πραγματικό χρόνο. Η αξιοπιστία των χαρτών θα εξαρτηθεί και από το ποσοστό παράδοσης πακέτων (Πιν. 6.20), το οποίο μειώνεται αισθητά στην περίπτωση χρήσης του μοντέλου LTE, ενώ με χρήση του μοντέλου MEC παραμένει για ακόμη μία φορά ανεπηρέαστο.

Συχνότητα αποστολής μηνυμάτων (Hz)	Ρυθμός μετάδοσης bit (kbrps)	Καθυστέρηση μοντέλου LTE (ms)	Καθυστέρηση μοντέλου MEC (ms)
1	8	34.55	9.18
2	16	36.03	9.16
5	40	43.40	9.17
10	80	61.55	9.45
20	160	84.24	10.98

Πίνακας 6.19 Καθυστέρηση DL οχημάτων συναρτήσει της συχνότητας αποστολής μηνυμάτων από τον V2X server



Σχήμα 6.14 Καθυστέρηση DL οχημάτων συναρτήσει της συχνότητας αποστολής μηνυμάτων από τον V2X server

Συχνότητα αποστολής μηνυμάτων (Hz)	PDR μοντέλου LTE (%)	PDR μοντέλου MEC (%)
1	99.41	100
2	98.87	100
5	97.03	100
10	90.80	100
20	75.93	100

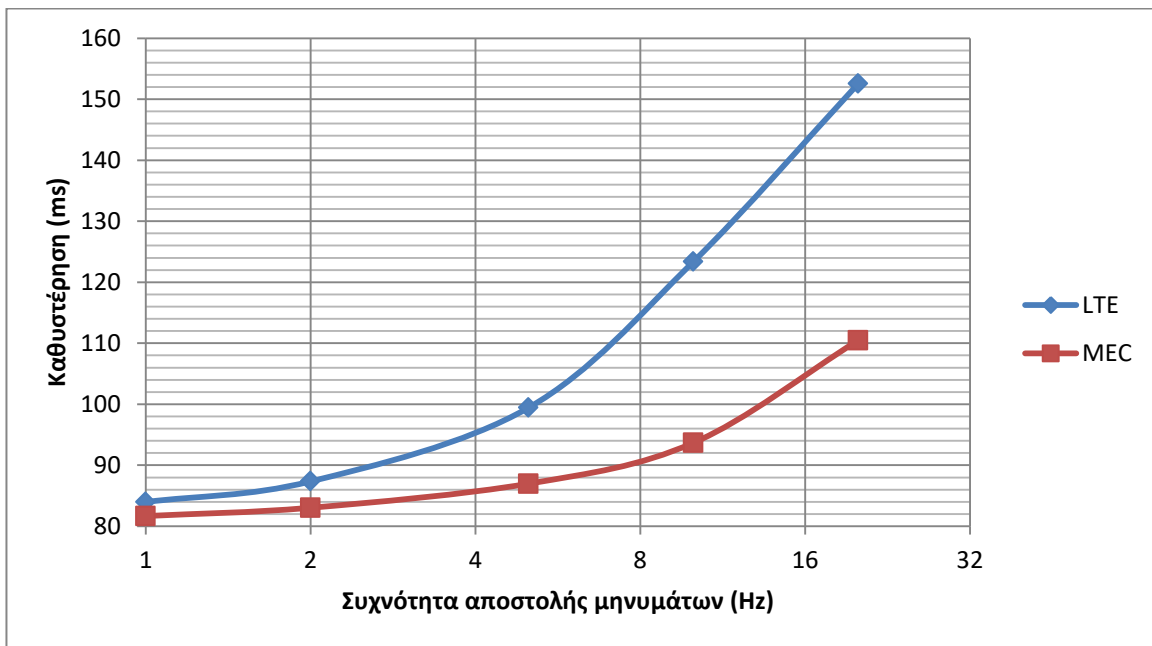
Πίνακας 6.20 PDR DL οχημάτων συναρτήσει της συχνότητας αποστολής μηνυμάτων από τον V2X server

Η αύξηση της χρησιμοποίησης του δικτύου λόγω της συχνότερης αποστολής μηνυμάτων προς τα οχήματα επηρεάζει αρνητικά τους πεζούς χρήστες. Όπως φαίνεται στο Σχ. 6.15, η καθυστέρηση που αυτοί αντιλαμβάνονται και στα δύο σενάρια αυξάνει με την αύξηση της τηλεπικοινωνιακής κίνησης που αφορά τα οχήματα. Ενώ, όμως, στην περίπτωση χρήσης του μοντέλου LTE το ποσοστό αύξησης της καθυστέρησης από την ελάχιστη στη μέγιστη τιμή είναι μεγαλύτερο από 80%, η αντίστοιχη μεταβολή όταν χρησιμοποιείται το μοντέλο MEC είναι μόλις 35%. Συνδυάζοντας τα αποτελέσματα των Σχ. 6.13

και 6.15, η διαφορά μεταξύ LTE και MEC αναμένεται να είναι ακόμη μεγαλύτερη στις περιπτώσεις υψηλότερης κυκλοφοριακής κίνησης.

Συχνότητα αποστολής μηνυμάτων (Hz)	Καθυστέρηση μοντέλου LTE (ms)	Καθυστέρηση μοντέλου MEC (ms)
1	83.97	81.67
2	87.35	83.03
5	99.42	86.97
10	123.36	93.67
20	152.53	110.47

Πίνακας 6.21 Καθυστέρηση DL πεζών χρηστών συναρτήσει της συχνότητας αποστολής μηνυμάτων από τον V2X server



Σχήμα 6.15 Καθυστέρηση DL πεζών χρηστών συναρτήσει της συχνότητας αποστολής μηνυμάτων από τον V2X server

6.3 Συμπεράσματα και μελλοντικές επεκτάσεις

Τα αποτελέσματα για την αποστολή δεδομένων κυκλοφορίας υποδηλώνουν ότι το LTE επιτυγχάνει την παράδοση αυτών με αποδεκτή καθυστέρηση, ακόμη και χωρίς την παρουσία του MEC. Η υψηλή συμφόρηση των δικτύων backhaul και κορμού, όμως, μπορεί να οδηγήσει σε ανεπιθύμητες απώλειες πακέτων, οι οποίες μπορούν να αντισταθμιστούν από τις υπολογιστικές ικανότητες ενός MEC server. Το πραγματικό όφελος του MEC φανερώνεται στην παράδοση των μηνυμάτων έκτακτης ανάγκης. Ακόμη και σε περιπτώσεις χαμηλής κυκλοφοριακής κίνησης, η μετάδοση των πακέτων από το δίκτυο κορμού και ο υψηλός όγκος δεδομένων που καταναλώνουν οι υπόλοιποι χρήστες της υπηρεσίας ενδεχομένως να οδηγήσουν σε μη έγκαιρη παράδοση των μηνυμάτων στα οχήματα. Αντίθετα, η χρήση του μοντέλου MEC προσφέρει τη δυνατότητα στο σύστημα προώθησης των ειδοποιήσεων με καθυστέρηση μικρότερη από 100ms από άκρο σε άκρο, ανεξαρτήτως του πλήθους των συνδεδεμένων οχημάτων. Επιπλέον, στην περίπτωση αύξησης του

όγκου των δεδομένων που αφορούν τα οχήματα, το μοντέλο MEC αποδείχθηκε ικανή λύση για την άμβλυση της επίδρασης των συνδεδεμένων οχημάτων στην εμπειρία που αντιλαμβάνονται οι υπάρχοντες χρήστες.

Σε μελλοντική έρευνα, αξίζει να μελετηθεί η συνεισφορά της τεχνολογίας E-MBMS στις επικοινωνίες οχημάτων και ο ενδεχόμενος συνδυασμός αυτής με το MEC. Η μέση καθυστέρηση των μηνυμάτων έκτακτης ανάγκης μπορεί να μειωθεί περαιτέρω, ιδιαίτερα σε καταστάσεις υψηλής πυκνότητας οχημάτων, με την εκπομπή μοναδικού μηνύματος προς τους ενδιαφερόμενους οδηγούς. Η E-MBMS αναμένεται, επίσης, να περιορίσει την επίδραση των συνδεδεμένων οχημάτων στους πεζούς χρήστες κατά την εξυπηρέτηση των χαρτών υψηλής ανάλυσης. Αφενός ο V2X server δεν χρειάζεται να αποστέλλει ξεχωριστά τις ανανεώσεις του χάρτη κάθε οχήματος και αφετέρου η τοποθέτηση των λειτουργιών αυτού σε έναν ME host θα διευκολύνει τον προσδιορισμό των περιοχών πολυεκπομπής. Η ολοκλήρωση των προδιαγραφών από το MEC ISG πιθανώς θα οδηγήσει και στην ανάπτυξη ακριβέστερων μοντέλων για τα λογισμικά προσομοίωσης, τα οποία θα φανούν χρήσιμα στους MNOs κατά την επιλογή ενσωμάτωσης του MEC στο δίκτυό τους.

Τέλος, παρά την αναμφίβολη συνεισφορά του MEC, οι τιμές που προέκυψαν από τις προσομοιώσεις υποδεικνύουν την αδυναμία αυτού να ικανοποιήσει τις απαιτήσεις σε καθυστέρηση ορισμένων μελλοντικών εφαρμογών, όπως τα αυτοοδηγούμενα οχήματα. Για την υποστήριξη αυτών, απαιτούνται νέες τεχνολογίες ασύρματης πρόσβασης και αρχιτεκτονικής κυψελωτών συστημάτων. Σύμφωνα με την ερευνητική κοινότητα, τα δίκτυα 5G αναμένεται ότι θα επιτυγχάνουν καθυστέρηση από άκρο σε άκρο της τάξης του 1ms, οπότε ίσως να αποτελέσουν την κατάλληλη τεχνολογία για την εξυπηρέτηση καινοτόμων εφαρμογών, που δεν εξετάστηκαν στην παρούσα εργασία.

Βιβλιογραφία και Αναφορές

- [1]. European Commission, "Press release - Road Safety: Encouraging results in 2016 call for continued efforts to save lives on EU roads," 2017
- [2]. 5GAA white paper; An assessment of LTE-V2X (PC5) and 802.11p direct communications technologies for improved road safety in the EU; 5-12-2017
- [3]. NGMN Alliance; V2X White Paper v1.0; 17-06-2018
- [4]. Elyes Ben Hamida, Hassan Noura and Wassim Znaidi: Security of Cooperative Intelligent Transport Systems: Standards, Threats Analysis and Cryptographic Countermeasures; 6-07-2015
- [5]. 5GPPP: White Paper on Automotive Vertical Sectors; 20-10-2015
- [6]. ETSI TR 102 638 V1.1.1 (2009-06): Intelligent Transport Systems (ITS); Vehicular Communications; Basic Set of Applications; Definitions
- [7]. ETSI EN 302 637-2 V1.3.2 (2014-11): Intelligent Transport Systems (ITS); Vehicular Communications; Basic Set of Applications; Part 2: Specification of Cooperative Awareness Basic Service
- [8]. ETSI EN 302 637-3 V1.1.1 (2014-09): Intelligent Transport Systems (ITS); Vehicular Communications; Basic Set of Applications; Part 3: Specifications of Decentralized Environmental Notification Basic Service
- [9]. Giuseppe Araniti, Claudia Campolo, Massimo Condoluci, Antonio Iera, and Antonella Molinaro, University Mediterranea of Reggio Calabria, "LTE for Vehicular Networking: A Survey, IEEE Communications Magazine; May 2013
- [10]. 3GPP TR 22.885 V14.0.0 (2015-12): Technical Specification Group Services and System Aspects; Study on LTE support for Vehicle to Everything (V2X) services
- [11]. Shladover, Nowakowski, Lu, and Ferlis: Cooperative Adaptive Cruise Control (CCAC) Definitions And Operating Concepts; 14 November 2014
- [12]. Giovanni Nardini , Antonio Viridis, Claudia Campolo , Antonella Molinaro, and Giovanni Stea: Cellular-V2X Communications for Platooning: Design and Evaluation; 11-05-2018
- [13]. SAE International: www.sae.org
- [14]. NHTSA: www.nhtsa.gov

- [15]. Jadranka, D.; Beate M.; Gereon M. European Roadmap Smart Systems for Automated Driving; Technical Report Version 1.2, European Technology Platform on Smart Systems Integration (EPoSS): Berlin, Germany; 2015
- [16]. Mate Boban, Apostolos Kousaridas, Konstantinos Manolakis, Joseph Eichinger, Wen Xu: Use Cases, Requirements, and Design Considerations for 5G V2X; 5-12-2017
- [17]. A. Festag: Standards for vehicular communication—from IEEE 802.11p to 5G; 21-09-2015
- [18]. A. Festag: Cooperative intelligent transport systems standards in Europe; IEEE Communications Magazine; December 2014
- [19]. ETSI EN 302 663 V1.2.0 (2012-11): Intelligent Transport Systems (ITS); Access layer specification for Intelligent Transport Systems operating in the 5 GHz frequency band
- [20]. 3GPP TS 36.300 V8.9.0 (2009-07): LTE; Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA) and Evolved Universal Terrestrial Radio Access Network (E-UTRAN); Overall description; Stage 2
- [21]. 3GPP TS 36.211 V8.9.0 (2009-12): Technical Specification Group Radio Access Network; Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); Physical Channels and Modulation
- [22]. Murtadha Ali Nsaif Sukar and Maninder Pal; SC-FDMA & OFDMA in LTE physical layer; International Journal of Engineering Trends and Technology (IJETT) - Volume 12 Number 2 - Jun 2014
- [23]. 3GPP TR 36.885 V14.0.0 (2016-06): 3rd Generation Partnership Project; Technical Specification Group Radio Access Network; Study on LTE-based V2X Services;
- [24]. 3GPP TS 23.285 V14.2.0 (2017-05): Universal Mobile Telecommunications System (UMTS); LTE; Architecture enhancements for V2X services
- [25]. 3GPP TS 36.300 v13.3.0 (2016-03): LTE; Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA) and Evolved Universal Terrestrial Radio Access Network (E-UTRAN); Overall description; Stage 2
- [26]. ETSI: Mobile-Edge Computing – Introductory Technical White Paper; September 2014
- [27]. ETSI GS MEC 001 v1.1.1 (2016-03): Mobile Edge Computing (MEC); Terminology
- [28]. ETSI GS MEC 002 v1.1.1 (2016-03): Mobile Edge Computing (MEC); Technical Requirements
- [29]. ETSI GS MEC-IEG 004 v1.1.1 (2015-11): Mobile Edge Computing (MEC); Service Scenarios

- [30]. Dario Sabella, Alessandro Vaillant, Pekka Kuure, Uwe Rauschenbach, Fabio Giust; Mobile-Edge Computing Architecture: The role of MEC in the Internet of Things; October 2016
- [31]. <https://www.gartner.com/newsroom/id/3598917>
- [32]. <http://www.etsi.org/technologies-clusters/technologies/nfv>
- [33]. ETSI GS NFV 002 v1.1.1 (2013-10): Network Function Virtualization (NFV); Architectural Framework
- [34]. ETSI GS NFV 003 v1.1.1 (2013-10): Network Function Virtualization (NFV); Terminology for Main Concepts in NFV
- [35]. ETSI GS NFV 004 v1.1.1 (2013-10): Network Function Virtualization (NFV); Virtualization Requirements
- [36]. <http://www.etsi.org/technologies-clusters/technologies/multi-access-edge-computing>
- [37]. <https://www.etsi.org/news-events/news/1180-2017-03-news-etsi-multiaccess-edge-computing-starts-second-phase-and-renews-leadership-team>
- [38]. ETSI GS MEC 003 v1.1.1 (2016-03): Mobile Edge Computing (MEC); Framework and Reference Architecture
- [39]. ETSI GS MEC 009 v1.1.1 (2017-07): Mobile Edge Computing (MEC); General principles for Mobile Edge Service APIs
- [40]. ETSI GS MEC 011 v1.1.1 (2017-07): Mobile Edge Computing (MEC); Mobile Edge Platform Application Enablement
- [41]. ETSI GS MEC 012 v1.1.1 (2017-07): Mobile Edge Computing (MEC); Radio Network Information API
- [42]. ETSI GS MEC 013 v1.1.1 (2017-07): Mobile Edge Computing (MEC); Location API
- [43]. ETSI GS MEC 015 v1.1.1 (2017-10): Mobile Edge Computing (MEC); Bandwidth Management API
- [44]. <https://forge.etsi.org/>
- [45]. NGMN alliance: 5G security – Package 3: Mobile Edge Computing/Low Latency/Consistent User Experience; 25/10/2016

- [46]. Draft ETSI GS MEC 026 V2.0.3 (2018-05): Multi-access Edge Computing(MEC); Support for regulatory requirements
- [47]. ETSI GR MEC 017 v1.1.1 (2018-02): Mobile Edge Computing (MEC); Deployment of Mobile Edge Computing in an NFV environment
- [48] . ETSI White Paper No. 24: MEC Deployment in 4G and Evolution Towards 5G; February 2018
- [49]. Chia-Yu Chang, Konstantinos Alexandris, Navid Nikaein, Kostas Katsalis and Thrasyvoulos Spyropoulos, Communication Systems Department, EURECOM, France, “MEC Architectural Implications for LTE/LTE-A Networks”; October 2016
- [50]. <https://www.slideshare.net/MichelleHolley1/5g-multiaccess-edge-compute>
- [51]. 3GPP TS 36.401 V8.6.0 (2009-07): LTE; Evolved Universal Terrestrial Radio Access Network (E-UTRAN); Architecture description
- [52]. 3GPP TS 23.214 V14.6.9 (2018-03): Universal Mobile Telecommunications System (UMTS); LTE; Architecture enhancements for control and user plane separation of EPC nodes
- [53]. 3GPP TS 29.212 V14.6.0 (2018-01): Universal Mobile Telecommunications System (UMTS); LTE; Policy and Charging Control (PCC); Reference points
- [54]. ITU-R Recommendation M.2083-0, “IMT Vision – Framework and overall objectives of the future development of IMT for 2020 and beyond”, Sep. 2015
- [55]. 3GPP TS 38.300 V15.1.0 (2018-03): Technical Specification Group Radio Access Network; NR; NR and NG-RAN Overall Description; Stage 2
- [56]. 3GPP TS 23.501 V15.0.0 (2017-12): Technical Specification Group Services and System Aspects; System Architecture for the 5G System; Stage 2
- [57]. <https://5g.co.uk/guides/what-is-network-slicing/>
- [58]. ETSI White Paper No. 28: MEC in 5G networks; June 2018
- [59]. <https://internetofbusiness.com/worldwide-connected-car-market-to-top-125-million-by-2022/>
- [60]. Zeeshan Hameed Mir and Fethi Filali; LTE and IEEE 802.11p for vehicular networking: a performance evaluation; EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking 2014
- [61]. <http://5gaa.org/about-5gaa/vision-mission/>

- [62]. 5GAA white paper; The Case for Cellular V2X for Safety and Cooperative Driving; November 2016
- [63]. 5GAA white paper; Toward fully connected vehicles: Edge computing for advanced automotive communications; December 2017
- [64]. F. Giust, V. Sciancalepore, D. Sabella, M. C. Fillipou, S. Mangiante, W. Featherstone and D. Munaretto; Multi-access Edge Computing: The driver behind the wheel of 5G-connected cars; 19-03-2018
- [65]. <https://markets.businessinsider.com/news/stocks/comba-telecom-and-astridemonstrate-mobile-edge-computing-system-mec-with-vehicle-to-everything-v2x-system-prototype-at-mobile-world-congress-2017-in-barcelona-1001792754>
- [66]. <https://www.prnewswire.com/news-releases/continental-deutsche-telekom-fraunhofer-esk-and-nokia-networks-showcase-first-safety-applications-at-digital-a9-motorway-test-bed-543728312.html>
- [67]. <https://www.ericsson.com/en/news/2017/2/towards-5g-initiative-welcomes-qualcomm-shows-fast-results>
- [68]. ETSI GR MEC 022 V2.1.0 (2018-09); Multi-access Edge Computing (MEC); Study on MEC Support for V2X Use Cases
- [69]. M. Emara, M. C. Filippou, D. Sabella; MEC-assisted End-to-End Latency Evaluations for C-V2X Communications; 22-02-2018
- [70]. ETSI GR MEC 018 v1.1.1 (2017-10); Mobile Edge Computing (MEC); End to End Mobility Aspects
- [71]. https://www.dlr.de/ts/en/desktopdefault.aspx/tabid-9883/16931_read-41000/
- [72]. <https://www.nsnam.org/>
- [73]. <https://www.nsnam.org/docs/release/3.28/models/html/lte-design.html>
- [74]. 3GPP TR 36.814 V9.0.0 (2010-03): 3rd Generation Partnership Project; Technical Specification Group Radio Access Network; Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); Further advancements for E-UTRA physical layer aspects
- [75]. 3GPP TS 36.104 V14.3.0 (2017-04): LTE; Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); Base Station (BS) radio transmission and reception
- [76]. Cl. Campolo, A. Molinaro and A. Lera; A Reference Framework for Social-enhanced Vehicle-to-Everything Communications in 5G Scenarios; July 2018

[77]. 3GPP TS 29.281 V9.3.0 (2010-06); Universal Mobile Telecommunications System (UMTS); LTE; General Packet Radio System (GPRS) Tunnelling Protocol User Plane (GTPv1-U)

[78]. 3GPP TR 22.886 V15.1.0 (2017-03); 3rd Generation Partnership Project; Technical Specification Group Services and System Aspects; Study on enhancement of 3GPP Support for 5G V2X Services