



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

## **Βελτιστοποίηση της λειτουργίας του TCP accelerator με χρήση του Mobile Edge Computing**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Παναγιώτης Ν. Πανόπουλος

**Επιβλέπων :** Παναγιώτης Γ. Κωττής  
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Οκτώβριος 2019





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

## Βελτιστοποίηση της λειτουργίας του TCP accelerator με χρήση του Mobile Edge Computing

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Παναγιώτης Ν. Πανόπουλος

**Επιβλέπων :** Παναγιώτης Γ. Κωττής  
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή την 6<sup>η</sup> Νοεμβρίου 2019.

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

.....  
Χρήστος Καμάλης  
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

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

Αθήνα, Οκτώβριος 2019

.....  
Παναγιώτης Ν. Πανόπουλος

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

Copyright © Παναγιώτης Πανόπουλος, 2019.

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

Απαγορεύεται η αντιγραφή, αποθήκευση και διανομή της παρούσας εργασίας, εξ ολοκλήρου ή τμήματος αυτής, για εμπορικό σκοπό. Επιτρέπεται η ανατύπωση, αποθήκευση και διανομή για σκοπό μη κερδοσκοπικό, εκπαιδευτικής ή ερευνητικής φύσης, υπό την προϋπόθεση να αναφέρεται η πηγή προέλευσης και να διατηρείται το παρόν μήνυμα. Ερωτήματα που αφορούν τη χρήση της εργασίας για κερδοσκοπικό σκοπό πρέπει να απευθύνονται προς 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, παρουσιάζονται τα οφέλη που προσφέρει η αξιοποίηση της τεχνολογίας Mobile Edge Computing (MEC) και της μονάδας TCP accelerator. Η τεχνολογία MEC παρέχει υπολογιστικούς, αποθηκευτικούς και δικτυακούς πόρους στην παρυφή του δικτύου κινητών επικοινωνιών, με στόχο (i) τη βελτίωση της ποιότητας υπηρεσίας που λαμβάνουν οι τηλεπικοινωνιακοί χρήστες και (ii) την ανάπτυξη καινοτόμων εφαρμογών που απαιτούν χαμηλή καθυστέρηση (πχ διασυνδεδεμένα οχήματα). Η ύπαρξη τέτοιων δυνατοτήτων στο ασύρματο δίκτυο πρόσβασης μπορεί να βελτιώσει τη λειτουργία του TCP accelerator, δηλαδή της μονάδας που χρησιμοποιείται από τους παρόχους υπηρεσιών Διαδικτύου για τη διαχείριση των δεδομένων που διακινούνται μέσα από το δίκτυο κορμού. Αν και βελτιώνει σημαντικά τη λειτουργία του πρωτοκόλλου μεταφοράς TCP καθώς και των διαδικτυακών εφαρμογών (πχ μεταφόρτωση video), ο τρέχων τρόπος λειτουργίας του TCP accelerator δεν είναι προσανατολισμένος για χρήση στα δίκτυα κινητών επικοινωνιών. Λόγω της μεταβλητότητας των τηλεπικοινωνιακών τους πόρων και της τυχαιότητας που τα χαρακτηρίζουν, τα δίκτυα κινητών επικοινωνιών απαιτούν διαφορετική αντιμετώπιση σε σχέση με τα ενσύρματα δίκτυα που χαρακτηρίζονται από σταθερότητα συνθηκών λειτουργίας. Συνεπώς, η χρήση της τεχνολογίας MEC μπορεί να υποβοηθήσει τη λειτουργία του TCP accelerator στα δίκτυα κινητών επικοινωνιών, μέσω της παροχής πληροφοριών σε πραγματικό χρόνο σχετικά με τις συνθήκες που επικρατούν στο ασύρματο περιβάλλον όπου είναι συνδεδεμένος ο χρήστης.

Στο πρώτο κεφάλαιο, γίνεται αναφορά στη διαχρονική αύξηση της χρήσης των κινητών συσκευών για την πρόσβαση στο Διαδίκτυο μέσω των ανεπτυγμένων συστημάτων κινητών επικοινωνιών. Επιπλέον, παρουσιάζεται η εκτεταμένη χρήση του πρωτοκόλλου TCP στο Διαδίκτυο και αναφέρεται η συμβολή του TCP accelerator και του MEC στη βελτίωση της ποιότητας υπηρεσίας των χρηστών.

Το δεύτερο κεφάλαιο επικεντρώνεται στα πλεονεκτήματα, τα σενάρια υπηρεσιών και την αρχιτεκτονική της τεχνολογίας MEC.

Το τρίτο κεφάλαιο εστιάζει στην περιγραφή των συστημάτων LTE. Συγκεκριμένα, αναλύεται η λειτουργία του δικτύου πρόσβασης και κορμού, καθώς και των πρωτοκόλλων και των σχημάτων μετάδοσης που χρησιμοποιούνται.

Το τέταρτο κεφάλαιο είναι αφιερωμένο στο πρωτόκολλο μεταφοράς TCP καθώς και στους τρόπους με τους οποίους ο TCP accelerator βελτιώνει τη λειτουργία του. Παράλληλα, αναλύεται και η συνεισφορά του TCP accelerator στη βελτίωση των διαδικτυακών εφαρμογών.

Στο πέμπτο κεφάλαιο, παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των μετρήσεων που πραγματοποιήθηκαν σε υποδομή δικτύου που έχει εγκατεστημένο TCP accelerator. Επίσης, το κεφάλαιο αυτό περιλαμβάνει μια προτεινόμενη προσθήκη στη λειτουργία του TCP accelerator, ώστε να μπορεί να αξιοποιεί τις πληροφορίες του ασύρματου δικτύου πρόσβασης των χρηστών και, ως εκ τούτου, να επιτυγχάνεται βελτίωση της ποιότητας υπηρεσίας που λαμβάνουν. Τέλος, προτείνονται ιδέες για μελλοντική έρευνα.

**Λέξεις κλειδιά:** TCP, LTE, Mobile Edge Computing, TCP accelerator, TCP optimization

## Abstract

This thesis explores the benefits of combining Mobile Edge Computing (MEC) with TCP accelerator. MEC technology offers computing, storage and network resources at the edge of mobile network, in the attempt to improve the users quality of experience and to enable the development of innovative applications that require low latency (e.g. connected vehicles). Providing such capabilities in the radio access network could improve the functionality of TCP accelerators, used by internet service providers for managing data moving through the core network. Although TCP acceleration improve significantly both the operation of the TCP transport protocol and web applications (e.g. video streaming), it is not oriented towards mobile networks. In contrast to fixed networks, mobile networks require a different approach due to the variability in network resources and to the randomness of the existing conditions. Therefore, employing MEC in mobile networks can support TCP acceleration, through the provision of real time information related to the current conditions of the mobile network.

The first chapter refers to the diachronic increase in the usage of mobile devices, which are used for Internet access. Moreover, presented are (i) the extended usage of TCP protocol in Internet and (ii) the contribution of TCP accelerator and MEC towards the improvement of users quality of experience.

The second chapter focuses on the advantages and the service scenarios of MEC technology as well as on the MEC architecture.

The third chapter provides information about LTE. Specifically, the functionality of radio access and core network of LTE are presented as well as the protocols and the transportation techniques employed by LTE.

The fourth chapter is dedicated (i) to the TCP transport protocol and (ii) to the solutions provided by TCP accelerator in the attempt to improve TCP functionality. Furthermore, information is given about TCP acceleration as a contributor to the improvement of web applications.

The fifth chapter presents the measurements taken in a network infrastructure, where a TCP accelerator is installed. Also, in this chapter, a solution is presented destined for TCP acceleration in mobile networks. The proposed solution exploits information concerning the radio access network in an attempt to improve the users quality of experience. Finally, suggestions for future research are provided.

**Key words:** TCP, LTE, Mobile Edge Computing, TCP accelerator, TCP optimization

## Ευχαριστίες

Θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον επιβλέποντα καθηγητή μου, κύριο Παναγιώτη Γ. Κωττή, για την πολύτιμη βοήθειά του κατά τη διάρκεια της εκπόνησης της παρούσας διπλωματικής εργασίας. Θα ήθελα επίσης να τον ευχαριστήσω για τις άρτια επιστημονικές γνώσεις που μου παρείχε όλα αυτά τα χρόνια μέσα από τα ακαδημαϊκά έδρανα.

Επιπλέον, θα ήθελα να ευχαριστήσω την εταιρεία VODAFONE που μου έδωσε τη δυνατότητα να χρησιμοποιήσω μέρος του εξοπλισμού της για την εξαγωγή συμπερασμάτων, καθοριστικών για την παρούσα διπλωματική εργασία.

Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω από καρδιάς όλους μου τους φίλους που ήταν κοντά μου σε όλη τη διάρκεια της φοιτητικής μου πορείας και κυρίως τους γονείς μου Νίκο και Κατερίνα, όπως επίσης και τον αγαπημένο μου αδερφό Γιώργο για όλη τη στήριξη και την αγάπη που απλόχερα μου έδωσαν όλα αυτά τα χρόνια.





## Πίνακας περιεχομένων

Περίληψη .....	5
Abstract.....	6
Ευχαριστίες.....	7
Ευρετήριο Σχημάτων .....	11
Κατάλογος Συντμήσεων .....	14
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 .....	17
1.1 Η εξέλιξη των τηλεπικοινωνιών.....	17
1.2 Τα χαρακτηριστικά των πρωτοκόλλων μεταφοράς στις υπηρεσίες Διαδικτύου.....	19
1.3 Τα προβλήματα λόγω της αυξημένης κίνησης στο Διαδίκτυο.....	22
1.4 Οι υπάρχουσες λύσεις σήμερα .....	23
1.5 Σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας .....	25
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 .....	27
2.1 Εισαγωγή.....	27
2.2 Οφέλη που προσφέρει το MEC.....	28
2.3 Σενάρια υπηρεσιών MEC.....	30
2.3.1 Υπηρεσίες προσανατολισμένες στους χρήστες.....	31
2.3.2 Υπηρεσίες σε συνεργασία με τρίτους ( <i>third-party services</i> ).....	33
2.3.3 Υπηρεσίες βελτίωσης της απόδοσης του δικτύου και του QoE του χρήστη.....	37
2.4 Βασικό πλαίσιο MEC.....	38
2.5 Αρχιτεκτονική MEC.....	40
2.5.1 Διαχείριση Συστήματος .....	41
2.5.2 Διαχείριση Host .....	41
2.5.3 Υπηρεσίες MEC .....	43
2.5.3.1 Υπηρεσία παροχής πληροφοριών ραδιοδιαύλου (RNI).....	43
2.5.3.2 Υπηρεσίες τοποθεσίας .....	44
2.5.3.3 Υπηρεσία διαχείρισης εύρους ζώνης .....	45
2.5.3.4 Άλλες υπηρεσίες .....	45
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 .....	46
3.1 Εισαγωγή.....	46
3.2 Αρχιτεκτονική LTE.....	48
3.2.1 Δίκτυο Ραδιο-Πρόσβασης (E-UTRAN) .....	48
3.2.2 Δίκτυο κορμού (EPC).....	49
3.3 Στοιβά πρωτοκόλλων LTE.....	52
3.4 Φυσικό Στρώμα LTE.....	56

3.4.1	Δομή πλαισίων.....	56
3.4.2	Σχήματα UL και DL Μετάδοσης.....	58
3.5	Σενάρια εγκατάστασης των MEC host σε δίκτυα LTE.....	62
3.5.1	Εγκατάσταση ως παρεμβολή στη γραμμή (Bump in the wire) .....	63
3.5.2	Εγκατάσταση κατακεντρωμένου EPC (Distributed EPC).....	64
3.5.3	Εγκατάσταση κατακεντρωμένων S/P-GW (Distributed S/P-GW).....	65
3.5.4	Εγκατάσταση κατακεντρωμένης S-GW με τοπική διαφυγή (Distributed S-GW with Local Breakout – SG-W LBO).....	66
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 .....		67
4.1	Εισαγωγή.....	67
4.2	Πρωτόκολλα Επιπέδου Μεταφοράς.....	70
4.2.1	Πρωτόκολλο UDP .....	70
4.2.1.1	Πρωτόκολλο Quic.....	71
4.2.2	Πρωτόκολλο TCP.....	73
4.2.2.1	Δομή τμήματος TCP .....	74
4.2.2.2	Τριπλή Χειραψία.....	76
4.2.2.3	Τερματισμός σύνδεσης TCP .....	76
4.2.2.4	Έλεγχος ροής .....	77
4.2.2.5	Αντιμετώπιση σφαλμάτων μετάδοσης.....	79
4.2.2.6	Έλεγχος συμφόρησης TCP .....	81
4.3	TCP Accelerator.....	84
4.3.1	Βελτιστοποίηση λειτουργίας του TCP .....	85
4.3.2	Βελτίωση άλλων εφαρμογών .....	92
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5 .....		95
5.1	Πειραματικό περιβάλλον.....	95
5.2	Περιορισμοί.....	98
5.3	Προτεινόμενη προσθήκη στη λειτουργία του TCP accelerator .....	98
5.4	Μελλοντικές επεκτάσεις .....	99
Βιβλιογραφία και Αναφορές.....		100

## Ευρετήριο Σχημάτων

<b>Σχήμα 1.1</b> Διάγραμμα μεταβολής του ποσοστού της κίνησης βίντεο στο ίντερνετ (σε κινητές συσκευές και συνολικά) σε διάστημα έξι ετών .....	18
<b>Σχήμα 1.2</b> Ραβδόγραμμα μεταβολής και πρόβλεψης κίνησης δεδομένων σε υπηρεσίες κινητών συσκευών .....	19
<b>Σχήμα 1.3</b> Καταγραφή στιγμιότυπου της κίνησης κατά την παρακολούθηση εκπομπής αποθηκευμένης στο <i>www.skai.gr/tv</i> .....	20
<b>Σχήμα 1.4</b> Καταγραφή στιγμιότυπου της κίνησης κατά την αναζήτηση της σελίδας <i>www.bbc.com/news</i> .....	21
<b>Σχήμα 1.5</b> Καταγραφή στιγμιότυπου της κίνησης κατά την μεταφόρτωση αρχείου pdf σε διαδικτυακό λογαριασμό της υπηρεσίας file-sharing dropbox.....	21
<b>Σχήμα 1.6</b> Ρυθμός μετάδοσης κατά την παρακολούθηση βίντεο μέσω ενσύρματης σύνδεσης στο Διαδίκτυο .....	23
<b>Σχήμα 1.7</b> Διάγραμμα δικτύου κορμού και πρόσβασης με τοποθετημένο τον TCP accelerator (traffic director).....	24
<b>Σχήμα 1.8</b> Τοπολογία δικτύου με εγκατεστημένη MEC πλατφόρμα με σκοπό την επιτάχυνση video.....	26
<b>Σχήμα 2.1</b> Επιχειρησιακό και τοπολογικό διάγραμμα MEC υποδομής.....	28
<b>Σχήμα 2.2</b> Μετακίνηση του cloud εγγύτερα στο χρήστη.....	31
<b>Σχήμα 2.3</b> Υπηρεσία επαυξημένης πραγματικότητας με χρήση του εξυπηρετητή MEC.....	32
<b>Σχήμα 2.4</b> Υπηρεσία γεωγραφικού εντοπισμού του χρήστη με χρήση του εξυπηρετητή MEC .....	33
<b>Σχήμα 2.5</b> Υπηρεσία ανάλυσης ροής video με χρήση του εξυπηρετητή MEC .....	34
<b>Σχήμα 2.6</b> Υπηρεσία πύλης IoT με χρήση του εξυπηρετητή MEC .....	35
<b>Σχήμα 2.7</b> Υπηρεσία διασυνδεδεμένων οχημάτων με χρήση του εξυπηρετητή MEC σε περίπτωση αυτοκινητιστικού ατυχήματος .....	36
<b>Σχήμα 2.8</b> Υπηρεσία έξυπνης βελτιστοποίησης video με χρήση του εξυπηρετητή MEC .....	38
<b>Σχήμα 2.9</b> Επίπεδα λειτουργίας MEC.....	39
<b>Σχήμα 2.10</b> Αρχιτεκτονική αναφοράς MEC .....	40
<b>Σχήμα 3.1</b> Η εξέλιξη των ασύρματων δικτύων στο χρόνο .....	47
<b>Σχήμα 3.2</b> Αρχιτεκτονική δικτύου LTE.....	48
<b>Σχήμα 3.3</b> Αρχιτεκτονική δικτύου κορμού (EPC).....	49
<b>Σχήμα 3.4</b> Αρχιτεκτονική Δικτύου LTE με τις επιμέρους οντότητες κάθε λειτουργικής μονάδας.....	51
<b>Σχήμα 3.5</b> Λειτουργικός διαχωρισμός μεταξύ E-UTRAN και EPC του δικτύου LTE .....	52
<b>Σχήμα 3.6</b> Διαστρωμάτωση για το επίπεδο χρήστη και ελέγχου του LTE.....	52
<b>Σχήμα 3.7</b> Στοιβά πρωτοκόλλων UP του LTE.....	55

<b>Σχήμα 3.8</b> Στοιβά πρωτοκόλλων CP του LTE.....	55
<b>Σχήμα 3.9</b> Δομή πλαισίου FDD .....	56
<b>Σχήμα 3.10</b> Δομή πλαισίου TDD .....	57
<b>Σχήμα 3.11</b> Δυνατοί συνδυασμοί χρήσης των υποπλαισίων ενός πλαισίου TDD.....	57
<b>Σχήμα 3.12</b> Περιοδικότητα εναλλαγής στα πλαίσια TDD.....	58
<b>Σχήμα 3.13</b> Χρήση τεσσάρων υποφερόντων στην OFDM διαμόρφωση .....	59
<b>Σχήμα 3.14</b> Τεχνικές OFDM και OFDMA .....	60
<b>Σχήμα 3.15</b> Διαδικασία σύνθεσης συμβόλου OFDMA .....	60
<b>Σχήμα 3.16</b> Διάταξη ραδιοπόρων στο πλέγμα χρόνου-συχνότητας .....	61
<b>Σχήμα 3.17</b> Τεχνικές OFDMA και SC-FDMA σε σχήμα διαμόρφωσης QPSK.....	62
<b>Σχήμα 3.18</b> Bump in the wire .....	63
<b>Σχήμα 3.19</b> Κατανεμημένο EPC .....	64
<b>Σχήμα 3.20</b> Κατανεμημένο EPC ως VNFs .....	65
<b>Σχήμα 3.21</b> Κατανεμημένες S/P-GW .....	66
<b>Σχήμα 3.22</b> Κατανεμημένη S-GW με τοπική διαφυγή .....	66
<b>Σχήμα 4.1</b> Μοντέλα διαστρωμάτωσης OSI και TCP/IP .....	67
<b>Σχήμα 4.2</b> Διαδικασία ενθυλάκωσης δεδομένων των ανωτέρων στρωμάτων σε κατώτερα ..	69
<b>Σχήμα 4.3</b> Δομή τμήματος UDP .....	71
<b>Σχήμα 4.4</b> Αρχιτεκτονική QUIC .....	72
<b>Σχήμα 4.5</b> Δομή τμήματος TCP .....	75
<b>Σχήμα 4.6</b> Τριπλή χειραψία TCP (οι αριθμοί seq είναι τυχαίοι) .....	76
<b>Σχήμα 4.7</b> Τερματισμός σύνδεσης TCP.....	77
<b>Σχήμα 4.8</b> Ενταμιευτής αποστολής και λήψης δύο διεργασιών σε μια σύνδεση TCP.....	78
<b>Σχήμα 4.9</b> Στιγμιότυπο των συρόμενων παραθύρων αποστολέα και παραλήπτη μιας σύνδεσης TCP.....	79
<b>Σχήμα 4.10</b> Αποστολή πακέτων TCP από έναν υπολογιστή A σε έναν υπολογιστή B με και χωρίς απώλεια πακέτου.....	80
<b>Σχήμα 4.11</b> Παράδειγμα ταχείας αναμετάδοσης .....	81
<b>Σχήμα 4.12</b> Φάση αργής εκκίνησης TCP.....	83
<b>Σχήμα 4.13</b> Φάση αποφυγής συμφόρησης TCP .....	83
<b>Σχήμα 4.14</b> Διάγραμμα καταστάσεων του ελέγχου συμφόρησης TCP .....	84
<b>Σχήμα 4.15</b> Υποδομή δικτύου με εγκατεστημένο TCP accelerator.....	86
<b>Σχήμα 4.16</b> Διαχωρισμός της καθυστέρησης μιας TCP σύνδεσης από τον TCP accelerator. 87	
<b>Σχήμα 4.17</b> Επιτάχυνση της φάσης αργής εκκίνησης TCP .....	87
<b>Σχήμα 4.18</b> Σύγκριση της διαδικασίας αργής εκκίνησης με και χωρίς τον TCP accelerator . 88	

<b>Σχήμα 4.19</b> Συμβολή του TCP accelerator στην αύξηση των ρυθμών λήψης ασύρματα δίκτυα.....	89
<b>Σχήμα 4.20</b> Ταχύτητα λήψης δεδομένων με ενεργοποιημένο (μπλε) και απενεργοποιημένο (κόκκινο) TCP accelerator.....	91
<b>Σχήμα 4.21</b> Μέσοι χρόνοι RTT με ενεργοποιημένο (μπλε) και απενεργοποιημένο (κόκκινο) TCP accelerator.....	91
<b>Σχήμα 4.22</b> Ποσοστό επαναμεταδόσεων με ενεργοποιημένο (μπλε) και απενεργοποιημένο (κόκκινο) TCP accelerator.....	92
<b>Σχήμα 4.23</b> Τεχνική Dynamic Bandwidth Shaping (DBS).....	93
<b>Σχήμα 4.24</b> Τεχνική Just-In-Time (JIT).....	93
<b>Σχήμα 5.1</b> Αποτελέσματα της καταγραφής πακέτων στη διεπαφή κινητή συσκευή/TCP accelerator.....	96
<b>Σχήμα 5.2</b> Αποτελέσματα της καταγραφής πακέτων στη διεπαφή TCP accelerator/εξυπηρετητής.....	96
<b>Σχήμα 5.3</b> Χρόνοι RTT στο ασύρματο τμήμα μετάδοσης.....	97
<b>Σχήμα 5.4</b> Χρόνοι RTT στο ενσύρματο τμήμα μετάδοσης.....	97

## **Κατάλογος Συντμήσεων**

2G/3G/4G/5G – 2nd/3rd/4th/5th Generation  
3GPP – 3rd Generation Partnership Project  
ABR – Adaptive Bitrate Streaming  
APN – Access Point Name  
BDP – Bandwidth-delay product  
CDMA – Code Division Multiple Access  
CP – Control Plane  
DBS – Dynamic Bandwidth Shaping  
DL – Downlink  
DNS – Domain Name System  
DSRC – Dedicated Short Range Communication  
DwPTS – Downlink Pilot Time Slot  
ECN – Explicit Congestion Notification  
EDGE – Enhanced Data Rates for GSM Evolution  
EMM – EPS Mobility Management  
eNB – evolved Node B  
EPC – Evolved Packet Core  
EPS – Evolved Packet System  
ESM – EPS Session Management  
ETSI – European Telecommunications Standards Institute  
E-UTRAN – Evolved UMTS Terrestrial Radio Access Network  
FDMA – Frequency Division Multiple Access  
FEC – Forward Error Correction  
FTP – File Transfer Protocol  
GP – Guard Period  
GPRS – General Packet Radio Service  
GSM – Global System for Mobile Communication  
GTP – GPRS Tunneling Protocol  
GTP-C – GTP Control Plane  
GTP-U – GTP User Plane)  
HARQ – Hybrid Automatic Repeat Request  
HeNB – Home Enb  
HSPA – High Speed Packet Access  
HSS – Home Subscriber Server  
HTTP – Hyper Text Transfer Protocol  
ICMP – Internet Control Message Protocol  
ICT – Information Computer Technology  
IoT – Internet of Things  
IP – Internet Protocol  
ISI – Intersymbol Interference  
ISP – Internet Service Provider  
ITU – International Telecommunication Union  
JIT – Just-In-Time  
LAN – Local Area Network  
LTE – Long Term Evolution

LTE-A – LTE-Advanced  
MAC – Medium Access Control  
MEC – Mobile Edge Computing  
MEO – Mobile Edge Orchestrator  
MEPM – Mobile Edge Platform Manager  
MME – Mobility Management Entity  
MMS – Multimedia Messaging Service  
MNO – Mobile Network Operator  
MSS – Maximum segment size  
NAS – Non Access Stratum  
NFVI – NFV Infrastructure  
OCS – Online Charging System  
OFCS – Offline Charging System  
OFDM – Orthogonal Frequency Division Multiplexing  
OFDMA – Orthogonal Frequency Division Multiple Access  
OSI – Open Systems Interconnection model  
OSPF – Open Shortest Path First  
OSS – Operations Support System  
PAPR – Peak to Average Power Ratio  
PCRF – Policy and Charging Rules Function  
PDCP – Packet Data Convergence Protocol  
PDN – Packet Data Network  
PDU – Packet Data Unit  
P-GW – Packet Data Network Gateway  
PHY – Physical Layer  
PLMN – Public Land Mobile Network  
QAM – Quadrature Amplitude Modulation  
QAT – Quality Aware Transcoding  
QoE – Quality of Experience  
QUIC – Quick UDP Internet Connections  
RAN – Radio access network  
RB – Resource Block  
RE – Resource Element  
RLC – Radio Link Control  
RNC – Radio Network Controller  
RNIS – Radio Network Information Service  
RRC – Radio Resource Control  
RRM – Radio Resource Management  
RTO – Retransmission TimeOut  
RTT – Round Trip time  
SC-FDMA – Single Carrier-Frequency Division Multiple Access  
SDU – Service Data Unit  
SFN – SubFrame Number  
S-GW – Serving Gateway  
SMS – Short Message Service  
SMTP – Simple Mail Transfer Protocol

ssthresh – slow start threshold  
TAC – Tracking Area Code  
TCP – Transmission Control Protocol  
TDMA – Time Division Multiple Access  
TLS – Transport Layer Security  
UDP – User Datagram Protocol  
UE – User Equipment  
UL – Uplink  
UMTS – Universal Mobile Telecommunications Systems  
UP – User Plane  
UpPTS – Uplink Pilot Time Slot  
VI – Virtualization Infrastructure  
VIM – Virtualization Infrastructure Manager  
VM – Virtual Machine  
VNF – Virtual Network Function  
VoIP – Voice over IP  
WAN – Wide Area Network  
WCDMA – Wideband Code Division Multiple Access



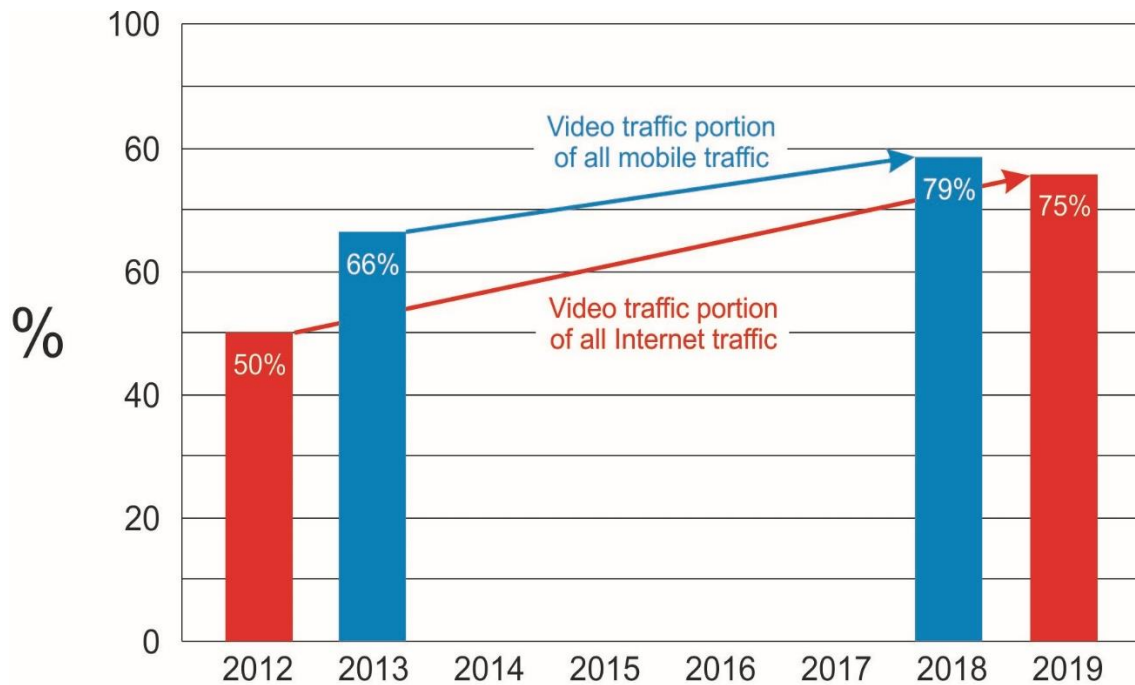
# ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

## Εισαγωγή

### 1.1 Η εξέλιξη των τηλεπικοινωνιών

Η ραγδαία ανάπτυξη της τεχνολογίας έχει συντελέσει στην αύξηση της ζήτησης και του πλήθους των τηλεπικοινωνιακών υπηρεσιών, που είναι προσανατολισμένες στην ικανοποίηση των ολοένα αυξανόμενων αναγκών του χρήστη. Λόγω της ανάπτυξης αυτής, ο χρήστης αναζητεί συνεχώς νέες ποιοτικότερες υπηρεσίες ή βελτίωση των υπαρχουσών, κυρίως αυτών που σχετίζονται με τη διαρκή πρόσβαση στο Διαδίκτυο (*internet*). Ταυτοχρόνως, η εύκολη και οικονομική πρόσβαση στο Διαδίκτυο σε συνδυασμό με την ταχύτατη ανταλλαγή πληροφοριών, προσελκύουν τη χρήση πολυάριθμων εφαρμογών. Το μεγαλύτερο μέρος αυτών σχετίζεται με υπηρεσίες διαδικτυακής αναμετάδοσης βίντεο (*video streaming*) που παρέχονται στο χρήστη ανεξαρτήτως χώρου και χρόνου αρκεί να είναι συνδεδεμένος στο Διαδίκτυο (*online*). Σε αυτή την κατεύθυνση έχουν στραφεί πλέον οι περισσότεροι τηλεοπτικοί σταθμοί και πάροχοι συνδρομητικών υπηρεσιών (πχ Netflix), προσφέροντας έτσι τη δυνατότητα στο χρήστη για ελεύθερη παρακολούθηση προγραμμάτων εφόσον αυτά είναι αποθηκευμένα και διαδικτυακά προσβάσιμα (*on demand*). Επομένως, ο χρήστης δεν είναι υποχρεωμένος να περιμένει τη στιγμή όπου είναι προγραμματισμένο ένα πρόγραμμα να μεταδοθεί από τον τηλεοπτικό πάροχο. Με αυτόν τον τρόπο, βελτιώνεται δραστικά η ικανοποίηση του χρήστη. Παράλληλα, αυξάνεται ο σχετικός ανταγωνισμός, καθώς οι συνδρομητικές εταιρείες μπορούν πλέον να παρέχουν στο χρήστη το περιεχόμενο που εκείνος επιθυμεί χωρίς να απαιτείται η εγκατάσταση κεραιοσυστημάτων αλλά μόνο η σύνδεση στο Διαδίκτυο. Συνέπεια της παροχής τέτοιων υπηρεσιών βίντεο προσβάσιμων από ποικίλες συσκευές πολυμέσων στη σύγχρονη εποχή αποτελεί η τεράστια αύξηση του όγκου των δεδομένων που διακινούνται στο Διαδίκτυο.

Εκτός από την αυξημένη ζήτηση υπηρεσιών video streaming, υπάρχουν και άλλες αιτίες που οδήγησαν σε αυξημένη κίνηση δεδομένων στο Διαδίκτυο. Η ανάπτυξη online εφαρμογών, η ανάγκη για απομακρυσμένη διασύνδεση μηχανών καθώς και η επικείμενη εποχή του Διαδικτύου των πραγμάτων (*Internet of things – IoT*) δημιουργούν νέες προκλήσεις τόσο στον τομέα της υπολογιστικής ισχύος όσο και σε αυτόν της διαχείρισης του τεράστιου όγκου των δεδομένων στο Διαδίκτυο. Ο πρώτος τομέας έχει αντιμετωπιστεί σε μεγάλο βαθμό μέσω της χρήσης υπηρεσιών υπολογιστικού νέφους (*Cloud computing*). Αυτές αφορούν τη χρήση υπολογιστικών πόρων απομακρυσμένων μηχανών, η επικοινωνία με τις οποίες εξασφαλίζεται μέσω του Διαδικτύου. Πλεονεκτήματα αυτής της προσέγγισης είναι η ευελιξία, η αποδοτικότητα, η ασφάλεια και η μειωμένη πολυπλοκότητα, καθώς ο χρήστης αποκτά πρόσβαση σε εφαρμογές χωρίς να χρησιμοποιεί κάθε φορά το απαιτούμενο λογισμικό και υλικό (π.χ servers). Παραδείγματα χρήσης του cloud computing αποτελεί η ενημέρωση του προφίλ Facebook, η ενημέρωση για το υπόλοιπο ενός τραπεζικού λογαριασμού μέσω του e-banking κτλ. Εντούτοις, η χρήση του cloud computing σε συνδυασμό με την αύξηση του πλήθους των πολυμέσων και των συσκευών που είναι συνδεδεμένες στο Διαδίκτυο αυξάνουν δραματικά τον όγκο δεδομένων που διακινούνται σε αυτό.



Source: Cisco\*

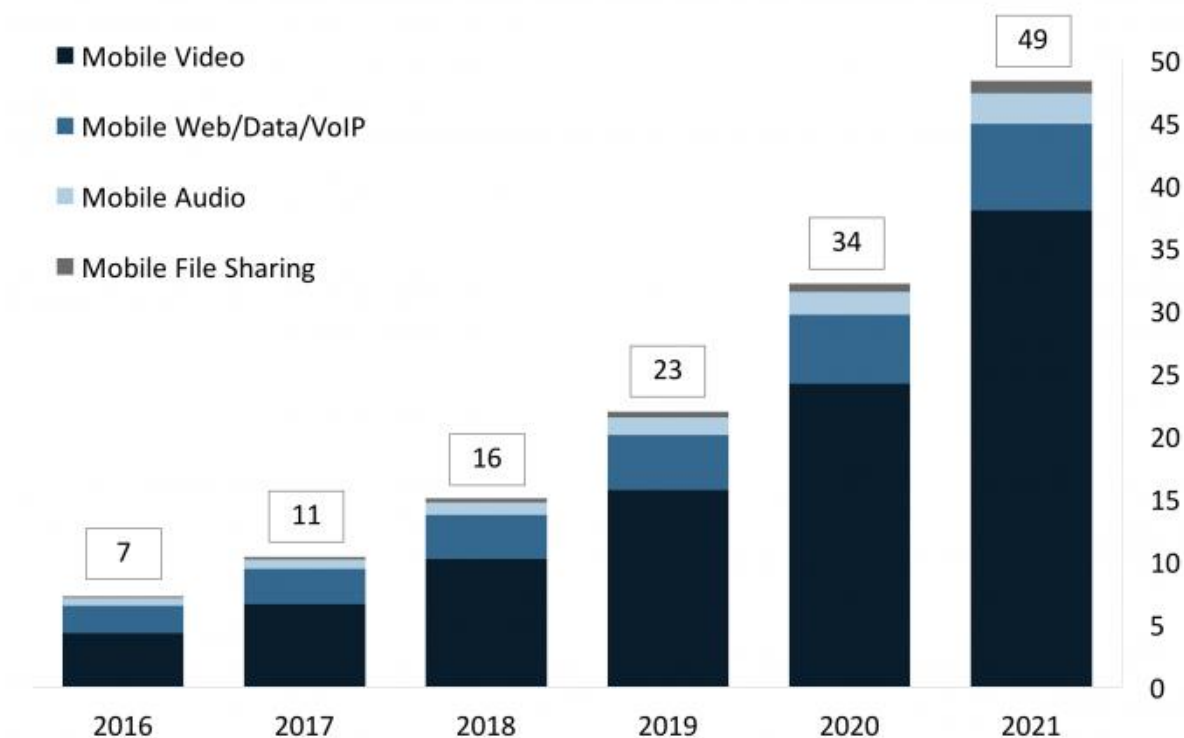
**Σχήμα 1.1** Διάγραμμα μεταβολής του ποσοστού της κίνησης βίντεο στο ίντερνετ (σε κινητές συσκευές και συνολικά) σε διάστημα έξι ετών

Με βάση τα προηγούμενα, είναι φανερό ότι η πρόσβαση στο Διαδίκτυο είναι διαρκώς απαραίτητη για το μέσο άνθρωπο, ενώ η τηλεπικοινωνιακή κίνηση σε αυτό προβλέπεται δραματικά αυξημένη και λόγω της συνεχούς προσθήκης εφαρμογών. Πέραν του video streaming, και άλλες εφαρμογές όπως το *web browsing* αυξάνουν σημαντικά τον όγκο της κίνησης στο Διαδίκτυο. Συνεπώς, κρίνεται απαραίτητη η ανάπτυξη νέων τεχνικών που θα αποσκοπούν στη διασφάλιση ικανοποιητικής εμπειρίας (*Quality of Experience – QoE*) του χρήστη, καθώς και στη διατήρηση της διαθεσιμότητας του κατά περίπτωση τηλεπικοινωνιακού δικτύου των παρόχων. Αναμφισβήτητα, οι νέες δικτυακές υποδομές και η εξέλιξη της τεχνολογίας (4G, VDSL, FTTx κλπ) μπορούν να συμβάλουν στην αύξηση των ταχυτήτων μετάδοσης και να περιορίσουν το πρόβλημα της συμφόρησης των τηλεπικοινωνιακών δικτύων. Εντούτοις, όπως ήδη αναφέρθηκε, η προσπάθεια σύνδεσης αντικειμένων στο Διαδίκτυο (π.χ smart locks, smart security systems κτλ) αναμένεται να αυξήσει κατά καταγιστικό τρόπο το τηλεπικοινωνιακό φορτίο που θα διακινείται σε αυτό. Γίνεται αντιληπτό ότι ακόμα και με μεγαλύτερο διαθέσιμο εύρος ζώνης μετάδοσης αυτή η υπέρμετρη αύξηση θα θέτει συνεχώς προκλήσεις για την εξασφάλιση της διαθεσιμότητας του δικτύου και της αναγκαίας ποιότητας εμπειρίας του χρήστη.

Όπως απεικονίζεται και στο διάγραμμα του Σχ.1.2, η αύξηση της κίνησης των δεδομένων (*data traffic*) σε συσκευές κινητής τηλεφωνίας έχει υπερτετραπλασιαστεί σε σχέση με το 2016, ενώ με βάση την έρευνα της Cisco αναμένεται να ακολουθήσει εκθετική αύξηση.

## Global Monthly Mobile Data Traffic, By Type

In exabytes



Source: Cisco, BI Intelligence calculations, 2017

**Σχήμα 1.2** Ραβδόγραμμα μεταβολής και πρόβλεψης κίνησης δεδομένων σε υπηρεσίες κινητών συσκευών

### 1.2 Τα χαρακτηριστικά των πρωτοκόλλων μεταφοράς στις υπηρεσίες Διαδικτύου

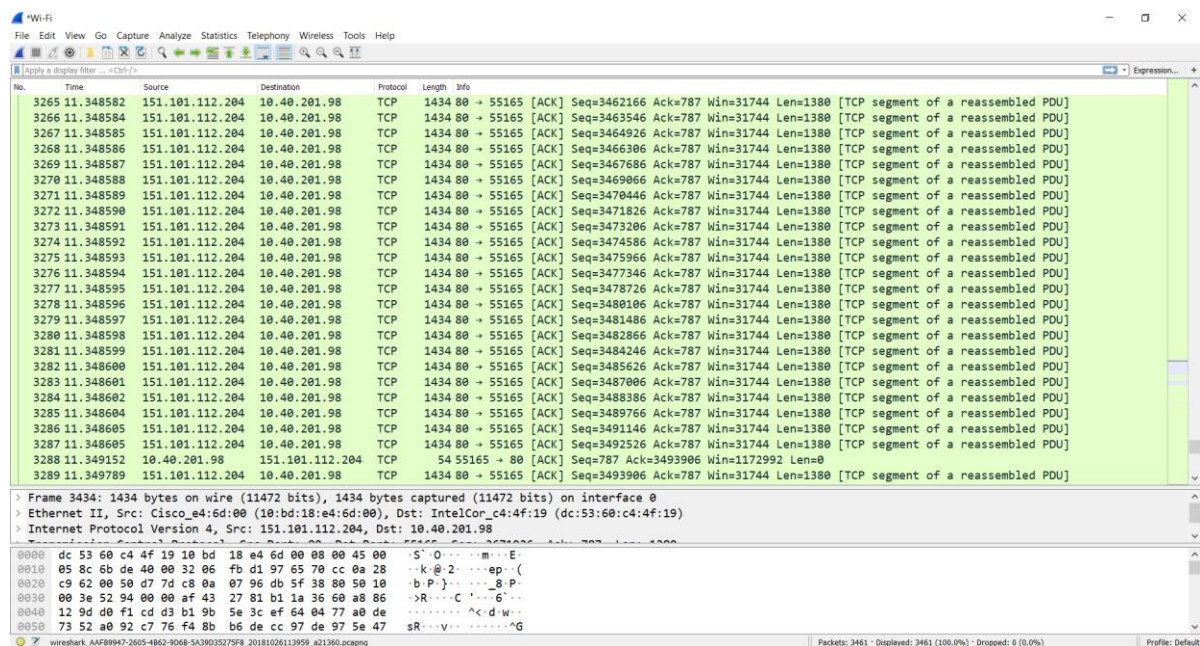
Οι υπηρεσίες που προσθέτουν μεγαλύτερη κίνηση στο Διαδίκτυο, λόγω του μεγάλου όγκου της πληροφορίας που διακινούν αλλά και λόγω της αυξημένης ζήτησής τους από τους χρήστες, είναι οι υπηρεσίες video streaming, web browsing και οι φωνητικές κλήσεις μέσω Διαδικτύου (*Voice over IP – VoIP*). Λόγω της αυξημένης αξιοπιστίας που απαιτούν, οι δύο πρώτες χρησιμοποιούν το πρωτόκολλο μεταφοράς TCP. Το πρωτόκολλο αυτό χαρακτηρίζεται από ασφάλεια και εξασφαλίζει την αναλλοίωτη παράδοση του περιεχομένου που ζητεί ο τηλεπικοινωνιακός χρήστης.

Από την άλλη πλευρά, το UDP είναι ένα πρωτόκολλο που χρησιμοποιείται σε υπηρεσίες στις οποίες δεν κρίνεται επιτακτική η αναλλοίωτη μεταφορά δεδομένων ούτε και η άριστη ποιότητα της υπηρεσίας που ζητεί ο χρήστης. Επιπλέον, σε υπηρεσίες απευθείας (*live*) μετάδοσης video, η χρήση του TCP εισάγει καθυστερήσεις στη μετάδοση λόγω επαναποστολής πακέτων δεδομένων, με αποτέλεσμα συχνά η μετάδοση να διακόπτεται. Αυτή η καθυστέρηση στο TCP είναι πολύ μεγαλύτερη σε *live* μεταδόσεις καθώς είναι πιθανό πολλοί χρήστες να ζητούν την ίδια υπηρεσία ταυτόχρονα, με αποτέλεσμα να πραγματοποιείται επαναποστολή πακέτων σε πολυάριθμους χρήστες, με αποτέλεσμα την εξάντληση των διαθέσιμων πόρων. Για τους

ανωτέρω λόγους, σε live μεταδόσεις video και κλήσεων μέσω Διαδικτύου χρησιμοποιείται το πρωτόκολλο UDP.

Σύμφωνα με έγκυρα στατιστικά στοιχεία, το TCP αντιπροσωπεύει το 85%-90% της κίνησης στην ενσύρματη σύνδεση στο Διαδίκτυο, ενώ στην ασύρματη αντιπροσωπεύει περίπου το 96%. Επομένως, είναι σημαντικό να βελτιστοποιηθεί η λειτουργία του καθώς οι περισσότερες υπηρεσίες εξαρτώνται από την αξιοπιστία κατά τη μετάδοση δεδομένων. Για να γίνει κατανοητή η εκτεταμένη χρήση του, χρησιμοποιήθηκε πρόγραμμα καταγραφής κίνησης (wireshark) στο Διαδίκτυο για διάφορες εφαρμογές, και όπως απεικονίζεται στα διαγράμματα που ακολουθούν, επιβεβαιώνεται ότι για τις συχνότερες χρήσεις του Διαδικτύου χρησιμοποιείται το TCP.

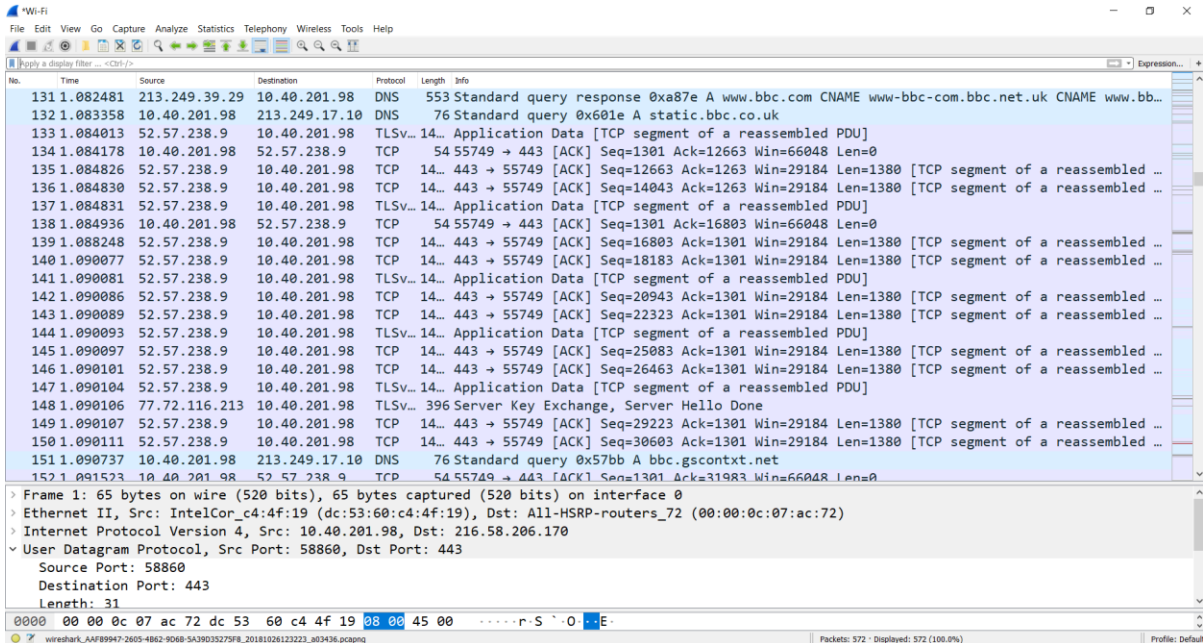
Αρχικά, στο πλαίσιο της διπλωματικής εργασίας πραγματοποιήθηκε σύνδεση με την υπηρεσία διαδικτυακής τηλεόρασης του ΣΚΑΙ για την παρακολούθηση αποθηκευμένης εκπομπής. Επιβεβαιώθηκε η χρήση του TCP.



**Σχήμα 1.3** Καταγραφή στιγμιότυπου της κίνησης κατά την παρακολούθηση εκπομπής αποθηκευμένης στο [www.skai.gr/tv](http://www.skai.gr/tv)

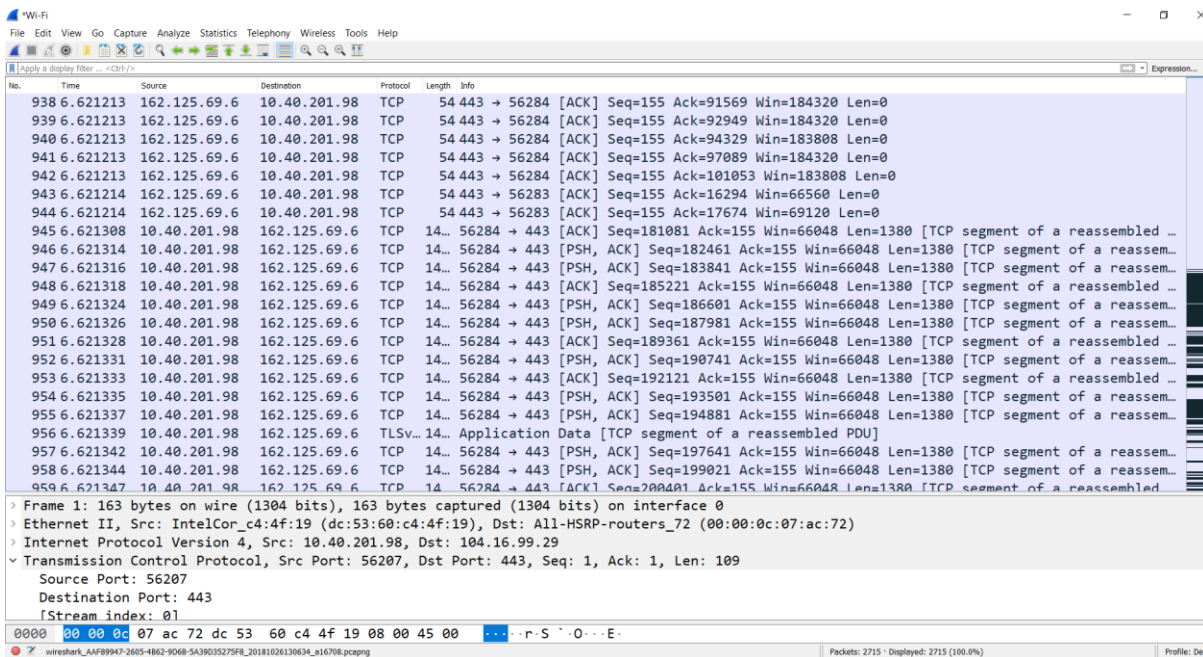
Παρομοίως, και οι άλλες υπηρεσίες διαδικτυακής τηλεόρασης και συνδρομητικές υπηρεσίες παρακολούθησης σειρών (πχ Netflix) χρησιμοποιούν ευρέως το TCP.

Ακολουθως, για την επιβεβαίωση της χρήσης του TCP για την αναζήτηση ιστοσελίδων (web browsing) έγινε στο πλαίσιο της διπλωματικής εργασίας σύνδεση στον ιστότοπο <https://www.bbc.com/news>. Και στην περίπτωση αυτή, επιβεβαιώθηκε η χρήση του TCP.



**Σχήμα 1.4 Καταγραφή στιγμιότυπου της κίνησης κατά την αναζήτηση της σελίδας [www.bbc.com/news](http://www.bbc.com/news)**

Η τελευταία επιβεβαίωση της ευρείας χρήσης του TCP πραγματοποιήθηκε μέσω της μεταφόρτωσης ενός αρχείου pdf στην υπηρεσία dropbox. Η υπηρεσία αυτή χρησιμοποιείται με σκοπό την εύκολη πρόσβαση σε προσωπικά του αρχεία τα οποία μεταφορτώνονται από και προς τον cloud server της υπηρεσίας αυτής μέσω της σύνδεσης στο Διαδίκτυο.



**Σχήμα 1.5 Καταγραφή στιγμιότυπου της κίνησης κατά την μεταφόρτωση αρχείου pdf σε διαδικτυακό λογαριασμό της υπηρεσίας file-sharing dropbox**

Αξίζει να σημειωθεί ότι στο Youtube, που είναι η πλέον δημοφιλής πλατφόρμα παρακολούθησης video, όπως και σε άλλες υπηρεσίες της Google, χρησιμοποιείται το TCP σε περιπτώσεις όπου χρήστης δεν χρησιμοποιεί το φυλλομετρητή Google chrome. Στην

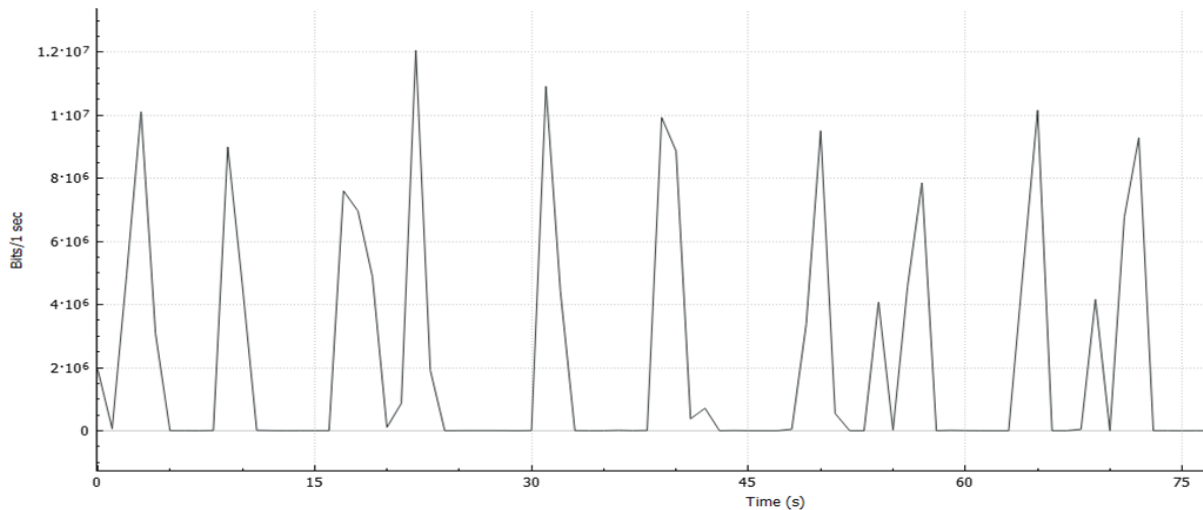
περίπτωση χρήσης του προαναφερθέντος φυλλομετρητή, χρησιμοποιείται το πρωτόκολλο μεταφοράς UDP και οι πρακτικές που χρησιμοποιούνται για την επίτευξη αξιοπιστίας γίνονται σε ανώτερο στρώμα. Σύμφωνα με στατιστικά στοιχεία, το 58.4% των χρηστών Διαδικτύου χρησιμοποιούν το φυλλομετρητή Google Chrome και μόνο ένα μέρος του συνολικού διαδικτύου ανήκει σε υπηρεσίες της Google. Επομένως, επιβεβαιώνεται η εκτεταμένη χρήση του TCP στο Διαδίκτυο και η ανάγκη βελτιστοποίησης της λειτουργίας του.

### **1.3 Τα προβλήματα λόγω της αυξημένης κίνησης στο Διαδίκτυο**

Εξαιτίας της αύξησης του όγκου των δεδομένων στο Διαδίκτυο αυξάνεται η πιθανότητα να προκληθεί συμφόρηση σε αυτό, η οποία μπορεί να επηρεάσει την ποιότητα εμπειρίας του τηλεπικοινωνιακού χρήστη και τη διαθεσιμότητα του δικτύου. Αν και η συνεχής ανάπτυξη της τεχνολογίας προσφέρει περισσότερες δυνατότητες και πόρους, δεν μπορεί να αντισταθμίσει τα προβλήματα που εγείρονται κάθε φορά λόγω των αυξημένων απαιτήσεων του χρήστη σε ό,τι αφορά την πρόσβαση στο Διαδίκτυο.

Όπως προαναφέρθηκε, το TCP είναι το περισσότερο δημοφιλές πρωτόκολλο μεταφοράς στο Διαδίκτυο. Ωστόσο, ο τρόπος λειτουργίας του δεν είναι βελτιστοποιημένος. Αυτό οφείλεται στο ότι το TCP είναι ένα πρωτόκολλο που αργεί να οδηγηθεί στην επιθυμητή κατάσταση (μέσω της επιλογής κατάλληλων παραμέτρων μετάδοσης) και μέχρι να γίνει αυτό, συνήθως έχουν προκύψει προβλήματα συμφόρησης. Συνακόλουθα, προκαλείται υποβάθμιση της εμπειρίας των χρηστών, καθώς οι κόμβοι του Διαδικτύου αποθηκεύουν προσωρινά τα πακέτα δεδομένων μέχρι να γίνει δυνατή η αποστολή τους, το οποίο εισάγει καθυστερήσεις στις συνδέσεις των χρηστών. Ιδιαίτερα στο δίκτυο κινητών επικοινωνιών, όπου οι συνθήκες είναι μεταβαλλόμενες και χαρακτηρίζονται από έντονη τυχαιότητα λόγω της κινητικότητας των χρηστών, το TCP συναντά πολλές δυσκολίες. Ο τρέχων τρόπος προσαρμογής του TCP στις συνθήκες αυτές επιφέρει μείωση του ρυθμού μετάδοσης δεδομένων ή ακόμα και προσωρινή διακοπή μιας σύνδεσης TCP. Αντίστοιχα, σε περιπτώσεις βελτίωσης των συνθηκών μετάδοσης, το TCP καθυστερεί να οδηγήσει την ταχύτητα μετάδοσης στο επιθυμητό επίπεδο καθώς η διαδικασία αυτή γίνεται σταδιακά, με διαδοχικές αυξήσεις του ρυθμού μετάδοσης δεδομένων. Γίνεται αντιληπτό ότι η πρόβλεψη του επιθυμητού ρυθμού μετάδοσης, και κατά συνέπεια η αντίστοιχα προσαρμοσμένη παραμετροποίηση του TCP, θα βελτίωναν βαθμιαία την ποιότητα εμπειρίας του χρήστη, ιδιαίτερα σε ένα δυναμικό περιβάλλον όπως αυτό του δικτύου κινητών επικοινωνιών.

Από το διάγραμμα του Σχ.1.6, διαπιστώνεται μεγάλος αριθμός χρονικών διαστημάτων μηδενισμών του ρυθμού μετάδοσης, γεγονός που προσδίδει μεταβλητότητα στις συνδέσεις των τηλεπικοινωνιακών χρηστών. Ωστόσο, αν η σύνδεση αυτών παρουσίαζε σταθερότητα και μικρότερη διακύμανση μέσω της κατάλληλης σχεδίασης, θα ήταν δυνατή η αποδοτικότερη διαχείριση πόρων και η βελτίωση της ποιότητας εμπειρίας του χρήστη. Έτσι, σε περίπτωση σφάλματος μετάδοσης θα γίνεται επαναποστολή μικρότερου αριθμού πακέτων, καθώς σε κάθε χρονική στιγμή ο χρήστης θα λαμβάνει δεδομένα με σταθερό ρυθμό. Επιπλέον, η ύπαρξη χρονικών στιγμών στις οποίες γίνεται λήψη δεδομένων με εκρηκτικό ρυθμό (βλ. Σχ.1.6) μπορεί να δράσει αποτρεπτικά για άλλους χρήστες, καθώς δεσμεύεται περισσότερο εύρος ζώνης σε σχέση με την περίπτωση σταθερού ρυθμού λήψης δεδομένων.

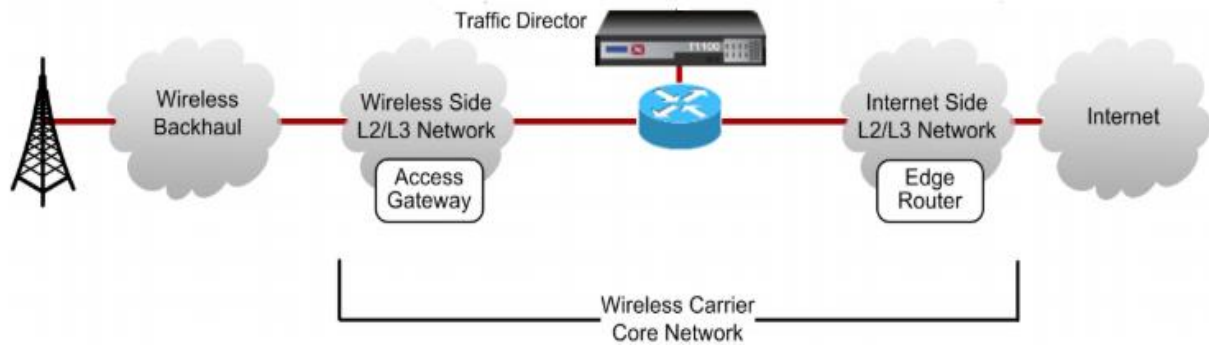


**Σχήμα 1.6** Ρυθμός μετάδοσης κατά την παρακολούθηση βίντεο μέσω ενσύρματης σύνδεσης στο Διαδίκτυο

Συγκεκριμένα η σταθεροποίηση της ταχύτητας λήψης δεδομένων γίνεται σε αρκετά μικρότερη τιμή από αυτή των κορυφών του Σχ.1.6, το οποίο απελευθερώνει εύρος ζώνης προς όφελος άλλων χρηστών. Μέσω αυτής της διαδικασίας, μπορεί να επιτευχθεί καλύτερη κατανομή των διαθέσιμων τηλεπικοινωνιακών πόρων, που συνακόλουθα βελτιώνει την ποιότητα υπηρεσίας του συνόλου των χρηστών, ιδιαίτερα κατά τις ώρες αιχμής όπου η ζήτηση πόρων είναι διαρκής. Στα ενσύρματα δίκτυα, η επίδραση των ανωτέρω πρακτικών αν και σημαντική, δεν είναι καθοριστικής σημασίας λόγω της διαθεσιμότητας πόρων και της μικρότερης καθυστέρησης και πιθανότητας σφάλματος μετάδοσης σε σχέση με τα ασύρματα δίκτυα. Αντίθετα, τα ασύρματα δίκτυα χαρακτηρίζονται από διαρκή μεταβλητότητα του διαθέσιμου εύρους ζώνης και αυξημένη πιθανότητα σφαλμάτων μετάδοσης. Συνεπώς, η ανάγκη για πρόβλεψη των κατάλληλων παραμέτρων μετάδοσης με στόχο την αποδοτική χρησιμοποίηση του διαθέσιμου εύρους ζώνης, καθίσταται επιτακτική για τη βελτιστοποίηση της ποιότητας εμπειρίας του τηλεπικοινωνιακού χρήστη.

#### 1.4 Οι υπάρχουσες λύσεις σήμερα

Οι περισσότεροι πάροχοι υπηρεσιών Διαδικτύου (*Internet Service Provider – ISP*) προκειμένου να διαχειριστούν την τεράστια κίνηση που διέρχεται από το δίκτυό τους έχουν εγκαταστήσει προσαρμοσμένες στη βελτίωση της λειτουργίας του TCP μονάδες (*TCP accelerators*). Οι μονάδες αυτές προσαρμόζουν τη διαδικτυακή κίνηση με στόχο την παροχή βελτιστοποιημένης ποιότητας υπηρεσίας για το σύνολο των τηλεπικοινωνιακών χρηστών έπειτα από συλλογή και επεξεργασία των κατάλληλων στατιστικών του δικτύου. Επιπλέον, οι προαναφερθείσες μονάδες είναι υπεύθυνες και για άλλες υπηρεσίες όπως η ασφάλεια, η προστασία από κακόβουλο λογισμικό, η απόκρυψη ευαίσθητου περιεχομένου σε συγκεκριμένες ηλικιακές ομάδες κτλ. Ουσιαστικά, πρόκειται για μια επιπλέον βαθμίδα που τοποθετείται στο δίκτυο κορμού του ISP (βλ. Σχ.1.7) μέσω της οποίας φιλτράρεται το περιεχόμενο της διαδικτυακής κίνησης προς το χρήστη έτσι ώστε να του παρέχεται η κατάλληλη ποιότητα υπηρεσίας.



**Σχήμα 1.7** Διάγραμμα δικτύου κορμού και πρόσβασης με τοποθετημένο τον TCP accelerator (traffic director)

Οι σημαντικότερες λειτουργίες ενός TCP accelerator είναι οι ακόλουθες:

### **Βελτιστοποίηση video (Video optimization)**

Η συγκεκριμένη διαδικασία αφορά σε τροποποιήσεις συγκεκριμένων παραμέτρων για το video streaming των χρηστών μέσω κατάλληλων διαδικασιών για την παροχή της καλύτερης δυνατής ποιότητας υπηρεσίας σε αυτούς. Για παράδειγμα, πραγματοποιείται κωδικοποίηση του video στους ρυθμούς μετάδοσης που επιτρέπουν οι συνδέσεις των χρηστών χωρίς να μειωθεί η ποιότητά τους. Επιπλέον, πραγματοποιείται η συμπίεσή τους με κατάλληλη μετατροπή έτσι ώστε να μη γίνει αντιληπτή από το χρήστη κάποια αλλαγή στην ποιότητά τους. Έτσι, το video μεταδίδεται ταχύτερα στο χρήστη, ενώ αποφεύγεται η συμφόρηση δεδομένων στο δίκτυο. Εκτός από τη βελτιστοποίηση κατά χρήστη, γίνεται βελτιστοποίηση και στο σύνολο των χρηστών. Αυτό αποσκοπεί στη δίκαιη κατανομή πόρων στο σύνολο των τηλεπικοινωνιακών χρηστών έτσι ώστε να ελαχιστοποιούνται οι διακοπές στους περισσότερους από αυτούς. Για παράδειγμα, σε περιόδους συμφόρησης δεδομένων, ο TCP accelerator μειώνει την ποιότητα των μεταδιδόμενων video έτσι ώστε στο μεγαλύτερο ποσοστό χρηστών να είναι διαθέσιμες υπηρεσίες video.

### **Βελτιστοποίηση web (Web optimization)**

Αυτό το είδος βελτιστοποίησης είναι υπεύθυνο κυρίως για την περιήγηση των χρηστών στο Διαδίκτυο (web browsing). Η συγκεκριμένη διαδικασία είναι ιδιαίτερα χρήσιμη καθώς, πλέον, οι ιστοσελίδες χαρακτηρίζονται από αυξημένη πολυπλοκότητα λόγω της άντλησης περιεχομένου από διαφορετικούς servers στο internet. Όπως και στην περίπτωση του video optimization, ο TCP accelerator αντιπροσωπεύει τους χρήστες κατά την επικοινωνία τους με τον web server. Εκτός από την αποθήκευση των δημοφιλών ιστοσελίδων, ο TCP accelerator, λαμβάνει το περιεχόμενο της ιστοσελίδας που ζητείται από τους χρήστες, το αποθηκεύει προσωρινά και το προωθεί σε εκείνον έπειτα από κατάλληλη επεξεργασία (πχ αφαίρεση σχολίων από τον html κώδικα). Αυτή η διαδικασία πραγματοποιείται καθώς ο TCP accelerator έχει τη δυνατότητα ανοίγματος παράλληλων συνδέσεων με τους web servers της ζητούμενης ιστοσελίδας από τους χρήστες, με αποτέλεσμα τη ταχύτερη διαμόρφωση του προς αποστολή περιεχομένου. Επιπλέον, ο TCP accelerator πραγματοποιεί συμπίεση των πολυμέσων που υπάρχουν στις ιστοσελίδες έτσι ώστε να μειωθεί το μέγεθός τους και η λήψη τους από τους χρήστες να επιταχυνθεί. Τέλος, ο TCP accelerator αποθηκεύει περιεχόμενο που αναζητείται συχνά από τους χρήστες με σκοπό την ταχύτερη μεταφόρτωσή του όταν ζητηθεί εκ νέου.



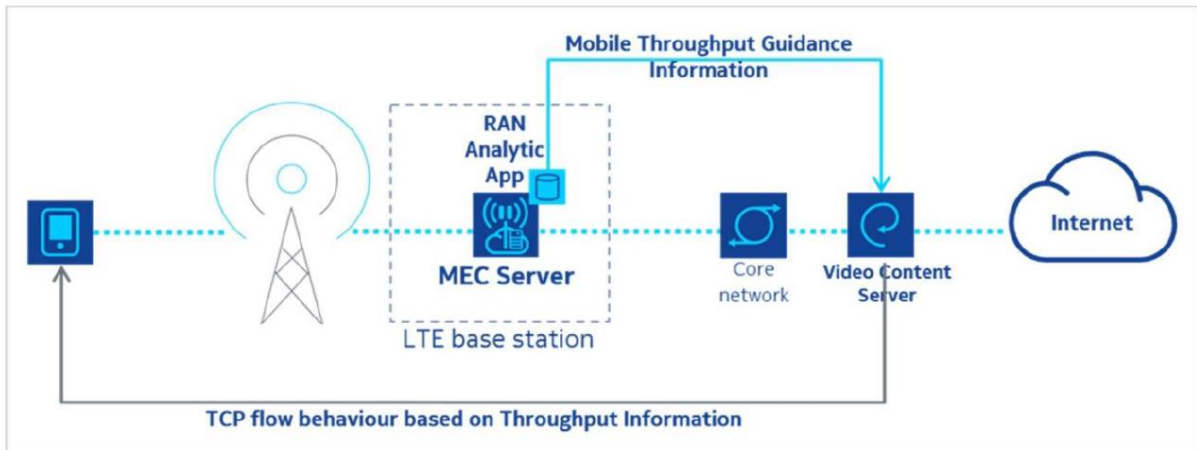
## Βελτιστοποίηση TCP (TCP optimization)

Μέσω της διαδικασίας αυτής, επιτυγχάνεται ο καθορισμός από τον TCP accelerator των κατάλληλων παραμέτρων μετάδοσης όταν οι χρήστες ζητούν διαδικτυακό περιεχόμενο. Όπως προαναφέρθηκε, η προαναφερθείσα πρακτική επηρεάζει περισσότερο τα ασύρματα δίκτυα που χαρακτηρίζονται από αυξημένη καθυστέρηση και ποσοστό λαθών. Έχοντας τη γνώση της κατάστασης του δικτύου και της διαθεσιμότητας των πόρων, ο TCP accelerator επιλέγει προς όφελος του χρήστη τις κατάλληλες παραμέτρους μετάδοσης συνυπολογίζοντας τις εντόνως μεταβαλλόμενες καθυστέρηση και ταχύτητα μετάδοσης στην περίπτωση των ασυρμάτων δικτύων. Επιπλέον, εφαρμόζει τον κατάλληλο αλγόριθμο αποφυγής συμφόρησης του TCP προκειμένου να αντιμετωπιστούν ταχύτερα φαινόμενα συμφόρησης στο δίκτυο. Ακόμα, λόγω της αργής προσαρμογής του TCP στις αλλαγές του διαθέσιμου εύρους ζώνης, ο TCP accelerator μεριμνά για τη βελτιστοποίηση διαδικασιών του TCP, οι οποίες θα αναλυθούν σε επόμενο κεφάλαιο

## 1.5 Σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας

Η ιδέα της παρούσας διπλωματικής εργασίας προέρχεται από την προσέγγιση *Mobile Edge Computing (MEC)*. Ουσιαστικά, το MEC αποσκοπεί στην παροχή υπηρεσιών cloud computing και εφαρμογών της τεχνολογίας πληροφοριών και επικοινωνιών (*Information Computer Technology – ICT*) εγγύτερα προς το χρήστη υπηρεσιών Διαδικτύου. Ως αποτέλεσμα αυτού, επιτυγχάνεται η μείωση του λανθάνοντος χρόνου δικτύου (*latency*), δηλαδή του χρόνου που απαιτείται για τη μεταφορά ενός τηλεπικοινωνιακού περιεχομένου από ένα σημείο σε ένα άλλο, και συνακόλουθα η βελτίωση της συνολικής εμπειρίας του τηλεπικοινωνιακού χρήστη. Επιπλέον, το τηλεπικοινωνιακό δίκτυο κορμού αποσυμφορείται καθώς μεγάλος όγκος πληροφορίας συλλέγεται, αποθηκεύεται και αναλύεται στη MEC πλατφόρμα, χωρίς να χρειαστεί περαιτέρω δρομολόγηση μέσω του δικτύου κορμού. Η προαναφερθείσα προσέγγιση αφορά δίκτυα κινητών επικοινωνιών στα οποία η MEC πλατφόρμα εγκαθίσταται συνήθως πλησίον του σταθμού βάσης (ΣΒ). Συνεπώς, προσδίδοντας ευφύια στους ΣΒ επιτυγχάνεται η ανάπτυξη εφαρμογών υψηλής αξιοπιστίας εγγύτερα στο χρήστη.

Μια από τις εφαρμογές του MEC αναμένεται να είναι η χρήση του με σκοπό τη βελτίωση της εμπειρίας του χρήστη των υπηρεσιών video streaming και web browsing που πραγματοποιούνται σε μεγάλο ποσοστό με χρήση του πρωτοκόλλου TCP. Μέσω της τοποθέτησης ευφύων διατάξεων που βελτιώνουν τη λειτουργία του TCP είναι δυνατό να επιτευχθεί περιορισμός των εγγενών προβλημάτων που εμφανίζει το TCP μέσω κινητών δικτύων επικοινωνιών όπως η καθυστέρηση εκκίνησης ενός video καθώς και η διακοπτόμενη φόρτωση του (*stall*). Τα συστήματα αυτά συλλέγουν και επεξεργάζονται real-time δεδομένα της κατάστασης του κινητού διαύλου και ανάλογα με την τηλεπικοινωνιακή κίνηση προσαρμόζουν κατάλληλα τις παραμέτρους του πρωτοκόλλου TCP μέσω του οποίου πραγματοποιούνται οι υπηρεσίες video streaming και web browsing, βελτιώνοντας τη συνολική εμπειρία του χρήστη.



**Σχήμα 1.8** Τοπολογία δικτύου με εγκατεστημένη MEC πλατφόρμα με σκοπό την επιτάχυνση video

Σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η ανάλυση της λειτουργίας του TCP accelerator και τα πλεονεκτήματα που προσφέρει η χρήση του. Θα δοθεί έμφαση στην πολύτιμη συνεισφορά του, ιδιαίτερα στα ασύρματα δίκτυα, στα οποία η διαδικτυακή κίνηση τη σύγχρονη εποχή αυξάνεται δραματικά. Επιπλέον θα παρουσιαστούν τα σενάρια χρήσης του MEC στην υπάρχουσα γενιά δικτύου *LTE (Long Term Evolution)*. Τέλος θα διερευνηθεί αν είναι δυνατό να αξιοποιηθεί η διασύνδεση του σταθμού βάσης κινητής τηλεφωνίας με τον TCP accelerator ώστε να επιτευχθεί η βέλτιστη αξιοποίηση των τηλεπικοινωνιακών πόρων και η παροχή της καλύτερης δυνατής ποιότητας υπηρεσίας στους τηλεπικοινωνιακούς χρήστες.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

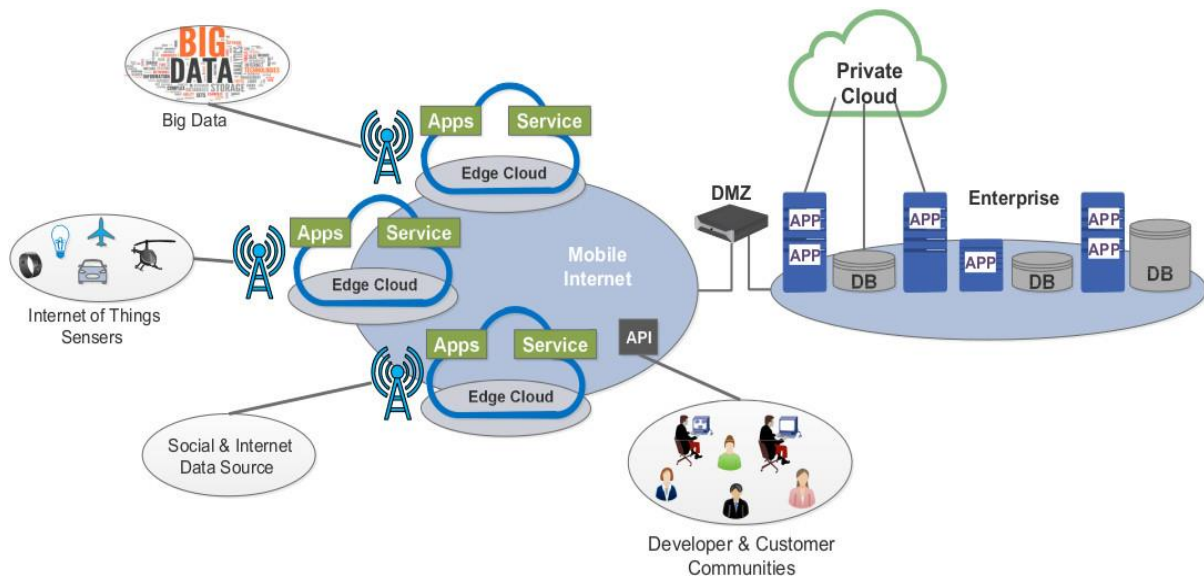
### Mobile Edge Computing (MEC)

#### 2.1 Εισαγωγή

Τα συστήματα κινητών επικοινωνιών παρουσιάζουν αρκετές προκλήσεις λόγω της μεταβλητότητας που τα διέπουν. Για να είναι εφικτή η επικοινωνία μεταξύ δύο τερματικών κινητής τηλεφωνίας, εκτός από το δίκτυο κορμού, μεσολαβεί το ασύρματο δίκτυο πρόσβασης (*Radio access network – RAN*). Στο δεύτερο δίκτυο, οι δυσμενείς συνθήκες μετάδοσης, όπως π.χ. η κινητικότητα του τερματικού και η απόστασή του από το ΣΒ, προκαλούν προβλήματα στη διαθεσιμότητα του δικτύου καθώς και στην ποιότητα εμπειρίας των χρηστών. Συγκεκριμένα, τα λάθη μετάδοσης κατά την επικοινωνία του τερματικού με το ΣΒ προκαλούν την επαναποστολή πακέτων, αυξάνοντας τον όγκο δεδομένων στο δίκτυο. Έτσι, τα πακέτα δεδομένων στα συστήματα κυβελωτής τηλεφωνίας είναι πιθανό να διέρχονται πολλαπλές φορές από το δίκτυο κορμού και πρόσβασης. Όπως προαναφέρθηκε, η χρήση του cloud computing, αν και προσφέρει λύσεις στον τομέα της υπολογιστικής ισχύος, εισάγει καθυστερήσεις λόγω της απόστασης των εξυπηρετητών του cloud από τα τερματικά. Συμπερασματικά, αν ληφθεί υπόψη το διαρκώς αυξανόμενο πλήθος εφαρμογών του IoT που απαιτούν αξιοπιστία και μικρή καθυστέρηση, η ανάγκη δραστηκής μείωσης του πλήθους των διερχόμενων πακέτων από το δίκτυο κορμού καθίσταται επιτακτική.

Τα τελευταία χρόνια, στο πλαίσιο του Ευρωπαϊκού Ινστιτούτου Τηλεπικοινωνιακών Προτύπων (*European Telecommunications Standards Institute – ETSI*) διερευνάται η επίδραση που θα έχει η υλοποίηση της τεχνολογίας Mobile Edge Computing (*MEC*) στην αντιμετώπιση των ανωτέρω προκλήσεων. Η προσέγγιση του MEC περιλαμβάνει την ύπαρξη του απαραίτητου υλικού και λογισμικού που είναι εγκατεστημένα στην παρυφή του δικτύου κινητών επικοινωνιών ώστε να παρέχονται υπηρεσίες cloud computing στους τηλεπικοινωνιακούς χρήστες του ασύρματου δικτύου πρόσβασης (*RAN*).

Η βασική ιδέα πίσω από την υλοποίηση του MEC είναι ότι μέσω της μετακίνησης του cloud στα άκρα του δικτύου κινητών επικοινωνιών, επιτυγχάνεται η εύρυθμη λειτουργία των ευαίσθητων σε καθυστέρηση εφαρμογών καθώς και η μείωση της συμφόρησης στο δίκτυο κορμού. Η τεχνολογία του MEC μπορεί να εφαρμοστεί είτε στους ΣΒ κινητής τηλεφωνίας είτε σε άλλους κόμβους στα άκρα του δικτύου πρόσβασης είτε στον ελεγκτή ασύρματου δικτύου του δικτύου 3<sup>ης</sup> γενιάς (*Radio Network Controller – RNC*) είτε σε κάποιο άλλο σημείο συγκέντρωσης δεδομένων από περισσότερες κυψέλες, εγγύτερα στο δίκτυο κορμού. Μέσω των νέων τεχνολογικών δυνατοτήτων του MEC, παρέχεται η δυνατότητα συνεργασίας των παρόχων εφαρμογών και των παρόχων υπηρεσιών διαδικτύου με σκοπό τη δημιουργία καινοτόμων εφαρμογών υψηλής αποδοτικότητας που θα είναι προσανατολισμένες σε συγκεκριμένες ανάγκες της εκάστοτε γεωγραφικής περιοχής (πχ Μουσεία, γήπεδα κτλ). Επιπλέον, οι πάροχοι υπηρεσιών διαδικτύου έχουν τη δυνατότητα αξιοποίησης του MEC με σκοπό τη ρύθμιση και την προσαρμογή της κίνησης δεδομένων στην επιθυμητή κατάσταση την εκάστοτε χρονική στιγμή.



Σχήμα 2.1 Επιχειρησιακό και τοπολογικό διάγραμμα MEC υποδομής

## 2.2 Οφέλη που προσφέρει το MEC

Η τεχνολογία MEC μπορεί να λειτουργήσει άμεσα και αυτοτελώς προς όφελος ενός παρόχου δικτύου. Αυτό μπορεί να επιτευχθεί εμπλουτίζοντας με υπολογιστικούς και αποθηκευτικούς πόρους είτε κατάλληλα επιλεγμένους RAN κόμβους είτε απολήξεις του σταθερού δικτύου, οπότε τα άκρα αυτά εξελίσσονται σε κόμβους MEC. Διαθέτοντας τη δυνατότητα αξιοποίησης υπολογιστικών και αποθηκευτικών πόρων και μέσω της ολοκλήρωσης μεγάλου αριθμού υπηρεσιών σε τοπικό επίπεδο χωρίς να εμπλέκεται το δίκτυο κορμού, οι εξελεγμένοι αυτοί κόμβοι MEC θα προσφέρουν στον πάροχο και στους τηλεπικοινωνιακούς χρήστες σημαντικά οφέλη, τα οποία παρουσιάζονται ακολούθως:

i) Η ύπαρξη του εξυπηρετητή MEC στην παρυφή του ασύρματου δικτύου πρόσβασης, συμβάλλει στην ταχύτατη επικοινωνία μεταξύ εκείνου και των τερματικών συσκευών. Η εγγύτητα που προσφέρεται στο χρήστη έχει ως αποτέλεσμα την ελαχιστοποίηση της καθυστέρησης, παράμετρο που έχει καθοριστικό ρόλο σε υπηρεσίες ευαίσθητες σε καθυστέρηση (*delay-sensitive services*). Επιπλέον, η απευθείας επικοινωνία με τον εξυπηρετητή MEC καθιστά ανεπηρέαστη τη λειτουργία της παρεχόμενης υπηρεσίας από ενδεχόμενα προβλήματα μετάδοσης στο δίκτυο κορμού (πχ συμφόρηση, βλάβη σε κάποιο κόμβο κτλ). Σύμφωνα με το Ευρωπαϊκό Ινστιτούτο Τηλεπικοινωνιακών Προτύπων (*ETSI*), η χρήση του MEC αναμένεται να μειώσει το μέσο χρόνο μεταφόρτωσης μιας διαδικτυακής σελίδας κατά 20%. Η μείωση του latency πέραν της σημαντικής βελτίωσης της QoE των χρηστών, ευνοεί την ανάπτυξη καινοτόμων υπηρεσιών που έχουν σχέση με augmented reality, gaming και εφαρμογές IoT.

ii) Μέσω του MEC εξασφαλίζεται ασφάλεια επικοινωνίας μεταξύ του τερματικού και της εφαρμογής που υλοποιείται στον MEC κόμβο. Η αποκοπή του περιβάλλοντος ανάπτυξης της εφαρμογής από το δίκτυο κορμού μειώνει την πιθανότητα υποκλοπής δεδομένων.

iii) Η MEC πλατφόρμα μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την αποθήκευση περιεχομένου εντοπισμένου ενδιαφέροντος (*locally relevant content*), ώστε να επιταχύνεται η εξυπηρέτηση υπηρεσιών cloud που βασίζονται στην τοποθεσία του χρήστη (*location based services*). Αυτή η δυνατότητα μπορεί να αξιοποιηθεί σε χώρους όπου συγκεντρώνεται μεγάλος αριθμός ατόμων όπως γήπεδα, μουσεία κτλ. Σε αυτή την περίπτωση, ο εξυπηρετητής MEC θα είναι προσανατολισμένος στην παροχή υπηρεσιών στους επισκέπτες των προαναφερθέντων χώρων. Συγκεκριμένα, ο εξυπηρετητής θα έχει αποθηκευμένες πληροφορίες σχετικές με τον τόπο ενδιαφέροντος με σκοπό όχι μόνο τη διευκόλυνση του χρήστη αλλά και τη μετάθεση του cloud εγγύτερα σε αυτόν. Η ανάπτυξη εφαρμογών τοπικού ενδιαφέροντος θα περιορίσει την αναμετάδοση των σχετικών πληροφοριών από απομακρυσμένα cloud κέντρα στους επισκέπτες-χρήστες. Συνεπώς, μέσω των εξυπηρετητών MEC, το περιεχόμενο τοπικού ενδιαφέροντος καθίσταται πλέον διαθέσιμο ταχέως και αξιόπιστα, με αποτέλεσμα τη σημαντική ελάφρυνση του δικτύου κορμού και τη δραστική μείωση των περιστατικών συμφόρησης.

iv) Το MEC συμβάλλει στη μείωση της συνολικής επιβάρυνσης του δικτύου κορμού, αφού μόνο ένα μέρος της συνολικής κίνησης διέρχεται από αυτό. Όπως ήδη αναφέρθηκε, η μετατόπιση του cloud κοντά στον τηλεπικοινωνιακό χρήστη προσδίδει τοπικό χαρακτήρα στη ζητούμενη υπηρεσία. Συγκεκριμένα, η ανταλλαγή πληροφοριών απαραίτητων για την παρεχόμενη υπηρεσία γίνεται εντός του RAN, αφήνοντας ανεπηρέαστο το δίκτυο κορμού. Συνεπώς, η επικοινωνία με το δίκτυο κορμού περιορίζεται στην ανανέωση των πληροφοριών από κάποιο απομακρυσμένο κέντρο δεδομένων (*data center*) και στη συγκεντρωτική αποστολή δεδομένων των χρηστών σε αυτό. Σύμφωνα με το Ευρωπαϊκό Ινστιτούτο Τηλεπικοινωνιακών Προτύπων, η χρήση του MEC αναμένεται να μειώσει τη μέση απαιτούμενη χωρητικότητα του δικτύου κορμού (*backhaul capacity*) κατά 35%.

v) Ο εξυπηρετητής MEC μπορεί και αποθηκεύει σε πραγματικό χρόνο τα χαρακτηριστικά του ασύρματου δικτύου. Έτσι, παρέχεται η δυνατότητα στους παρόχους κινητών επικοινωνιών (*Mobile Network Operator – MNO*) για άμεση επεξεργασία τοπικών δεδομένων του δικτύου κινητών επικοινωνιών (κατάσταση ραδιοδιαύλου, στατιστικά του δικτύου, τηλεπικοινωνιακό φορτίο κυψέλης). Η υποστήριξη των μηχανισμών που ρυθμίζουν τη λειτουργία του TCP με τρέχουσα πληροφορία περί της τοπικής κατάστασης του δικτύου θα οδηγήσει σε αύξηση της ταχύτητας περιήγησης στο Διαδίκτυο και σε δραστική βελτίωση της υπηρεσίας video streaming μέσω της καλύτερης διαχείρισης των διαθέσιμων πόρων του ασύρματου δικτύου πρόσβασης.

vi) Το MEC διευκολύνει τον εντοπισμό της θέσης των τερματικών συσκευών και επιτρέπει την ανάπτυξη εφαρμογών που βασίζονται στη θέση των χρηστών. Η ύπαρξη του εξυπηρετητή MEC στις παρυφές του δικτύου δημιουργεί τις κατάλληλες προϋποθέσεις για την παροχή υπηρεσιών που θα βασίζονται στην τοποθεσία του χρήστη. Ο εντοπισμός της θέσης θα αποθηκεύεται στον εξυπηρετητή MEC, ο οποίος θα αξιοποιεί τις πληροφορίες των χαμηλότερων στρωμάτων δικτύου. Ο εντοπισμός της θέσης των τερματικών συσκευών μπορεί να αξιοποιηθεί με σκοπό την παροχή διαφημίσεων, την ενημέρωση σχετικά με τα πλησιέστερα σημεία ενδιαφέροντος κλπ.

## 2.3 Σενάρια υπηρεσιών MEC

Όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως, το MEC συνεισφέρει στη μείωση της καθυστέρησης και την αξιοποίηση των τηλεπικοινωνιακών πόρων με στόχο τη διατήρηση της διαθεσιμότητας του δικτύου. Οι ανωτέρω δυνατότητες μπορούν να αξιοποιηθούν με σκοπό την ανάπτυξη καινοτόμων εφαρμογών και τη βελτίωση της λειτουργίας των υπαρχόντων. Οι αναβαθμισμένες αυτές εφαρμογές θα προσφέρουν βελτιωμένη ποιότητα υπηρεσίας στους χρήστες. Ως εκ τούτου, θα προσεγγίζονται συνεχώς νέοι συνδρομητές, συμβάλλοντας στην οικονομική ανάπτυξη του παρόχου κινητών επικοινωνιών. Παράλληλα, το MEC παρέχει τη δυνατότητα στον πάροχο δικτύου να δημιουργήσει αυτοτελώς ή σε συνεργασία με τρίτους συνεργάτες (*third parties*) μια αλυσίδα νέων εφαρμογών και υπηρεσιών (πχ augmented reality, εφαρμογές IoT κτλ) που θα απευθύνονται τόσο σε απλούς όσο και σε εταιρικούς πελάτες. Οι υπηρεσίες που θα κάνουν χρήση της τεχνολογίας MEC μπορούν να διαχωριστούν στις εξής κατηγορίες:

**i) Υπηρεσίες προσανατολισμένες στους χρήστες:** Αυτό το είδος υπηρεσιών αποσκοπεί στη βελτίωση της ποιότητας εμπειρίας που αντιλαμβάνονται οι χρήστες και την παροχή καινοτόμου περιεχομένου σε αυτούς. Παραδείγματα τέτοιων υπηρεσιών αποτελούν το διαδικτυακό διαδραστικό gaming, η επαυξημένη (*augmented*) και η εικονική (*virtual*) πραγματικότητα, η χαμηλότερη καθυστέρηση στην περιήγηση των χρηστών στο Διαδίκτυο κλπ.

**ii) Υπηρεσίες σε συνεργασία με τρίτους (*third-party services*):** Αυτό το είδος υπηρεσιών δεν έχει σκοπό κατά κύριο λόγο την ικανοποίηση των χρηστών αλλά την αύξηση του κέρδους του MNO και των συνεργατών του. Οι συνεργάτες είναι υπεύθυνοι για την ανάπτυξη εφαρμογών που μπορούν να λειτουργήσουν αποδοτικά λόγω της χαμηλής καθυστέρησης που προσφέρει το MEC. Συγκεκριμένα, παρέχουν τον κατάλληλο εξοπλισμό στους διαχειριστές του MEC, ενώ διαθέτουν στο εμπόριο έξυπνες συσκευές που θα μπορεί να χρησιμοποιεί ο χρήστης στο περιβάλλον MEC (πχ συσκευές IoT). Κατ' αυτόν τον τρόπο, η συνεργασία αυτή προσφέρει οικονομικά οφέλη όχι μόνο στους διαχειριστές MEC αλλά και στους εταιρικούς χρήστες που αναλαμβάνουν την ανάπτυξη των προαναφερθέντων εφαρμογών.

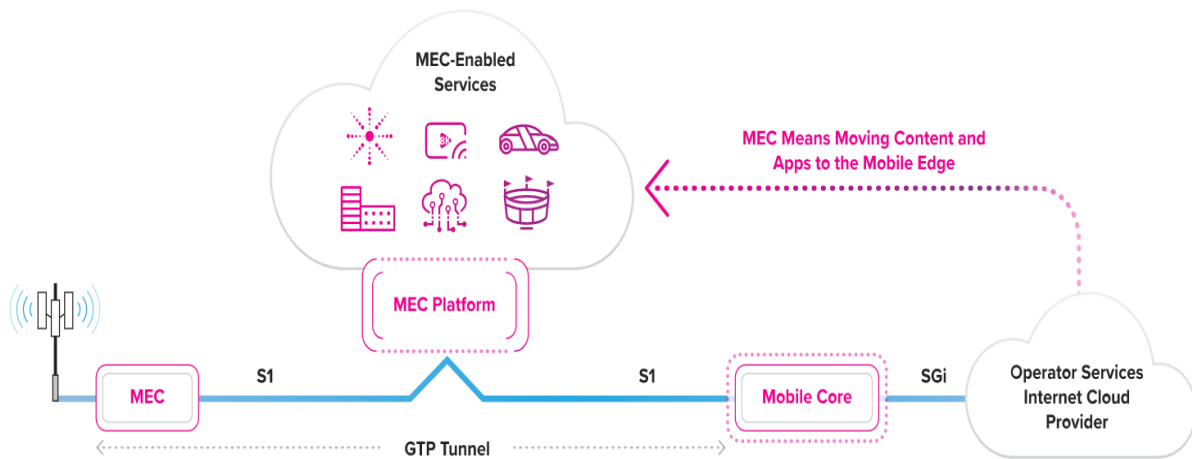
**iii) Υπηρεσίες βελτίωσης της απόδοσης του δικτύου και του QoE του χρήστη:** Αυτό το είδος υπηρεσιών είναι προσανατολισμένο κυρίως στη διατήρηση της διαθεσιμότητας του δικτύου. Παράλληλα, πέραν της διαθεσιμότητας του δικτύου ενισχύεται και η ποιότητα υπηρεσίας των χρηστών, καθώς περιορίζονται τα προβλήματα καθυστέρησης και συμφόρησης στο δίκτυο. Οι εφαρμογές αυτής της κατηγορίας υπηρεσιών αν και είναι διαφανείς προς τους χρήστες, προσφέρουν σημαντική βοήθεια στην επίλυση των προβλημάτων συμφόρησης που αναμένονται αυξημένα λόγω της συνεχούς προσθήκης συσκευών που συνδέονται στο Διαδίκτυο.

Στη συνέχεια, παρουσιάζονται αναλυτικά τα σημαντικότερα σενάρια υπηρεσιών MEC κάθε κατηγορίας, ώστε να γίνει αντιληπτή η καθοριστική συνεισφορά του σε υπάρχοντα προβλήματα και στην ανάπτυξη νέων εφαρμογών.

## 2.3.1 Υπηρεσίες προσανατολισμένες στους χρήστες

### i) Υπηρεσίες cloud στο περιβάλλον του RAN

Οι υπηρεσίες αυτές βασίζονται στη μετάθεση του cloud στο ασύρματο δίκτυο πρόσβασης, με στόχο τη μείωση της καθυστέρησης κατά την εκτέλεση των απαραίτητων διεργασιών της ζητούμενης εφαρμογής. Ταυτόχρονα, εφαρμογές υψηλής υπολογιστικής ισχύος μπορούν να εκτελούνται στη MEC πλατφόρμα λόγω των αυξημένων υπολογιστικών πόρων που διαθέτει και στη συνέχεια το αποτέλεσμα αυτής να μεταφέρεται στο χρήστη. Στη συνέχεια, ο εξυπηρετητής MEC επικοινωνεί με τον κεντρικό εξυπηρετητή της αντίστοιχης υπηρεσίας, με σκοπό την ενημέρωση του για τις διαδικασίες που εκτελέστηκαν. Έτσι, η επεξεργασία δεδομένων μπορεί να ανατίθεται στη MEC πλατφόρμα, αποδεσμεύοντας τις τερματικές συσκευές από ένα μέρος αυτής. Ένα άλλο σημαντικό πλεονέκτημα αυτής της λειτουργίας είναι η αύξηση της διάρκειας της μπαταρίας των συσκευών, καθώς αποδεσμεύονται από διαδικασίες επεξεργασίας δεδομένων. Η διατήρηση της αυτονομίας των συσκευών κρίνεται επιτακτική τη σύγχρονη εποχή, ιδιαίτερα σε εκείνες που πρέπει να είναι λειτουργικές για μεγάλα χρονικά διαστήματα. Για παράδειγμα, ένα ρομπότ που εκτελεί αναγνώριση αντικειμένων ή λαμβάνει αποφάσεις μπορεί να επικοινωνεί με τον εξυπηρετητή MEC και να του μεταδίδει τα δεδομένα και, ύστερα από κατάλληλη επεξεργασία σε αυτόν, να του επιστρέφεται το αντίστοιχο αποτέλεσμα. Επιπλέον, η μείωση της καθυστέρησης επιδρά θετικά και στο διαδραστικό διαδικτυακό gaming, στο οποίο η μείωση αυτή είναι κρίσιμη για τη βελτίωση της εμπειρίας των χρηστών.



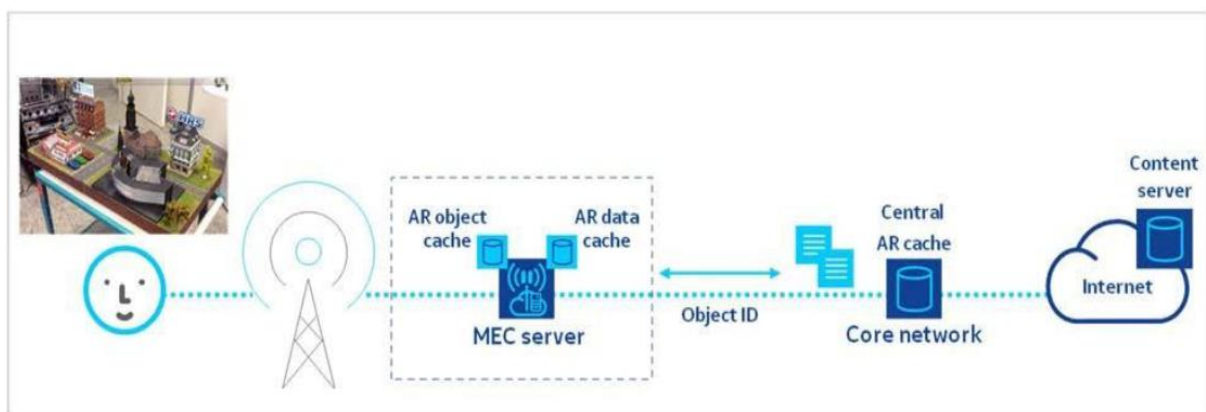
Σχήμα 2.2 Μετακίνηση του cloud εγγύτερα στο χρήστη

### ii) Επαυξημένη και εικονική πραγματικότητα (*augmented and virtual reality*)

Οι υπηρεσίες επαυξημένης και εικονικής πραγματικότητας αποτελούν καινοτόμες προσθήκες στον τρόπο αλληλεπίδρασης του χρήστη με το περιβάλλον. Συγκεκριμένα, προσανατολίζονται στην παροχή πρόσθετων πληροφοριών σχετικών με το χώρο στον οποίο βρίσκονται οι χρήστες. Για παράδειγμα, οι επισκέπτες ενός μουσείου ή οι θεατές ενός αθλητικού/μουσικού γεγονότος στρέφουν τις συσκευές (smartphone, tablet κλπ) τους προς την κατεύθυνση συγκεκριμένου

σημείου ενδιαφέροντος έχοντας ενεργοποιημένη την εφαρμογή που σχετίζεται με το αντικείμενο της επίσκεψης. Η κάμερα της συσκευής συλλαμβάνει το σημείο ενδιαφέροντος και, στη συνέχεια, η εφαρμογή που φιλοξενείται στον εξυπηρετητή MEC, έχοντας γνώση της θέσης του χρήστη και της κατεύθυνσής του, επεξεργάζεται την εικόνα και εμφανίζει στην οθόνη τις πληροφορίες που αφορούν το συγκεκριμένο σημείο ενδιαφέροντος (πχ video, εικόνα, κείμενο κλπ). Δεδομένου ότι ο χρήστης μπορεί να κινείται, είναι επιτακτική η ανάγκη ανανέωσης της πληροφορίας με πολύ υψηλό ρυθμό. Η υπηρεσία επαυξημένης πραγματικότητας που μόλις περιγράφηκε ενισχύει σημαντικά την ποιότητα εμπειρίας των κινητών χρηστών που επισκέπτονται σημεία δημόσιου ενδιαφέροντος όπως μουσεία, εμπορικά κέντρα, δημαρχεία, χώροι διεξαγωγής αθλητικών ή μουσικών γεγονότων. Η υπηρεσία εικονικής πραγματικότητας λειτουργεί με παρόμοια λογική, μέσω της διαμόρφωσης εικονικού περιβάλλοντος στο χώρο που βρίσκεται ο χρήστης.

Επειδή η πληροφορία που σχετίζεται με την υπηρεσία augmented reality συνδέεται με συγκεκριμένα σημεία ενδιαφέροντος, η αποθήκευση και επεξεργασία της σε τοπικά RAN άκρα του δικτύου κινητών επικοινωνιών προσφέρει δραματική βελτίωση έναντι της επεξεργασίας της στον κεντρικό εξυπηρετητή περιεχομένου (βλ. Σχ.2.3). Επομένως, στην περιοχή κάποιου σημείου δημόσιου ενδιαφέροντος δημιουργείται ένα τοπικό cloud που περιλαμβάνει μόνο τις πληροφορίες που αφορούν το συγκεκριμένο σημείο και τις παρέχει στους ενδιαφερόμενους κινητούς χρήστες σε σχεδόν πραγματικό χρόνο χωρίς να απασχολείται το δίκτυο κορμού. Επιπλέον, ο εξυπηρετητής MEC, μέσω της προσωρινής αποθήκευσης των πληροφοριών επαυξημένης πραγματικότητας που παρέχονται στους χρήστες και της συσχέτισής τους με το περιβάλλον στο οποίο βρίσκονται, μπορεί να τις αναμεταδίδει όταν ζητηθούν εκ νέου, χωρίς να χρειαστεί η συνεισφορά του κεντρικού εξυπηρετητή. Είναι φανερό ότι η χρήση ενός εξυπηρετητή MEC εξασφαλίζει την μετάδοση των ζητούμενων πληροφοριών με χαμηλή καθυστέρηση, ενώ συμβάλλει στην ελάφρυνση του δικτύου κορμού.



**Σχήμα 2.3** Υπηρεσία επαυξημένης πραγματικότητας με χρήση του εξυπηρετητή MEC

### iii) Υπηρεσίες βασισμένες στη θέση του χρήστη

Η γεωγραφική τοποθεσία του χρήστη συνδέεται πολλές φορές με το περιεχόμενο που θα ζητήσει από το Διαδίκτυο. Για παράδειγμα, ένας χρήστης που παρακολουθεί απευθείας έναν αγώνα καλαθοσφαίρισης είναι πιθανό να αναζητήσει πληροφορίες σχετικά με παίκτες, με αποτελέσματα άλλων αγώνων κλπ. Η εγκατάσταση ενός εξυπηρετητή MEC κοντά στο σημείο

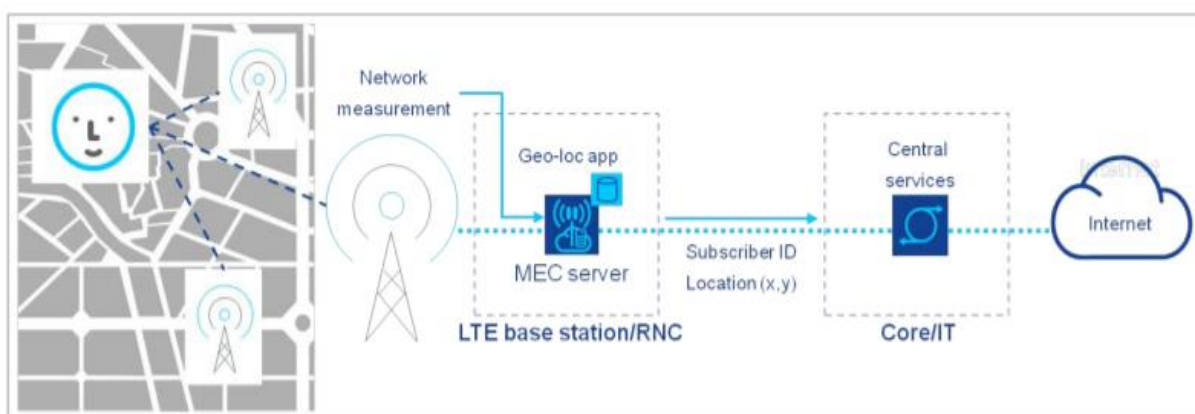


ενδιαφέροντος εξασφαλίζει την ταχύτερη μετάδοση πληροφοριών σχετικά με αυτό, χωρίς να χρειάζεται η μεταφορά τους μέσω του δικτύου κορμού. Επιπλέον, σε πολλές περιπτώσεις συνωστισμού ατόμων σε σημεία ενδιαφέροντος παρατηρείται προσωρινή διακοπή κατά την πρόσβαση των χρηστών στο διαδίκτυο, λόγω εξάντλησης των τηλεπικοινωνιακών πόρων σε εκείνη την περιοχή. Με την εγκατάσταση του εξυπηρετητή MEC, είναι δυνατή η πρόσβαση σε περιεχόμενο σχετικό με το σημείο ενδιαφέροντος, ώστε να παρέχονται τουλάχιστον οι πληροφορίες που ενδιαφέρουν άμεσα το χρήστη εκείνη τη χρονική στιγμή. Αυτό μπορεί να υλοποιηθεί μέσω της άντλησης από τον εξυπηρετητή MEC του απαραίτητου περιεχομένου από το Διαδίκτυο και της αποθήκευσής του σε αυτόν ώστε να είναι άμεσα διαθέσιμο στο χρήστη.

### 2.3.2 Υπηρεσίες σε συνεργασία με τρίτους (*third-party services*)

#### i) Εντοπισμός της θέσης τηλεπικοινωνιακών συσκευών

Σκοπός της χρήσης του MEC σε αυτή την περίπτωση είναι η αξιοποίηση της γνώσης της θέσης του χρήστη με σκοπό την αποστολή διαφημίσεων, την ενημέρωση του σχετικά με τις τιμές βενζινάδικων ή σταθμών φόρτισης ηλεκτρικών αυτοκινήτων στην περιοχή εκείνη κλπ. Μέσω της εφαρμογής γεωγραφικού εντοπισμού που φιλοξενείται στον εξυπηρετητή MEC είναι δυνατός ο κατά προσέγγιση εντοπισμός του χρήστη χωρίς την ενεργοποίηση του GPS. Αυτό επιτυγχάνεται ύστερα από μετρήσεις της ισχύος λήψης του χρήστη από διαφορετικούς ΣΒ, οι οποίες στη συνέχεια μεταφέρονται στον εξυπηρετητή MEC και ύστερα από την επεξεργασία τους προσδιορίζεται η θέση του χρήστη. Στη συνέχεια, η τοποθεσία του χρήστη γνωστοποιείται στον εξυπηρετητή του συνεργαζόμενου παρόχου υπηρεσιών (*third party*), όπου αποφασίζεται ποιες υπηρεσίες θα του προσφερθούν με βάση τη θέση του.

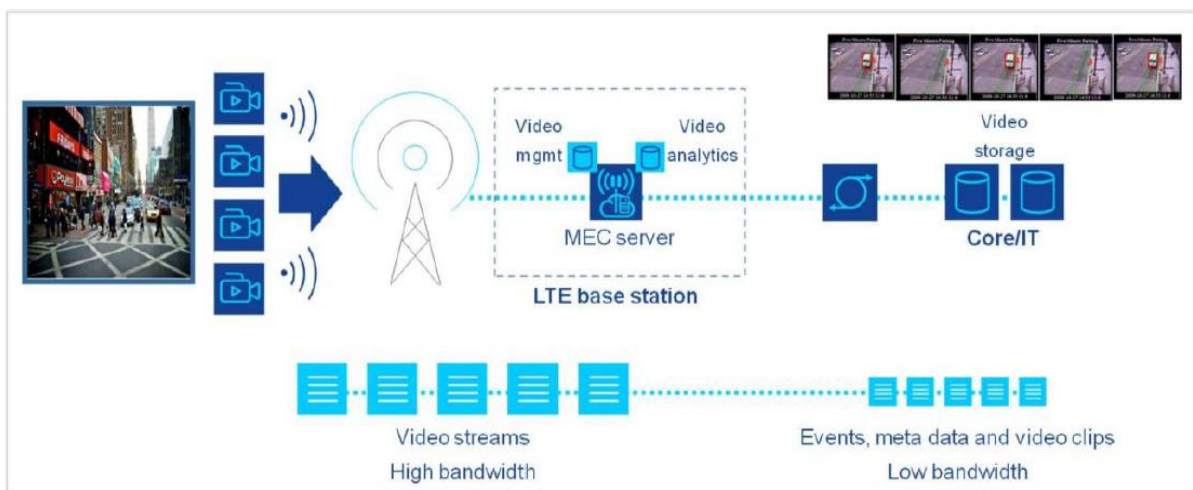


Σχήμα 2.4 Υπηρεσία γεωγραφικού εντοπισμού του χρήστη με χρήση του εξυπηρετητή MEC

#### ii) Υπηρεσία ανάλυσης ροής video

Η ανάλυση ροής video αποτελεί επίκαιρη υπηρεσία ευρείας χρήσης σε πληθώρα εφαρμογών. Τέτοιες εφαρμογές αποτελούν η αναγνώριση πινακίδων των οχημάτων που εισέρχονται σε ένα χώρο, η ταυτοποίηση εξουσιοδοτημένων ατόμων σε χώρους ασφαλείας κλπ. Αρχικά, η

καταγραφή του video γίνεται μέσω της τοποθέτησης κάμερας στους χώρους ενδιαφέροντος. Με τα σημερινά δεδομένα, η ανάλυση της ροής video πραγματοποιείται είτε στην ίδια την κάμερα, είτε σε κάποιο κεντρικό εξυπηρετητή προσανατολισμένο στη συγκεκριμένη διαδικασία. Στην πρώτη περίπτωση, υφίσταται σημαντικό κόστος, αφού κάθε κάμερα πρέπει να είναι εφοδιασμένη με τον ανάλογο εξοπλισμό ανάλυσης ροής video. Στη δεύτερη περίπτωση, χρειάζεται η μεταφορά μεγάλου όγκου δεδομένων μέσω του δικτύου κορμού, προκαλώντας συμφόρηση σε αυτό. Η χρήση ενός εξυπηρετητή MEC πλησίον των συστημάτων παρακολούθησης των χώρων ενδιαφέροντος προσφέρει τοπική επεξεργασία των ροών video και αντιμετωπίζει τα δύο ανωτέρω προβλήματα. Ο εξυπηρετητής MEC αναλύει τις ροές video, εξάγει τα απαραίτητα συμπεράσματα και μεταδίδει μέσω του δικτύου κορμού μόνο τα ουσιώδη δεδομένα στον κεντρικό εξυπηρετητή. Αυτή η μέθοδος υλοποίησης της ανάλυσης ροής video είναι αποδοτικότερη από τις υπάρχουσες καθώς συμβάλλει στον περιορισμό κόστους αλλά και στην εξοικονόμηση του εύρους ζώνης του δικτύου κορμού.

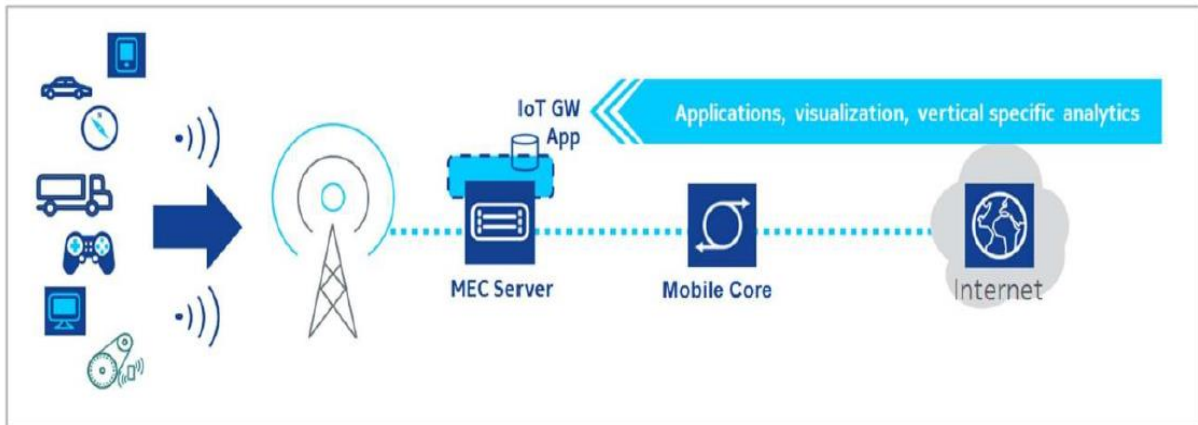


**Σχήμα 2.5** Υπηρεσία ανάλυσης ροής video με χρήση του εξυπηρετητή MEC

### iii) Υπηρεσία πύλης IoT

Το IoT αποτελεί μια κατηγορία υπηρεσιών που απαιτεί ελάχιστη καθυστέρηση και αδιάλειπτη διαθεσιμότητα τηλεπικοινωνιακών πόρων. Αντικείμενα που υπόκεινται στις ανωτέρω προϋποθέσεις είναι ηλεκτρικές συσκευές, οχήματα και γενικότερα έξυπνες συσκευές που διαθέτουν αισθητήρες και επικοινωνούν μεταξύ τους. Τα αντικείμενα αυτά είναι συνδεδεμένα στο Διαδίκτυο μέσω διαφορετικών τρόπων, π.χ. μέσω LTE, 3G, Wi-fi κλπ. Τα μηνύματα που ανταλλάσσονται για την επιτυχή λειτουργία των συσκευών αυτών είναι μικρού μήκους, κρυπτογραφημένα και αποτελούν υλοποιήσεις διαφορετικών πρωτοκόλλων. Λόγω των απαιτήσεων σε αξιοπιστία, ασφάλεια και μικρή καθυστέρηση που έχουν οι συσκευές IoT, κρίνεται επιτακτική η ανάγκη για συγκέντρωση της παραγόμενης κίνησης από αυτές τις συσκευές κοντά στις περιοχές παραγωγής της. Ο εξυπηρετητής MEC ο οποίος θα είναι τοποθετημένος στην παρυφή του ασύρματου δικτύου πρόσβασης, θα μπορεί να συνεισφέρει στην αποδοτική διαχείριση των πολυάριθμων συσκευών IoT μέσω της εγκατάστασης της εφαρμογής πύλης IoT σε αυτόν. Συγκεκριμένα, η εφαρμογή αυτή θα είναι προσανατολισμένη στα εξής:

- i) Προκαταρκτική επεξεργασία με στόχο την ομαδοποίηση και δρομολόγηση των IoT δεδομένων σε πραγματικό χρόνο προς τις κεντρικές οντότητες της αντίστοιχης εφαρμογής IoT
- ii) Ταξινόμηση των ροών πληροφορίας ανάλογα με την ευαισθησία σε καθυστέρηση
- iii) Εξαγωγή στατιστικών της κίνησης με σκοπό τη μελλοντική βελτιστοποίηση του περιβάλλοντος IoT
- iv) Επεξεργασία των μηνυμάτων που αποστέλλουν οι ευφυείς IoT διατάξεις και λήψη των αντίστοιχων αποφάσεων
- v) Απομακρυσμένη παρακολούθηση και έλεγχο των ευφυών IoT διατάξεων



**Σχήμα 2.6** Υπηρεσία πύλης IoT με χρήση του εξυπηρετητή MEC

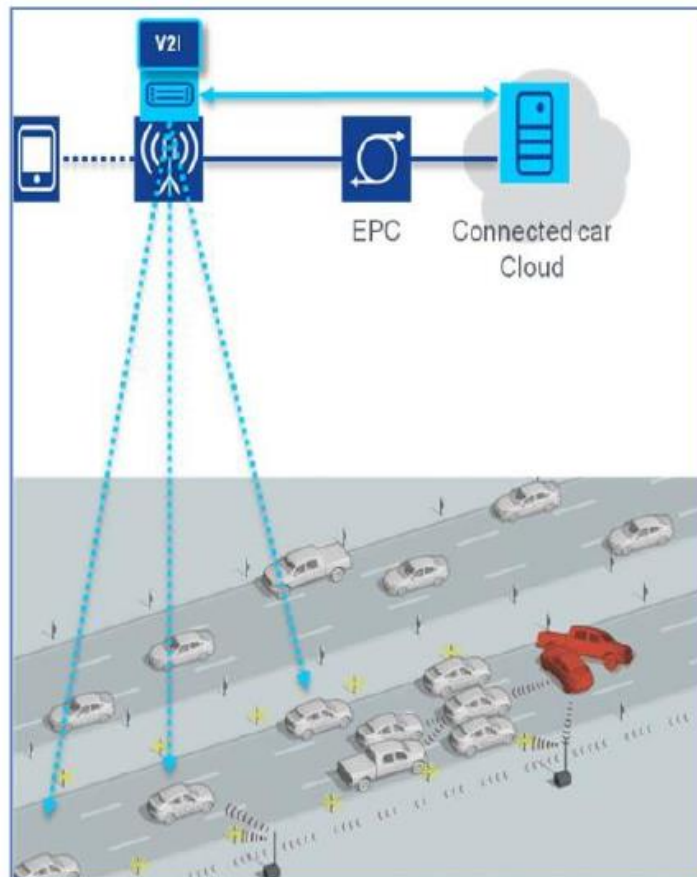
#### iv) Διασυνδεδεμένα οχήματα

Τα διασυνδεδεμένα οχήματα αποτελούν καινοτόμο εφαρμογή που με τη συμβολή του MEC θα λειτουργήσει αποδοτικά και με ασφάλεια. Κατά τη σύγχρονη εποχή, αυξάνεται ραγδαία η παραγωγή τέτοιου διασυνδεδεμένων οχημάτων, που απαιτούν χαμηλή καθυστέρηση για να αξιοποιήσουν τη δυνατότητα διασύνδεσης που έχουν. Η προαναφερθείσα απαίτηση ικανοποιείται σε μεγάλο βαθμό με τις υπάρχουσες τεχνολογίες δικτύωσης. Συγκεκριμένα, για μικρές αποστάσεις για τις οποίες υπάρχει οπτική επαφή μεταξύ των οχημάτων, η επικοινωνία μεταξύ των οχημάτων βασίζεται στην τεχνολογία δικτύωσης γνωστή ως αποκλειστική επικοινωνία μικρής εμβέλειας (*Dedicated short range communications – DSRC*). Αντίθετα, σε μεγάλες αποστάσεις όπου δεν υπάρχει οπτική επαφή, χρησιμοποιείται το LTE. Επιπλέον, η τοποθέτηση αισθητήρων κατά μήκος του οδικού δικτύου μπορεί να βελτιώσει σημαντικά την ασφάλεια και την αποδοτικότητα του υπάρχοντος κυκλοφοριακού δικτύου.

Σε συνδυασμό με τους κατάλληλους αισθητήρες, το LTE μπορεί να συμβάλει στην περαιτέρω βελτίωση της λειτουργίας των διασυνδεδεμένων οχημάτων. Το LTE εξασφαλίζει την επικοινωνία οχημάτων εκτός οπτικής επαφής σε μεγάλες αποστάσεις (300-500 μέτρα) και πληροί τις προϋποθέσεις χαμηλής καθυστέρησης (περίπου 100 ms) που είναι καθοριστικός παράγοντας για την αξιόπιστη λειτουργία των διασυνδεδεμένων οχημάτων. Συνεπώς, τα μηνύματα μεταξύ των οχημάτων μπορούν να διανεμούνται μέσω του LTE, αποφεύγοντας την εγκατάσταση κοστοβόρων δικτύων DSRC σε περιοχές όπου η χρήση του LTE είναι επαρκής. Συγκεκριμένα, βέλτιστη επιλογή αποτελεί η συνύπαρξη των DSRC και LTE και η επιλογή του

πρώτου μόνο σε εφαρμογές σχετικές με την ασφάλεια των διασυνδεδεμένων οχημάτων όπου απαιτείται η μικρότερη δυνατή καθυστέρηση.

Παραδείγματα εφαρμογών των διασυνδεδεμένων οχημάτων είναι η ειδοποίηση των οδηγών για κινδύνους κατά μήκος του οδικού δικτύου, η έξυπνη πλοήγηση των αυτοκινήτων, ο εντοπισμός αυτοκινήτου και θέσεων στάθμευσης κλπ. Γίνεται αντιληπτό ότι το πλήθος των εφαρμογών σχετικά με τα διασυνδεδεμένα οχήματα πρόκειται να αυξήσει την κίνηση των δεδομένων στο δίκτυο κορμού, όταν κάθε εφαρμογή διαθέτει τους κεντρικούς εξυπηρετητές μακριά από το περιβάλλον των διασυνδεδεμένων οχημάτων. Επιπλέον, η συμφόρηση που οφείλεται στην αυξημένη διακίνηση δεδομένων προκαλεί καθυστερήσεις μετάδοσης, αποτρεπτικές για την ασφαλή και αξιόπιστη λειτουργία των διασυνδεδεμένων οχημάτων. Και σε αυτή την περίπτωση, η χρήση της τεχνολογίας MEC μπορεί να συμβάλει στη μετάθεση των απομακρυσμένων εξυπηρετητών των εφαρμογών των διασυνδεδεμένων οχημάτων στο περιβάλλον του ασύρματου δικτύου πρόσβασης. Επομένως, οι εφαρμογές των διασυνδεδεμένων οχημάτων θα τρέχουν στους εξυπηρετητές MEC οι οποίοι μπορούν να είναι εγκατεστημένοι είτε σε ΣΒ του LTE είτε σε σημεία συγκέντρωσης δεδομένων. Μέσω αυτής της υλοποίησης, επιτυγχάνεται μείωση της καθυστέρησης των διακινούμενων πληροφοριών μεταξύ του εξυπηρετητή της εφαρμογής και των οχημάτων. Επιπλέον, με αυτόν τον τρόπο δημιουργείται ένα αφηρημένο στρώμα μεταξύ του περιβάλλοντος των διασυνδεδεμένων οχημάτων από τη μια, και του δικτύου κορμού και των σχετικών εφαρμογών από την άλλη, με στόχο την αποθήκευση των δεδομένων σε κεντρικές οντότητες για λόγους ασφάλειας.



**Σχήμα 2.7** Υπηρεσία διασυνδεδεμένων οχημάτων με χρήση του εξυπηρετητή MEC σε περίπτωση αυτοκινητιστικού ατυχήματος

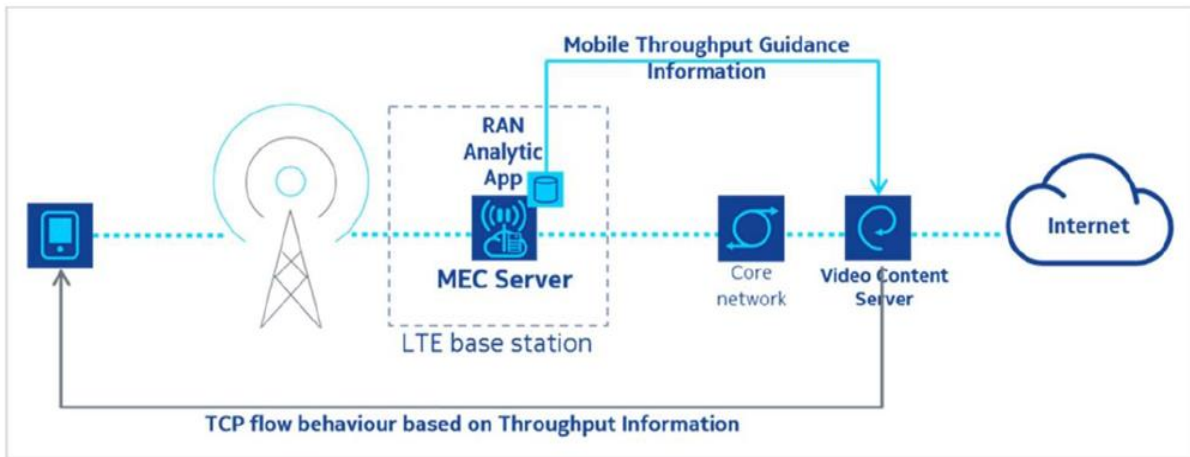
Συνοψίζοντας, οι εφαρμογές του εξυπηρετητή MEC που σχετίζονται με τα διασυνδεδεμένα οχήματα φιλοξενούνται πλησίον του οδικού δικτύου (πχ σε ΣΒ) και εξασφαλίζουν ασφάλεια και αποδοτικότητα στη χρήση τους. Ο εξυπηρετητής MEC λαμβάνει τα απαραίτητα δεδομένα από τα οχήματα και τους αισθητήρες, τα επεξεργάζεται και εξάγει τα απαραίτητα συμπεράσματα. Στη συνέχεια ενημερώνει τα οχήματα στην περιοχή κοντά στον εξυπηρετητή για τους επικείμενους κινδύνους καθώς και για άλλα κρίσιμα θέματα. Αυτές οι λειτουργίες επιτρέπουν στους οδηγούς να λαμβάνουν τα ευαίσθητα σε καθυστέρηση μηνύματα και να λαμβάνουν εγκαίρως κατάλληλες αποφάσεις.

### **2.3.3 Υπηρεσίες βελτίωσης της απόδοσης του δικτύου και του QoE του χρήστη**

#### **i) Υπηρεσία έξυπνης βελτιστοποίησης video**

Η χρήση του πρωτοκόλλου TCP δεν είναι βελτιστοποιημένη στο ασύρματο δίκτυο πρόσβασης καθώς οι μηχανισμοί αντιμετώπισης των δυσμενών συνθηκών μετάδοσης είναι πανομοιότυποι με αυτούς των ενσύρματων δικτύων. Η πρακτική αυτή καθίσταται αναποτελεσματική καθώς το TCP βασίζεται στην υπόθεση ότι η απώλεια πακέτων οφείλεται στη συμφόρηση του δικτύου, υπόθεση που είναι αληθής στα ενσύρματα δίκτυα. Εντούτοις, στα ασύρματα δίκτυα, οι κυριότεροι λόγοι απώλειας πακέτων είναι οι δυσμενείς συνθήκες του διαύλου (μειωμένη ισχύς λήψης, αυξημένος αριθμός χρηστών στην κυψέλη κλπ) και η κινητικότητα των χρηστών. Ιδιαίτερα στη μεταφόρτωση video, όπου γίνεται αποστολή μεγάλου όγκου πακέτων, η απώλεια και η επαναποστολή αυτών δημιουργεί σημαντικά προβλήματα στην ποιότητα υπηρεσίας των χρηστών. Η κατάλληλη ρύθμιση των παραμέτρων του TCP σε αυτές τις περιπτώσεις γίνεται έπειτα από διαδοχικές απώλειες πακέτων μέχρι να μην παρατηρούνται άλλες. Γίνεται αντιληπτό ότι η αντιμετώπιση των δυσμενών συνθηκών στα ασύρματα δίκτυα είναι συντηρητική και αργή σε σχέση με τις διαρκώς μεταβαλλόμενες συνθήκες και δεν διατίθενται οι κατάλληλοι μηχανισμοί εκτίμησης του διαθέσιμου εύρους ζώνης στο RAN.

Η εγκατάσταση ενός εξυπηρετητή MEC στο RAN (βλ. Σχ.2.8) μπορεί να παρέχει τους προαναφερθέντες μηχανισμούς εκτίμησης του εύρους ζώνης και να βελτιώσει σημαντικά τη λειτουργία του TCP και κατ' επέκταση, τη μεταφόρτωση video. Η εφαρμογή που θα φιλοξενηθεί στον εξυπηρετητή θα λαμβάνει τις κατάλληλες πληροφορίες από το RAN και βάσει αυτών θα εκτιμά σε πραγματικό χρόνο το διαθέσιμο εύρος ζώνης. Στη συνέχεια, θα γνωστοποιεί στον εξυπηρετητή περιεχομένου video την πρόβλεψη για το εύρος ζώνης, ο οποίος θα προσαρμόζει αντίστοιχα το ρυθμό μετάδοσης μέσω των κατάλληλων παραμέτρων TCP (μέγεθος παραθύρου συμφόρησης). Η προαναφερθείσα διαδικασία θα γίνεται για κάθε χρήστη εντός της κυψέλης όπου ανήκει ο εξυπηρετητής MEC. Συμπερασματικά, η λειτουργία του εξυπηρετητή MEC μπορεί να συμβάλει στην ταχεία προσαρμογή στις εντόνως μεταβαλλόμενες συνθήκες των ασυρμάτων δικτύων και μέσω αυτής να βελτιώσει σημαντικά την ποιότητα εμπειρίας των χρηστών καθώς και την αποδοτική αξιοποίηση των τηλεπικοινωνιακών πόρων.



Σχήμα 2.8 Υπηρεσία έξυπνης βελτιστοποίησης video με χρήση του εξυπηρετητή MEC

## ii) Υπηρεσία τοπικής αποθήκευσης περιεχομένου

Η υπηρεσία αυτή βασίζεται στην αξιοποίηση των αποθηκευτικών πόρων που διαθέτει ο εξυπηρετητής MEC. Συγκεκριμένα, εκείνος αποθηκεύει προσωρινά (*caching*) περιεχόμενο που αναζητήθηκε πρόσφατα και με μεγάλη συχνότητα από τους χρήστες της κυψέλης και το αναμεταδίδει όταν ζητηθεί εκ νέου. Μέσω αυτής της πρακτικής, αποφεύγεται η διακίνηση των ίδιων πληροφοριών από το δίκτυο κορμού καθώς και η συμφόρηση σε αυτό. Επιπλέον, σε περιπτώσεις γεγονότων που λαμβάνουν ταχεία εξάπλωση στο Διαδίκτυο (πχ σεισμοί, στιγμιότυπο αγώνα κλπ), η ζήτηση του περιεχομένου τους από υπεράριθμους χρήστες μπορεί να εξαντλήσει τους διαθέσιμους πόρους (ιδιαίτερα σε ώρες αιχμής) και να καταστεί αδύνατη η παράδοση του σε ένα ποσοστό αυτών. Συνεπώς, η υπηρεσία αυτή εγγυάται την παράδοση περιεχομένου άμεσα και αξιόπιστα χωρίς να επιβαρύνει το δίκτυο κορμού.

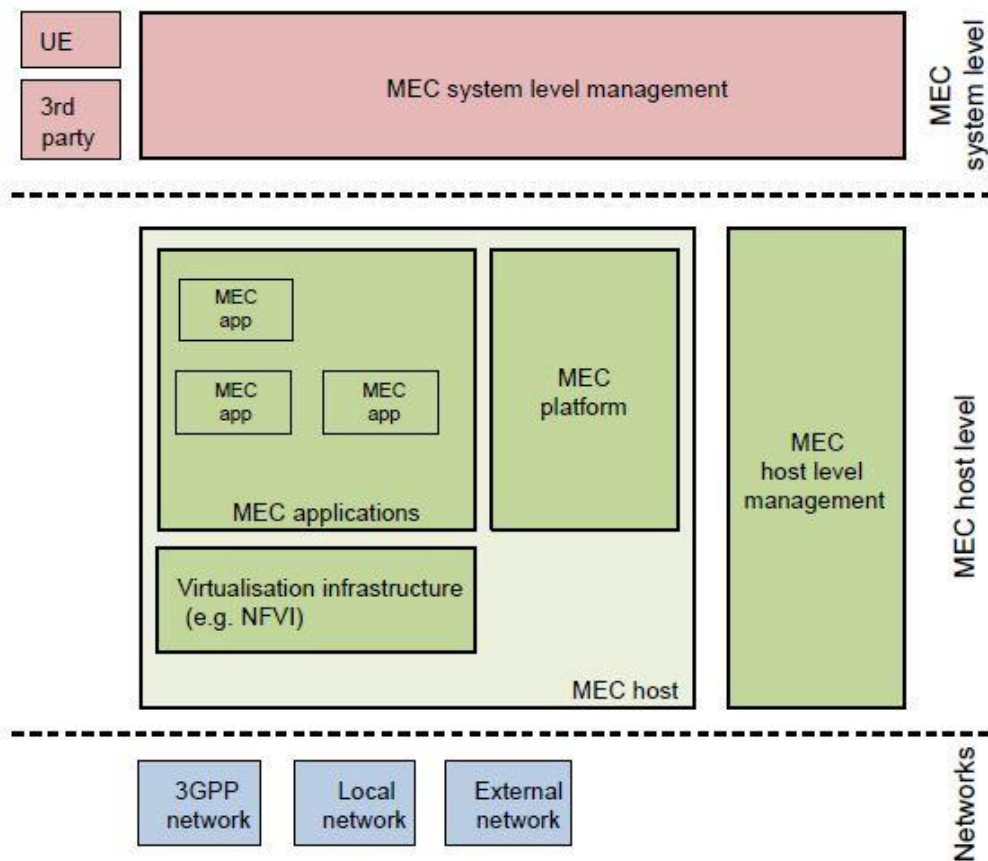
## 2.4 Βασικό πλαίσιο MEC

Για τη λειτουργικότητα των εφαρμογών των σεναρίων υπηρεσιών που προαναφέρθηκαν, το Ευρωπαϊκό Ινστιτούτο Τηλεπικοινωνιακών Προτύπων (*ETSI*) προτυποποίησε το MEC και διαμόρφωσε το βασικό πλαίσιο λειτουργίας του. Πρέπει να τονιστεί ότι οι εφαρμογές MEC αποτελούν οντότητες λογισμικού και τρέχουν πάνω από την υποδομή εικονικότητας δικτύου (*Network Function Virtualization – NFVI*) που είναι εγκατεστημένη στα άκρα του RAN. Όπως φαίνεται και στο Σχ.2.9, το πλαίσιο αυτό απαρτίζεται από το επίπεδο δικτύου (*network level*), το επίπεδο ξενιστή (*host level*) και το επίπεδο συστήματος (*system level*).

Το χαμηλότερο επίπεδο είναι το επίπεδο δικτύου, το οποίο περιλαμβάνει τη συνδεσιμότητα με το τοπικό δίκτυο, το δίκτυο κινητής τηλεφωνίας καθώς και το Internet.

Το αμέσως επόμενο επίπεδο είναι το επίπεδο host το οποίο περιλαμβάνει την οντότητα *MEC host* καθώς και την οντότητα διαχείρισης επιπέδου του MEC ξενιστή (*MEC host level management*), που είναι υπεύθυνη για τη διαχείριση της πρώτης. Η MEC host αποτελείται από την MEC πλατφόρμα (*MEC platform*), τις MEC εφαρμογές (*MEC applications*) καθώς και την

υποδομή εικονικότητας δικτύου *NFVI*. Η MEC πλατφόρμα εξασφαλίζει τη λειτουργικότητα των MEC εφαρμογών οι οποίες τρέχουν πάνω στην υποδομή εικονικότητας δικτύου του MEC εξυπηρετητή. Ο MEC host αποτελεί την οντότητα στην οποία τρέχουν οι εφαρμογές MEC. Οι MEC host μπορούν να τοποθετηθούν σε κόμβους του RAN ή σε σημεία συνάθροισης αυτών ή σε καταναμημένα data centers ή σε κόμβους των εξωτερικών δικτύων (πχ Wi-fi, 3GPP κλπ.). Οι εφαρμογές MEC αποτελούν αποκλειστικά οντότητες λογισμικού που τρέχουν πάνω στην υποδομή εικονικότητας που παρέχεται από τον MEC host.



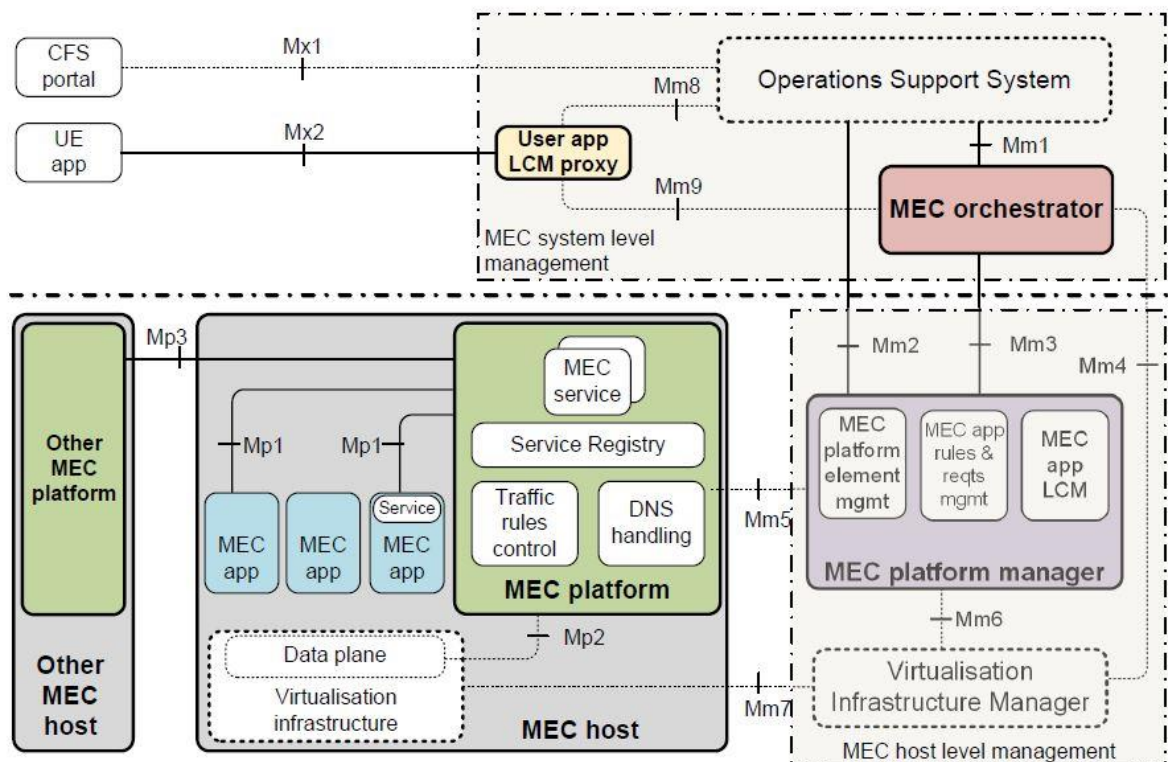
**Σχήμα 2.9** Επίπεδα λειτουργίας MEC

Το υψηλότερο επίπεδο είναι το επίπεδο συστήματος το οποίο περιλαμβάνει την οντότητα διαχείρισης επιπέδου συστήματος MEC (*MEC system level management*) καθώς και τα τερματικά των χρηστών και τα τρίτα μέρη που εμπλέκονται στις υπηρεσίες MEC. Στόχος της οντότητας διαχείρισης επιπέδου συστήματος είναι η εποπτεία του MEC συστήματος μέσω της καθοδήγησης των MEC host σχετικά με τις παρεχόμενες υπηρεσίες και της υψηλού επιπέδου ανάλυσης αυτών.

Η δυνατότητα που έχει το MEC να μπορεί να εφαρμοστεί και σε άλλα δίκτυα εκτός από αυτό της κινητής τηλεφωνίας αποτέλεσε τον πρωταρχικό στόχο υλοποίησης του. Επιπλέον, το MEC χαρακτηρίζεται από διαφάνεια ώστε η παρουσία του να μη γίνεται αντιληπτή από τα στοιχεία του εκάστοτε δικτύου.

## 2.5 Αρχιτεκτονική MEC

Στο προηγούμενο εδάφιο παρουσιάστηκε το βασικό πλαίσιο λειτουργίας του MEC, δηλαδή ο σκελετός της αρχιτεκτονικής του. Στο τρέχον εδάφιο, θα πραγματοποιηθεί λεπτομερέστερη παρουσίαση της αρχιτεκτονικής MEC καθώς και των λειτουργιών που εκτελούνται στις διάφορες οντότητες MEC. Στο Σχ.2.10 απεικονίζεται η αρχιτεκτονική αναφοράς MEC, που όπως και στο βασικό πλαίσιο εμπεριέχει το επίπεδο συστήματος και το επίπεδο host. Στην αρχιτεκτονική αναφοράς MEC δεν γίνεται αναφορά στο επίπεδο δικτύου, εφόσον η πρόσβαση στις οντότητες δικτύου αποτελεί τυπική διαδικασία και δεν απαιτεί ιδιαίτερες λειτουργίες.



Σχήμα 2.10 Αρχιτεκτονική αναφοράς MEC

Στο Σχ.2.10, οι συνεχείς γραμμές αναπαριστούν σημεία αναφοράς που ανήκουν στο πεδίο εφαρμογής των προδιαγραφών MEC, ενώ οι διακοπόμενες αφορούν οντότητες που βρίσκονται υπό τη διαχείριση ιδιόκτητων οργανισμών. Τα σημεία αναφοράς Mx1 και Mx2 εξασφαλίζουν την πρόσβαση των εξωτερικών χρηστών με τις λειτουργίες του MEC. Συγκεκριμένα, στο Mx1 συνδέονται οι πύλες διεπαφής πελάτη (*CFS portal*), η διαχείριση των οποίων αναλαμβάνεται από τα τρίτα μέρη. Μέσω του Mx1, τα τρίτα μέρη μπορούν να επιλέξουν την κατάλληλη υπηρεσία προς τους χρήστες, αφού έπειτα από ανατροφοδότηση μέσω της διεπαφής Mx1 μπορούν να λαμβάνουν τις κατάλληλες πληροφορίες για τις ανάγκες τους και να εξάγουν συμπεράσματα σχετικά με την ποιότητα των παρεχόμενων υπηρεσιών. Το Mx2 αποτελεί την πύλη διεπαφής μέσω της οποίας οι εφαρμογές που τρέχουν στις τερματικές συσκευές των χρηστών και συνδέονται στο πληρεξούσιο διαχείρισης κύκλου ζωής των εφαρμογών των χρηστών (*User application lifecycle management proxy – User app LCM proxy*). Η οντότητα αυτή χρησιμοποιείται έτσι ώστε να οι χρήστες εφαρμογών MEC να μπορούν να ζητούν υπηρεσίες σχετικές με την εξοικειώσή τους στο περιβάλλον της εφαρμογής



(*on-boarding*) καθώς και την εκτέλεση και τον τερματισμό εφαρμογών. Ένα παράδειγμα χρήσης της είναι η μετακίνηση μιας εφαρμογής από κάποιον απομακρυσμένο εξυπηρετητή στο σύστημα MEC. Το Mx2 είναι προσβάσιμο αποκλειστικά από τους χρήστες του δικτύου κινητής τηλεφωνίας.

### 2.5.1 Διαχείριση Συστήματος

Η διαχείριση στο επίπεδο συστήματος MEC περιλαμβάνει τον ενορχηστρωτή MEC (*MEC Orchestrator – MEO*), το σύστημα υποστήριξης λειτουργιών (*Operations Support System-OSS*) και το πληρεξούσιο διαχείρισης κύκλου ζωής των εφαρμογών των χρηστών (*User app LCM proxy*) που αναφέρθηκε προηγουμένως. Ο ενορχηστρωτής MEC αποτελεί τον πυρήνα διαχείρισης του συστήματος MEC και έχει αποθηκευμένες πληροφορίες σχετικά με την κατάσταση του συστήματος, την τοπολογία αυτού, τη λειτουργία των hosts και τις υπηρεσίες που παρέχουν καθώς και τη διαθεσιμότητα των πόρων. Η αποθήκευση των ανωτέρω πληροφοριών εξασφαλίζουν τη δυνατότητα επιλογής κατάλληλου host για την έναρξη μιας εφαρμογής ύστερα από εκτιμήσεις που πραγματοποιεί για το διαθέσιμο εύρος ζώνης και την καθυστέρηση μετάδοσης. Επιπλέον, ο ενορχηστρωτής MEC εκτελεί λειτουργίες ελέγχου της αυθεντικότητας και ακεραιότητας των πακέτων που εισέρχονται στο σύστημα και διατηρεί αρχείο καταγραφής τους. Ακόμα, ελέγχει και τροποποιεί τη λειτουργία των εφαρμογών ώστε να συμμορφώνονται με τις πολιτικές των παρόχων και επικοινωνεί με τη *διαχείριση της πλατφόρμας MEC (MEC Platform Manager – MEPM)* μέσω του σημείου αναφοράς Mm3 για τη διαχείριση του κύκλου ζωής των εφαρμογών MEC. Παρόμοια, επικοινωνεί και με τη *διαχείριση της εικονικής υποδομής (Virtualisation Infrastructure Manager – VIM)* μέσω του σημείου αναφοράς Mm4 με σκοπό τη διαχείριση των εικονικών πόρων του συστήματος και την τον έλεγχο διαθεσιμότητας τους σε κάθε host.

Τα αιτήματα των χρηστών σχετικά με την εκτέλεση των εφαρμογών MEC προωθούνται στον ενορχηστρωτή MEC μέσω δύο διαύλων. Ο πρώτος διέρχεται από τον User app LCM proxy μέσω του σημείου αναφοράς Mm9 και προωθεί τα αιτήματα των εφαρμογών των χρηστών στον ενορχηστρωτή MEC και επιστρέφει τα αποτελέσματα σε εκείνους. Ο δεύτερος δίαυλος διέρχεται από το σύστημα υποστήριξης λειτουργιών. Εκείνο λαμβάνει τα αιτήματα είτε από τις πύλες διεπαφής πελάτη μέσω του σημείου αναφοράς Mx1, είτε από την εφαρμογή του τερματικού έπειτα από κατάλληλη επεξεργασία από τον User app LCM proxy μέσω του σημείου αναφοράς Mm8. Στη συνέχεια, τα αιτήματα αυτά αφού εγκριθούν από το σύστημα υποστήριξης λειτουργιών, διαβιβάζονται στον ενορχηστρωτή MEC μέσω του σημείου αναφοράς Mm1.

### 2.5.2 Διαχείριση Host

Όπως προαναφέρθηκε στο εδάφιο 2.4, το επίπεδο host περιλαμβάνει τις οντότητες *MEC host* και *MEC host level management*. Η πρώτη οντότητα αποτελείται από τις (υπο)οντότητες *MEC platform*, *MEC applications* και την *NFVI*. Η δεύτερη περιλαμβάνει την (υπο)οντότητα διαχείρισης της πλατφόρμας MEC (*MEPM*) και την υποδομή *VIM*. Με τη σειρά της η *MEPM* αποτελείται από τις (υπο)οντότητες *διαχείρισης των στοιχείων της πλατφόρμας MEC (MEC platform element management)*, *διαχείρισης του κύκλου ζωής των εφαρμογών MEC (MEC*

*application lifecycle management*) και λειτουργιών διαχείρισης των πολιτικών των MEC εφαρμογών (*MEC application policy management functions*). Η υποοντότητα διαχείρισης του κύκλου ζωής των εφαρμογών MEC είναι υπεύθυνη για την έναρξη, τον τερματισμό και τη μεταφορά εντός ή εκτός του συστήματος MEC των εφαρμογών (εφόσον υπάρχει αυτή η δυνατότητα), όπως επίσης και για την παροχή σχετικών με τις εφαρμογές πληροφοριών στον εντοχιστή MEC.

Τα αιτήματα των χρηστών αφού περάσουν το επίπεδο συστήματος, προωθούνται στη διαχείριση του επιπέδου host. Συγκεκριμένα, ο εντοχιστής MEC τα μεταβιβάζει διαμέσου του σημείου αναφοράς Mm3 στην *MEPM*. Η τελευταία έχει ως αρμοδιότητα την παροχή λειτουργιών υποστήριξης στην πλατφόρμα MEC σχετικά με τη διαχείριση των εφαρμογών χρησιμοποιώντας τις (υπο)οντότητες που αναφέρθηκαν προηγουμένως. Η *MEPM* είναι υπεύθυνη για τη διαχείριση του κύκλου ζωής των εφαρμογών καθώς και την ενημέρωση του εντοχιστή MEC σχετικά με αυτόν. Επιπλέον, διαχειρίζεται τους σχετικούς με τις εφαρμογές κανόνες όπως εξουσιοδότηση υπηρεσιών, κανονισμών κίνησης, ρυθμίσεις DNS και διευθέτηση αντικρουόμενων πολιτικών. Παράλληλα, επικοινωνεί με το σύστημα υποστήριξης λειτουργιών μέσω του σημείου αναφοράς Mm2, από το οποίο λαμβάνει αιτήματα σχετικά με τον κύκλο ζωής και τις απαιτήσεις των εφαρμογών καθώς και τη ρύθμιση της πλατφόρμας MEC και επιστρέφει αναφορές σφαλμάτων και τροποποιήσεις στη λειτουργία της εφαρμογής. Ακόμα, η *MEPM* λαμβάνει από τον *VIM* μέσω του σημείου αναφοράς Mm6, αναφορές σχετικές με την επίδοση και τα σφάλματα των εικονικών πόρων του συστήματος. Έπειτα από τις απαραίτητες ενέργειες σχετικά με τα προαναφερθέντα διαχειριστικά θέματα, η *MEPM*, γνωστοποιεί τα εξαγόμενα συμπεράσματα-πληροφορίες στην πλατφόρμα MEC μέσω του σημείου αναφοράς Mm5.

Εκτός από τη *MEPM*, η οντότητα MEC host level management περιλαμβάνει και τη *διαχείριση εικονικής υποδομής (VIM)*. Εκείνη εκτελεί λειτουργίες σχετικές με τον κύκλο ζωής των εικονικών πόρων και την αποδοτική διαχείρισή τους στην υποδομή εικονικότητας (*Virtualisation Infrastructure – VI*). Επιπλέον, δημιουργεί αναφορές σχετικές με την επίδοση των εικονικών πόρων και τα σφάλματα που υπεισέρχονται στο σύστημα και υλοποιεί μετακινήσεις εφαρμογών εντός και εκτός συστήματος MEC εφόσον υποστηρίζεται. Με τις ανωτέρω λειτουργίες, η *VIM* προετοιμάζει την *VI* ώστε να έχει τη δυνατότητα να τρέχει τις απαραίτητες εφαρμογές. Η διαχείριση της *VI* από την *VIM* γίνεται μέσω της επικοινωνίας τους από το σημείο αναφοράς Mm7. Ακόμα, η *VIM* επικοινωνεί και με τον εντοχιστή MEC μέσω του σημείου αναφοράς Mm4, με σκοπό τη διαχείριση των εικονικών πόρων του συστήματος και τον έλεγχο της διαθεσιμότητάς τους σε κάθε host. Τέλος, οι αναφορές σφαλμάτων και οι μετρήσεις της επίδοσης του συστήματος κοινοποιούνται στην *MEPM* μέσω του σημείου αναφοράς Mm6, με σκοπό την αποδοτική διαχείριση των εικονικών πόρων.

Η δεύτερη κύρια οντότητα του επιπέδου host είναι η MEC host. Περιλαμβάνει την πλατφόρμα MEC, την υποδομή εικονικότητας και τις εφαρμογές MEC. Η υποδομή εικονικότητας παρέχει υπολογιστικούς, αποθηκευτικούς και δικτυακούς πόρους για την επιτυχή λειτουργία των εφαρμογών MEC. Επιπλέον, διαθέτει ένα επίπεδο δεδομένων το οποίο μεριμνά για την εφαρμογή των κανόνων κίνησης δεδομένων που είναι αποθηκευμένοι στην πλατφόρμα MEC και δρομολογεί σύμφωνα με αυτούς τα δεδομένα μεταξύ εφαρμογών, υπηρεσιών, DNS εξυπηρετητή, δίκτυο κινητών επικοινωνιών, τοπικών και εξωτερικών δικτύων. Οι ανωτέρω

κανόνες γνωστοποιούνται στην υποδομή εικονικότητας από την πλατφόρμα MEC μέσω του σημείου αναφοράς M<sub>p</sub>2.

Η πλατφόρμα MEC περιέχει το σύνολο των βασικών λειτουργιών και κανόνων που απαιτούνται για την εκτέλεση των εφαρμογών MEC του MEC host πάνω στην υποδομή εικονικότητας και επιτρέπουν στις εφαρμογές αυτές να ανακαλύπτουν, να διαφημίζουν, να παρέχουν και να καταναλώνουν υπηρεσίες MEC. Η πλατφόρμα MEC επικοινωνεί με τη M<sub>EP</sub>M μέσω του σημείου αναφοράς M<sub>m</sub>5 έτσι ώστε να επιτυγχάνεται η ρύθμισή της πρώτης, ο καθορισμός των κανόνων και απαιτήσεων των εφαρμογών, η παροχή υπηρεσιών υποστήριξης σχετικά με τον κύκλο ζωής των εφαρμογών, η ενημέρωση του τοπικού εξυπηρετητή DNS σχετικά με τις εγγραφές DNS κτλ. Επιπλέον, επικοινωνεί και με τις εφαρμογές MEC μέσω του σημείου αναφοράς M<sub>p</sub>1. Έτσι, εξασφαλίζεται η εξουσιοδοτημένη δημιουργία, κατανάλωση και η εγγραφή υπηρεσιών, η ενημέρωση της πλατφόρμας και των εφαρμογών MEC σχετικά με τη διαθεσιμότητα των υπηρεσιών, η έναρξη και ο τερματισμός των εφαρμογών, η ενεργοποίηση και απενεργοποίηση των κανόνων κίνησης δεδομένων κτλ. Ακόμα η πλατφόρμα MEC διαθέτει αποθηκευτικό χώρο για τα δεδομένα της και πληροφορίες ημερομηνίας και ώρας. Τέλος μπορεί να επικοινωνεί με άλλες πλατφόρμες MEC μέσω του σημείου αναφοράς M<sub>m</sub>3.

Οι εφαρμογές MEC τρέχουν σαν εικονικές μηχανές (*virtual machines – VM*) πάνω από την υποδομή εικονικότητας εντός του MEC host. Όπως προαναφέρθηκε, επικοινωνούν με την πλατφόρμα MEC έτσι ώστε να καταναλώνουν και να παρέχουν υπηρεσίες MEC που είναι διαθέσιμες στον MEC host. Οι εφαρμογές MEC λειτουργούν κάτω από συγκεκριμένους κανόνες και απαιτήσεις όπως, για παράδειγμα, οι απαιτούμενοι πόροι, το ανώτατο όριο καθυστέρησης κτλ. Αυτές οι απαιτήσεις καθορίζονται από την M<sub>EP</sub>M και βάσει αυτών λαμβάνονται αποφάσεις σχετικά με την μετακίνηση εφαρμογών και την επιλογή του κατάλληλου εξωτερικού MEC host σε περίπτωση επικοινωνίας μαζί του. Κατά την έναρξη μιας εφαρμογής, εκείνη μπορεί να διακρίνεται από δύο ειδών καταστάσεις:

- i) Κατάσταση λειτουργίας δηλαδή ενεργοποιημένη ή απενεργοποιημένη (enabled/disabled)
- ii) Κατάσταση χρήσης δηλαδή σε χρήση ή όχι σε χρήση (in use/not in use)

### 2.5.3 Υπηρεσίες MEC

Υπηρεσία MEC είναι μια υπηρεσία που παρέχεται ή καταναλώνεται είτε από την πλατφόρμα MEC είτε από τις εφαρμογές MEC. Οι υπηρεσίες αυτές είναι διαθέσιμες στην πλατφόρμα MEC καθώς και στις εξουσιοδοτημένες εφαρμογές MEC σχετικά με τις συγκεκριμένες υπηρεσίες. Οι εφαρμογές χρησιμοποιούν τις υπηρεσίες MEC ώστε να είναι λειτουργικές. Τέτοιες υπηρεσίες είναι η *υπηρεσία παροχής πληροφοριών ραδιοδιαύλου (Radio Network Information – RNI)*, οι *υπηρεσίες τοποθεσίας (Location Services)* και η *υπηρεσία διαχείρισης εύρους ζώνης (Bandwidth Manager)*.

#### 2.5.3.1 Υπηρεσία παροχής πληροφοριών ραδιοδιαύλου (RNI)

Οι υπηρεσίες MEC τρέχουν στις παρυφές του δικτύου κινητών επικοινωνιών, όπου το περιβάλλον χαρακτηρίζεται από εγγύτητα, χαμηλή καθυστέρηση, υψηλό εύρος ζώνης. Ως εκ

τούτου, πληροφορίες τοποθεσίας και κατάστασης του ραδιοδιαύλου είναι άμεσα προσβάσιμες από τον εξυπηρετητή MEC. Με βάση αυτή τη δυνατότητα, η υπηρεσία RNI παρέχει τις πληροφορίες που αναφέρθηκαν προηγουμένως στις εφαρμογές MEC και στην πλατφόρμα MEC. Οι πληροφορίες αυτές μπορούν να αφορούν κυψέλη, τερματικά ή να είναι συγκεντρωτικές για συγκεκριμένο χρονικό διάστημα. Τυπικές πληροφορίες μπορεί να είναι:

- i) Πληροφορίες σχετικά με την κατάσταση και τα χαρακτηριστικά του ραδιοδιαύλου σε πραγματικό χρόνο
- ii) Πληροφορίες για την τοποθεσία των χρηστών (κατά προσέγγιση) καθώς και για τις κυψέλες που εξυπηρετούνται από τον εξυπηρετητή MEC.
- iii) Μετρήσεις και στατιστικά σχετικά με το επίπεδο χρήστη (*user plane – UP*)
- iv) Πληροφορίες σχετικές με τα τερματικά που εξυπηρετούνται από ασύρματους κόμβους πρόσβασης που ανήκουν στο περιβάλλον του MEC host. Παραδείγματα τέτοιων πληροφοριών είναι η ποιότητα υπηρεσίας και η ταχύτητα σύνδεσης των τερματικών.
- v) Πληροφόρηση σχετικά με αλλαγές των ανωτέρω πληροφοριών υπό μορφή ανακοινώσεων (πχ αλλαγή κυψέλης, αναφορές σχετικά με αλλαγές στα χαρακτηριστικά της σύνδεσης κτλ).

Οι πληροφορίες ραδιοδιαύλου που παρέχονται μέσω αυτής της υπηρεσίας μπορούν να χρησιμοποιηθούν από την πλατφόρμα MEC προς βελτιστοποίηση των υπάρχουσών υπηρεσιών και τη δημιουργία νέων. Για παράδειγμα, η υπηρεσία αυτή θα μπορούσε να περιλαμβάνει την παροχή υποδείξεων σχετικά με τον κατάλληλο ρυθμό μετάδοσης δεδομένων σε περιπτώσεις αναμετάδοσης video στους χρήστες. Αυτές οι υποδείξεις θα βασίζονται στις ανωτέρω πληροφορίες, αφού μέσω αυτών των πληροφοριών θα προκύπτει ο υπολογισμός των διαθέσιμων χωρητικότητων των συνδέσεων των χρηστών.

### **2.5.3.2 Υπηρεσίες τοποθεσίας**

Οι υπηρεσίες τοποθεσίας παρέχουν στην πλατφόρμα MEC και στις εξουσιοδοτημένες εφαρμογές πληροφορίες σχετικά με την τοποθεσία των χρηστών και των κόμβων του δικτύου πρόσβασης. Με αυτές τις πληροφορίες είναι δυνατός ο εντοπισμός της τοποθεσίας του χρήστη καθώς και η παροχή πρόσθετων υπηρεσιών βασισμένων στα γεωγραφικά χαρακτηριστικά της περιοχής εκείνης. Ο εντοπισμός του χρήστη μπορεί να γίνει είτε σε επίπεδο γεωεντοπισμού, δηλαδή με τη χρήση γεωγραφικών συντεταγμένων είτε σε επίπεδο κυψέλης με χρήση του Cell ID. Οι διαχειριστές του συστήματος και τα τρίτα μέρη μπορούν να χρησιμοποιήσουν τέτοιες πληροφορίες για την αύξηση της ασφάλειας, την εξαγωγή στατιστικών στοιχείων και τη βελτιστοποίηση του δικτύου. Συγκεκριμένα, οι υπηρεσίες τοποθεσίας περιλαμβάνουν τις εξής πληροφορίες:

- i) Πληροφορίες τοποθεσίας των τερματικών που εξυπηρετούνται από ασύρματους κόμβους οι οποίοι σχετίζονται με τον MEC host
- ii) Κατάλογος των τερματικών που βρίσκονται σε συγκεκριμένη περιοχή
- iii) Τερματικά που εισέρχονται ή εξέρχονται από συγκεκριμένη περιοχή

### 2.5.3.3 Υπηρεσία διαχείρισης εύρους ζώνης

Σε ένα MEC host με περιορισμένο πλήθος δικτυακών πόρων μπορούν να τρέχουν πολλές εφαρμογές ταυτόχρονα, με αποτέλεσμα να ανταγωνίζονται σχετικά με το διαθέσιμο εύρος ζώνης. Κάθε εφαρμογή όμως έχει διαφορετικές απαιτήσεις ως προς το εύρος ζώνης καθώς και την προτεραιότητα χρήσης αυτού. Η υπηρεσία διαχείρισης εύρους ζώνης επιτρέπει την αποδοτικότερη κατανομή του εύρους ζώνης μεταξύ των εφαρμογών MEC. Αυτό επιτυγχάνεται μέσω της συλλογής των απαιτήσεων όλων των εφαρμογών σε εύρος ζώνης και προτεραιότητα και της ταξινόμησης αυτών έτσι ώστε να επιτυγχάνεται η ταυτόχρονη λειτουργία όσο το δυνατόν περισσότερων εφαρμογών .

### 2.5.3.4 Άλλες υπηρεσίες

Αυτές οι υπηρεσίες αφορούν ενέργειες που αποσκοπούν στην αποδοτική και ασφαλή χρήση των εφαρμογών MEC σε περιπτώσεις δυσμενών συνθηκών και απέναντι σε προσπάθειες παραβίασης των πολιτικών ασφάλειας του συστήματος MEC.

**-Υποστήριξη κινητικότητας:** Όταν η επικοινωνία του τερματικού με ένα MEC host πραγματοποιείται μέσω του δικτύου κινητής τηλεφωνίας, είναι πιθανή η χειροτέρευση της ποιότητας σύνδεσης τους λόγω της κινητικότητας των χρηστών. Για το λόγο αυτό, το σύστημα MEC μεριμνά για τη μεταφορά της σύνδεσης των χρηστών στον κοντινότερο σε αυτούς host ώστε να εξασφαλίζεται η καλύτερη δυνατή ποιότητα υπηρεσίας. Κατά τη μεταπομπή των χρηστών από έναν host σε κάποιον άλλον, το σύστημα MEC πρέπει να διατηρεί τη συνδεσιμότητα τους με τις εφαρμογές MEC. Επομένως, οι χρήστες μπορούν να συνεχίσουν τη χρήση των εφαρμογών MEC μέσω του επόμενου host χωρίς να διακοπεί η σύνδεσή τους.

**-Ασφάλεια και ρυθμιστικά θέματα:** Ένα σύστημα MEC πρέπει να μεριμνά για την τήρηση των κανόνων ασφαλείας των εφαρμογών και την ιδιωτικότητα των χρηστών. Συγκεκριμένα, η πρόσβαση πολλών οργανισμών στις εφαρμογές (πάροχοι, τρίτα μέρη, προγραμματιστές κλπ) καθιστά ευάλωτο το σύστημα MEC. Για το λόγο αυτό, πρέπει να λαμβάνονται τα κατάλληλα μέτρα ασφαλείας από τους διαχειριστές του συστήματος. Αυτά αφορούν την εξουσιοδοτημένη πρόσβαση των αλληλεπιδρώντων εφαρμογών στα δεδομένα των άλλων καθώς και τον τακτικό έλεγχο σχετικά με τη χρήση των πόρων που έχουν αποδοθεί στις εφαρμογές αυτές. Επιπλέον, είναι επιτακτικός ο έλεγχος των εξωτερικών οντοτήτων που αποκτούν πρόσβαση στις εφαρμογές αυτές (πχ τρίτα μέρη, εξωτερικοί συνεργάτες κλπ) ώστε να μην γίνονται μη επιτρεπτές ή κακόβουλες ενέργειες. Επίσης, ο μεγαλύτερος όγκος δεδομένων δεν διέρχεται από το δίκτυο κορμού που διακρίνεται από υψηλής ασφάλειας κρυπτογράφηση. Συνεπώς, αντίστοιχες πρακτικές πρέπει να εφαρμοστούν και στο δίκτυο πρόσβασης μέσω του MEC συστήματος. Τέλος, οι διαχειριστές του συστήματος MEC πρέπει να μεριμνούν για την εφαρμογή των συμφωνημένων χρεώσεων των χρηστών ανάλογα με τη χρήση των υπηρεσιών που επιλέγουν και την προστασία τους από κακόβουλες οντότητες.

# ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

## Συστήματα LTE

### 3.1 Εισαγωγή

Με βάση το σύνολο δομικών και λειτουργικών χαρακτηριστικών τους, τα συστήματα κινητών επικοινωνιών διακρίνονται σε κλάσεις που είναι ευρέως γνωστές ως γενιές. Η πρώτη αξιοσημείωτη γενιά δικτύων είναι η δεύτερη (2G), που περιλαμβάνει κυρίως τα δίκτυα *GSM* (*Global System for Mobile Communication*) και τα δίκτυα *CDMA* (*Code Division Multiple Access*). Ο διαχωρισμός των ανωτέρω δικτύων έγκειται στην τεχνολογία πολυπλεξίας που χρησιμοποιούν. Τα δίκτυα *GSM* χρησιμοποιούν τις τεχνολογίες πολυπλεξίας *TDMA* (*Time Division Multiple Access*) και *FDMA* (*Frequency Division Multiple Access*) ενώ τα δίκτυα *CDMA* χρησιμοποιούν την τεχνολογία *CDMA* από την οποία πήραν και την ονομασία τους. Η αξιοποίηση των τεχνολογιών αυτών επιτρέπει στα συστήματα 2G να υποστηρίζουν τη χρήση κάθε καναλιού επικοινωνίας από πολλαπλούς χρήστες. Σε αυτή τη γενιά δικτύων, πραγματοποιήθηκε η μετάβαση από αναλογικές σε ψηφιακές επικοινωνίες μέσω της οποίας τέθηκαν οι προϋποθέσεις για ασφάλεια και αξιοπιστία στην επικοινωνία των χρηστών. Τα συστήματα 2G χρησιμοποιούν τεχνικές ψηφιακής διαμόρφωσης, κωδικοποίησης πηγής και διαύλου και άλλων ευφών τεχνικών που συνεισφέρουν σε βελτιωμένη ποιότητα υπηρεσίας σε σχέση με τα αναλογικά συστήματα. Οι ταχύτητες μετάδοσης δεδομένων των τεχνολογιών 2G δεν υπερβαίνουν τα 14.4Kbps, ενώ οι υπηρεσίες που προσφέρονται είναι τα σύντομα μηνύματα κειμένου (*Short Message Service – SMS*) και πολυμέσων (*Multimedia Messaging Service – MMS*), το fax, το ηλεκτρονικό ταχυδρομείο κλπ.

Ακολούθησαν οι γενιές 2.5G και 2.75G, που βασίστηκαν στις τεχνολογίες *GPRS* (*General Packet Radio Service*) και *EDGE* (*Enhanced Data Rates for GSM Evolution*) αντιστοίχως και αποτελούν εξέλιξη των δικτύων *GSM*. Σε αντίθεση με το *GSM* που αποτελεί τεχνολογία μεταγωγής κυκλώματος, το *GPRS* αποτελεί τεχνολογία μεταγωγής πακέτων, δηλαδή τα δεδομένα χωρίζονται σε μικρά πακέτα πριν αποσταλούν. Ταυτόχρονα, διαθέτει βελτιωμένες τεχνικές και τέσσερα νέα σχήματα κωδικοποίησης σε σχέση με το *GSM*, οπότε επιτυγχάνει να αυξήσει το ρυθμό μετάδοσης στα 115Kbps. Η τεχνολογία *EDGE* αποτελεί μετεξέλιξη του *GPRS*. Οι βασικές διαφορές του *EDGE* από το *GPRS* είναι ότι χρησιμοποιεί διαφορετικό τρόπο διαμόρφωσης (8-PSK) και διαφορετικούς τύπους κωδικοποίησης διαύλου και ότι έχουν προστεθεί πρόσθετοι κόμβοι στο δίκτυο. Θεωρητικά, υποστηρίζει ταχύτητες έως και 384Kbps.

Το περιορισμένο εύρος ζώνης των τηλεπικοινωνιακών συστημάτων δεύτερης γενιάς, η αυξανόμενη ζήτηση πολυμεσικών υπηρεσιών μέσω του Διαδικτύου και η ανάγκη για αύξηση των ταχυτήτων μετάδοσης δεδομένων, έδωσαν το έναυσμα στη Διεθνή Ένωση Τηλεπικοινωνιών (*International Telecommunication Union – ITU*) για τη δημιουργία συστημάτων κινητών επικοινωνιών τρίτης γενιάς. Βασικός στόχος των συστημάτων αυτών ήταν η παροχή ασύρματης πρόσβασης στην παγκόσμια τηλεπικοινωνιακή υποδομή και η ικανοποίηση συγκεκριμένων απαιτήσεων σε ρυθμούς μετάδοσης, ποιότητα υπηρεσίας και φασματική απόδοση. Ταυτόχρονα, επιδιώχθηκε η συμβατότητα μεταξύ της δεύτερης και της τρίτης γενιάς συστημάτων επικοινωνιών και η υποστήριξη μεταπομπής μεταξύ αυτών με στόχο

τη βελτίωση της τηλεπικοινωνιακής κάλυψης και την εξισορρόπηση του τηλεπικοινωνιακού φορτίου.

Τα δίκτυα τρίτης γενιάς στην Ευρώπη ονομάστηκαν από τον ETSI *Universal Mobile Telecommunications Systems (UMTS)*. Οι ραδιοεπαφές που έχουν αναπτυχθεί για τα συστήματα τρίτης γενιάς είναι το WCDMA (*Wideband Code Division Multiple Access*) για τα δίκτυα UMTS και το CDMA2000 στις ΗΠΑ, την Κορέα και την Ιαπωνία. Αρχικά, οι ταχύτητες μετάδοσης δεδομένων που προσφέρονταν από τα δίκτυα τρίτης γενιάς δεν υπερέβαιναν τα 2Mbps. Η εξέλιξη των δικτύων τρίτης γενιάς επιτεύχθηκε μέσω της εισαγωγής της τεχνολογίας που ονομάζεται *Πρόσβαση Πακέτων Υψηλής Ταχύτητας (High Speed Packet Access – HSPA)*. Μέσω του HSPA, παρέχονται υπηρεσίες μεταγωγής πακέτων πολύ υψηλής ταχύτητας και υποστηρίζονται ταχύτητες έως και 47Mbps, ενώ σε μεταγενέστερες εκδόσεις του είναι επιτεύξιμοι ρυθμοί μέχρι και 337Mbps. Ουσιαστικά, η εισαγωγή αυτής της τεχνολογίας στα τότε υπάρχοντα δίκτυα τρίτης γενιάς αποτέλεσε τη γενιά 3.5G, και ήταν πρόδρομος των συστημάτων *LTE (Long Term Evolution)* που θα εξεταστούν στο κεφάλαιο αυτό.

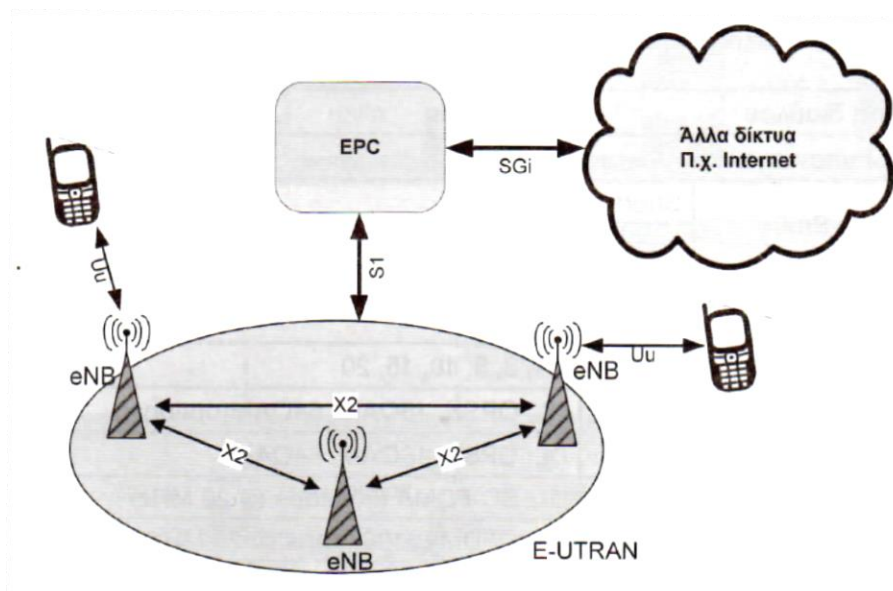
Η κατασκευή έξυπνων κινητών τερματικών (*smartphones*) πυροδότησε την ανάπτυξη σύνθετων εφαρμογών για τους τηλεπικοινωνιακούς χρήστες, οι οποίες όμως, απαιτούν την υποστήριξη από δίκτυα υψηλών ρυθμών μετάδοσης δεδομένων. Οι προκλήσεις χωρητικότητας και ρυθμών μετάδοσης αντιμετωπίστηκαν από τα συστήματα LTE. Στόχος τους αποτέλεσε η ανάπτυξη δικτύων βασισμένων σε μεταγωγή πακέτων, που υποστηρίζουν υψηλές ταχύτητες μετάδοσης (100Mbps), χαμηλή καθυστέρηση, πλήρη υποστήριξη κινητικότητας χρήστη και υψηλά επίπεδα ποιότητας υπηρεσίας. Οι μεταγενέστερες εκδόσεις του LTE ήταν η *LTE-Advanced (LTE-A)* και η *LTE-Advanced pro*. Αυτές, αν και δεν απαιτούν σημαντικές αλλαγές στην αρχιτεκτονική δικτύου του LTE, προσφέρουν ακόμα υψηλότερους ρυθμούς μετάδοσης (300Mbps) και θεωρούνται από κάποιους ως πραγματικά συστήματα δικτύων τέταρτης γενιάς (*4G*). Επιπλέον, θέτουν τις βάσεις για την υλοποίηση των συστημάτων πέμπτης γενιάς (*5G*) που θα εξασφαλίζουν τη λειτουργικότητα εφαρμογών ευαίσθητων σε καθυστέρηση.

Generation	Speed	Technology	Key Features
1G (1970 –1980s)	14.4 Kbps	AMPS,NMT, TACS	Voice only services
2G (1990 to 2000)	9.6/ 14.4 Kbps	TDMA,CDMA	Voice and Data services
2.5G to 2.75G (2001-2004 )	171.2 Kbps 20-40 Kbps	GPRS	Voice, Data and web mobile internet, low speed streaming services and email services.
3G (2004-2005)	3.1 Mbps 500- 700 Kbps	CDMA2000 (1xRTT, EVDO) UMTS and EDGE	Voice, Data, Multimedia, support for smart phone applications, faster web browsing, video calling and TV streaming.
3.5G (2006-2010)	14.4 Mbps 1- 3 Mbps	HSPA	All the services from 3G network with enhanced speed and more mobility.
4G (2010 onwards)	100-300 Mbps. 3-5 Mbps 100 Mbps (Wi-Fi)	WiMax, LTE and Wi-Fi	High speed, high quality voice over IP, HD multimedia streaming, 3D gaming, HD video conferencing and worldwide roaming.
5G (Expecting at the end of 2019)	1 to 10 Gbps	LTE advanced schemes, OMA and NOMA	Super fast mobile internet, low latency network for mission critical applications, Internet of Things, security and surveillance, HD multimedia streaming, autonomous driving, smart healthcare applications.

**Σχήμα 3.1** Η εξέλιξη των ασύρματων δικτύων στο χρόνο

## 3.2 Αρχιτεκτονική LTE

Στο Σχ.3.2 απεικονίζεται η βασική αρχιτεκτονική του δικτύου LTE. Σύμφωνα με αυτή, το δίκτυο LTE περιλαμβάνει τον εξοπλισμό χρήστη (*User Equipment – UE*), το δίκτυο ραδιοπρόσβασης (*Evolved UMTS Terrestrial Radio Access Network – E-UTRAN*) και το δίκτυο κορμού (*Evolved Packet Core – EPC*). Το δίκτυο ραδιοπρόσβασης E-UTRAN αποτελεί την εξέλιξη του ασύρματου δικτύου πρόσβασης RAN που αφορά προϋπάρχουσες γενιές δικτύων και είναι υπεύθυνο για την επικοινωνία των τερματικών UE με τους σταθμούς βάσης. Ο σταθμός βάσης στο LTE ονομάζεται Evolved Node-B και αναφέρεται με τη συντομογραφία eNB. Η επικοινωνία μεταξύ eNB και UE εξασφαλίζεται κάθε φορά μέσω της διεπαφής *Uu* (*Uu interface*) ενώ οι γειτονικοί eNBs επικοινωνούν μεταξύ τους μέσω της διεπαφής *X2* (*X2 interface*). Το E-UTRAN επικοινωνεί με το EPC μέσω της διεπαφής *S1* (*S1 interface*), το οποίο με τη σειρά του επικοινωνεί με τα υπόλοιπα δίκτυα μέσω της διεπαφής *SG-i* (*SGi interface*).



Σχήμα 3.2 Αρχιτεκτονική δικτύου LTE

### 3.2.1 Δίκτυο Ραδιο-Πρόσβασης (E-UTRAN)

Σκοπός του E-UTRAN είναι η διαχείριση της επικοινωνίας μεταξύ των UEs και του EPC. Κάθε UE ανήκει σε μία κυψέλη του δικτύου και επικοινωνεί με έναν eNB που ονομάζεται *serving eNB*. Κάθε eNB επικοινωνεί με ένα σύνολο από UE, μεταφέροντας δεδομένα από και προς αυτούς και ελέγχει χαμηλού επιπέδου λειτουργίες τους, αποστέλλοντας τα κατάλληλα μηνύματα σηματοδότησης (πχ εντολές μεταπομπής). Όπως προαναφέρθηκε, οι γειτονικοί eNBs του E-UTRAN συνδέονται μεταξύ τους μέσω της διεπαφής X2, μέσω της οποίας μεταφέρονται μηνύματα σηματοδότησης και προωθούνται πακέτα δεδομένων, σε περίπτωση μεταπομπής ενός UE. Επιπλέον, κάθε eNB συνδέεται με το δίκτυο κορμού EPC μέσω της διεπαφής S1, ώστε να εξασφαλίζεται η μεταφορά δεδομένων χρήστη και σηματοδότησης μεταξύ του E-UTRAN και του EPC.



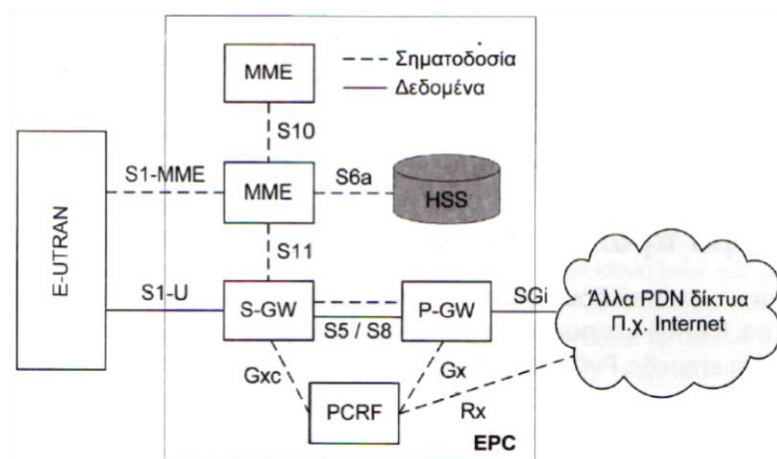
Οι βασικές λειτουργίες που υλοποιεί ένας σταθμός eNB είναι οι εξής:

- Διαχείριση ραδιοπόρων (*Radio Resource Management – RRM*) και δυναμική εκχώρηση αυτών στα UEs (χρονοπρογραμματισμός).
- Ευρυεκτομή πληροφοριών κυψέλης και άλλων προειδοποιητικών μηνυμάτων (πχ σεισμός, τσουνάμι)
- Κρυπτογράφηση και αποκρυπτογράφηση των διακινούμενων δεδομένων
- Συμπίεση και αποσυμπίεση των επικεφαλίδων IP των διακινούμενων πακέτων δεδομένων
- Δρομολόγηση των πακέτων προς το δίκτυο κορμού EPC
- Έλεγχος αποδοχής σύνδεσης (*admission control*), δηλαδή έλεγχος ύπαρξης επαρκών διαθέσιμων ραδιοπόρων για την έναρξη μιας σύνδεσης
- Έλεγχος κινητικότητας των συνδεδεμένων χρηστών
- Έλεγχος ραδιο-κομιστών (*radio bearer*). Ένας κομιστής είναι ουσιαστικά μια σύνδεση μεταξύ δύο σημείων η οποία περιλαμβάνει καθορισμένα χαρακτηριστικά κίνησης των δεδομένων που διακινούνται σε αυτή
- Λήψη μετρήσεων και διάρθρωση αναφορών σχετικά με τις λειτουργίες κινητικότητας και χρονοπρογραμματισμού.

Μια ειδική κατηγορία των σταθμών eNBs αποτελούν οι *Home eNBs-HeNBs*. Εκείνοι εξυπηρετούν UEs που ανήκουν σε μια κλειστή ομάδα συνδρομητών εντός κυψελών πολύ μικρής έκτασης.

### 3.2.2 Δίκτυο κορμού (EPC)

Στο Σχ.3.3 απεικονίζεται η αρχιτεκτονική δικτύου κορμού EPC και οι λειτουργικές οντότητες που το απαρτίζουν. Οι κυριότερες οντότητες είναι ο οικείος εξυπηρετητής συνδρομητών (*Home Subscriber Server – HSS*), η κεντρική πύλη του δικτύου πακέτων δεδομένων (*Packet Data Network Gateway – P-GW*), η κεντρική πύλη εξυπηρέτησης (*Serving Gateway – S-GW*), η μονάδα διαχείρισης κινητικότητας (*Mobility Management Entity – MME*) και η μονάδα πολιτικής και κανόνων χρέωσης (*Policy and Charging Rules Function – PCRF*).



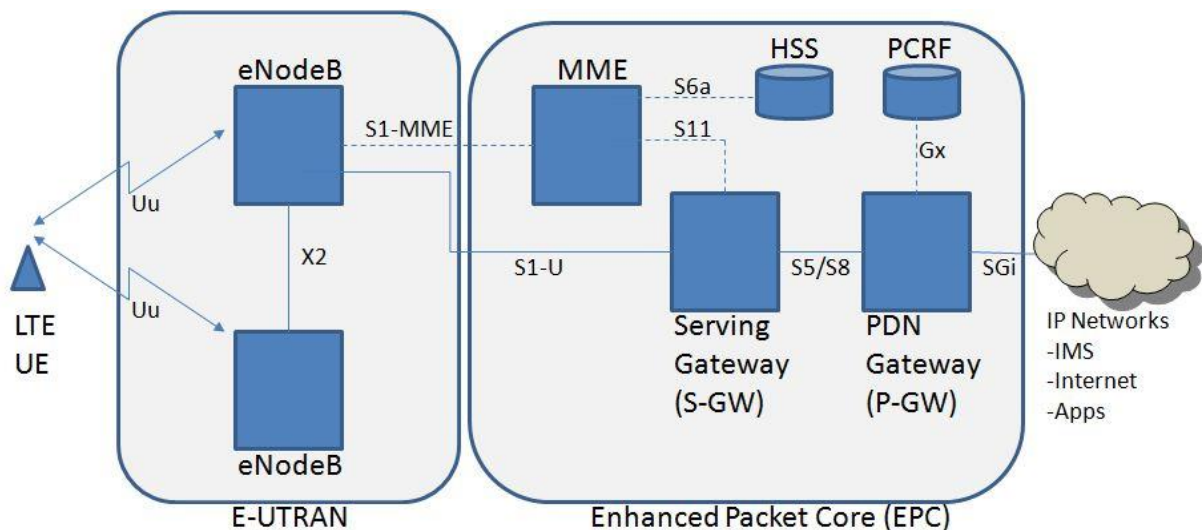
Σχήμα 3.3 Αρχιτεκτονική δικτύου κορμού (EPC)

- Ο οικείος εξυπηρετητής συνδρομητών HSS είναι μια κεντρική βάση δεδομένων που περιέχει πληροφορίες σχετικές με τους τηλεπικοινωνιακούς χρήστες (πχ προφίλ QoS) και τη συνδρομή τους. Επιπλέον, περιλαμβάνει στοιχεία για τα *δίκτυα πακέτων δεδομένων (Packet Data Networks – PDNs)* όπου μπορούν να συνδεθούν οι χρήστες (πχ Διαδίκτυο) καθώς και πληροφορίες για τις MME με τις οποίες επικοινωνεί.
- Η κεντρική πύλη του δικτύου πακέτων δεδομένων (P-GW) επικοινωνεί με τα υπόλοιπα δίκτυα πακέτων δεδομένων (PDNs) μέσω της διεπαφής SGi. Συγκεκριμένα, η πύλη P-GW διασφαλίζει τη συνδεσιμότητα των UE με τα εξωτερικά δίκτυα, αποδίδοντας τους διευθύνσεις IP και ελέγχοντας τα δεδομένα που διακινούνται από και προς εκείνα. Επιπλέον, περιλαμβάνει λειτουργίες προσανατολισμένες στην εξασφάλιση της ποιότητας υπηρεσίας των χρηστών και υποστηρίζει τις διαδικασίες χρεώσεων, *νόμιμης συνακρόασης (lawful interception)* και απόρριψης πακέτων. Τέλος, εξασφαλίζει την κινητικότητα μεταξύ 3GPP και non-3GPP δίκτυα. Ένα UE μπορεί να είναι συνδεδεμένο με περισσότερα του ενός P-GW ώστε να μπορεί να επικοινωνεί με πολλαπλά PDNs.
- Η κεντρική πύλη εξυπηρέτησης (S-GW) εξασφαλίζει τη σύνδεση μεταξύ του E-UTRAN και του EPC. Λειτουργεί ως δρομολογητής, προωθώντας πακέτα από και προς τα UEs, ενώ παράλληλα υποστηρίζει τη μεταπομπή των UEs μεταξύ διαφορετικών σταθμών eNBs ή μεταξύ δικτύου LTE και άλλων 3GPP (3<sup>rd</sup> Generation Partnership Project) δικτύων (πχ 3G). Επιπλέον, για τερματικά τα οποία βρίσκονται σε αδρανή κατάσταση (*idle*), η S-GW αποτελεί το τερματικό άκρο της σύνδεσης προς αυτά. Συνεπώς, σε περίπτωση όπου δεχτεί δεδομένα με προορισμό ένα αδρανές τερματικό, η S-GW ενεργοποιεί την *τηλεειδοποίηση (paging)* εκείνου, δηλαδή τον εντοπισμό του. Ακόμα, αποθηκεύει πληροφορίες όπως οι παράμετροι υπηρεσίας του κομιστή IP καθώς και πληροφορίες δρομολόγησης. Η διεπαφή μεταξύ S-GW και P-GW μπορεί να είναι η S5 αν το UE είναι συνδρομητής του δικτύου ή η S8 αν δεν είναι (σε περίπτωση *roaming*).
- Η μονάδα διαχείρισης κινητικότητας (MME) είναι ο κύριος κόμβος ελέγχου του E-UTRAN και εξασφαλίζει τη σύνδεση του με το EPC μεταφέροντας τα κατάλληλα μηνύματα σηματοδότησης. Είναι υπεύθυνη για την παρακολούθηση των UEs που βρίσκονται σε αδρανή κατάσταση καθώς και για τις υπηρεσίες τηλεειδοποίησης και επανεκπομπής. Παράλληλα, έχει ως αρμοδιότητα τη διαχείριση των κομιστών μέσω της ενεργοποίησης, συντήρησης και απενεργοποίησης τους. Επιπλέον, επιλέγει τον κατάλληλο S-GW για τα UE κατά την εισαγωγή τους στο δίκτυο αλλά και σε περίπτωση μεταπομπής σε άλλον κόμβο του EPC. Μια άλλη λειτουργία της μονάδας MME είναι η πιστοποίηση (*authentication*) των UEs κατόπιν επικοινωνίας με την HSS μέσω της διεπαφής S6a. Ακόμα, η MME αποφασίζει για την παροχή ή μη εξουσιοδότησης σε ένα UE να συνδεθεί στο *δημόσιο επίγειο δίκτυο του παρόχου (Public Land Mobile Network–PLMN)* και παρέχει τις απαραίτητες λειτουργίες κινητικότητας μεταξύ LTE και δικτύων 2G/3G. Για την υποστήριξη της κινητικότητας, η MME επικοινωνεί με S-GWs μέσω της διεπαφής S11 με σκοπό τη διαχείριση των κομιστών δεδομένων κατά τη μεταπομπή μεταξύ δύο eNBs. Ταυτόχρονα, η μονάδα MME επικοινωνεί και με άλλες μονάδες MME μέσω της διεπαφής S10 για τη μεταφορά

πληροφοριών κατά τη μεταπομπή μεταξύ δύο MME. Τέλος, η MME αποτελεί σημείο τερματισμού του *συστρώματος μη πρόσβασης (Non Access Stratum – NAS)* και είναι υπεύθυνη για τον έλεγχο ασφάλειας σε αυτό. Πληροφορίες για το NAS περιλαμβάνονται στο εδάφιο 3.3.

- Στο EPC ανήκει επίσης και η μονάδα πολιτικής και κανόνων χρέωσης (PCRF). Πρόκειται για μια οντότητα λογισμικού που έχει πρόσβαση στις βάσεις δεδομένων των συνδρομητών και ελέγχει την εφαρμογή της πολιτικής χρεώσεων και απονομής εύρους ζώνης που εφαρμόζεται σε κάθε συνδρομητή.

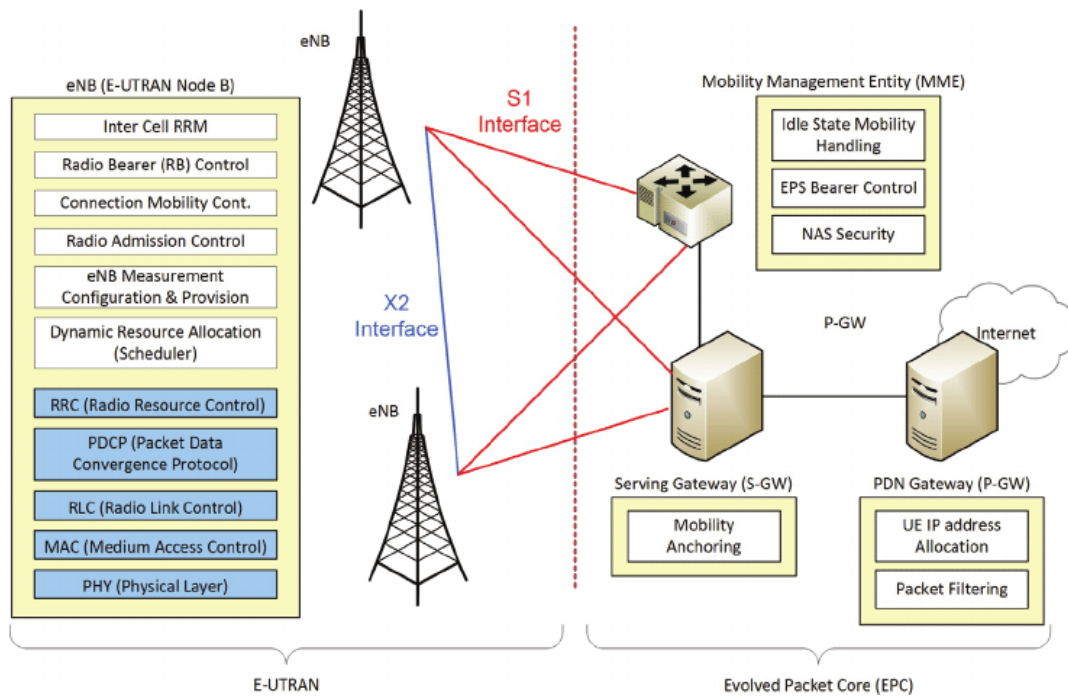
Στο Σχ.3.4 απεικονίζεται η πλήρης αρχιτεκτονική δικτύου με τις επιμέρους βαθμίδες καθώς και οι συνδέσεις μεταξύ αυτών. Η διεπαφή S1 που αναφέρθηκε προηγουμένως αναλύεται στις διεπαφές S1-U και S1-MME. Η διεπαφή S1-U εξασφαλίζει τη μεταφορά δεδομένων χρήστη μεταξύ του eNB και της S-GW, ενώ η διεπαφή S1-MME είναι υπεύθυνη για τη διακίνηση δεδομένων σηματοδοσίας μεταξύ του eNB και της MME. Στα Σχ. 3.3 και 3.4, οι διακοπτόμενες γραμμές απεικονίζουν τη μεταφορά δεδομένων σηματοδοσίας και αφορούν το *επίπεδο ελέγχου (Control Plane – CP)*, ενώ οι συνεχείς γραμμές απεικονίζουν τη μεταφορά δεδομένων που αφορούν το *επίπεδο χρήστη (User Plane – UP)*.



**Σχήμα 3.4** Αρχιτεκτονική Δικτύου LTE με τις επιμέρους οντότητες κάθε λειτουργικής μονάδας

Στο Σχ.3.5 απεικονίζεται ο λειτουργικός διαχωρισμός μεταξύ E-UTRAN και EPC του δικτύου LTE. Οι σκιασμένες μονάδες στο E-UTRAN αντιπροσωπεύουν τα στρώματα της στοίβας πρωτοκόλλων που θα αναλυθούν στο εδάφιο 3.3.

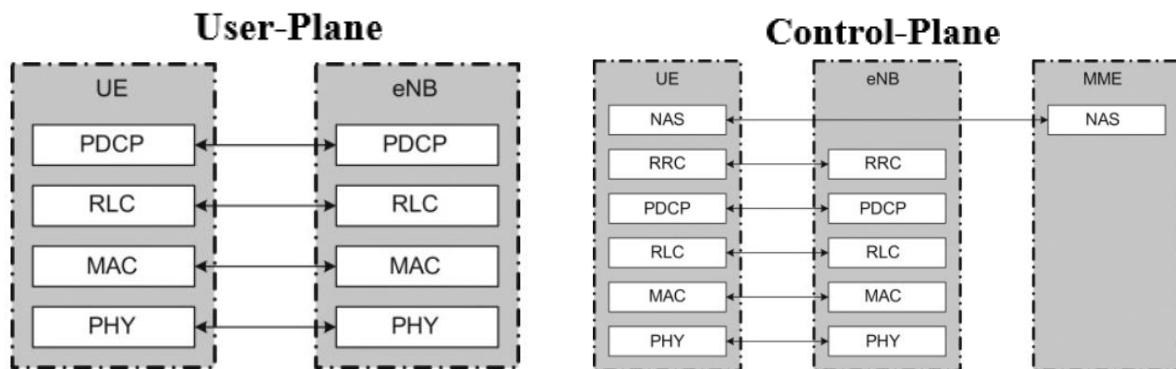
Εκτός από τις οντότητες που προαναφέρθηκαν, το EPC περιλαμβάνει και μερικές επιπλέον που σχετίζονται με τη χρέωση των συνδρομητών, όπως το *Online Charging System (OCS)* και το *Offline Charging System (OFCS)*, που δεν απεικονίζονται στα προηγούμενα σχήματα. Το OCS είναι υπεύθυνο για τη χρέωση των συνδρομητών σε πραγματικό χρόνο, ενώ το OFCS περιέχει συγκεντρωτικές πληροφορίες σχετικά με το ιστορικό χρεώσεων των συνδρομητών.



Σχήμα 3.5 Λειτουργικός διαχωρισμός μεταξύ E-UTRAN και EPC του δικτύου LTE

### 3.3 Στοιβα πρωτοκόλλων LTE

Προκειμένου να παρέχεται η στοιχειώδης λειτουργικότητα και πρόσβαση στο Διαδίκτυο, σε κάθε σύστημα κινητών επικοινωνιών είναι απαραίτητη η επικοινωνία του τερματικού με το ΣΒ και κατ' επέκταση με το δίκτυο κορμού. Έτσι και στο LTE, πρέπει να εξασφαλίζεται η ανταλλαγή δεδομένων μεταξύ του UE και του eNB που το εξυπηρετεί καθώς και η σύνδεσή του UE με τις οντότητες του EPC. Αυτή επιτυγχάνεται μέσω της χρήσης συγκεκριμένων πρωτοκόλλων που είναι υπεύθυνα για τη μεταφορά δεδομένων του UP και του CP. Για καθένα από τα δύο αυτά επίπεδα, υπάρχει μια στοιβα πρωτοκόλλων οι οποίες απεικονίζονται στο Σχ.3.6. Τα στρώματα που απαρτίζουν το UP είναι το PDCP (*Packet Data Convergence Protocol*), το RLC (*Radio Link Control*), το MAC (*Medium Access Control*) και το φυσικό στρώμα PHY (*Physical Layer*). Εκτός από τα προαναφερθέντα στρώματα, το CP περιλαμβάνει επιπλέον και το RRC (*Radio Resource Control*) καθώς επίσης και το NAS (*Non Access Stratum*) που αναφέρθηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο.



Σχήμα 3.6 Διαστρωμάτωση για το επίπεδο χρήστη και ελέγχου του LTE

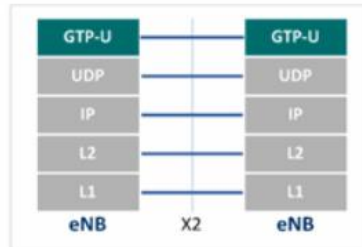
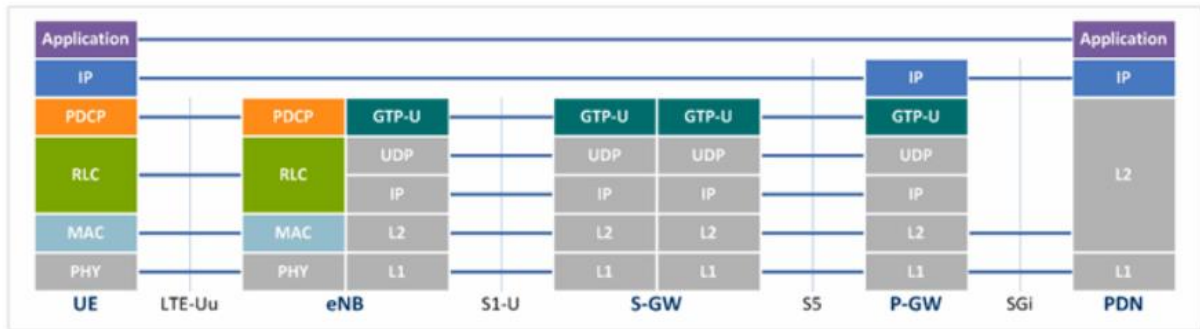
- Το στρώμα PDCP τερματίζεται στο eNB και είναι υπεύθυνο για την επεξεργασία και μεταφορά των δεδομένων IP και RRC για το UP και το CP, αντίστοιχα, μέσω της διεπαφής Uu. Επιπλέον, πραγματοποιεί συμπίεση και αποσυμπίεση των πακέτων IP του UP μέσω της οποίας επιτυγχάνεται ταχύτερη μεταφορά δεδομένων. Επιπλέον, υποστηρίζει διαδικασίες κρυπτογράφησης και αποκρυπτογράφησης και για τα δύο επίπεδα, ενώ διασφαλίζει και την ακεραιότητα των δεδομένων. Ακόμα, υλοποιεί τις διαδικασίες αναμετάδοσης κατά τη μεταπομπή των τερματικών. Συγκεκριμένα, αναδιατάσσει με ορθή σειρά τα PDUs (*Packet Data Unit*) κατά τη μεταπομπή, ενώ τα SDUs (*Service Data Unit*) τα προωθεί από τον αρχικό eNB, στον eNB που θα εξυπηρετεί τους χρήστες μετά τη μεταπομπή. Τα SDUs του UE που δεν έχουν μεταδοθεί πριν την μεταπομπή, αποθηκεύονται προσωρινά και μεταδίδονται εν συνεχεία από το νέο eNB. Τα πακέτα που λαμβάνονται από ανώτερα στρώματα αποτελούν τα SDUs του υπάρχοντος στρώματος ενώ αυτά που προορίζονται για ανώτερα στρώματα αποτελούν τα PDUs του υπάρχοντος στρώματος.
- Το στρώμα RLC τερματίζεται και αυτό στο eNB. Η κύρια λειτουργία του είναι η μορφοποίηση των PDUs του PDCP έτσι ώστε να έχουν προκαθορισμένο μέγεθος σύμφωνα με το στρώμα MAC. Επίσης, στο RLC ανακτώνται τα πακέτα που έχουν χαθεί κατά τη μετάδοση και υποστηρίζονται και τεχνικές αναδιάταξης των πακέτων που φτάνουν στο δέκτη με λανθασμένη σειρά.
- Το στρώμα MAC, όπως και τα δύο προηγούμενα στρώματα, τερματίζεται στο eNB και συνδέεται με το στρώμα RLC μέσω *λογικών καναλιών (Logical Channels)* και με το φυσικό στρώμα μέσω *καναλιών μεταφοράς (Transport Channels)*. Τα λογικά κανάλια προσδιορίζουν το είδος των πληροφοριών που διακινούνται ενώ τα κανάλια μεταφοράς προσδιορίζουν τον τρόπο διακίνησης των πληροφοριών πάνω από τη ραδιοεπαφή. Συνεπώς, το στρώμα MAC είναι υπεύθυνο για την πολύπλεξη/αποπολύπλεξη μεταξύ λογικών καναλιών και καναλιών μεταφοράς. Επιπλέον, υποστηρίζει λειτουργίες χρονοπρογραμματισμού των ραδιοπόρων μεταξύ των UEs και διαδικασίες τυχαίας πρόσβασης. Μέσω των λειτουργιών αυτών, επιτυγχάνεται ο χρονικός συγχρονισμός των UEs κατά τη χρήση των πόρων της άνω ζεύξης (Uplink) και συνακόλουθα η αποφυγή συγκρούσεων κατά τις μεταδόσεις UL. Τέλος, το στρώμα MAC χρησιμοποιεί την τεχνική *HARQ (Hybrid Automatic Repeat Request)* με σκοπό τη διόρθωση σφαλμάτων καθώς και την τεχνική *DRX (Discontinuous Reception)* που εξασφαλίζει καλύτερα επίπεδα μπαταρίας στα UEs .
- Το φυσικό στρώμα (PHY ή L1) είναι υπεύθυνο για τη μεταφορά δεδομένων του UP και του CP πάνω από τη ραδιοεπαφή. Επεξεργάζεται το σχήμα διαμόρφωσης και το ρυθμό κώδικα διόρθωσης λαθών και υποστηρίζει λειτουργίες εντοπισμού σφαλμάτων και μετρήσεων χαρακτηριστικών της ραδιοζεύξης προς όφελος των ανωτέρων στρωμάτων.
- Το στρώμα RRC τερματίζεται στο eNB και περιλαμβάνει λειτουργίες που σχετίζονται με την κατάσταση των UE. Η κατάσταση κάποιου UE μπορεί να είναι *idle (αδρανής)* ή *connected (συνδεδεμένος)*. Οι λειτουργίες που υποστηρίζονται στην κατάσταση idle είναι η αναζήτηση της κατάλληλης κυψέλης με κριτήριο τα χαρακτηριστικά του

ραδιοδιαύλου και των κυψελών πλησίον του UE. Στην κατάσταση connected, το UE μεταδίδει και λαμβάνει δεδομένα και υλοποιεί λειτουργίες ευρυεκπομπής, κινητικότητας και διαχείρισης των συνδέσεων RRC μεταξύ του UE και του E-UTRAN. Παράλληλα, είναι υπεύθυνο για τη δημιουργία αναφορών έπειτα από μετρήσεις στο UE για τον έλεγχο των ραδιοκομιστών, για τη μεταφορά των πληροφοριών του στρώματος NAS καθώς και για λειτουργίες ασφάλειας, όπως η διαχείριση των κλειδιών κρυπτογράφησης.

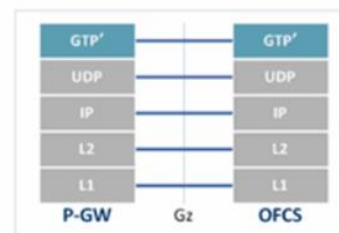
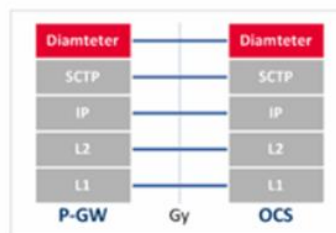
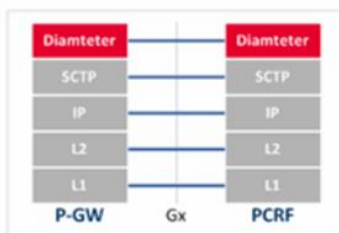
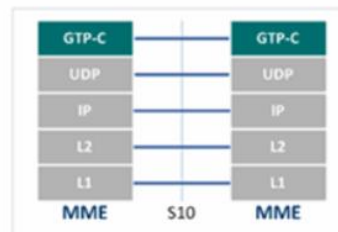
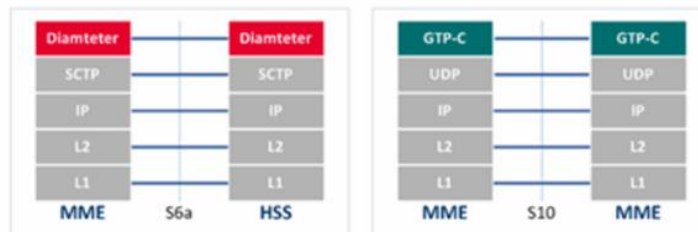
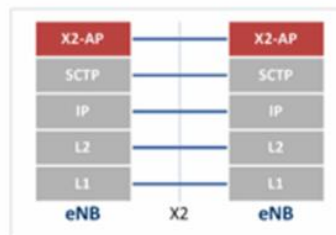
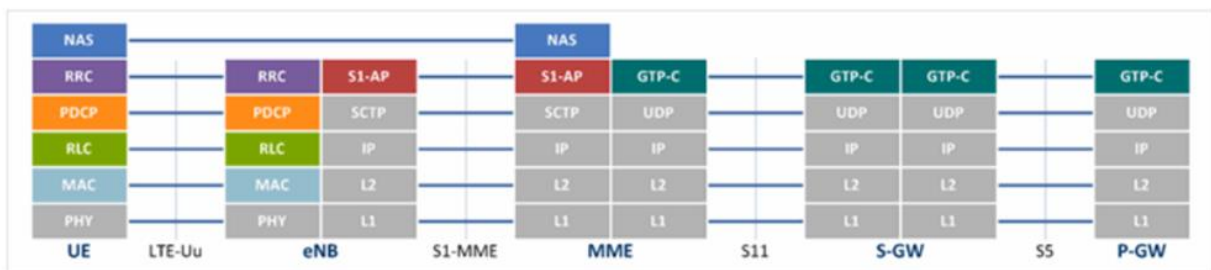
- Το στρώμα NAS αποτελεί το ανώτερο στρώμα του CP μεταξύ του UE και του MME και περιλαμβάνει δύο ειδών λειτουργίες, τη *διαχείριση κινητικότητας του EPS (EPS Mobility Management – EMM)* και τη *διαχείριση συνόδου του EPS (EPS Session Management – ESM)*. Ο *κομιστής EPS (Evolved Packet System)* είναι μια εικονική σύνδεση μεταξύ του UE και του P-GW. Σχετικά με τις λειτουργίες του NAS, η EMM περιλαμβάνει διαδικασίες διαχείρισης κινητικότητας εντός του E-UTRAN, επαλήθευσης ταυτότητας, ασφάλειας και ενημέρωσης της περιοχής του UE. Η ESM είναι υπεύθυνη για τη διαχείριση των δεδομένων του χρήστη εντός του στρώματος NAS καθώς και του κομιστή EPS.

Εκτός από τα προαναφερθέντα στρώματα-πρωτόκολλα που αφορούν την επικοινωνία του UE με τον eNB και το MME, το LTE χρησιμοποιεί και κάποια επιπλέον πρωτόκολλα κατά την επικοινωνία μεταξύ των λειτουργικών οντοτήτων του LTE όπως απεικονίζεται στα Σχ. 3.7 και 3.8.

- Το πρωτόκολλο GTP βασίζεται στο πρωτόκολλο IP και εφαρμόζεται στα δίκτυα GPRS, UMTS και LTE. Χρησιμοποιείται για την ενθυλάκωση δεδομένων των χρηστών καθώς εκείνα διέρχονται από το δίκτυο κορμού και για τη μεταφορά μηνυμάτων σηματοδοσίας εντός του δικτύου κορμού, τα οποία σχετίζονται με τους κομιστές GTP. Εκτός από τη μεταφορά δεδομένων, το πρωτόκολλο GTP συμβάλλει στη διατήρηση της σύνδεσης των UE στο Διαδίκτυο καθώς εκείνα κινούνται. Επιπλέον, περιλαμβάνει τρεις υποκατηγορίες πρωτοκόλλων, το *GTP-U (GPRS Tunneling Protocol User Plane)*, το *GTP-C (GPRS Tunneling Protocol Control Plane)* και το *GTP'*. Το πρωτόκολλο GTP-U χρησιμοποιείται στο UP και είναι υπεύθυνο για τη μεταφορά των δεδομένων του χρήστη εντός του EPC και μεταξύ των eNBs. Το GTP-C εφαρμόζεται στο CP και υποστηρίζει λειτουργίες ελέγχου του GTP μέσω της ενεργοποίησης, τροποποίησης και διαγραφής των κομιστών GTP. Σε περίπτωση μεταπομπής, το GTP-C δημιουργεί διαύλους προώθησης πακέτων για να αποφευχθούν σφάλματα μετάδοσης. Τέλος, το *GTP'* εφαρμόζεται και αυτό στο CP και χρησιμοποιείται για τη μεταφορά των δεδομένων χρέωσης των συνδρομητών στο OFCS.
- Το πρωτόκολλο S1-AP χρησιμοποιείται στο CP και υποστηρίζει λειτουργίες όπως η διαχείριση της διεπαφής S1 και η μεταφορά των μηνυμάτων σηματοδοσίας NAS μεταξύ του UE και του MME.



Σχήμα 3.7 Στοιβα πρωτοκόλλων UP του LTE



Σχήμα 3.8 Στοιβα πρωτοκόλλων CP του LTE

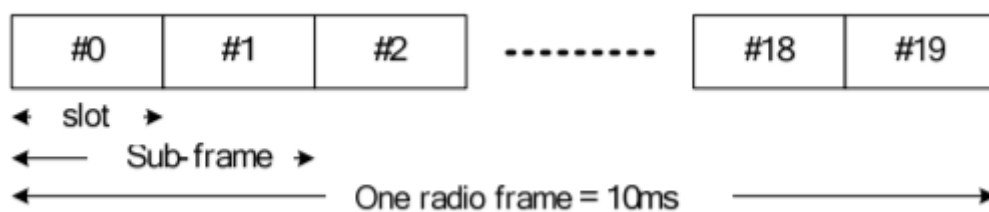
- Η χρήση του πρωτοκόλλου SCTP (Stream Control Transmission Protocol) στο CP εξασφαλίζει την αξιόπιστη ανταλλαγή μηνυμάτων, όπως και στο TCP. Ωστόσο το SCTP μπορεί να υποστηρίξει πολλαπλές ταυτόχρονες ροές πληροφορίας για κάθε σύνδεση μεταξύ δύο κόμβων.
- Το πρωτόκολλο X2-AP χρησιμοποιείται στο CP για την ανταλλαγή πληροφοριών μεταπομπής, παρεμβολών και όγκου του τηλεπικοινωνιακού φορτίου καθώς και για την προώθηση μηνυμάτων μεταξύ των eNBs.
- Τέλος, το πρωτόκολλο diameter του CP χρησιμοποιείται για την ανταλλαγή μηνυμάτων σχετικά με την εξουσιοδότηση και την πιστοποίηση των χρηστών καθώς και για τη διακίνηση λογιστικών πληροφοριών.

### 3.4 Φυσικό Στρώμα LTE

#### 3.4.1 Δομή πλαισίων

Η οργάνωση και η δομή των πλαισίων στο LTE διαφέρει αντίστοιχα με τον τρόπο που διαχωρίζεται η UL μετάδοση από την DL. Διακρίνονται δύο τύποι πλαισίων: Τα πλαίσια τύπου 1 (FDD) και τα πλαίσια τύπου 2 (TDD).

Για τα πλαίσια FDD (βλ. Σχ.3.9), οι μεταδόσεις UL και DL μπορούν να πραγματοποιούνται ταυτόχρονα σε διαφορετικές ζώνες συχνοτήτων. Η συνολική χρονική διάρκεια του πλαισίου FDD είναι 10ms και αποτελείται από 20 σχισμές (slots) διάρκειας 0.5ms τα οποία αριθμούνται από #0 έως #19. Δύο συνεχόμενα slots σχηματίζουν ένα υποπλαίσιο (sub-frame) διάρκειας 1ms. Συνεπώς ένα πλαίσιο FDD αποτελείται από δέκα υποπλαίσια.

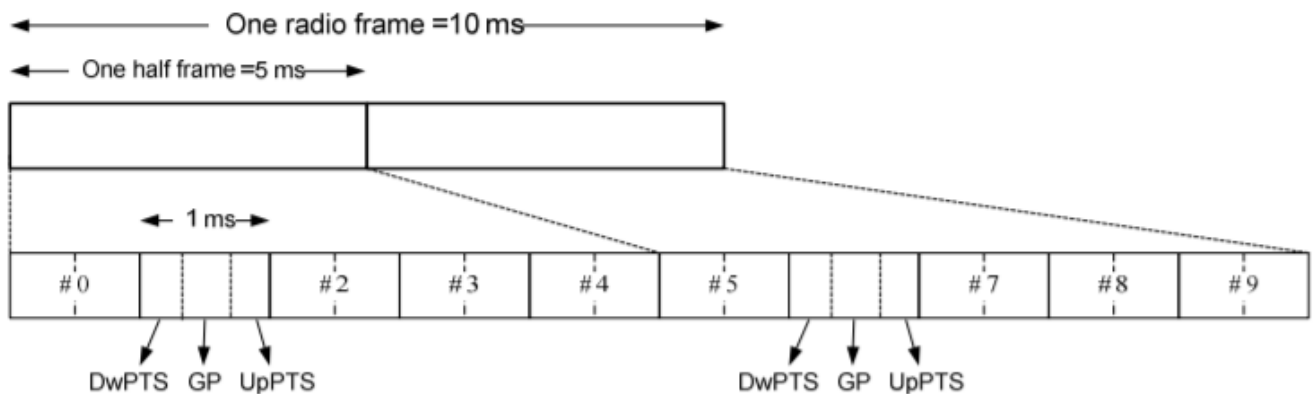


Σχήμα 3.9 Δομή πλαισίου FDD

Για τα πλαίσια TDD (βλ. Σχ.3.10), οι μεταδόσεις UL και DL πραγματοποιούνται εντός συγκεκριμένων χρονικών διαστημάτων και όχι ταυτόχρονα όπως στα πλαίσια FDD, αφού η ίδια ζώνη συχνοτήτων χρησιμοποιείται και για τις δύο μεταδόσεις. Η συνολική διάρκεια των πλαισίων TDD είναι επίσης 10ms. Όμως, η δομή τους είναι διαφορετική σε σχέση με τα πλαίσια FDD. Κάθε πλαίσιο TDD χωρίζεται σε 2 τμήματα διάρκειας 5ms το καθένα. Κάθε τμήμα περιλαμβάνει 8 σχισμές διάρκειας 0.5ms και άλλα τρία πεδία συνολικής διάρκειας 1ms. Τα τρία αυτά πεδία είναι το DwPTS (Downlink Pilot Time Slot), το GP (Guard Period) και το UpPTS (Uplink Pilot Time Slot). Στο DwPTS μεταφέρονται σήματα φυσικού επιπέδου,



ελέγχου και συγχρονισμού καθώς και δεδομένα σε ορισμένες υλοποιήσεις. Στο UpPTS μεταφέρονται σήματα εκτίμησης της κατάστασης του διαύλου (SRS) και συγχρονισμού, ενώ το GP χρησιμοποιείται για τη μετάβαση από DL σε UL μετάδοση. Το χρονικό διάστημα ανάμεσα σε δύο διαδοχικές μεταβολές από DL σε UL μετάδοση μπορεί να είναι 5ms ή 10ms και ονομάζεται *περιοδικότητα εναλλαγής (switch-point periodicity)*. Το υποπλαίσιο #1 και στις δύο περιπτώσεις περιοδικότητας εναλλαγής καθώς και το υποπλαίσιο #6 στην περίπτωση περιοδικότητας εναλλαγής 5ms αποτελούνται από τα DwPTS, GP και UpPTS. Το υποπλαίσιο #6 στην περίπτωση περιοδικότητας εναλλαγής 10ms αποτελείται είναι πλαίσιο DL μετάδοσης. Επιπλέον, τα υποπλαίσια #0 και #5 προορίζονται για DL μετάδοση ενώ το υποπλαίσιο #2 για UL μετάδοση. Στο Σχ.3.11 απεικονίζονται οι τρόποι υλοποίησης των προαναφερθεισών προδιαγραφών και περιλαμβάνει όλους τους δυνατούς συνδυασμούς χρήσης των υποπλαισίων για τη DL και UL μετάδοση (D και U αντιστοίχως) καθώς και των υποπλαισίων που απαρτίζονται από τα τμήματα DwPTS, GP και UpPTS (S).

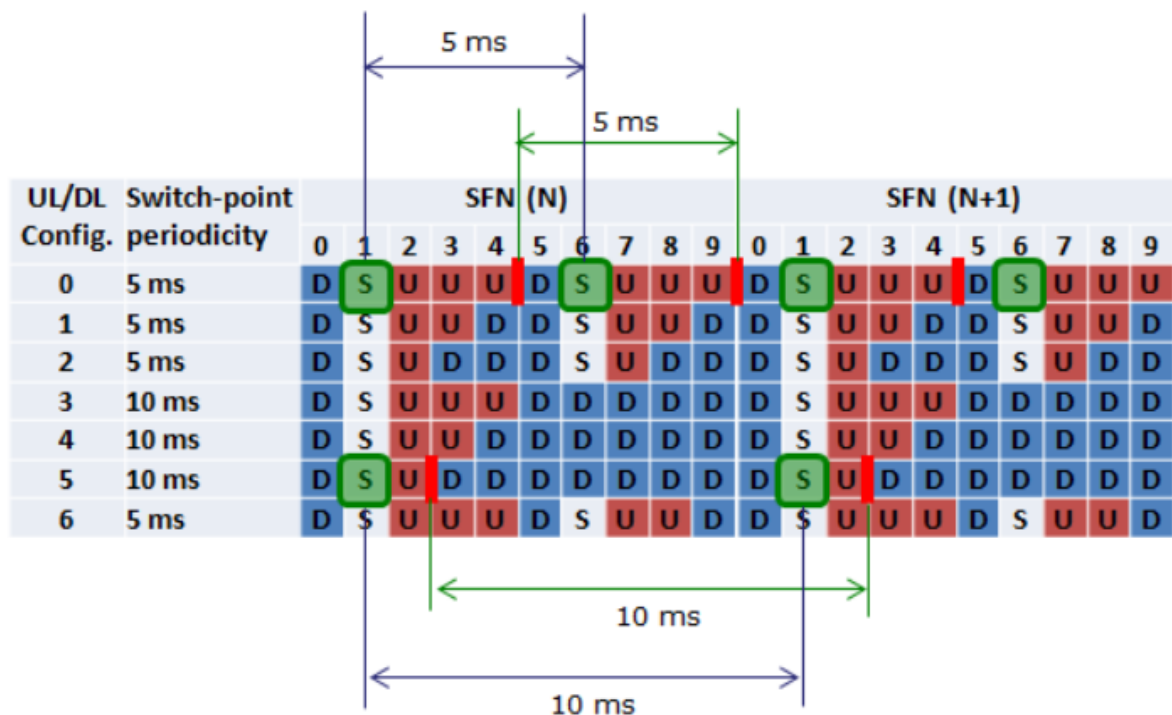


**Σχήμα 3.10** Δομή πλαισίου TDD

Configuration	3GPP release	Downlink to uplink switch point periodicity (ms)	Subframe number									Number of subframes / frame			
			0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	D [DL]	U [UL]	S [SSF]
0	8	5	D	S	U	U	U	D	S	U	U	U	2	6	2
1	8	5	D	S	U	U	D	D	S	U	U	D	4	4	2
2	8	5	D	S	U	D	D	D	S	U	D	D	6	2	2
3	8	10	D	S	U	U	U	D	D	D	D	D	6	3	1
4	8	10	D	S	U	U	D	D	D	D	D	D	7	2	1
5	8	10	D	S	U	D	D	D	D	D	D	D	8	1	1
6	8	5	D	S	U	U	U	D	S	U	U	D	3	5	2

**Σχήμα 3.11** Δυνατοί συνδυασμοί χρήσης των υποπλαισίων ενός πλαισίου TDD

Στο Σχ.3.12 απεικονίζεται η υλοποίηση του Σχ.3.11 σε δύο διαδοχικά πλαίσια με στόχο να γίνει αντιληπτή η περιοδικότητα εναλλαγής κάθε περίπτωσης. Οι συμβολισμοί SFN (N) και SFN (N+1) χρησιμοποιούνται για το διαχωρισμό των αριθμών υποπλαισίων του πλαισίου N και N+1 αντίστοιχα (SubFrame Number – SFN). Διαπιστώνεται ότι η περιοδικότητα εναλλαγής αφορά και στην επανάληψη ενός συγκεκριμένου μοτίβου των υποπλαισίων D, S και U.



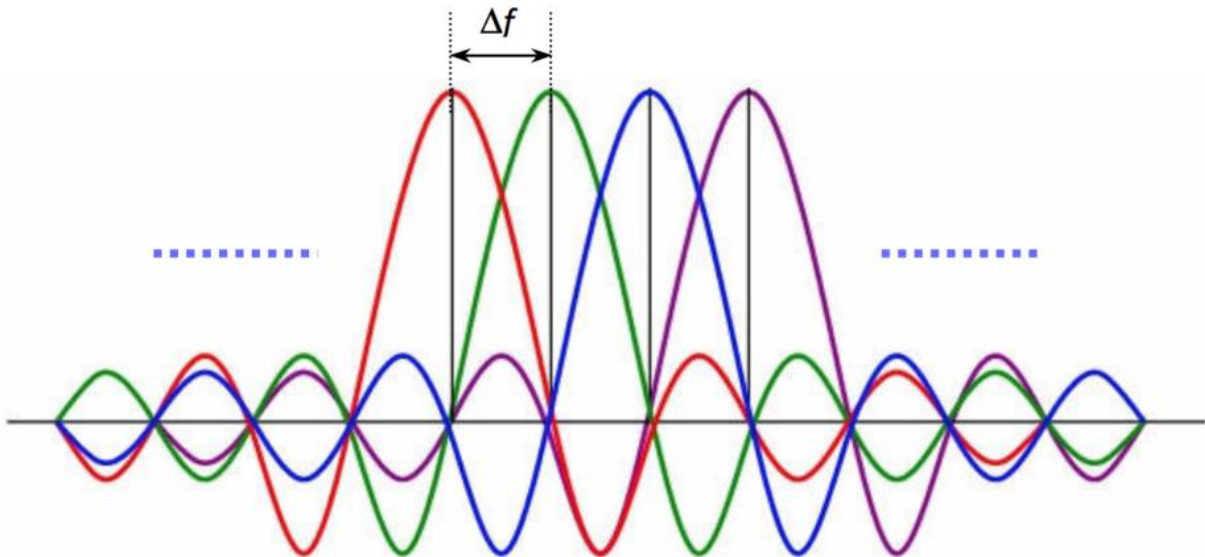
Σχήμα 3.12 Περιοδικότητα εναλλαγής στα πλαίσια TDD

Ο επικρατέστερος τύπος πλαισίου είναι ο FDD, κυρίως επειδή αποφεύγονται φαινόμενα παρεμβολών σε γειτονικές ζώνες συχνοτήτων. Συνεπώς, με την κατάλληλη περιοχή προστασίας (δηλαδή κάποιου κενού διαστήματος συχνοτήτων μεταξύ UL και DL), οι UL και DL μεταδόσεις μπορούν να πραγματοποιούνται ταυτοχρόνως, χωρίς να απαιτείται ο χρονικός διαχωρισμός τους.

### 3.4.2 Σχήματα UL και DL Μετάδοσης

Στη DL μετάδοση χρησιμοποιείται η τεχνική της *πολλαπλής πρόσβασης με ορθογωνική πολυπλεξία διαίρεσης συχνότητας (Orthogonal Frequency Division Multiple Access – OFDMA)*, η οποία στηρίζεται στην *τεχνική της ορθογώνιας πολύπλεξης διαίρεσης συχνότητας (Orthogonal Frequency Division Multiplexing – OFDM)* που χρησιμοποιήθηκε ως σχήμα διαμόρφωσης. Η βασική ιδέα της τεχνικής OFDM είναι η διαίρεση του προς μετάδοση ευρυζωνικού σήματος σε πλήθος παράλληλων σημάτων στενής ζώνης που ονομάζονται *υποφέροντα (subcarriers)*. Ενώ ένα συμβατικό σύστημα καταλαμβάνει όλο το διαθέσιμο εύρος ζώνης χρησιμοποιώντας παλμούς μικρής διάρκειας για τη μετάδοση κάθε συμβόλου, στην τεχνική OFDM, τα προς μετάδοση ψηφιακά δεδομένα κατανέμονται παράλληλα σε υποκανάλια (με τη βοήθεια των υποφερόντων), καθένα από τα οποία καταλαμβάνει ένα στοιχειώδες εύρος ζώνης. Τα υποκανάλια αυτά συναρπάζουν το συνολικό εύρος ζώνης του μεταδιδόμενου σήματος, όμως το καταλαμβανόμενο φάσμα είναι συρρικνωμένο. Αυτό οφείλεται στην αλληλοκάλυψη μεταξύ των υποκαναλιών υπό την προϋπόθεση ότι είναι ορθογώνια. Η ορθογωνιότητα εξασφαλίζει ότι στα σημεία όπου το φάσμα ενός υποκαναλιού μεγιστοποιείται, το φάσμα των γειτονικών υποκαναλιών μηδενίζεται. Για να υπάρχει η ιδιότητα της ορθογωνιότητας, πρέπει η φέρουσα συχνότητα κάθε υποκαναλιού να είναι ακέραιο πολλαπλάσιο μιας βασικής συχνότητας, δηλαδή  $f_i = i \cdot f_1$ ,  $i > 1$ , όπου  $f_1$  είναι η βασική

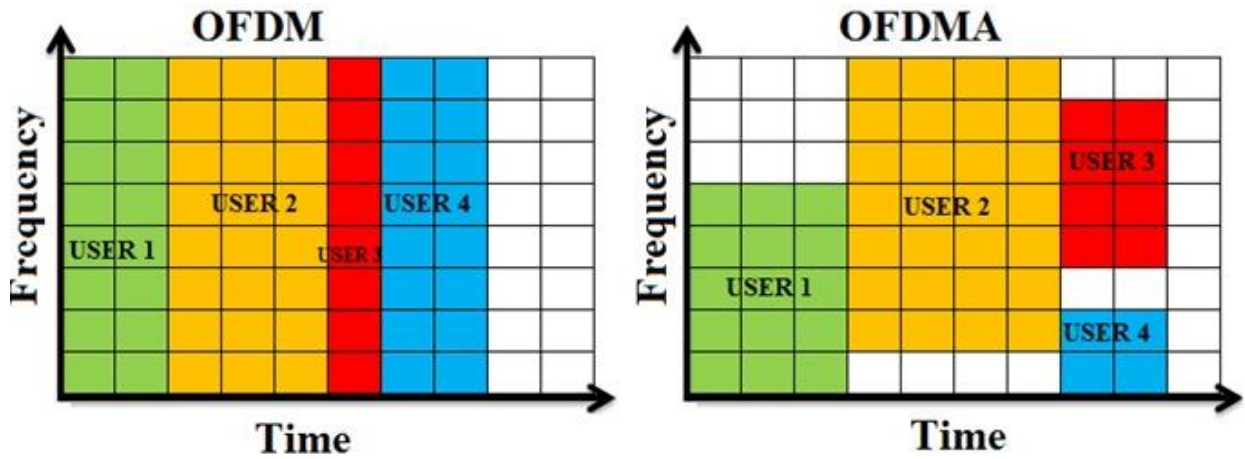
συχνότητα . Επιπλέον, πριν από κάθε σύμβολο OFDM προστίθεται ένα *κυκλικό πρόθεμα* (*Cyclic Prefix*), το οποίο είναι ένα αντίγραφο του τελευταίου μέρους του μεταδιδόμενου συμβόλου. Το κυκλικό πρόθεμα προστίθεται με σκοπό (i) την εξάλειψη της διασυμβολικής παρεμβολής (*Intersymbol Interference – ISI*) που οφείλεται στη χρονική διασπορά του διαύλου και (ii) την ευκολότερη επεξεργασία του συμβόλου στο πεδίο της συχνότητας.



**Σχήμα 3.13** Χρήση τεσσάρων υποφερόντων στην OFDM διαμόρφωση

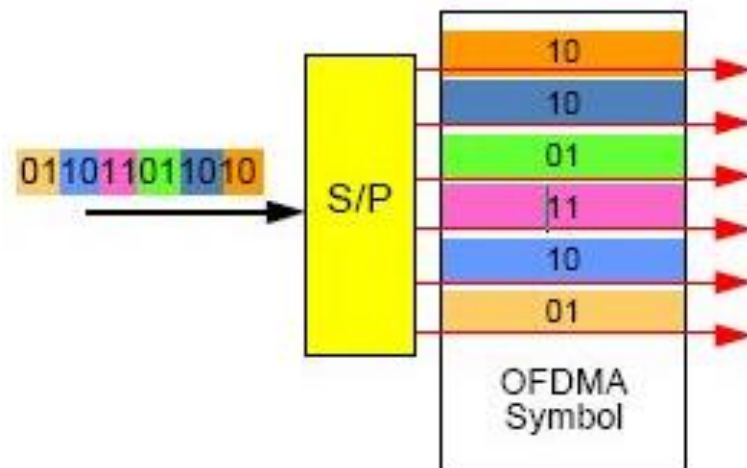
Η τεχνική OFDMA διαφοροποιείται σε σχέση με την OFDM στον τρόπο ανάθεσης των υποκαναλιών στους χρήστες. Συγκεκριμένα, στην τεχνική OFDM τα διαθέσιμα υποκανάλια αποδίδονται σε κάποιο χρήστη εξ ολοκλήρου μέχρι την εξυπηρέτηση του επόμενου χρήστη. Αντίθετα, στην τεχνική OFDMA τα διαθέσιμα υποκανάλια μπορούν να χωριστούν σε ομάδες και να διατεθούν σε διαφορετικούς χρήστες. Έτσι, μια ομάδα χρηστών μπορεί να χρησιμοποιεί ταυτόχρονα το διαθέσιμο εύρος ζώνης, αφού ο αριθμός των υποκαναλιών που έχει διατεθεί σε αυτούς αντιστοιχεί σε τμήμα του διαθέσιμου εύρους ζώνης. Ουσιαστικά, πρόκειται για μια συνδυασμένη εφαρμογή των τεχνικών TDMA και FDMA, αφού στους χρήστες αποδίδονται διαφορετικά υποκανάλια (FDMA) και διαφορετικές χρονοσχισμές (TDMA). Στο Σχ.3.14 απεικονίζονται οι τεχνικές OFDM και OFDMA. Τα λευκά διαστήματα στην τεχνική OFDMA υποδεικνύουν την ελευθερία χρήσης του διαθέσιμου φάσματος στο χρόνο και ότι δεν είναι απαραίτητη η δέσμευσή του προς όφελος ενός μόνο χρήστη, όπως γίνεται στην τεχνική OFDM. Συνεπώς, τα λευκά διαστήματα θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν ακόμα και από άλλους χρήστες ή και να μην χρησιμοποιηθούν αν δεν είναι απαραίτητο.

Το εύρος ζώνης που χρησιμοποιείται για την μετάδοση FDD πλαισίων στο LTE μπορεί να είναι 1.4MHz, 3 MHz, 5MHz, 10MHz, 15MHz και 20MHz. Το χρησιμοποιούμενο φάσμα αποτελείται από υποφέροντα που απέχουν 15kHz και σε ορισμένες περιπτώσεις 7.5kHz. Ως αποτέλεσμα της ορθογωνιότητας, η φασματική απόσταση μεταξύ των υποφερόντων ταυτίζεται με το εύρος ζώνης κάθε υποφέροντος. Η ωφέλιμη διάρκεια συμβόλου (δηλαδή χωρίς τη διάρκεια του κυκλικού προθέματος) είναι το αντίστροφο της φασματικής απόστασης μεταξύ των υποφερόντων. Ενδεικτικά, στην περίπτωση χρήσης υποφερόντων φάσματος που απέχουν 15kHz, η ωφέλιμη διάρκεια συμβόλου είναι 66.67μs, οπότε προσθέτοντας και τη διάρκεια του κυκλικού προθέματος προκύπτει η διάρκεια ενός OFDMA συμβόλου.



Σχήμα 3.14 Τεχνικές OFDM και OFDMA

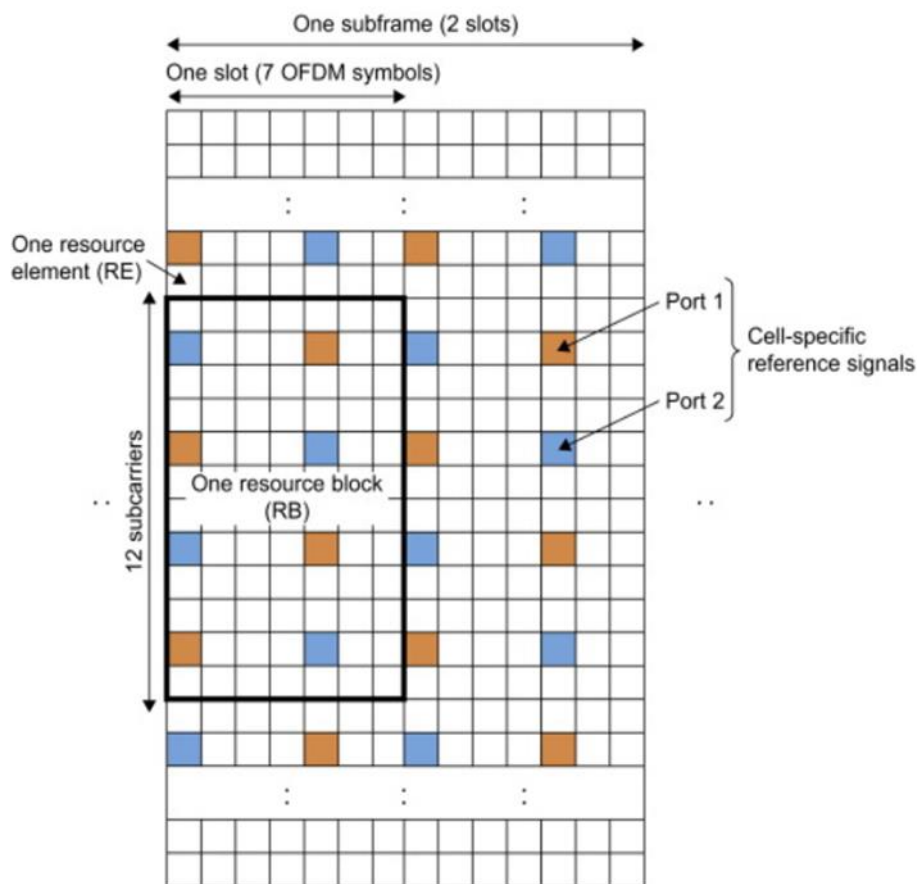
Στην τεχνική OFDMA, αρχικά εφαρμόζονται οι τεχνικές διαμόρφωσης *M-QAM* (*Quadrature Amplitude Modulation*), δηλαδή επιλέγεται ένα από τα σχήματα QPSK, 16QAM και 64QAM με σκοπό την αντιστοίχιση των ψηφιακών δεδομένων σε σύμβολα. Στη συνέχεια, τα σύμβολα αυτά χρησιμοποιώντας τα υποκανάλια μπορούν να μεταδοθούν στο χρόνο ενός συμβόλου OFDMA. Συνεπώς σε χρόνο ενός συμβόλου OFDMA, μπορούν να μεταδοθούν παράλληλα δεδομένα διαφορετικών χρηστών, αξιοποιώντας όλα τα διαθέσιμα υποκανάλια. Η ενσωμάτωση των μεταδιδόμενων συμβόλων εντός των διαθέσιμων υποκαναλιών σε χρόνο ενός συμβόλου OFDMA αποτελεί το σύμβολο OFDMA. Στο Σχ.3.15 απεικονίζεται τα επιμέρους στάδια της τεχνικής OFDMA. Αρχικά, τα σειριακά bit ομαδοποιούνται ανάλογα με το σχήμα διαμόρφωσης που χρησιμοποιείται. Στο παράδειγμα του Σχ.3.15 χρησιμοποιείται QPSK, οπότε κάθε σύμβολο αποτελείται από δύο bit. Ο διαμορφωτής S/P (Serial to Parallel) κατανέμει κάθε σύμβολο σε κάθε διαθέσιμο υποκανάλι, επιτυγχάνοντας έτσι την παραλληλοποίηση των συμβόλων QPSK σε ένα σύμβολο OFDMA. Στη συνέχεια, το σύμβολο OFDMA μεταδίδεται στο δέκτη, όπου υλοποιείται η αντίστροφη διαδικασία.



Σχήμα 3.15 Διαδικασία σύνθεσης συμβόλου OFDMA

Η μικρότερη διακριτή μονάδα μεταφοράς δεδομένων για το LTE είναι το *RE* (*Resource Element*) και αποτελεί ουσιαστικά το στοιχειώδη ραδιοπόρο του συστήματος στο πλέγμα

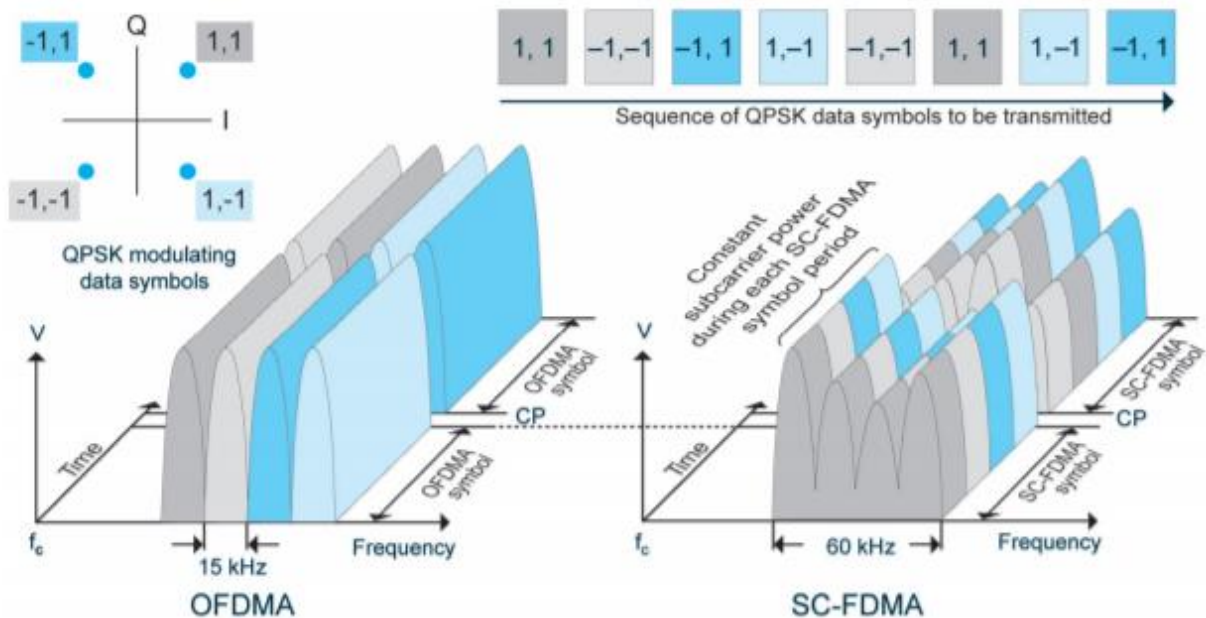
χρόνου-συχνότητας (*time-frequency grid*), όπως φαίνεται στο Σχ.3.16 έχοντας εύρος ζώνης ίσο με το ελάχιστο εύρος ενός υποκαναλιού OFDM (15kHz) και χρονική διάρκεια ίση με τη διάρκεια ενός OFDM συμβόλου. Μια *συστάδα ραδιοπόρων (Resource Block – RB)* περιλαμβάνει 12 υποκάναλια των 15kHz σε χρονική διάρκεια μιας χρονικής σχισμής (0.5ms) και αποτελεί τη μικρότερη μονάδα ραδιοπόρων που μπορεί να ανατεθεί σε κάποιο χρήστη. Το πλήθος των OFDM συμβόλων που περιλαμβάνονται σε μια χρονική σχισμή μπορεί να είναι 7 ή 6 ανάλογα με το αν χρησιμοποιείται *κανονικό (normal)* ή *εκτεταμένο (extended) CP* αντιστοίχως. Το κανονικό CP χρησιμοποιείται σε αστικές περιοχές και σε εφαρμογές όπου απαιτούνται αυξημένες ταχύτητες μετάδοσης, ενώ το εκτεταμένο CP σε αγροτικές περιοχές που χαρακτηρίζονται από μεγαλύτερη καθυστέρηση μετάδοσης.



**Σχήμα 3.16** Διάταξη ραδιοπόρων στο πλέγμα χρόνου-συχνότητας

Η τεχνική OFDMA παρουσιάζει αρκετά πλεονεκτήματα όπως η ανθεκτικότητα σε φαινόμενα πολυδιαδρομικής διάδοσης και η φασματική αποδοτικότητα λόγω της επικάλυψης μεταξύ των υποκαναλιών στο πεδίο της συχνότητας. Εντούτοις, εμφανίζει μεγάλο λόγο μέγιστης προς μέση ισχύ (*Peak to Average Power Ratio – PAPR*) και, ως εκ τούτου, απαιτείται αυξημένη κατανάλωση ισχύος και η λειτουργία ενισχυτών σε μεγάλα εύρη PAPR. Στην DL μετάδοση, αυτό δεν αποτελεί πρόβλημα καθώς οι τηλεπικοινωνιακοί κόμβοι (πλην των UEs που είναι απλώς παραλήπτες δεδομένων) διαθέτουν τέτοιες δυνατότητες ενίσχυσης και ισχύος. Αντιθέτως, στην UL μετάδοση, η ενσωμάτωση ενισχυτών με μεγάλο PAPR στις τερματικές συσκευές αυξάνει το κόστος των συσκευών, καθώς απαιτούν μπαταρίες υψηλής χωρητικότητας και ενισχυτές μεγάλου εύρους λειτουργίας. Προκειμένου να αποφευχθεί αυτό, χρησιμοποιείται μια παραλλαγή της OFDMA η οποία αξιοποιεί τα πλεονεκτήματα της

διατηρώντας όμως χαμηλότερο PAPR. Η τεχνική αυτή είναι γνωστή ως πολλαπλή πρόσβαση διαίρεσης συχνότητας απλού φέροντος (SC-FDMA – *Single Carrier-Frequency Division Multiple Access*) και επιτυγχάνει φασματική εξάπλωση των μεταδιδόμενων συμβόλων και συνακόλουθα τη μείωση του PAPR. Πρέπει να σημειωθεί ότι, μέσω της τεχνικής SC-FDMA, τα σύμβολα αποστέλλονται σειριακά, δηλαδή χρησιμοποιούν περισσότερα υποκανάλια για τη μετάδοσή τους σε χρόνο μικρότερο της διάρκειας συμβόλου. Συγκεκριμένα, σε περίπτωση χρήσης διαμόρφωσης M-QAM τα σύμβολα καταλαμβάνουν εύρος  $M \cdot 15\text{kHz}$  σε χρονικό διάστημα  $1/M$  της διάρκειας συμβόλου (βλ. Σχ.3.17).



Σχήμα 3.17 Τεχνικές OFDMA και SC-FDMA σε σχήμα διαμόρφωσης QPSK

### 3.5 Σενάρια εγκατάστασης των MEC host σε δίκτυα LTE

Μια από τις θεμελιώδεις λειτουργίες της πλατφόρμας MEC είναι η δρομολόγηση των πακέτων IP στις εφαρμογές MEC που διαχειρίζονται την κίνηση δεδομένων κατά τους ακόλουθους τρόπους:

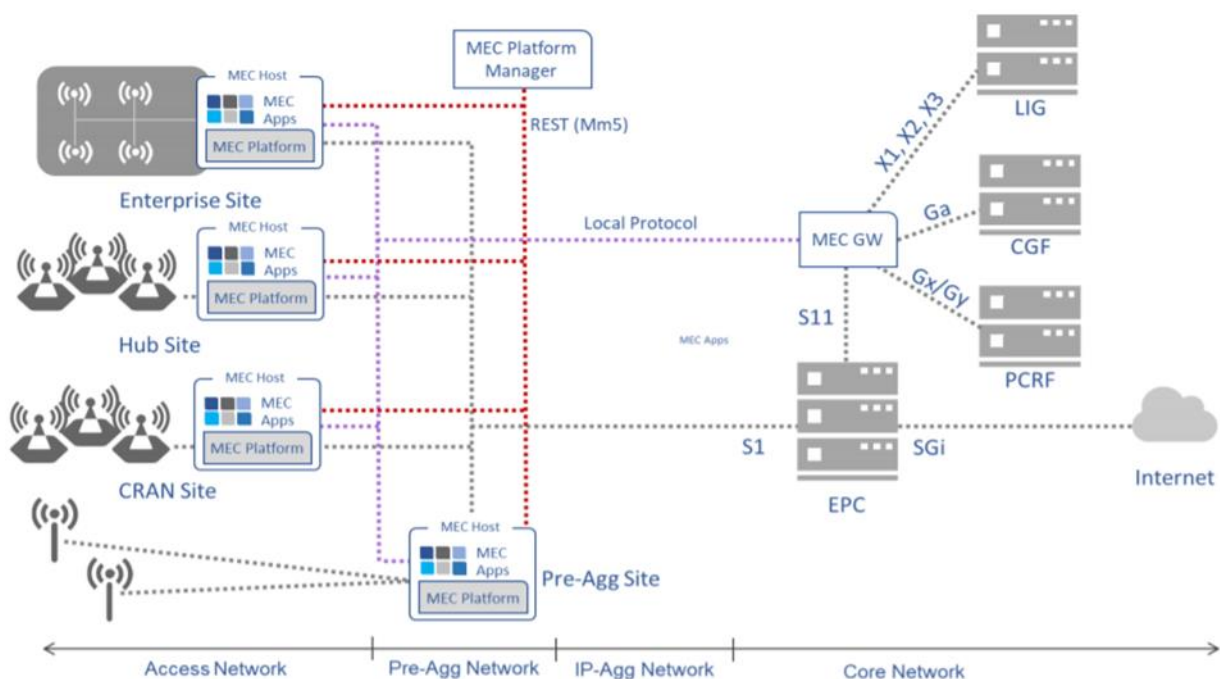
- Στη λειτουργία διαφυγής (*Breakout mode*), γίνεται ανακατεύθυνση της κίνησης δεδομένων προς μια εφαρμογή MEC που φιλοξενείται είτε τοπικά στην πλατφόρμα MEC είτε σε κάποιο απομακρυσμένο εξυπηρετητή. Παραδείγματα εφαρμογών που κάνουν χρήση της λειτουργίας διαφυγής αποτελούν το gaming, οι υπηρεσίες παροχής πολυμεσικού περιεχομένου, τα εταιρικά δίκτυα κλπ.
- Στη λειτουργία σε σειρά (*In-line mode*), η σύνδεση με τον απομακρυσμένο εξυπηρετητή διατηρείται αλλά όλα τα δεδομένα διέρχονται από την εφαρμογή MEC. Παραδείγματα εφαρμογών που κάνουν χρήση της λειτουργίας σε σειρά είναι η προσωρινή αποθήκευση περιεχομένου και εφαρμογές ασφάλειας.

- Στη λειτουργία αντιγραφής (*Tar mode*), τα δεδομένα, καθώς διέρχονται από τον εξυπηρετητή MEC, αντιγράφονται και προωθούνται στην εφαρμογή αντιγραφής MEC όπου παρακολουθούνται και ελέγχονται. Στη συνέχεια, εξάγονται συμπεράσματα σχετικά με την αξιοπιστία και την ασφάλεια της σύνδεσης του χρήστη με τον απομακρυσμένο εξυπηρετητή.
- Στην ανεξάρτητη λειτουργία (*Independent mode*), τα δεδομένα δεν είναι αναγκαίο να διέρχονται μέσα από την εφαρμογή MEC, αλλά η εφαρμογή MEC ανήκει στις καταγεγραμμένες εφαρμογές της πλατφόρμας MEC ώστε να λαμβάνει υπηρεσίες DNS, RNIS κτλ.

Η δρομολόγηση της κίνησης από και προς τις εφαρμογές MEC επιτυγχάνεται μέσω της ρύθμισης του τοπικού εξυπηρετητή DNS και του επιπέδου δεδομένων του MEC host. Η λειτουργία του επιπέδου δεδομένων μέσα στο MEC host καθώς και η MEC πλατφόρμα που διαχειρίζεται το επίπεδο δεδομένων μέσω του σημείου αναφοράς Mp2 (βλ. Σχ.2.10) επηρεάζονται από την τοποθεσία εγκατάστασης του MEC host εντός της LTE αρχιτεκτονικής. Στη συνέχεια, παρουσιάζονται τα πιθανά σενάρια εγκατάστασης των MEC host.

### 3.5.1 Εγκατάσταση ως παρεμβολή στη γραμμή (**Bump in the wire**)

Το σενάριο αυτό περιλαμβάνει όλες τις περιπτώσεις εγκατάστασης του MEC host μεταξύ του eNB και του EPC με σκοπό την επίτευξη της μικρότερης δυνατής καθυστέρησης. Στην περίπτωση όπου η πλατφόρμα MEC είναι εγκατεστημένη στον eNB έχει τη δυνατότητα (i) να δρομολογεί πακέτα IP από και προς τις MEC εφαρμογές και (ii) να δρομολογεί ενθυλακωμένα GTP πακέτα από και προς την S-GW.

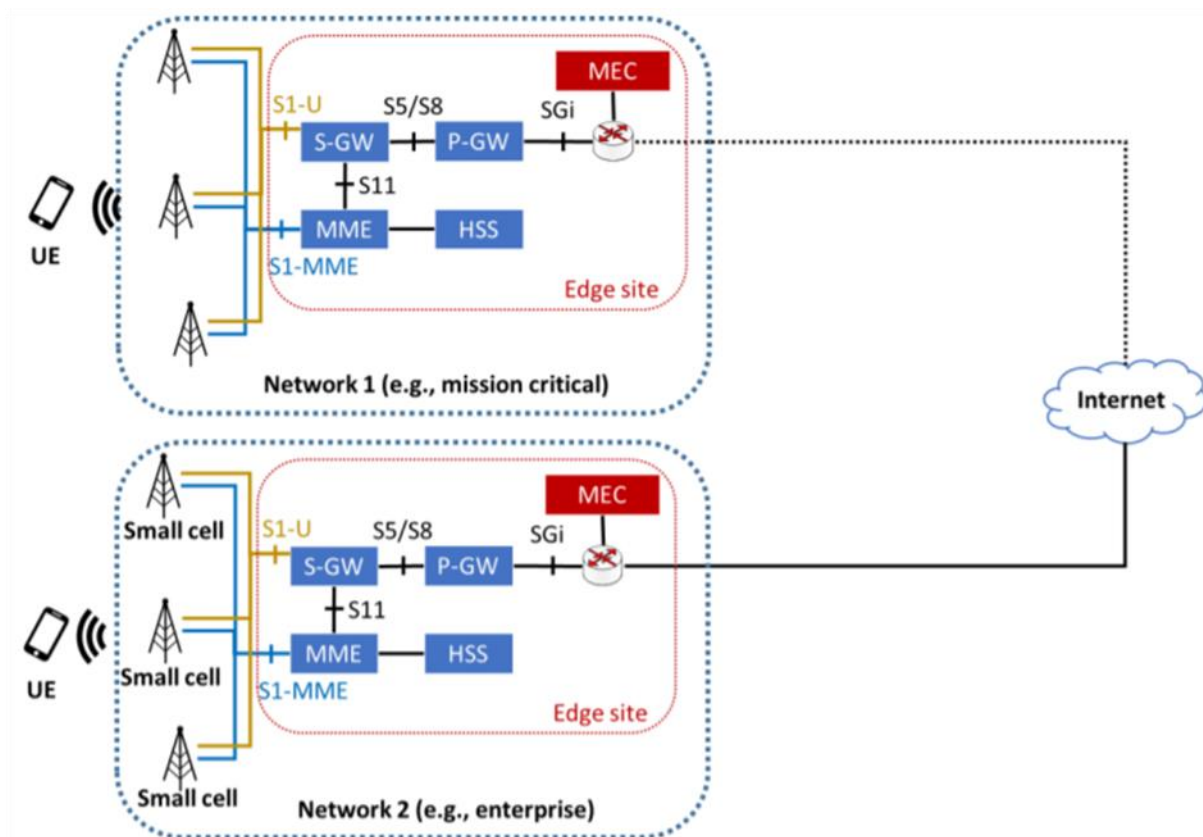


Σχήμα 3.18 *Bump in the wire*

Αυτό το σενάριο εγκατάστασης είναι κατάλληλο σε εταιρικές υλοποιήσεις στις οποίες η κίνηση δεδομένων του εταιρικού δικτύου μπορεί να αποκτήσει πρόσβαση σε τοπικές υπηρεσίες. Σε όλες τις άλλες περιπτώσεις τοποθεσίας εγκατάστασης, είτε αυτή είναι σε κόμβο κοντά στον eNB είτε σε σημείο συνάθροισης, η πλατφόρμα MEC συνδέεται στη διεπαφή S1 του EPC. Συνεπώς, το επίπεδο δεδομένων του MEC host πρέπει να επεξεργάζεται την κίνηση δεδομένων των χρηστών η οποία είναι ενθυλακωμένη σε GTP-U πακέτα. Αυτή η διαδικασία εγείρει προκλήσεις, καθώς κάποιο ποσοστό των διακινούμενων δεδομένων μπορεί να παράγεται στο MEC host ή να προέρχεται από κάποια δίοδο *τοπικής διαφυγής (Local breakout)*, με αποτέλεσμα να μη διέρχεται από το EPC. Για αυτές τις περιπτώσεις, μια λύση είναι η χρήση μιας MEC-GW που θα αποσκοπεί στην αποτελεσματική διαχείριση των λειτουργιών τιμολόγησης και νόμιμης υποκλοπής, όπως απεικονίζεται στο Σχ.3.18.

### 3.5.2 Εγκατάσταση κατανεμημένου EPC (Distributed EPC)

Σε αυτή την περίπτωση, ο MEC host περιλαμβάνει τις μονάδες του EPC ή κάποιες από αυτές, ενώ το επίπεδο δεδομένων συνδέεται με τη διεπαφή SGi και δρομολογεί την κίνηση δεδομένων μεταξύ του MEC συστήματος και των εξωτερικών δικτύων. Προκειμένου να επιτυγχάνεται η διαχείριση της κίνησης δεδομένων του επιπέδου χρήστη εντός του MEC συστήματος, χρησιμοποιείται ο τοπικός εξυπηρετητής DNS του MEC και η P-GW του κατανεμημένου EPC. Συγκεκριμένα, όταν το UE εγγράφεται στον κατανεμημένο EPC που συσχετίζεται με τον MEC host, η P-GW τερματίζει τη σύνδεση του με το PDN, εκχωρεί σε αυτό μια διεύθυνση IP και του μεταβιβάζει τις απαραίτητες πληροφορίες DNS ώστε να εξασφαλίζεται η επικοινωνία του με τις εφαρμογές MEC.

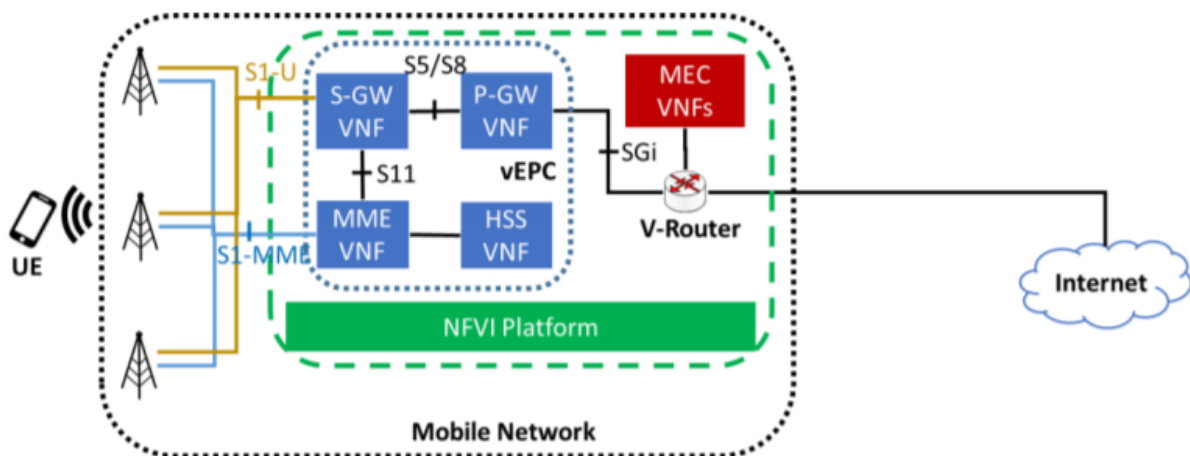


Σχήμα 3.19 Κατανεμημένο EPC



Αυτό το σενάριο εγκατάστασης απαιτεί λιγότερες αλλαγές στο δίκτυο, καθώς αξιοποιούνται υπάρχουσες 3GPP οντότητες και διεπαφές για λειτουργίες όπως η διαχείριση της κίνησης, η χρέωση κλπ. Επιπλέον, μέσω αυτού του τρόπου εγκατάστασης και με την ενσωμάτωση του HSS στο καταναμημένο δίκτυο EPC, είναι δυνατή η υποστήριξη M2M επικοινωνιών χωρίς να χρειάζεται η επικοινωνία με το δίκτυο κορμού. Η ύπαρξη του HSS στο καταναμημένο EPC εξαρτάται από το είδος των εφαρμογών που φιλοξενούνται στο MEC host και της ευαισθησίας τους σε καθυστέρηση. Η ένταξη του HSS στο καταναμημένο EPC είναι ιδιαίτερα χρήσιμη για τη διασφάλιση παροχής καθορισμένης ποιότητας υπηρεσίας των υπηρεσιών που παρέχονται σε εταιρικούς πελάτες.

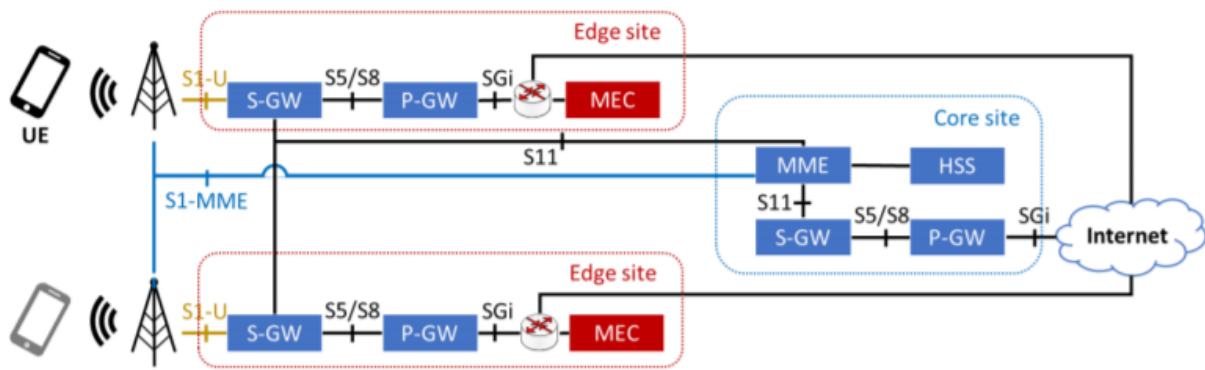
Η χρήση της τεχνολογίας NFV μπορεί να βελτιώσει τη λειτουργία του καταναμημένου EPC. Οι MNOs μπορούν να υλοποιήσουν ένα εικονικό EPC που θα αποτελείται από τις ανάλογες εικονικές οντότητες οι οποίες θα τρέχουν ως εικονικές λειτουργίες δικτύου (*Virtual Network Functions – VNFs*) πάνω στην ίδια υποδομή εικονικότητας NFVI (βλ. Σχ.3.20). Η υλοποίηση αυτή προσφέρει οικονομικά οφέλη στους MNOs καθώς και ευελιξία και αποδοτικότερη διαχείριση των δικτυακών πόρων.



Σχήμα 3.20 Καταναμημένο EPC ως VNFs

### 3.5.3 Εγκατάσταση καταναμημένων S/P-GW (Distributed S/P-GW)

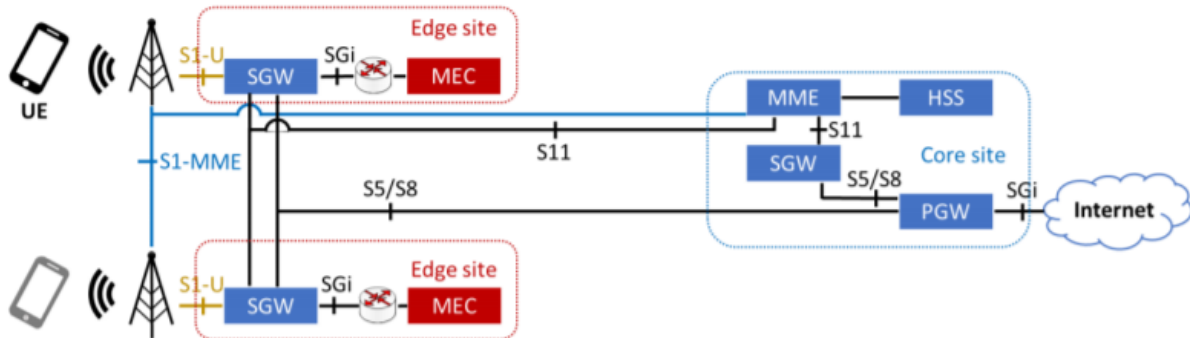
Το σενάριο αυτό είναι παρόμοιο με αυτό του εδαφίου 3.5.2, με τη διαφορά ότι μόνο οι S-GW και P-GW οντότητες είναι εγκατεστημένες πλησίον του MEC host, ενώ οι λειτουργίες των HSS και MME εκτελούνται στο EPC. Και σε αυτό το σενάριο, το επίπεδο δεδομένων συνδέεται με την P-GW μέσω της διεπαφής SGI και οι λειτουργίες των S-GW και P-GW μπορούν να τρέχουν ως VNFs μαζί με την εκάστοτε εφαρμογή MEC πάνω στην ίδια υποδομή NFV. Η επιλογή της τοπικής S-GW πραγματοποιείται από την MME του EPC σύμφωνα με τις DNS διαδικασίες που ορίζει ο 3GPP και βάσει του κωδικού περιοχής εντοπισμού (*Tracking Area Code – TAC*) του UE. Η διατήρηση της MME στο EPC επιτρέπει την καλύτερη διαχείρισή αυτής και διευκολύνει τη διαδικασία μεταπομπής του UE μεταξύ δύο MEC hosts. Η τοπολογία αυτού του σεναρίου εγκατάστασης απεικονίζεται στο Σχ.3.21.



Σχήμα 3.21 Κατανεμημένες S/P-GW

### 3.5.4 Εγκατάσταση κατανεμημένης S-GW με τοπική διαφυγή (Distributed S-GW with Local Breakout – SG-W LBO)

Η χρήση τοπικής διαφυγής στην SG-W αποτελεί ένα είδος αρχιτεκτονικής του MEC που προέρχεται από την πρόθεση των MNO να έχουν καλύτερο έλεγχο της διαδικτυακής κίνησης. Μέσω της τοπικής διαφυγής εξασφαλίζεται η δυνατότητα στους χρήστες να χρησιμοποιούν εφαρμογές τόσο του συστήματος MEC όσο και του Διαδικτύου με επιλεκτικό τρόπο. Στο Σχ.3.22, απεικονίζεται η συστέγηση MEC host και κατανεμημένης S-GW στη παρυφή του δικτύου κινητών επικοινωνιών.



Σχήμα 3.22 Κατανεμημένη S-GW με τοπική διαφυγή

Και σε αυτό το σενάριο, η κατανεμημένη S-GW καθώς και οι εφαρμογές MEC μπορούν να φιλοξενηθούν ως VNFs πάνω στην ίδια πλατφόρμα MEC.

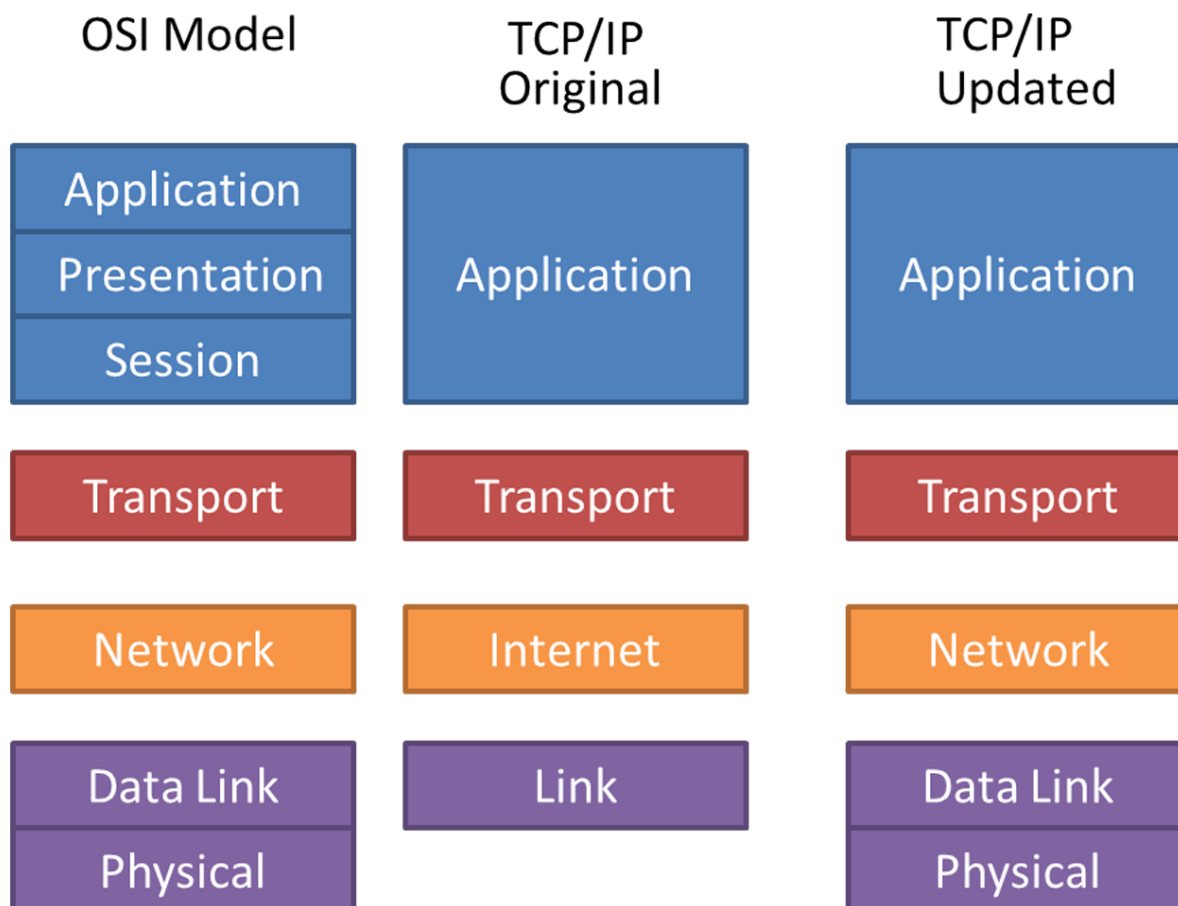
Ο έλεγχος της κίνησης πραγματοποιείται μέσω της διεπαφής SGI-LBO, η οποία υποστηρίζει το διαχωρισμό της κίνησης δεδομένων και παρέχει το ίδιο επίπεδο ασφάλειας με τα συμβατικά συστήματα 3GPP. Η λύση αυτή επιτρέπει στους MNO να εφαρμόσουν φίλτρα στην κίνηση δεδομένων από και προς τα UE με βάση πληροφορίες όπως APN (Access Point Name), αναγνωριστικό χρήστη ή παραμέτρους του IP. Η επιλογή του S-GW γίνεται και σε αυτό το σενάριο από την MME βάσει των προδιαγραφών του 3GPP και της γεωγραφικής τοποθεσίας του UE.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

### Μηχανισμοί βελτιστοποίησης του επιπέδου μεταφοράς

#### 4.1 Εισαγωγή

Για την κατανόηση των λειτουργιών ενός τηλεπικοινωνιακού δικτύου χρησιμοποιήθηκε αρχικά το μοντέλο διαστρωμάτωσης *OSI (Open Systems Interconnection model)* και στη συνέχεια το *TCP/IP (Transmission Control Protocol/Internet Protocol)*. Τα μοντέλα διαστρωμάτωσης αυτά εμφανίζουν μια ιεραρχική δομή επιπέδων και καθορίζουν (i) τις προδιαγραφές επικοινωνίας μεταξύ δύο τερματικών καθώς και (ii) τα χρησιμοποιούμενα πρωτόκολλα κάθε επιπέδου. Κάθε επίπεδο αξιοποιεί τις λειτουργίες του κατώτερου επιπέδου και προσφέρει υπηρεσίες στο ανώτερό του. Συγκεκριμένα, το μοντέλο αναφοράς OSI αποτελείται από επτά επίπεδα ενώ το μοντέλο TCP/IP από τέσσερα, όπως απεικονίζεται στο Σχ.4.1. Η πολυπλοκότητα των προδιαγραφών του μοντέλου OSI συντέλεσε στον περιορισμό της χρήσης του και κατέστησε το μοντέλο TCP/IP θεμελιώδες για την περιγραφή δικτύων όπως το ARPANET και άλλα δίκτυα που εξελίχθηκαν στο σημερινό Διαδίκτυο.



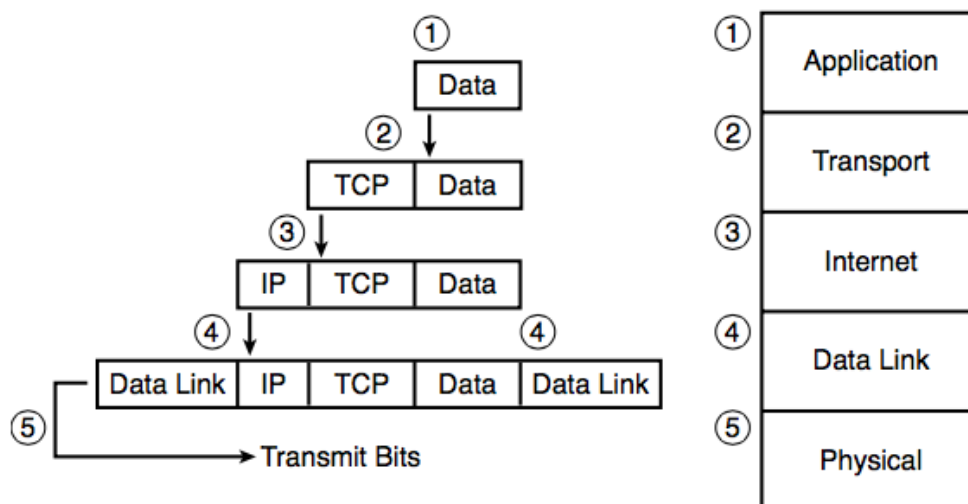
Σχήμα 4.1 Μοντέλα διαστρωμάτωσης OSI και TCP/IP

Στην παρούσα διπλωματική θα γίνει ανάλυση του μοντέλου TCP/IP που αφορά το Διαδίκτυο. Το TCP/IP αποτελείται από τα εξής επίπεδα:

- **Φυσικό επίπεδο (Physical Layer):** Ορίζει όλες τις ηλεκτρικές και φυσικές προδιαγραφές της επικοινωνίας μεταξύ δύο τερματικών και η κυριότερη λειτουργία του είναι η μεταφορά bit από ένα κόμβο δικτύου στον επόμενο. Επιπλέον, παρέχει λειτουργίες όπως η πολύπλεξη, η επίλυση προβλημάτων προτεραιότητας πρόσβασης, ο έλεγχος ροής δεδομένων καθώς και η διαμόρφωση/αποδιαμόρφωση των ψηφιακών σημάτων κατά τη μετάδοση από ένα φυσικό μέσο σε ένα άλλο (πχ χάλκινο καλώδιο, οπτική ίνα, δορυφόρος κλπ). Διατάξεις του φυσικού επιπέδου αποτελούν οι επαναλήπτες (*repeaters*), οι προσαρμοστές διαύλου (*bus adapters*), οι κεραίες κλπ.
- **Επίπεδο ζεύξης δεδομένων (Data Link Layer):** Εξασφαλίζει τη μεταφορά πακέτων δεδομένων μεταξύ δύο γειτονικών κόμβων είτε του ίδιου τοπικού δικτύου (*Local Area Network – LAN*) είτε του ίδιου δικτύου ευρείας περιοχής (*Wide Area Network – WAN*). Υποστηρίζει λειτουργίες ανίχνευσης και διόρθωσης σφαλμάτων που ενδέχεται να συμβούν στο φυσικό επίπεδο (πχ συγκρούσεις πακέτων κατά την ταυτόχρονη χρήση του φυσικού μέσου). Για την επικοινωνία μεταξύ των κόμβων χρησιμοποιούνται διευθύνσεις MAC που αντιστοιχούν στις κάρτες δικτύου που διαθέτουν. Οι διευθύνσεις αυτές είναι μοναδικές και στατικές για κάθε κάρτα δικτύου και αποδίδονται από τον κατασκευαστή τους. Το δημοφιλέστερο πρωτόκολλο αυτού του επιπέδου είναι το Ethernet για τα τοπικά δίκτυα, που βρίσκει ευρεία εφαρμογή στη σημερινή εποχή. Για τη διακίνηση δεδομένων μέσα σε ένα τοπικό δίκτυο χρησιμοποιούνται μεταγωγείς (*switches*).
- **Επίπεδο Δικτύου (Network Layer):** Εξασφαλίζει τη δρομολόγηση πακέτων δεδομένων μεταβλητού μήκους μέσα από ενδιάμεσα δίκτυα και κόμβους κατά την επικοινωνία μεταξύ δύο τερματικών. Υποστηρίζει λειτουργίες καθορισμού βέλτιστης δρομολόγησης καθώς τα πακέτα διέρχονται από τις ενδιάμεσες διατάξεις. Για την επικοινωνία μεταξύ των συσκευών χρησιμοποιούνται δημόσιες διευθύνσεις IP που εκχωρούνται δυναμικά. Τυπικές συσκευές αυτού του επιπέδου είναι οι δρομολογητές (*routers*), οι γέφυρες (*bridges*) και το τείχος προστασίας (*firewall*). Τα πλέον διαδεδομένα πρωτόκολλα αυτού του επιπέδου είναι το IP, το ICMP (*Internet Control Message Protocol*) που χρησιμοποιείται για την ανίχνευση σφαλμάτων μετάδοσης, το IPsec για την κρυπτογράφηση των πακέτων και το OSPF (*Open Shortest Path First*) για τον καθορισμό της βέλτιστης διαδρομής των πακέτων.
- **Επίπεδο Μεταφοράς (Transport Layer):** Το επίπεδο μεταφοράς του Διαδικτύου παρέχει τη δυνατότητα λογικής επικοινωνίας ανάμεσα σε διεργασίες εφαρμογών που εκτελούνται σε διαφορετικούς υπολογιστές. Τα πρωτόκολλα επιπέδου μεταφοράς υλοποιούνται στους τερματικούς κόμβους και όχι στους ενδιάμεσους κόμβους του Διαδικτύου. Στην πλευρά της αποστολής, το επίπεδο μεταφοράς διαιρεί τα μηνύματα που δέχεται από τη διεργασία εφαρμογής σε μικρότερα πακέτα επιπέδου μεταφοράς που ονομάζονται τμήματα (*segments*). Στη συνέχεια, κάθε τμήμα διαβιβάζεται στο επίπεδο δικτύου όπου ενθυλακώνεται σε ένα πακέτο επιπέδου δικτύου και τελικά αποστέλλεται στον προορισμό. Στην πλευρά λήψης, ακολουθεί η αντίστροφη διαδικασία, δηλαδή το επίπεδο δικτύου εξάγει το τμήμα του επιπέδου μεταφοράς από το πακέτο επιπέδου δικτύου και το διαβιβάζει στο επίπεδο μεταφοράς. Στη συνέχεια, το επίπεδο μεταφοράς επεξεργάζεται το τμήμα αυτό και καθιστά τα δεδομένα του

τμήματος διαθέσιμα στην παραλαμβάνουσα εφαρμογή. Τα δημοφιλέστερα πρωτόκολλα του επιπέδου μεταφοράς στο Διαδίκτυο είναι το *TCP (Transmission Control Protocol)* και το *UDP (User Datagram Protocol)*. Η διαφορά τους έγκειται στην εκ μέρους του TCP παροχή αξιόπιστης συνδεσμικής υπηρεσίας στην καλούσα εφαρμογή, σε αντίθεση με το UDP που αποτελεί μη αξιόπιστο πρωτόκολλο. Συγκεκριμένα, το TCP χρησιμοποιεί έλεγχο ροής, αριθμούς ακολουθίας, επιβεβαιώσεις, χρονομετρήσεις και αναμεταδόσεις με στόχο να εξασφαλίζεται η ορθή μετάδοση των πακέτων με τη σωστή σειρά ανάμεσα σε δύο διεργασίες υπολογιστών. Επιπλέον, παρέχει έλεγχο συμφόρησης ώστε όταν εντοπιστεί συμφόρηση να ρυθμίζει το ρυθμό μετάδοσης του αποστολέα. Αντίθετα, το UDP δεν υποστηρίζει λειτουργίες αξιόπιστης μετάδοσης δεδομένων και παρέχει μόνο τον έλεγχο ακεραιότητας των επικεφαλίδων των πακέτων που αποστέλλονται, όπως κάνει και το TCP. Στα εδάφια 4.2.1 και 4.2.2 θα γίνει εκτενέστερη περιγραφή των πρωτοκόλλων UDP και TCP.

- Επίπεδο Εφαρμογής (Application Layer):** Το επίπεδο εφαρμογής περιλαμβάνει τα δεδομένα των δικτυακών εφαρμογών. Το Διαδίκτυο περιλαμβάνει πολλά πρωτόκολλα εφαρμογής, όπως (i) το *HTTP (Hyper Text Transfer Protocol)* που χρησιμοποιείται στους φυλλομετρητές για τη μεταφορά δεδομένων ανάμεσα σε έναν *εξυπηρετητή web (web server)* και ένα πελάτη (δηλαδή το χρήστη που επιθυμεί να έχει πρόσβαση στα δεδομένα του εξυπηρετητή web), (ii) το *SMTP (Simple Mail Transfer Protocol)* για τη μεταφορά μηνυμάτων ηλεκτρονικού ταχυδρομείου, (iii) το *FTP (File Transfer Protocol)* για τη μεταφορά αρχείων ανάμεσα σε δύο τερματικά και (iv) το *DNS (Domain Name System)* για τη μετάφραση ονομάτων ιστοσελίδων σε διευθύνσεις IP. Οι εφαρμογές που κατανέμονται σε πολλαπλά τερματικά χρησιμοποιούν το εκάστοτε πρωτόκολλο εφαρμογής με σκοπό την ανταλλαγή πακέτων πληροφοριών μεταξύ τους. Το πακέτο πληροφοριών του επιπέδου εφαρμογής είναι γνωστό ως *μήνυμα (message)*.



**Σχήμα 4.2** Διαδικασία ενθυλάκωσης δεδομένων των ανωτέρων στρωμάτων σε κατώτερα

Στο Σχ.4.2 απεικονίζεται η αρχή της ενθυλάκωσης (*encapsulation*) μεταξύ των επιπέδων. Σύμφωνα με αυτή, ένα μήνυμα επιπέδου εφαρμογής διαβιβάζεται στο επίπεδο μεταφοράς. Το επίπεδο μεταφοράς προσθέτει τις απαραίτητες πληροφορίες οι οποίες θα χρησιμοποιηθούν από

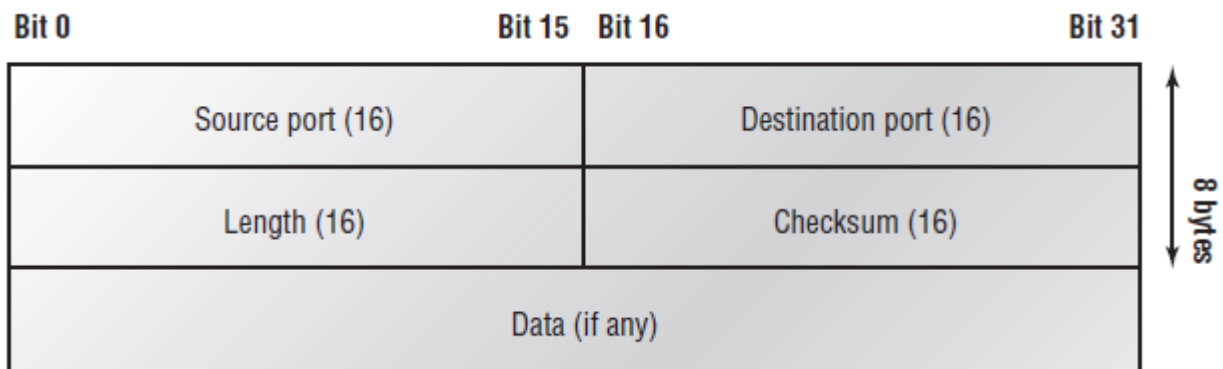
το επίπεδο μεταφοράς της πλευράς λήψης. Οι πληροφορίες αυτές είναι ουσιαστικά η *επικεφαλίδα (header)* του επιπέδου μεταφοράς και μαζί με τις πληροφορίες του μηνύματος του επιπέδου εφαρμογής αποτελούν το τμήμα επιπέδου μεταφοράς. Επομένως, το τμήμα επιπέδου μεταφοράς ενθυλακώνει το μήνυμα επιπέδου εφαρμογής. Στη συνέχεια, το επίπεδο μεταφοράς διαβιβάζει το τμήμα του στο επίπεδο δικτύου, το οποίο προσθέτει πληροφορίες επικεφαλίδας, δηλαδή τις διευθύνσεις IP των τερματικών προέλευσης και προορισμού, δημιουργώντας έτσι ένα *δεδομενόγραμμα (datagram)*. Ακολούθως, το δεδομένογραμμα διαβιβάζεται στο επίπεδο ζεύξης που προσθέτει τη δική του επικεφαλίδα δημιουργώντας έτσι ένα *πλαίσιο (frame)*. Τέλος, το πακέτο που έχει διαμορφωθεί έπειτα από τις διαδικασίες ενθυλάκωσης μεταξύ των επιπέδων αποστέλλεται στον προορισμό μέσω των τεχνικών μετάδοσης που υποστηρίζονται στο φυσικό επίπεδο.

## 4.2 Πρωτόκολλα Επιπέδου Μεταφοράς

### 4.2.1 Πρωτόκολλο UDP

Το UDP αποτελεί το απλούστερο πρωτόκολλο του επιπέδου μεταφοράς. Οι μόνες λειτουργίες που προσθέτει στο επίπεδο δικτύου είναι ο έλεγχος σφαλμάτων στο τμήμα του και η πολύπλεξη/αποπολύπλεξη των δεδομένων από και προς τις διεργασίες. Για τις λειτουργίες της πολύπλεξης και αποπολύπλεξης, στο UDP (όπως και στο TCP) χρησιμοποιούνται ειδικά πεδία στην επικεφαλίδα του που δείχνουν τη διεργασία στην οποία πρέπει να παραδοθούν τα δεδομένα. Τα πεδία αυτά είναι η *θύρα προέλευσης (source port)* και η *θύρα προορισμού (destination port)*. Πρόκειται για αριθμούς 16-bit (0 έως 65535) που χρησιμοποιούνται για την αντιστοίχιση διεργασίας-θύρας. Οι αριθμοί από 0 έως 1023 ονομάζονται *πασίγνωστοι αριθμοί θυρών (well-known port numbers)* και έχουν δεσμευτεί για χρήση συγκεκριμένων γνωστών πρωτοκόλλων εφαρμογής (πχ η θύρα 80 για το HTTP). Συνεπώς, το UDP λαμβάνει μηνύματα από την εκάστοτε διεργασία του επιπέδου εφαρμογής, προσαρτά τα πεδία θύρας προέλευσης και θύρας προορισμού, προσθέτει ακόμα δύο πεδία και διοχετεύει το τμήμα που δημιουργήθηκε στο επίπεδο δικτύου. Αν το τμήμα φθάσει στον προορισμό του, το UDP χρησιμοποιεί τον αριθμό θύρας προορισμού για να παραδώσει τα δεδομένα του τμήματος στη σωστή διεργασία της εφαρμογής. Το UDP αποτελεί ένα *ασυνδεσμικό (connectionless)* πρωτόκολλο με την έννοια ότι δεν υπάρχει εγκαθίδρυση σύνδεσης πριν την αποστολή δεδομένων και δεν ελέγχεται αν ο παραλήπτης των μηνυμάτων είναι διαθέσιμος. Ωστόσο, ένα αξιόπιστο πρωτόκολλο όπως το TCP που θα αναλυθεί στη συνέχεια, δεν είναι πάντα προτιμότερο από το UDP, καθώς η επιλογή ανάμεσα σε αυτά τα δύο πρωτόκολλα εξαρτάται από τη χρησιμοποιούμενη εφαρμογή. Συγκεκριμένα, το UDP δεν παρέχει τις λειτουργίες (i) ελέγχου συμφόρησης, (ii) εγκαθίδρυσης σύνδεσης και (iii) επαναποστολής πακέτων που καθυστερούν τη μετάδοση. Ιδιαίτερα σε εφαρμογές πραγματικού χρόνου (πχ ζωντανές μεταδόσεις, online gaming κτλ), οι αναμεταδόσεις πακέτων μέχρι τη λήψη επιβεβαίωσης καθώς και οι διάφοροι μηχανισμοί ελέγχου της κατάστασης της σύνδεσης εισάγουν καθυστερήσεις που μειώνουν την ποιότητα υπηρεσίας του χρήστη. Στην πραγματικότητα, σε αυτές τις εφαρμογές, η απώλεια μικρού ποσοστού πακέτων δεν επηρεάζει σημαντικά το περιεχόμενο λήψης του χρήστη ενώ, παράλληλα, απαιτείται η μικρότερη δυνατή καθυστέρηση έτσι ώστε η μετάδοση να συμβαδίζει χρονικά με την εκάστοτε εφαρμογή πραγματικού χρόνου.

Ένα άλλο σημαντικό πλεονέκτημα του UDP είναι ότι προσθέτει μικρού μήκους επικεφαλίδα (8 byte), εισάγοντας έτσι ελάχιστη καθυστέρηση στο μήνυμα εφαρμογής. Στο Σχ.4.3 απεικονίζεται η δομή του τμήματος UDP και τα πεδία που περιλαμβάνει. Σύμφωνα με το Σχ.4.3, τα δεδομένα της εφαρμογής καταλαμβάνουν το πεδίο δεδομένων στο τμήμα UDP, ενώ η επικεφαλίδα έχει τέσσερα πεδία που περιλαμβάνουν 2byte έκαστο. Τα τέσσερα αυτά πεδία είναι η θύρα προέλευσης, η θύρα προορισμού, το μήκος (*length*) και το άθροισμα ελέγχου (*checksum*). Όπως προαναφέρθηκε, οι θύρες προέλευσης και προορισμού επιτρέπουν στο τερματικό να διοχετεύει τα δεδομένα εφαρμογής στη σωστή διεργασία, εφόσον κάθε διεργασία χρησιμοποιεί μια θύρα με στόχο το διαχωρισμό της από άλλες διεργασίες. Το πεδίο μήκους καθορίζει το μήκος του τμήματος UDP σε bytes (επικεφαλίδα και δεδομένα) και χρησιμοποιείται καθώς το μέγεθος του πεδίου δεδομένων μπορεί να διαφέρει για κάθε τμήμα UDP. Το άθροισμα ελέγχου χρησιμοποιείται από το τερματικό λήψης για τον έλεγχο ενδεχόμενων σφαλμάτων στο τμήμα που λαμβάνεται. Όταν διαπιστωθεί σφάλμα που συνέβη κατά τη μετάδοση, το τερματικό μπορεί είτε να απορρίψει το τμήμα είτε να το διοχετεύσει στη διεργασία με κατάλληλη προειδοποίηση.



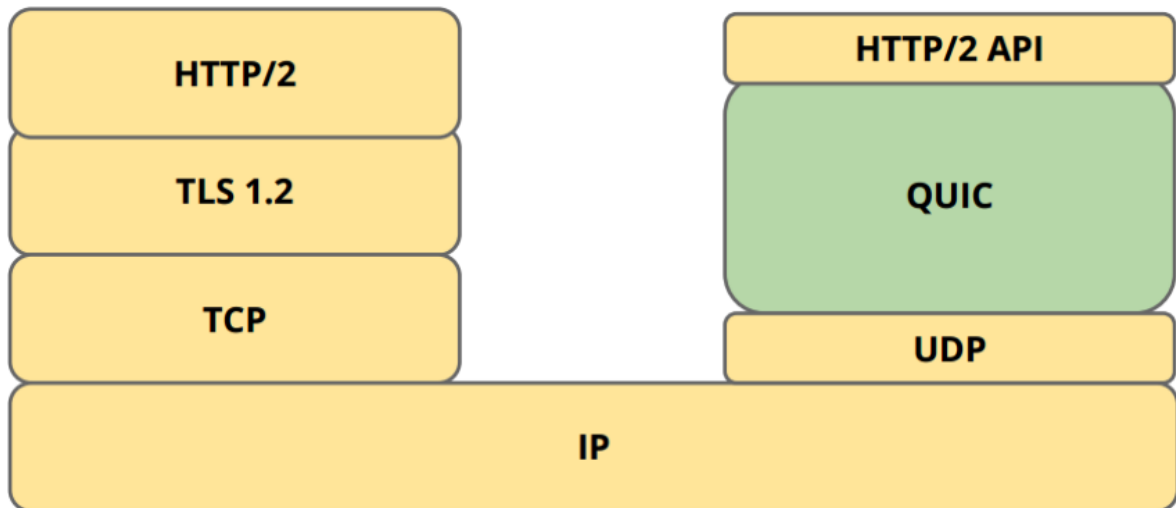
Σχήμα 4.3 Δομή τμήματος UDP

#### 4.2.1.1 Πρωτόκολλο Quic

Το *QUIC* (*Quick UDP Internet Connections*) είναι ένα νέο πρωτόκολλο που λειτουργεί πάνω από το UDP, η υλοποίησή του οποίου ξεκίνησε το 2012 και συνεχίζεται μέχρι σήμερα. Χρησιμοποιείται με στόχο να προσδίδει λειτουργίες αξιόπιστης μετάδοσης στο UDP και τρέχει κάτω από το πρωτόκολλο HTTP/2 που αποτελεί αναβαθμισμένη έκδοση του HTTP. Ουσιαστικά, αποτελεί ένα ενδιάμεσο στρώμα μεταξύ του UDP και του HTTP/2 όπως απεικονίζεται και στο Σχ.4.4.

Η χρήση του QUIC πάνω από το UDP είναι παρόμοια με αυτή του *TLS* (*Transport Layer Security*) πάνω από το TCP (βλ. Σχ.4.4). Η εφαρμογή του TLS πάνω από TCP εξασφαλίζει την ασφαλή επικοινωνία μεταξύ τερματικών, αφού παρέχει λειτουργίες κρυπτογράφησης μηνυμάτων, ενώ το HTTP/2 χρησιμοποιείται για τη μείωση της καθυστέρησης κατά τη μεταφόρτωση ιστοσελίδων. Το QUIC παρέχει λειτουργίες πολύπλεξης και ελέγχου ροής δεδομένων παρόμοιες με αυτές που παρέχει το HTTP/2, επίπεδα ασφάλειας παρόμοια με αυτά

που παρέχει το TLS καθώς και αξιοπιστία και έλεγχο συμφόρησης όπως στην περίπτωση του TCP.



Σχήμα 4.4 Αρχιτεκτονική QUIC

Τα πλεονεκτήματα της QUIC υλοποίησης σε σύγκριση με αυτή του TCP είναι:

- Ο μειωμένος χρόνος εγκατάστασης της σύνδεσης μέσω της βελτιστοποίησης της διαδικασίας χειραψίας των δύο πλευρών
- Ο βελτιωμένος έλεγχος συμφόρησης
- Η αποδοτικότερη πολύπλεξη των δεδομένων
- Η υποστήριξη λειτουργιών *FEC* (*Forward Error Correction*) μέσω των οποίων εξασφαλίζεται η ανάκτηση πακέτων και δεν απαιτείται η επαναποστολή τους
- Η διατήρηση της σύνδεσης του χρήστη σε περίπτωση αλλαγής των χαρακτηριστικών της (πχ σε περίπτωση που αλλάζει η IP του όταν μεταβαίνει από μια Wi-fi σύνδεση σε μια κινητή)
- Παρουσιάζει καλύτερη απόδοση σε σχέση με το TCP όταν χρησιμοποιείται σε εντόνως μεταβαλλόμενα δίκτυα (πχ δίκτυο κινητών επικοινωνιών)

Αναμφισβήτητα, τα ανωτέρω πλεονεκτήματα του QUIC προσφέρουν νέες δυνατότητες. Όπως προαναφέρθηκε ωστόσο, το QUIC δεν βρίσκεται ακόμα σε τελικό στάδιο και χρησιμοποιείται μόνο σε εφαρμογές της Google. Πρέπει να τονιστεί ότι προκειμένου να υποστηριχθεί η χρήση του στην πλευρά του χρήστη, πρέπει ο τελευταίος να διαθέτει την ανάλογη εφαρμογή google (πχ φυλλομετρητή Google Chrome). Γίνεται αντιληπτό ότι μέχρι σήμερα χρησιμοποιείται σε συγκεκριμένες εφαρμογές (κυρίως video streaming) και η χρήση του δεν έχει υιοθετηθεί καθολικά. Αυτό οφείλεται στους εξής λόγους:

- Το QUIC δρα ανασταλτικά σε διάφορες λειτουργίες ασφάλειας που παρέχονται προς όφελος του χρήστη. Για λόγους ταχύτητας και αποδοτικότητας, η διαφορετική δομή της επικεφαλίδας που χρησιμοποιεί το QUIC περιέχει λιγότερες πληροφορίες σε σχέση με το TCP. Ταυτόχρονα, όμως, η έλλειψη πληροφοριών δυσχεραίνει λειτουργίες αντιμετώπισης προβλημάτων (*troubleshooting*), διαχείρισης του δικτύου και ελέγχου



της εισερχόμενης κίνησης. Συνεπώς, οι MNOs και οι κατασκευαστές firewall δυσκολεύονται να εγγυηθούν την ποιότητα και την ασφάλεια των παρεχόμενων υπηρεσιών. Για το λόγο αυτό, είναι συχνό το φαινόμενο μπλοκαρίσματος πακέτων QUIC από firewalls εταιρικών δικτύων που συνήθως μπλοκάρουν πακέτα UDP και κατά συνέπεια και το QUIC.

- Υπό ευνοϊκές συνθήκες μετάδοσης, η χρήση του QUIC είναι λιγότερο αποδοτική σε σχέση με το TCP καθώς οι λειτουργίες FEC που υποστηρίζει καταλαμβάνουν ένα σημαντικό ποσοστό του πακέτου (10%) και εισάγουν πλεονασμό χωρίς να προσδίδουν λειτουργικά οφέλη. Αντίθετα οι μηχανισμοί του TCP για την αντιμετώπιση προβλημάτων μετάδοσης ενεργοποιούνται μόνο όταν αυτά παρουσιαστούν. Επιπλέον, ο αυτόματος έλεγχος συμφόρησης που γίνεται στο QUIC μπορεί να συντελέσει σε μείωση του ρυθμού μετάδοσης ακόμα και σε συνδέσεις που υποστηρίζουν υψηλή χωρητικότητα.

Γίνεται αντιληπτό ότι το QUIC είναι ένα πρωτόκολλο που μπορεί να προσδώσει αξιοπιστία και αποδοτικότητα στη μετάδοση δεδομένων σε χρονικές στιγμές όπου παρατηρούνται φαινόμενα συμφόρησης και απώλειας πακέτων. Εντούτοις, για να υιοθετηθεί η χρήση του από περισσότερες εφαρμογές, πρέπει να πραγματοποιηθεί η κατάλληλη μελέτη ώστε να αντιμετωπιστούν τα προαναφερθέντα μειονεκτήματα ή να δοθεί η δυνατότητα συνύπαρξης με το TCP ανάλογα με την κατάσταση της σύνδεσης.

#### 4.2.2 Πρωτόκολλο TCP

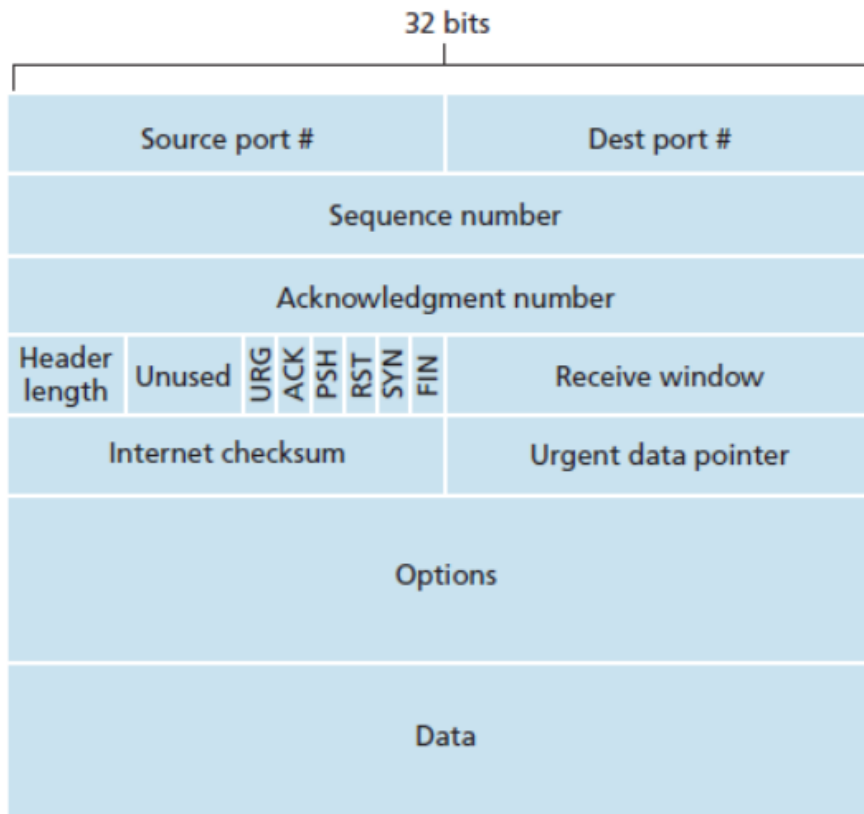
Αν και υπό ιδανικές συνθήκες το πρωτόκολλο UDP διακρίνεται από απλότητα και υψηλή ταχύτητα μετάδοσης, η εκτέλεση εφαρμογών πολυμέσων πάνω από UDP αποτελεί μια αμφισβητήσιμη πρακτική. Όπως προαναφέρθηκε, το UDP δεν παρέχει έλεγχο συμφόρησης ενώ η υπέρμετρη χρήση του μπορεί να προκαλέσει μείωση της ποιότητας υπηρεσίας που λαμβάνουν οι χρήστες. Για παράδειγμα, αν όλοι οι χρήστες λάμβαναν υπηρεσίες βίντεο ταυτόχρονα μέσω του πρωτοκόλλου UDP, θα υπήρχε υπέρμετρη υπερχειλίση πακέτων στους δρομολογητές και θα έφθαναν λίγα πακέτα επιτυχώς στον προορισμό τους. Επιπλέον, η υπερβολική χρήση του UDP συντελεί σε μεγάλους ρυθμούς απώλειας πακέτων, με αποτέλεσμα να επηρεάζεται και η λειτουργία του TCP καθώς δημιουργείται συνωστισμός πακέτων στους δρομολογητές. Επομένως, μειώνεται και η ταχύτητα μετάδοσης των TCP πακέτων λόγω συμφόρησης στο δίκτυο. Μέσω των μηχανισμών που περιλαμβάνει, η χρήση του TCP μπορεί να βελτιώσει σημαντικά την αξιοπιστία των μεταδόσεων και να συμβάλει στην επίτευξη της επιθυμητής ποιότητας υπηρεσίας των χρηστών.

Το TCP είναι ένα *συνδεδεσμένο (connection-oriented)* πρωτόκολλο, καθώς πριν την αποστολή δεδομένων μεταξύ των επικοινωνουσών διεργασιών, απαιτείται χειραψία μεταξύ τους. Η χειραψία αυτή είναι μια διαδικασία αποστολής προκαταρκτικών τμημάτων μεταξύ των διεργασιών με στόχο να καθοριστούν οι παράμετροι της επικείμενης μεταφοράς δεδομένων. Επιπλέον, μια σύνδεση TCP μεταξύ δύο τερματικών είναι αμφίδρομη, καθώς υποστηρίζεται η ταυτόχρονη μετάδοση δεδομένων και προς τις δύο κατευθύνσεις.

### 4.2.2.1 Δομή τμήματος TCP

Το τμήμα TCP αποτελείται από τα πεδία της επικεφαλίδας (20 byte) και ένα πεδίο δεδομένων (Data) όπως απεικονίζεται στο Σχ.4.5. Το πεδίο δεδομένων περιλαμβάνει ένα τμήμα του μηνύματος της εφαρμογής. Η μέγιστη ποσότητα δεδομένων που μπορούν να ενωσματοωθούν μέσα σε ένα τμήμα TCP περιορίζεται από το *μέγιστο μέγεθος τμήματος* (*Maximum segment size – MSS*), το οποίο εξαρτάται από τα κατώτερα επίπεδα λόγω της ενθυλάκωσης που πραγματοποιείται (στο επίπεδο ζεύξης το μέγεθος του πεδίου των δεδομένων μπορεί να είναι μεταξύ 46 και 1500 byte). Όσον αφορά στην επικεφαλίδα του TCP, αυτή περιλαμβάνει όπως και στο UDP τις θύρες προέλευσης και προορισμού για την πολύπλεξη/αποπολύπλεξη των δεδομένων προς/από τις εφαρμογές. Επιπλέον, όπως και στην περίπτωση του UDP, περιλαμβάνει ένα πεδίο αθροίσματος ελέγχου για τον έλεγχο σφαλμάτων. Τα υπόλοιπα πεδία που θα αναφερθούν στη συνέχεια δεν περιλαμβάνονται στο UDP και χρησιμοποιούνται για την υποστήριξη αξιόπιστης μετάδοσης δεδομένων.

- Το πεδίο *αριθμού ακολουθίας* (*sequence number*) και το πεδίο *αριθμού επιβεβαίωσης* (*Acknowledgment number*) χρησιμοποιούνται από τον αποστολέα και τον παραλήπτη TCP αντίστοιχα. Ο αριθμός ακολουθίας είναι ο αύξων αριθμός του πρώτου byte κάθε τμήματος TCP που μεταδίδεται από τον αποστολέα προς τον παραλήπτη. Αν, για παράδειγμα, μια διεργασία A θέλει να στείλει ένα αρχείο 500.000byte σε μια διεργασία B και κάθε τμήμα περιλαμβάνει 1000byte, τότε το TCP δημιουργεί 500 τμήματα δεδομένων. Επομένως το πρώτο τμήμα δεδομένων θα έχει αριθμό ακολουθίας 0, το δεύτερο 1000, το τρίτο 2000 κοκ. Ο αριθμός επιβεβαίωσης αντιστοιχεί στον αύξοντα αριθμό του πρώτου byte του τμήματος που περιμένει να παραλάβει ο παραλήπτης. Στο προηγούμενο παράδειγμα, ο υπολογιστής B επιστρέφει τον αριθμό επιβεβαίωσης 501 όταν έχει λάβει το πρώτο τμήμα. Στη συνέχεια, ο υπολογιστής A αποστέλλει ένα τμήμα TCP που έχει αριθμό ακολουθίας 501 καθώς αντιστοιχεί στον αύξοντα αριθμό του πρώτου byte του τμήματος που πρέπει να παραδοθεί στον υπολογιστή B. Σε μια σύνδεση TCP, κάθε πλευρά διατηρεί τους δικούς της αριθμούς ακολουθίας και επιβεβαίωσης καθώς οι ρόλοι του αποστολέα και του παραλήπτη εναλλάσσονται διαρκώς. Τα δύο αυτά πεδία είναι πολύ σημαντικά καθώς μέσω αυτών εξασφαλίζεται η επιβεβαίωση λήψης των δεδομένων από κάθε τερματικό, προσδίδοντας έτσι αξιοπιστία στο TCP.
- Το πεδίο *παραθύρου λήψης* (*receive window*) χρησιμοποιείται με στόχο ο παραλήπτης να δηλώσει στον αποστολέα τον αριθμό των byte που προτίθεται να δεχθεί. Αυτό το πεδίο είναι χρήσιμο για την υπηρεσία ελέγχου ροής που παρέχει το TCP, η οποία θα περιγραφεί ακολούθως.
- Το πεδίο *μήκους επικεφαλίδας* (*header length*) καθορίζει το μήκος της επικεφαλίδας TCP σε λέξεις 32bit. Η χρήση αυτού του πεδίου είναι απαραίτητη καθώς η επικεφαλίδα TCP έχει μεταβλητό μήκος λόγω του πεδίου των επιλογών. Στις περισσότερες περιπτώσεις όπου το πεδίο των επιλογών είναι κενό, το μήκος της επικεφαλίδας TCP είναι 20byte.

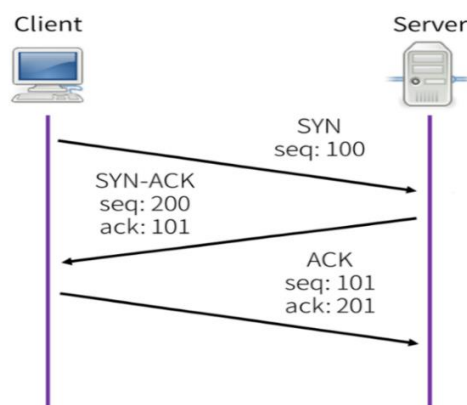


**Σχήμα 4.5** Δομή τμήματος TCP

- Το πεδίο σημαίας (*flag field*) περιέχει 6 bit, καθένα από τα οποία αντιπροσωπεύει ένα υποπεδίο (URG, ACK, PSH, RST, SYN, FIN). Το ACK bit χρησιμοποιείται για να επιβεβαιώσει η μια πλευρά στην άλλη ότι ένα τμήμα λήφθηκε επιτυχώς. Το RST bit χρησιμοποιείται από τον παραλήπτη για να δηλώσει στον αποστολέα ότι έλαβε ένα πακέτο που δεν περίμενε. Ακόμα χρησιμοποιείται από ένα τερματικό στην περίπτωση όπου εντοπίσει κάποιο σφάλμα στη σύνδεση TCP με στόχο την ενημέρωση της άλλης πλευράς μετάδοσης. Το SYN bit χρησιμοποιείται κατά την έναρξη μιας TCP σύνδεσης μεταξύ δύο πλευρών ώστε να επιτευχθεί ο συγχρονισμός τους, ενώ το FIN σηματοδοτεί το τέλος της σύνδεσης και ενημερώνει την άλλη πλευρά ότι δεν υπάρχουν άλλα δεδομένα προς αποστολή. Όταν το PSH bit είναι 1 αποτελεί ένδειξη ότι ο παραλήπτης πρέπει να διοχετεύσει τα δεδομένα στο ανώτερο επίπεδο αμέσως αντί να τα αποθηκεύσει προσωρινά. Τέλος, το URG bit υποδηλώνει ότι τα δεδομένα του συγκεκριμένου τμήματος πρέπει να επεξεργαστούν άμεσα και ότι έχουν προτεραιότητα έναντι άλλων.
- Το προαιρετικό και μεταβλητού μήκους πεδίο επιλογών (*options field*) για τη διαπραγμάτευση μεταξύ αποστολέα και παραλήπτη σχετικά με το μέγιστο μέγεθος MSS.

### 4.2.2.2 Τριπλή Χειραψία

Η *τριπλή χειραψία* (*three-way handshake*) αποτελεί τη διαδικασία εγκατάστασης μιας σύνδεσης TCP ανάμεσα σε δύο τερματικά. Όταν μια διεργασία που εκτελείται σε ένα υπολογιστή (client-πελάτη) θέλει να εκκινήσει μια σύνδεση TCP με μια άλλη διεργασία σε ένα άλλο υπολογιστή (εξυπηρετητής-server), ακολουθείται συγκεκριμένη διαδικασία βημάτων. Συγκεκριμένα, το TCP στην πλευρά του πελάτη αποστέλλει πρώτα ένα τμήμα TCP στον εξυπηρετητή το οποίο δεν περιέχει δεδομένα, ενώ στην επικεφαλίδα του το SYN bit είναι ίσο με 1 και ο αριθμός ακολουθίας είναι ένας τυχαίος αριθμός. Αυτό το τμήμα ουσιαστικά αναφέρεται ως το αίτημα SYN του πελάτη προς τον εξυπηρετητή ή διαφορετικά ως το τμήμα SYN και θεωρείται ότι έχει μέγεθος δεδομένων 1 byte (phantom byte). Μόλις το τμήμα SYN φθάσει στον υπολογιστή του εξυπηρετητή, εκείνος αποστέλλει ένα αίτημα αποδοχής σύνδεσης στον πελάτη, το οποίο ονομάζεται τμήμα SYN-ACK. Το αίτημα αυτό είναι και σε αυτή την περίπτωση ένα τμήμα TCP του οποίου όμως η επικεφαλίδα έχει τα SYN και ACK bits ίσα με 1 και έχει (όπως το τμήμα SYN) μέγεθος δεδομένων 1 byte. Επιπλέον, η επικεφαλίδα αυτού του τμήματος έχει αριθμό επιβεβαίωσης ίσο με την τιμή του αριθμού ακολουθίας του τμήματος SYN προσαυξημένο κατά 1 και αριθμό ακολουθίας ένα τυχαίο αριθμό. Τέλος, ο πελάτης αποστέλλει στον εξυπηρετητή ακόμα ένα τμήμα TCP το οποίο ονομάζεται τμήμα ACK. Στην επικεφαλίδα αυτού, το SYN bit γίνεται 0 ενώ το ACK bit είναι 1. Ο αριθμός ακολουθίας είναι ίσος με τον αριθμό επιβεβαίωσης του τμήματος SYN-ACK που στάλθηκε από τον εξυπηρετητή στον πελάτη, ενώ ο αριθμός επιβεβαίωσης είναι ίσος με την τιμή του αριθμού ακολουθίας του τμήματος SYN-ACK προσαυξημένος κατά 1. Οι τιμές των αριθμών ακολουθίας και επιβεβαίωσης καθορίζονται με βάση τη λογική που περιγράφηκε στην ενότητα 4.2.2.1. Στο Σχ.4.6 απεικονίζεται η διαδικασία της τριπλής χειραψίας ανάμεσα σε ένα πελάτη και ένα εξυπηρετητή. Έπειτα από τη διαδικασία αυτή, θεωρείται ότι έγινε εγκαθίδρυση της σύνδεσης TCP και αρχίζει η ανταλλαγή μηνυμάτων ανάμεσα στις διεργασίες των δύο υπολογιστών.

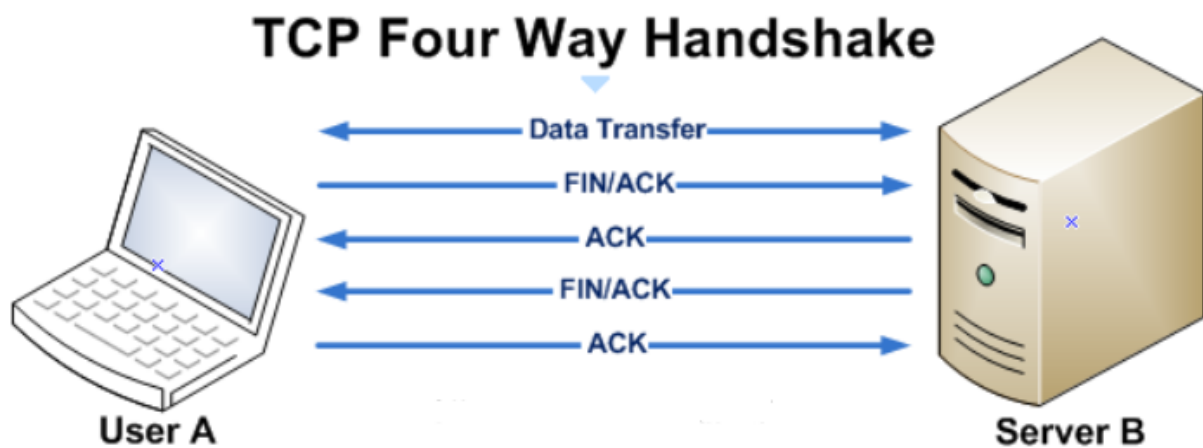


Σχήμα 4.6 Τριπλή χειραψία TCP (οι αριθμοί seq είναι τυχαίοι)

### 4.2.2.3 Τερματισμός σύνδεσης TCP

Όταν ο πελάτης αποφασίσει να τερματίσει τη σύνδεση με τον εξυπηρετητή, όπως και στην περίπτωση εγκατάστασης της σύνδεσης ακολουθείται η σειρά βημάτων που απεικονίζεται στο Σχ.4.7. Αρχικά, ο χρήστης αποστέλλει ένα τμήμα FIN-ACK στον εξυπηρετητή, δηλαδή ένα τμήμα TCP που έχει τα FIN και ACK bits ίσα με 1 και έχει μήκος δεδομένων 1byte (phantom

byte). Η τιμή 1 στο ACK bit υποδεικνύει ότι ο πελάτης έχει λάβει όλα τα δεδομένα από τον εξυπηρετητή με επιτυχία. Στη συνέχεια, ο εξυπηρετητής επιβεβαιώνει το αίτημα του πελάτη αποστέλλοντας ένα τμήμα TCP που έχει το ACK bit ίσο με 1 και δεν περιλαμβάνει δεδομένα. Η ίδια διαδικασία ακολουθείται και από τον εξυπηρετητή, ο οποίος αποστέλλει ένα τμήμα FIN-ACK στον πελάτη και λαμβάνει από αυτόν ένα τμήμα επιβεβαίωσης ACK. Όταν έχει ολοκληρωθεί αυτή η σειρά βημάτων (*χειραψία τεσσάρων βημάτων – four-way handshake*) θεωρείται ότι η σύνδεση TCP έχει ολοκληρωθεί. Πρέπει να σημειωθεί ότι μπορεί και ο εξυπηρετητής να εκκινήσει διαδικασία τερματισμού της σύνδεσης TCP αποστέλλοντας εκείνος πρώτος ένα τμήμα FIN-ACK.

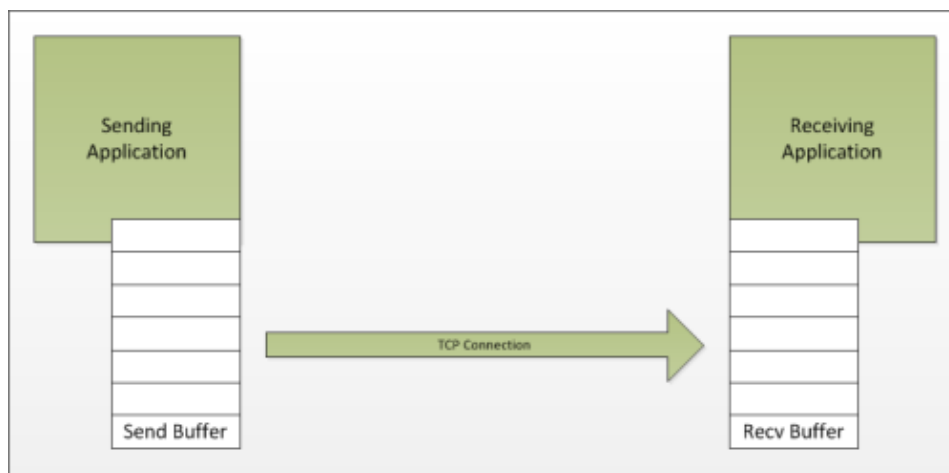


Σχήμα 4.7 Τερματισμός σύνδεσης TCP

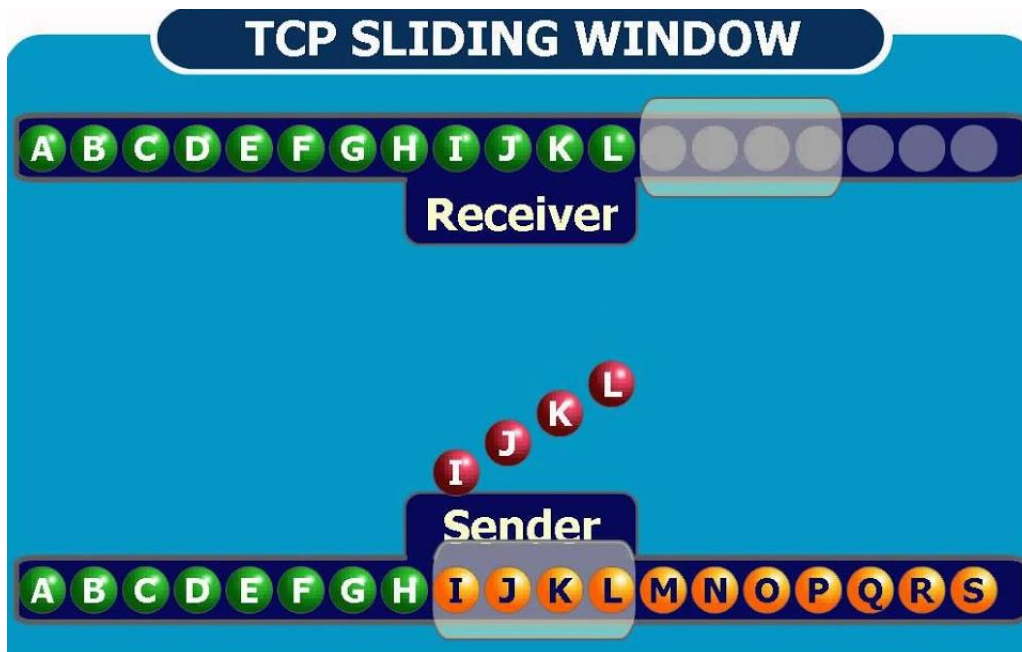
#### 4.2.2.4 Έλεγχος ροής

Ο υπολογιστής κάθε πλευράς μιας σύνδεσης TCP δεσμεύει ένα *ενταμιευτή λήψης* (receive buffer) και ένα *ενταμιευτή αποστολής* (send buffer) όπως απεικονίζεται στο σχήμα 4.8. Ο ενταμιευτής λήψης αποθηκεύει προσωρινά τα ληφθέντα δεδομένα όταν ο υπολογιστής δεν προλαμβάνει να τα επεξεργαστεί με τον ίδιο ή μεγαλύτερο ρυθμό από αυτόν που τα λαμβάνει. Η σχετική διεργασία παραλαμβάνει και επεξεργάζεται τα δεδομένα από τον ενταμιευτή λήψης αλλά όχι απαραίτητα τη χρονική στιγμή που αυτά καταφθάνουν στον παραλήπτη, καθώς μπορεί να είναι απασχολημένη με την επεξεργασία άλλων δεδομένων ή την εκτέλεση άλλης εργασίας. Συνεπώς, στην περίπτωση όπου η εφαρμογή καθυστερήσει την επεξεργασία των δεδομένων που βρίσκονται στον ενταμιευτή λήψης χωρίς να υπάρξει αλλαγή στο ρυθμό λήψης, ο ενταμιευτής λήψης μπορεί να υποστεί υπερχειλίση και να απορρίψει δεδομένα που φθάνουν σε αυτόν. Το TCP παρέχει στις εφαρμογές του την *υπηρεσία ελέγχου ροής* (flow-control service) για να εξαλειφθεί η πιθανότητα εμφάνισης υπερχειλίσης. Ο έλεγχος ροής αποτελεί υπηρεσία μέσω της οποίας επιτυγχάνεται η εξομοίωση της ταχύτητας μετάδοσης του αποστολέα (και συνακόλουθα της ταχύτητας λήψης) με την ταχύτητα επεξεργασίας της εφαρμογής λήψης. Η υπηρεσία αυτή σχετίζεται με το παράθυρο λήψης που διατηρεί κάθε υπολογιστής και το γνωστοποιεί στον επικοινωνούντα μέσω του αντίστοιχου πεδίου στην επικεφαλίδα του τμήματος TCP. Ουσιαστικά, το παράθυρο λήψης χρησιμοποιείται για να πληροφορηθεί ο αποστολέας για το διαθέσιμο αποθηκευτικό χώρο του ενταμιευτή λήψης του παραλήπτη. Συγκεκριμένα, μετά την τριπλή χειραψία οι υπολογιστές που έχουν

εγκαθιδρύσει μια σύνδεση TCP γνωρίζουν το μέγεθος του παραθύρου λήψης του άλλου. Συνεπώς, όταν η διεργασία του ενός θέλει να στείλει δεδομένα στη διεργασία του άλλου προσαρμόζει τη μετάδοση σύμφωνα με το παράθυρο λήψης του υπολογιστή με τον οποίο επικοινωνεί. Ουσιαστικά, ο αποστολέας διατηρεί ένα παράθυρο αποστολής δεδομένων που είναι ίδιο (ή μικρότερο) με το παράθυρο λήψης που του έχει γνωστοποιήσει ο παραλήπτης. Αρχικά, τα δεδομένα ενθυλακώνονται σε πακέτα σύμφωνα με τη δομή των επιπέδων του Διαδικτύου και, στη συνέχεια, διοχετεύονται στον ενταμιευτή αποστολής. Αν ο υπολογιστής λήψης έχει επιβεβαιώσει την παραλαβή των προηγούμενων δεδομένων, τότε εκκινεί η αποστολή της επόμενης ομάδας δεδομένων που βρίσκονται στον ενταμιευτή αποστολής. Σε αντίθετη περίπτωση, τα δεδομένα παραμένουν στον ενταμιευτή αποστολής μέχρι να έλθει η επιβεβαίωση των προηγούμενων δεδομένων. Όταν φθάσει στον αποστολέα η επιβεβαίωση, εκείνη περιλαμβάνει στην επικεφαλίδα το μέγεθος του παραθύρου λήψης, οπότε ο αποστολέας προσαρμόζει ανάλογα το μέγεθος των δεδομένων (σε πακέτα) που θα αποσταλούν. Αυτή η διαδικασία συνεχίζεται μέχρι να τερματιστεί η αποστολή των δεδομένων, με τον παραλήπτη να γνωστοποιεί στις επιβεβαιώσεις, το μέγεθος του παραθύρου λήψης που μπορεί να υποστηρίξει και τον αποστολέα να προσαρμόζεται σε αυτό. Κατά την επικοινωνία τους, ο αποστολέας και ο παραλήπτης διαθέτουν αντίστοιχα παράθυρα αποστολής και λήψης, με το παράθυρο αποστολής να μην υπερβαίνει το παράθυρο λήψης. Όταν ο αποστολέας λαμβάνει επιβεβαίωση για κάποιο τμήμα TCP, τότε μπορεί να στείλει το επόμενο χωρίς να περιμένει να φθάσουν όλες οι επιβεβαιώσεις των τμημάτων TCP που έχουν σταλεί ως τότε, δηλαδή το παράθυρό αποστολής του ολισθαίνει δεξιά κατά μια θέση. Αντίστοιχα, όταν φθάνει ένα τμήμα TCP στον παραλήπτη, εκείνος μπορεί να δεχθεί το επόμενο τμήμα, δηλαδή το παράθυρό του ολισθαίνει προς τα δεξιά κατά μια θέση. Ο μηχανισμός αυτός ονομάζεται *συρόμενο παράθυρο* (*sliding window*) και χρησιμοποιείται για τον έλεγχο του όγκου των δεδομένων που έχουν αποσταλεί αλλά δεν έχουν επιβεβαιωθεί (*in flight*). Στο Σχ.4.9 απεικονίζεται μια σύνδεση TCP ανάμεσα σε έναν αποστολέα και έναν παραλήπτη με μέγεθος παραθύρων αποστολής και λήψης τεσσάρων πακέτων. Ο παραλήπτης έχει ήδη κάνει ολίσθηση του παραθύρου του προς τα δεξιά τέσσερις θέσεις (μια για κάθε τμήμα TCP που παρέλαβε). Ο αποστολέας περιμένει τις αντίστοιχες επιβεβαιώσεις ώστε να κάνει και αυτός ολίσθηση του παραθύρου του προς τα δεξιά (μια θέση για κάθε επιβεβαίωση) και να συνεχίσει την αποστολή των πακέτων. Το μέγεθος του παραθύρου λήψης μπορεί να μεταβάλλεται συνεχώς, ανάλογα με την ταχύτητα επεξεργασίας των δεδομένων από τη διεργασία λήψης και τις αποθηκευτικές δυνατότητες του ενταμιευτή λήψης.



**Σχήμα 4.8** Ενταμιευτής αποστολής και λήψης δύο διεργασιών σε μια σύνδεση TCP

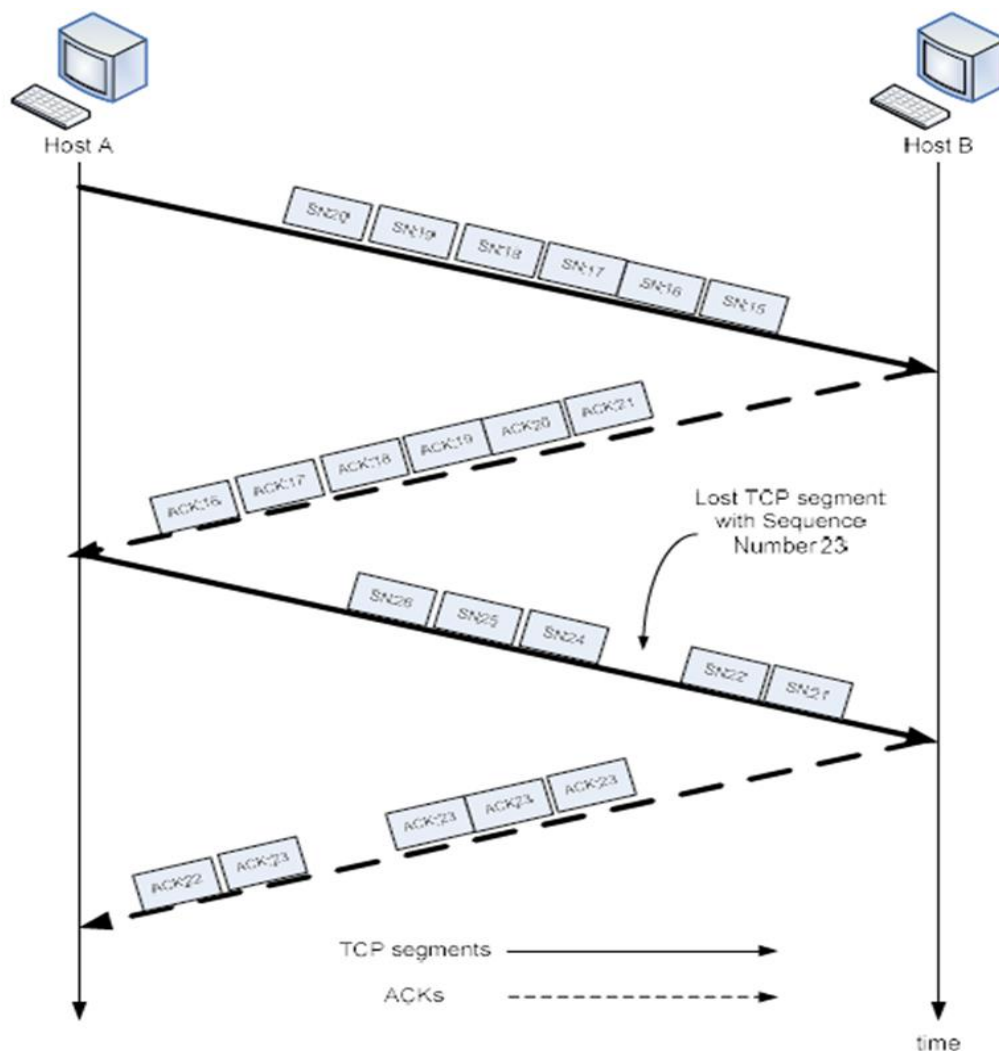


Σχήμα 4.9 Στιγμιότυπο των συρόμενων παραθύρων αποστολέα και παραλήπτη μιας σύνδεσης TCP

#### 4.2.2.5 Αντιμετώπιση σφαλμάτων μετάδοσης

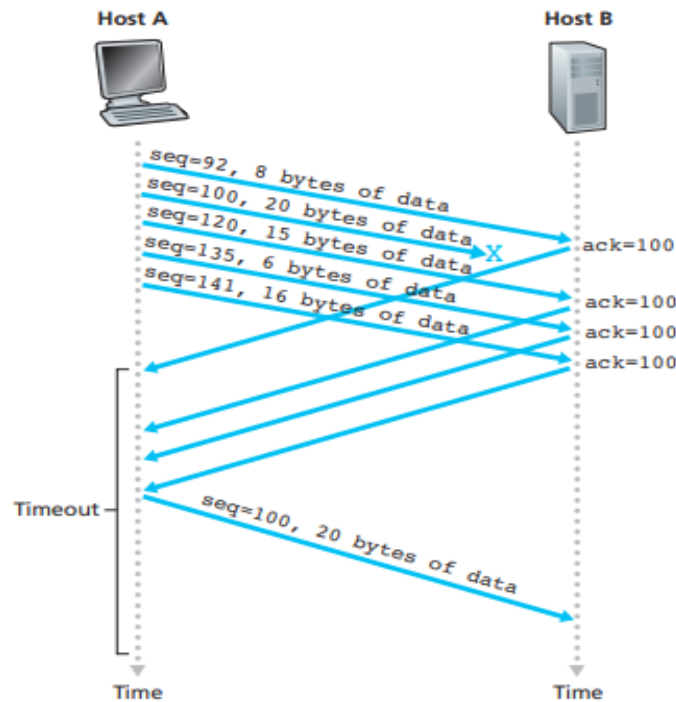
Για την παράδοση των πακέτων με την ορθή σειρά χρησιμοποιούνται οι αριθμοί ακολουθίας και επιβεβαίωσης. Όταν λαμβάνει ένα πακέτο από τον αποστολέα, ο παραλήπτης αποστέλλει στο δεύτερο πακέτο επιβεβαίωσης στο οποίο του υποδεικνύει μέσω του αριθμού επιβεβαίωσης ποιο είναι το επόμενο πακέτο που αναμένει να λάβει. Στην περίπτωση όπου το πακέτο δεν φθάσει στον προορισμό, είτε αυτό είναι πακέτο επιβεβαίωσης είτε πακέτο δεδομένων, αναμεταδίδεται μετά από συγκεκριμένο χρονικό διάστημα (*Retransmission TimeOut – RTO*), ο καθορισμός του οποίου γίνεται έπειτα από εκτιμήσεις του TCP. Αν ένα πακέτο παραληφθεί περισσότερο από μια φορές απορρίπτεται. Στο Σχ.4.10 απεικονίζεται η μετάδοση δεδομένων από ένα υπολογιστή A σε ένα υπολογιστή B και η αντίστοιχη διαδικασία επιβεβαίωσης από το δεύτερο. Στην πρώτη ομάδα πακέτων, ο A αποστέλλει τα πακέτα και μέχρι να στείλει την επόμενη ομάδα, αναμένει την αντίστοιχη επιβεβαίωση από τον B για καθένα από αυτά. Στη δεύτερη ομάδα πακέτων, χάνεται ένα πακέτο κατά την αποστολή του προς τον B. Ο υπολογιστής B λαμβάνει όλα τα άλλα πακέτα και αναγνωρίζει ποιο πακέτο λείπει βάσει του αριθμού ακολουθίας. Συνεπώς, επιβεβαιώνει όλα τα πακέτα που φθάνουν σε αυτόν μέχρι το απολεσθέν πακέτο. Για κάθε πακέτο που λαμβάνει εκτός σειράς (δηλαδή πακέτο που πρέπει να παραδοθεί μετά το απολεσθέν πακέτο), αντί να επιβεβαιώσει τη λήψη του, αποστέλλει αίτημα αναμετάδοσης για το πακέτο που του λείπει, υποθέτοντας ότι αυτό έχει χαθεί. Όταν ο υπολογιστής A λάβει τρεις φορές αίτημα αναμετάδοσης του απολεσθέντος-ανεπιβεβαίωτου πακέτου, πραγματοποιεί επαναποστολή του. Αυτή η διαδικασία ονομάζεται *ταχεία επαναμετάδοση (fast retransmission)*, ένα παράδειγμα της οποίας απεικονίζεται στο Σχ.4.11. Αν και πάλι δεν φθάσει το πακέτο αυτό, ο υπολογιστής B αποστέλλει νέο αίτημα αναμετάδοσής του και η διαδικασία συνεχίζεται μέχρι να καταστεί επιτυχής η παράδοσή του. Όταν όλα τα πακέτα έχουν παραδοθεί στον υπολογιστή B, αυτός ζητεί τη μετάδοση των επόμενων και ουσιαστικά υποδεικνύει στον A ότι ήταν επιτυχημένη η διαδικασία αποστολής

των πακέτων του ακόμα και αν δεν έχει γίνει επιβεβαίωση για κάθε πακέτο χωριστά. Σε νεότερες υλοποιήσεις του TCP χρησιμοποιείται η τεχνική της *επιλεκτικής επιβεβαίωσης* (*selective acknowledgment*) όπου επιβεβαιώνεται η λήψη εκτός σειράς πακέτων, προκειμένου ο αποστολέας να γνωρίζει ποια πακέτα έχουν παραδοθεί. Η τεχνική της ταχείας επαναμετάδοσης εφαρμόζεται και σε υλοποιήσεις της επιλεκτικής επιβεβαίωσης. Ο συνδυασμός των τεχνικών ταχείας αναμετάδοσης και επιλεκτικής επιβεβαίωσης προσφέρει βέλτιστες επιδόσεις σε περιπτώσεις πολλαπλών χαμένων πακέτων. Για την επιλεκτική επιβεβαίωση των πακέτων χρησιμοποιείται μέρος του πεδίου επιλογών της επικεφαλίδας του τμήματος TCP. Πλεονέκτημα της τεχνικής επιλεκτικής επιβεβαίωσης είναι ότι μέσω των επιβεβαιώσεων που λαμβάνει, ο αποστολέας μπορεί να γνωρίζει ποια πακέτα έχουν παραδοθεί στον παραλήπτη καθώς και να υλοποιεί τη διαδικασία ταχείας αναμετάδοσης ταυτόχρονα για περισσότερα του ενός πακέτα.



**Σχήμα 4.10** Αποστολή πακέτων TCP από έναν υπολογιστή A σε έναν υπολογιστή B με και χωρίς απώλεια πακέτου





Σχήμα 4.11 Παράδειγμα ταχείας αναμετάδοσης

#### 4.2.2.6 Έλεγχος συμφόρησης TCP

Ένας από τους σημαντικότερους μηχανισμούς του TCP είναι ο έλεγχος συμφόρησης. Η προσέγγιση που ακολουθείται από το TCP είναι ο καθορισμός του ρυθμού μετάδοσης κάθε αποστολέα με βάση τη συμφόρηση του δικτύου. Για να γίνει αυτό εφικτό, κάθε αποστολέας διατηρεί μια μεταβλητή, το παράθυρο συμφόρησης (*congestion window*), που συμβολίζεται *cwnd*. Ο έλεγχος συμφόρησης διαφοροποιείται από τον έλεγχο ροής που περιγράφηκε προηγουμένως, καθώς ο έλεγχος συμφόρησης αφορά τον αποστολέα ενώ ο έλεγχος ροής τον παραλήπτη. Για να γίνει αντιληπτός ο έλεγχος συμφόρησης, γίνεται η παραδοχή ότι ο ενταμιευτής λήψης είναι τόσο μεγάλος που ο περιορισμός που επιβάλλει το παράθυρο λήψης μπορεί να αγνοηθεί. Συνεπώς, το πλήθος των μη επιβεβαιωθέντων πακέτων στον αποστολέα περιορίζεται αποκλειστικά από το μέγεθος του παραθύρου συμφόρησης, το οποίο συνακόλουθα περιορίζει και το ρυθμό αποστολής δεδομένων. Επομένως, ρυθμίζοντας την τιμή του παραθύρου συμφόρησης, ο αποστολέας ρυθμίζει και το ρυθμό με τον οποίο αποστέλλει δεδομένα στη σύνδεσή του. Ο αποστολέας αντιλαμβάνεται ότι υπάρχει συμφόρηση στη σύνδεση όταν υπάρξει ένα περιστατικό απώλειας, που γίνεται αντιληπτό είτε λόγω λήξης χρόνου (*retransmission timeout*) ενός ανεπιβεβαιωμένου πακέτου είτε λόγω λήξης τριών αιτημάτων αναμετάδοσης ενός πακέτου. Σε περίπτωση συμφόρησης, ένας ή περισσότεροι ενταμιευτές δρομολογητών που μεσολαβούν εντός της σύνδεσης TCP υπερχειλίζουν προκαλώντας την απόρριψη πακέτων, τα οποία προκαλούν μια από τις προαναφερθείσες εκδοχές του περιστατικού απώλειας. Τέτοια περιστατικά υποδεικνύουν στον αποστολέα ότι πρέπει να μειώσει το ρυθμό αποστολής του. Σε αντίθετη περίπτωση, δηλαδή όταν δεν εμφανίζεται ένα περιστατικό απώλειας, θεωρείται ότι δεν υπάρχει συμφόρηση στη σύνδεση. Συγκεκριμένα, όσο ο αποστολέας λαμβάνει επιβεβαιώσεις για τα πακέτα που έχει στείλει, δηλαδή όσο η αποστολή τους θεωρείται επιτυχής, αυξάνει το μέγεθος του παραθύρου συμφόρησης και, συνακόλουθα, το ρυθμό αποστολής του. Ο ρυθμός αύξησης του παραθύρου

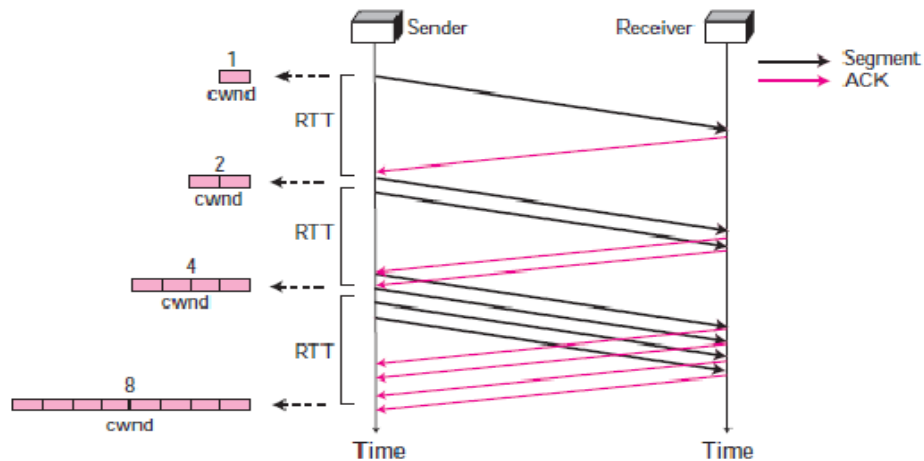
συμφόρησης είναι ανάλογος του ρυθμού με τον οποίο φθάνουν οι επιβεβαιώσεις στον αποστολέα. Όταν παρατηρηθεί ένα περιστατικό απώλειας, αρχίζει η μείωση του ρυθμού μετάδοσης δεδομένων του αποστολέα, όπως θα περιγραφεί στη συνέχεια. Όταν, πλέον, δεν υπάρχουν ενδείξεις για απώλειες πακέτων, ο αποστολέας αρχίζει πάλι να αυξάνει το ρυθμό μετάδοσης και η διαδικασία προσαρμογής του παραθύρου συμφόρησης στην κατάσταση της σύνδεσης επαναλαμβάνεται.

Η ρύθμιση του ρυθμού αποστολής κάθε αποστολέα πρέπει να εξασφαλίζει ότι δεν προκαλεί συμφόρηση στο δίκτυο αλλά ούτε υποχρησιμοποίηση του διαθέσιμου εύρους ζώνης. Και στις δύο περιπτώσεις, οι χρήστες του Διαδικτύου αντιλαμβάνονται υποβαθμισμένη ποιότητα υπηρεσίας. Ο τρόπος ρύθμισης των ταχυτήτων των αποστολέων καθορίζεται βάσει του αλγορίθμου ελέγχου συμφόρησης TCP (*TCP congestion-control algorithm*), ο οποίος αποτελείται από τρία στάδια: την *αργή εκκίνηση* (*slow start*), την *αποφυγή συμφόρησης* (*congestion avoidance*) και την *ταχεία ανάκαμψη* (*fast recovery*). Η αργή εκκίνηση και η αποφυγή συμφόρησης είναι υποχρεωτικά στάδια του TCP και διαφέρουν στον τρόπο αύξησης του παραθύρου συμφόρησης όταν ο αποστολέας λαμβάνει πακέτα επιβεβαίωσης. Η ταχεία ανάκαμψη συστήνεται αλλά δεν είναι υποχρεωτική για αποστολείς TCP.

**Αργή Εκκίνηση:** Όταν εκκινήσει μια σύνδεση TCP, η τιμή του παραθύρου συμφόρησης αρχικοποιείται στην τιμή του ενός MSS, που αντιστοιχεί σε ρυθμό αποστολής δεδομένων ίσο με  $MSS/RTT$ , όπου *RTT* (*Round Trip Time*) ο χρόνος που απαιτείται για την αποστολή ενός πακέτου μέχρι τον παραλήπτη μαζί με το χρόνο που απαιτείται για την άφιξη της επιβεβαίωσής του στον αποστολέα. Όταν φθάσει η επιβεβαίωση στον αποστολέα για το τμήμα που στάλθηκε, το παράθυρο συμφόρησης αυξάνεται κατά ένα MSS. Αυτή η πρακτική συνεχίζεται και ο αποστολέας αυξάνει το παράθυρο συμφόρησης κατά ένα MSS για κάθε επιβεβαίωση που φθάνει σε εκείνον. Στο παράδειγμα του Σχ.4.12, ο αποστολέας αποστέλλει το πρώτο τμήμα TCP στον παραλήπτη και περιμένει επιβεβαίωση. Όταν αυτή φθάσει, ο αποστολέας αυξάνει το παράθυρο συμφόρησης κατά ένα MSS και αποστέλλει δύο τμήματα MSS. Αυτά τα τμήματα επιβεβαιώνονται και ο αποστολέας αυξάνει το παράθυρο συμφόρησης κατά ένα MSS για καθένα από τα επιβεβαιωθέντα τμήματα με αποτέλεσμα το παράθυρο συμφόρησης να αποκτά 4MSS. Συμπερασματικά, η διαδικασία αργής εκκίνησης συντελεί στο διπλασιασμό του ρυθμού αποστολής σε κάθε RTT, δηλαδή προσφέρει εκθετική αύξηση στο παράθυρο συμφόρησης. Η εκθετική αυτή αύξηση του παραθύρου συμφόρησης πραγματοποιείται με στόχο τον ταχύ προσδιορισμό του διαθέσιμου εύρους ζώνης της σύνδεσης.

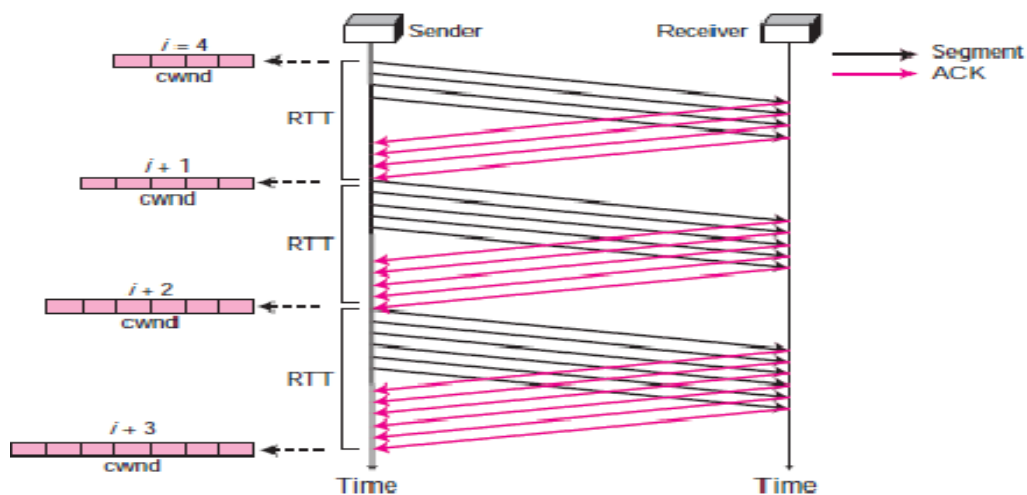
Για τη διακοπή του σταδίου της αργής εκκίνησης υπάρχουν τρεις λόγοι. Αρχικά, ο πρώτος λόγος είναι να υπάρξει κάποια λήξη χρόνου (*retransmission timeout*) ενός ανεπιβεβαίωτου πακέτου. Στην περίπτωση αυτή, ο αποστολέας θέτει την τιμή του παραθύρου συμφόρησης ίση με 1MSS και αρχίζει τη διαδικασία αργής εκκίνησης εκ νέου. Επιπλέον, θέτει την τιμή της μεταβλητής *ssthresh* (*slow start threshold*) ίση με το μισό της τιμής που είχε το παράθυρο συμφόρησης όταν ανιχνεύθηκε η συμφόρηση. Το *ssthresh* αποτελεί το ανώτατο όριο του μεγέθους του παραθύρου συμφόρησης που μπορεί να χρησιμοποιηθεί κατά την αργή εκκίνηση. Ο δεύτερος λόγος σχετίζεται με την τιμή της *ssthresh*. Επειδή η *ssthresh* είναι το μισό του παραθύρου συμφόρησης που είχε ο αποστολέας όταν παρατηρήθηκε συμφόρηση για τελευταία φορά, το TCP θεωρεί ότι είναι ριποκίνδυνο να διπλασιαστεί το παράθυρο συμφόρησης όταν είναι ίσο με *ssthresh*. Συνεπώς, όταν η τιμή του παραθύρου συμφόρησης γίνει ίση με *ssthresh*,

η αργή εκκίνηση τερματίζεται και το TCP μεταπίπτει στη λειτουργία αποφυγής συμφόρησης. Τέλος, η αργή εκκίνηση τερματίζεται όταν ανιχνευθούν τρία αιτήματα αναμετάδοσης ενός πακέτου, οπότε το TCP εκτελεί την ταχεία αναμετάδοση και εισέρχεται στην κατάσταση ταχείας ανάκαμψης. Πριν εισέλθει στην κατάσταση ταχείας ανάκαμψης, θέτει την τιμή του ssthresh ίση με το μισό του τρέχοντος παραθύρου συμφόρησης, ενώ υποδιπλασιάζει την τιμή του παραθύρου συμφόρησης και προσθέτει σε αυτή 3MSS.



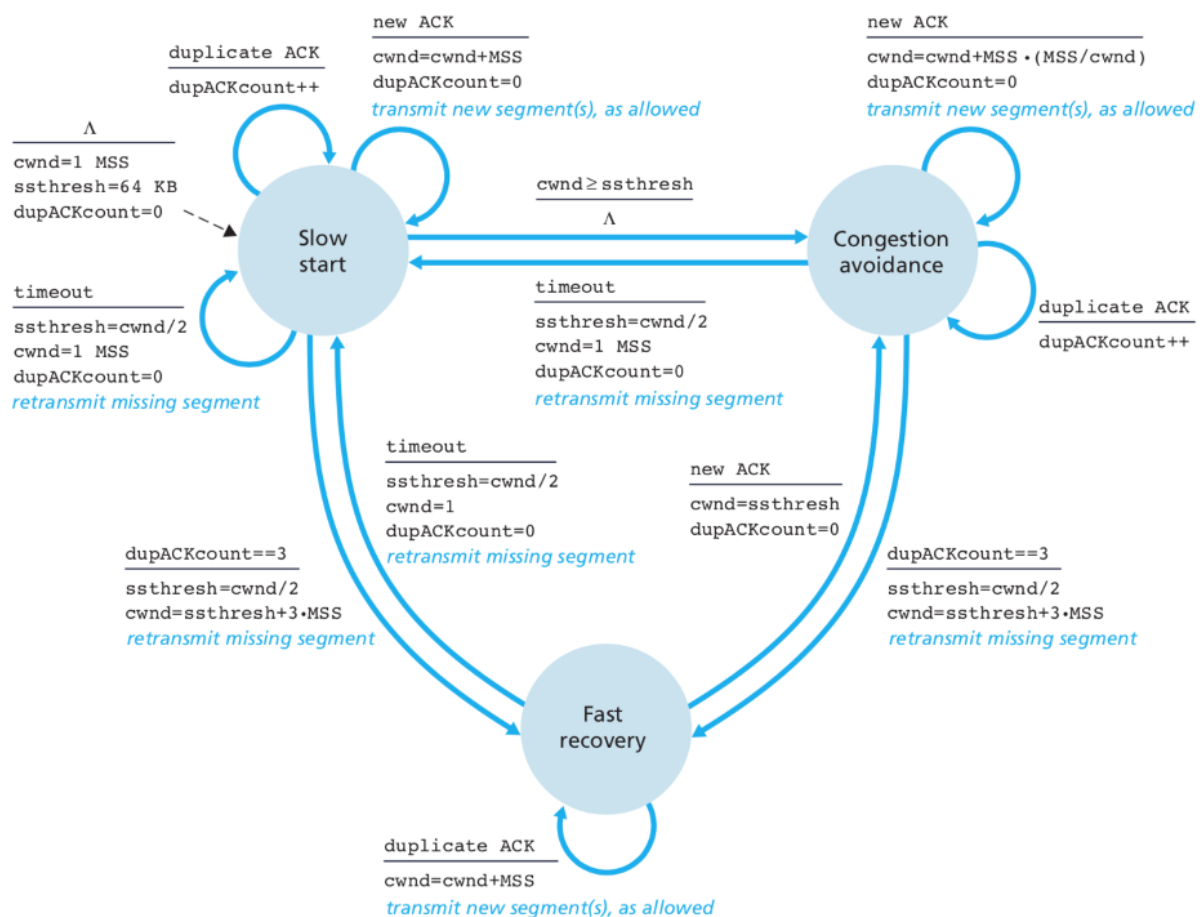
Σχήμα 4.12 Φάση αργής εκκίνησης TCP

**Αποφυγή Συμφόρησης:** Όταν πραγματοποιείται είσοδος στην κατάσταση αποφυγής συμφόρησης, η τιμή του παραθύρου συμφόρησης αντί να διπλασιάζεται, αυξάνεται μόνο κατά ένα MSS σε κάθε RTT (βλ. Σχ.4.13). Ο τερματισμός της κατάστασης αποφυγής συμφόρησης γίνεται όταν λάβει χώρα ένα περιστατικό απώλειας. Όταν συμβεί μια λήξη χρόνου (Retransmission timeout), η συμπεριφορά της κατάστασης αποφυγής συμφόρησης είναι ίδια με αυτή της αργής εκκίνησης. Η τιμή του παραθύρου συμφόρησης τίθεται ίση με 1MSS και η τιμή της ssthresh ίση με το μισό της τιμής του παραθύρου συμφόρησης όταν έλαβε χώρα το περιστατικό απώλειας. Στην περίπτωση όπου φθάσουν στον αποστολέα τρία αιτήματα αναμετάδοσης για ένα ανεπιβεβαίωτο πακέτο, το TCP υποδιπλασιάζει την τιμή του παραθύρου συμφόρησης και προσθέτει σε αυτή 3MSS. Παράλληλα, θέτει την τιμή της ssthresh ίση με το μισό του παραθύρου συμφόρησης όταν λήφθηκαν τα τρία αιτήματα αναμετάδοσης. Κατόπιν, εισέρχεται στην κατάσταση ταχείας ανάκαμψης.



Σχήμα 4.13 Φάση αποφυγής συμφόρησης TCP

**Ταχεία Ανάκαμψη:** Κατά την ταχεία ανάκαμψη, η τιμή του παραθύρου συμφόρησης αυξάνεται κατά 1MSS για κάθε αίτημα επαναποστολής ενός ανεπιβεβαίωτου πακέτου (χωρίς να συμπεριλαμβάνονται τα τρία αιτήματα επαναποστολής που οδήγησαν το TCP στην ταχεία ανάκαμψη). Όταν τελικά φθάσει ένα τμήμα επιβεβαίωσης για το ανεπιβεβαίωτο πακέτο, το TCP εισέρχεται στην κατάσταση αποφυγής συμφόρησης με μέγεθος παραθύρου ίσο με ssthresh. Αν λάβει χώρα ένα περιστατικό λήξης χρόνου ενόσω το TCP βρίσκεται σε φάση ταχείας ανάκαμψης, το TCP μεταπίπτει στην κατάσταση αργής εκκίνησης αφού θέσει την τιμή του παραθύρου συμφόρησης ίσο με 1MSS και του ssthresh ίση με το μισό της τιμής του παραθύρου συμφόρησης όταν ανιχνεύθηκε το περιστατικό λήξης χρόνου. Όπως προαναφέρθηκε, η ταχεία ανάκαμψη είναι μια κατάσταση που συνιστάται αλλά δεν είναι υποχρεωτική. Οι παλαιότερες εκδόσεις του TCP όπως η *TCP Tahoe*, εισέρχονται σε φάση αργής εκκίνησης μετά από ένα περιστατικό απώλειας, ενώ οι νεότερες εκδόσεις του TCP όπως η *TCP Reno*, ενσωμάτωσαν στο TCP την ταχεία ανάκαμψη που μόλις περιγράφηκε.



Σχήμα 4.14 Διάγραμμα καταστάσεων του ελέγχου συμφόρησης TCP

### 4.3 TCP Accelerator

Στο προηγούμενο εδάφιο παρουσιάστηκε το πρωτόκολλο μεταφοράς TCP, το οποίο εξασφαλίζει αξιόπιστη μετάδοση δεδομένων και περιορίζει φαινόμενα συμφόρησης. Ωστόσο, η επίδοση του TCP δεν είναι βελτιστοποιημένη λόγω της μη αποδοτικής χρήσης των τηλεπικοινωνιακών πόρων και τη λανθασμένη αντιμετώπιση που πραγματοποιεί το TCP σε

ορισμένες περιπτώσεις προβλημάτων μετάδοσης στα δίκτυα κινητής τηλεφωνίας. Βελτιστοποιώντας το TCP μέσω της χρήσης του TCP accelerator, οι ISPs μπορούν να βελτιώσουν τη λειτουργία του TCP επιτυγχάνοντας:

- Μείωση του χρόνου προσαρμογής στο διαθέσιμο εύρος ζώνης μετάδοσης
- Αξιοποίηση του διαθέσιμου εύρους ζώνης μετάδοσης
- Ταχεία προσαρμογής στις μεταβολές του εύρους ζώνης μετάδοσης
- Αποδοτική διαχείριση των σφαλμάτων μετάδοσης που οφείλονται είτε σε συμφόρηση είτε σε απώλεια πακέτων

Τα ανωτέρω βελτιώνουν σημαντικά τη λειτουργία του TCP προσφέροντας:

- Αύξηση των ταχυτήτων μετάδοσης δεδομένων
- Μικρότερους και σταθερούς χρόνους RTT
- Μείωση των αναμεταδόσεων
- Βελτιωμένη ποιότητα υπηρεσίας στο χρήστη

### 4.3.1 Βελτιστοποίηση λειτουργίας του TCP

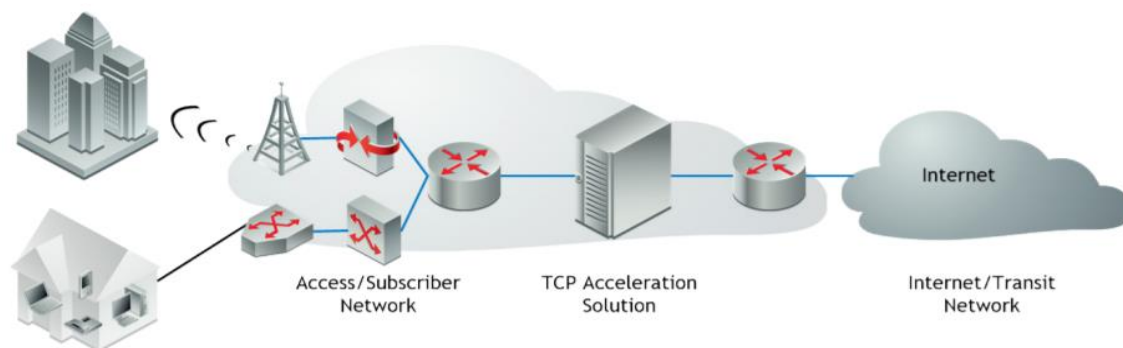
Σε συνδυασμό με την εφαρμογή των αλγορίθμων αποφυγής συμφόρησης, η χρήση του TCP βελτίωσε σημαντικά τη μετάδοση δεδομένων στο Διαδίκτυο. Οι αλγόριθμοι αυτοί προσαρμόζουν τις ταχύτητες μετάδοσης δεδομένων στις εκάστοτε συνθήκες του δικτύου. Ωστόσο, κάθε τεμαχικό μπορεί να χρησιμοποιεί διαφορετικό αλγόριθμο, με αποτέλεσμα τη διαφορετική συμπεριφορά απέναντι στα φαινόμενα συμφόρησης. Επιπλέον, το TCP βασίζει τη λειτουργία του στην υπόθεση ότι η απώλεια πακέτων οφείλεται στη συμφόρηση του δικτύου, το οποίο πράγματι ισχύει στα ενσύρματα δίκτυα αλλά όχι απαραίτητα στα ασύρματα. Η έλλειψη πληροφοριών για το είδος του δικτύου (ενσύρματο, ασύρματο) και για το διαθέσιμο εύρος ζώνης μιας σύνδεσης καθιστά το TCP αργό στις μεταβολές του δικτύου όπως θα αναλυθεί στη συνέχεια. Επομένως, αν και η εξέλιξη του TCP είναι φανερή, υπάρχουν ακόμα περιθώρια βελτίωσης της λειτουργίας του. Στόχος του TCP (και του TCP accelerator) είναι η μετάδοση της μέγιστης ποσότητας δεδομένων που μπορεί να διακινείται στην εκάστοτε σύνδεση TCP χωρίς η ποσότητα αυτή να έχει επιβεβαιωθεί. Αυτή η ποσότητα δεδομένων είναι ίση το γινόμενο του διαθέσιμου εύρους ζώνης (bandwidth) και της καθυστέρησης (RTT) της σύνδεσης και συμβολίζεται με  $BDP$  (*Bandwidth-delay product*), δηλαδή:

$$BDP(bit) = Bandwidth \left( \frac{bit}{sec} \right) \cdot RTT(sec)$$

Εξαιτίας της έλλειψης πληροφοριών περί των χαρακτηριστικών του δικτύου, υπάρχουν περιπτώσεις όπου η ποσότητα δεδομένων που διακινούνται σε μια σύνδεση είναι μικρότερη από το BDP και περιπτώσεις όπου είναι μεγαλύτερη από το BDP. Κάποια χρονική στιγμή για παράδειγμα, είναι ενδεχόμενο το δίκτυο να έχει μεγαλύτερο εύρος ζώνης διαθέσιμο αλλά η διαδικασία προσαρμογής σε αυτό να είναι αργή, οπότε υποχρησιμοποιείται το διαθέσιμο εύρος ζώνης. Παράλληλα, το TCP πραγματοποιεί συντηρητική αντιμετώπιση απέναντι σε απώλειες πακέτων καθώς θεωρεί ότι είναι ενδείξεις συμφόρησης. Αυτό έχει αρνητική επίδραση σε κάποιο συνδρομητή κινητής τηλεφωνίας, ο οποίος λόγω κακής ισχύος λήψης σε μια δεδομένη στιγμή δέχεται μείωση της ταχύτητας μετάδοσής του, η οποία στη συνέχεια καθυστερεί να αυξηθεί μέχρι την τιμή του διαθέσιμου εύρους ζώνης. Αντίστοιχα, υπάρχουν περιπτώσεις όπου

το TCP πραγματοποιεί αποστολή δεδομένων με αυξημένους ρυθμούς που προκαλούν υπερχειλίση των ενταμιευτών στους διάφορους κόμβους του δικτύου. Η υπερχειλίση των ενταμιευτών των διαφόρων κόμβων μπορεί να οφείλεται είτε σε απότομη μείωση του διαθέσιμου εύρους ζώνης είτε σε ξαφνική αποστολή μεγάλου όγκου δεδομένων σε μικρό χρονικό διάστημα (*micro-burst*). Η συσσώρευση δεδομένων στους ενταμιευτές προκαλεί απόρριψη πακέτων, που παρερμηνεύεται από το TCP ως συμφόρηση στο δίκτυο. Συνεπώς, εξαιτίας της υπερχειλίσης των ενταμιευτών λόγω των δύο προαναφερθέντων φαινομένων, μειώνονται οι ταχύτητες μετάδοσης των χρηστών χωρίς να έχει προκληθεί συμφόρηση στο δίκτυο.

Η βελτιστοποίηση της λειτουργίας του TCP παρέχεται μέσω της αξιοποίησης του TCP accelerator, ο οποίος χρησιμοποιείται από τους ISP για τη διαχείριση των συνδέσεων TCP των συνδρομητών τους. Ο TCP accelerator είναι εγκατεστημένος ανάμεσα στα δύο άκρα των συνδέσεων TCP, συγκεκριμένα στο δίκτυο κορμού του ISP (βλ. Σχ.4.15). Η παρεμβολή του στις συνδέσεις TCP των χρηστών παρέχει στον TCP accelerator τη δυνατότητα να επικοινωνεί με τον εξυπηρετητή web εκ μέρους των χρηστών και με τους χρήστες εκ μέρους του εξυπηρετητή, δεδομένου ότι ο TCP accelerator παρακολουθεί και διαχειρίζεται όλη την κίνηση TCP που διέρχεται μέσω αυτού. Στη συνέχεια, παρουσιάζονται οι τρόποι επιτάχυνσης της κίνησης TCP στο Διαδίκτυο από τον TCP accelerator.

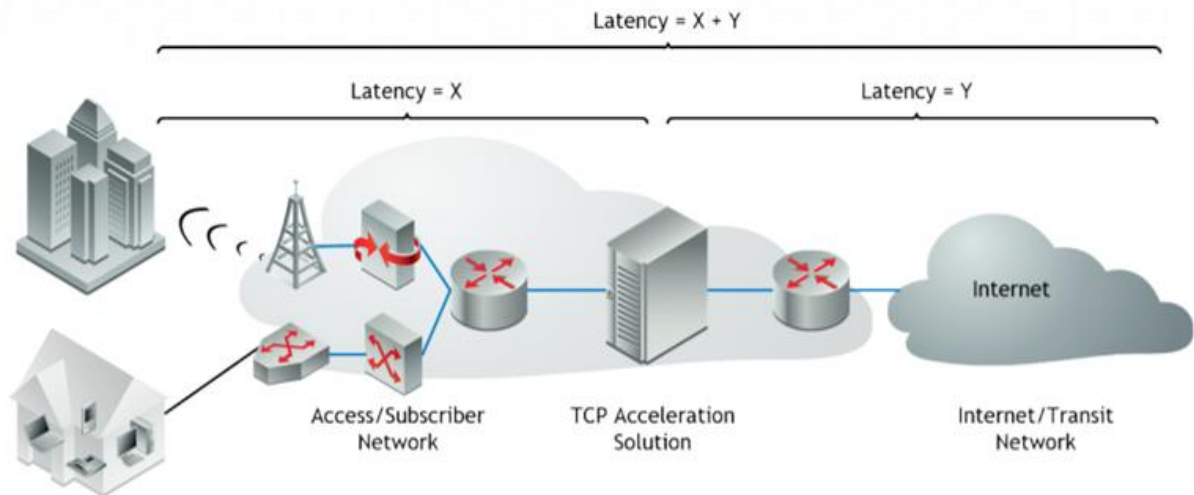


Σχήμα 4.15 Υποδομή δικτύου με εγκατεστημένο TCP accelerator

### Μείωση του χρόνου προσαρμογής στο διαθέσιμο εύρος ζώνης

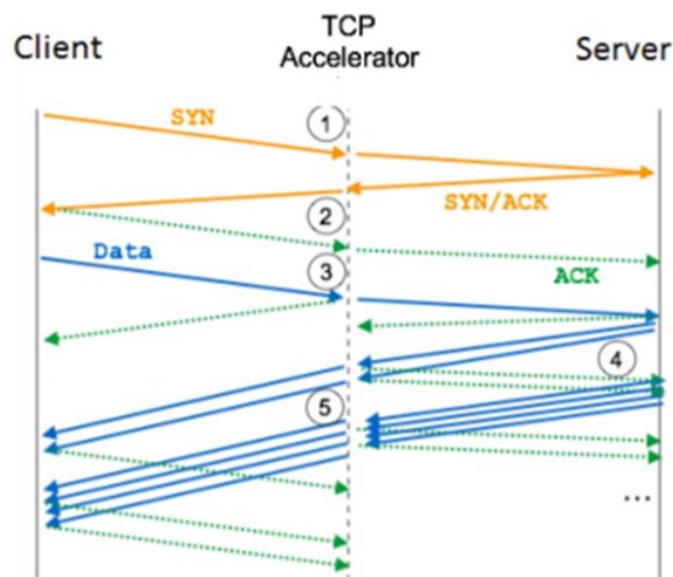
Επειδή το TCP δεν γνωρίζει τα χαρακτηριστικά μιας σύνδεσης TCP και προκειμένου να εκτιμήσει το διαθέσιμο εύρος ζώνης, εφαρμόζει τη διαδικασία αργής εκκίνησης. Μέσω αυτής, επιχειρείται η εκτίμηση του BDP στην εκάστοτε σύνδεση TCP, ύστερα από επαναλαμβανόμενες εκθετικές αυξήσεις των ρυθμών μετάδοσης δεδομένων. Αυτές οι αυξήσεις διακόπτονται είτε όταν ανιχνευτεί απώλεια πακέτου, είτε όταν το παράθυρο λήψης του χρήστη περιορίσει το ρυθμό μετάδοσης είτε όταν το παράθυρο συμφόρησης φθάσει στην τιμή *ssthresh*. Όταν εμφανιστεί ένα περιστατικό απώλειας ερμηνεύεται από το TCP ως ένδειξη συμφόρησης στο δίκτυο. Όπως έχει ήδη αναλυθεί, η υπόθεση αυτή δεν είναι πάντα ορθή, ιδιαίτερα στα ασύρματα δίκτυα. Στα ασύρματα δίκτυα, η καθυστέρηση είναι αρκετά μεγαλύτερη σε σχέση με τα ενσύρματα και ο χρόνος προσαρμογής στο διαθέσιμο εύρος ζώνης είναι καθοριστικός για την ποιότητα υπηρεσίας των χρηστών. Η χρήση του TCP accelerator συμβάλλει στη μείωση του χρόνου αυτού μέσω του διαχωρισμού της TCP σύνδεσης σε δύο τμήματα, ένα μεταξύ χρήστη και TCP accelerator και ένα μεταξύ TCP accelerator και Διαδικτύου (βλ. Σχ.4.16). Αυτός ο διαχωρισμός αποσκοπεί στην ανεξαρτητοποίηση των δύο

πλευρών και τη βελτιστοποίηση της επίδοσής τους ξεχωριστά από τον TCP accelerator, όπως θα αναλυθεί στη συνέχεια.



**Σχήμα 4.16** Διαχωρισμός της καθυστέρησης μιας TCP σύνδεσης από τον TCP accelerator

Για τον ταχύτερο καθορισμό του εύρους ζώνης των TCP συνδέσεων, ο TCP accelerator επιταχύνει τη διαδικασία αργής εκκίνησης μέσω της μείωσης του χρόνου επιβεβαίωσης των πακέτων. Με την παρέμβαση του TCP accelerator, η διαδικασία αργής εκκίνησης τροποποιείται όπως φαίνεται στο Σχ.4.17.

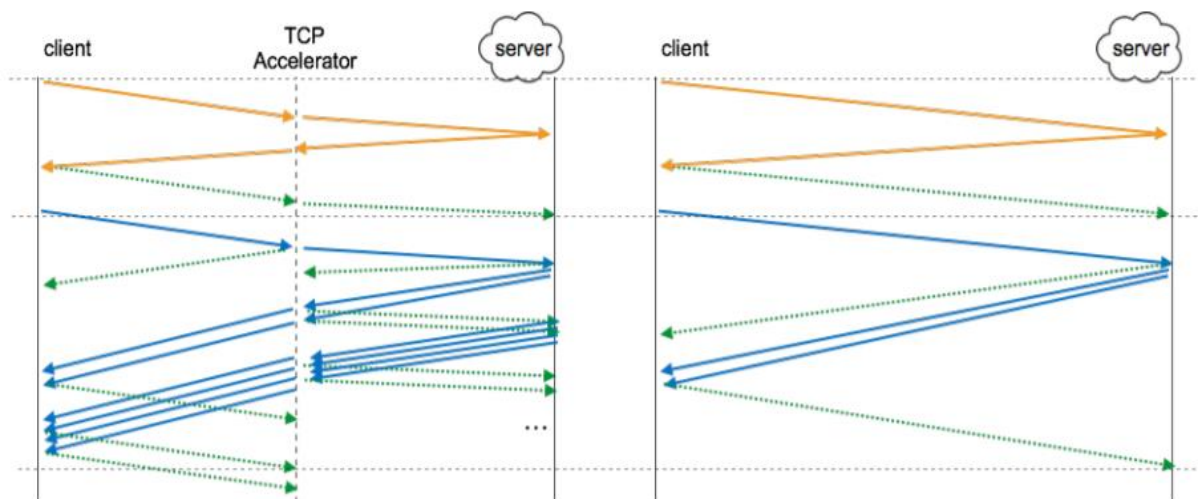


**Σχήμα 4.17** Επιτάχυνση της φάσης αργής εκκίνησης TCP

Αρχικά, ο TCP accelerator παρακολουθεί τη διαδικασία τριπλής χειραψίας ανάμεσα στον χρήστη και τον εξυπηρετητή, προωθώντας τα πακέτα που φθάσουν σε εκείνον στην αντίστοιχη πλευρά (1-2). Μόλις ολοκληρωθεί η διαδικασία αυτή, η σύνδεση έχει εγκατασταθεί και ο TCP accelerator έχει όλες τις απαραίτητες πληροφορίες για να αντιπροσωπεύει τον χρήστη στην επικοινωνία του με τον εξυπηρετητή και αντίστροφα. Συνεπώς, ο TCP accelerator μπορεί να επιβεβαιώνει τη λήψη δεδομένων εκ μέρους του παραλήπτη, είτε αυτός είναι ο χρήστης είτε αυτός είναι ο εξυπηρετητής (3). Τα πακέτα επιβεβαίωσης δημιουργούνται στον TCP

accelerator και περιέχουν στην επικεφαλίδα πληροφορίες διαμορφωμένες από εκείνον (πχ παράθυρο λήψης, αριθμοί ακολουθίας κλπ). Επιπλέον, το πακέτο δεδομένων που αποστέλλεται από το χρήστη στο σημείο αναφοράς (3), προωθείται στον εξυπηρετητή αφού αποθηκευτεί προσωρινά στον ενταμιευτή του TCP accelerator. Η προσωρινή αποθήκευση των ανεπιβεβαιωτών πακέτων πραγματοποιείται καθώς μπορεί να χρειαστεί η αναμετάδοσή τους, η οποία στην περίπτωση αυτή θα γίνει με πολύ μικρότερη καθυστέρηση σε σχέση με την αναμετάδοσή τους από τον εξυπηρετητή. Καθώς οι επιβεβαιώσεις φθάνουν ταχύτερα στον αποστολέα, πυροδοτούν την αποστολή δεδομένων με μεγαλύτερο ρυθμό (4), οπότε η διαδικασία της αργής εκκίνησης επιταχύνεται σημαντικά. Η αποστολή δεδομένων μπορεί να γίνεται ενώ δεν έχει επιβεβαιωθεί η λήψη των προηγούμενων πακέτων (5), καθώς ο TCP accelerator διαθέτει αρκετά μεγάλο παράθυρο συμφόρησης για να προσεγγίζει το διαθέσιμο εύρος ζώνης.

Στο Σχ.4.18 απεικονίζεται η σύγκριση της διαδικασίας αργής εκκίνησης με και χωρίς τη συμβολή του TCP accelerator.

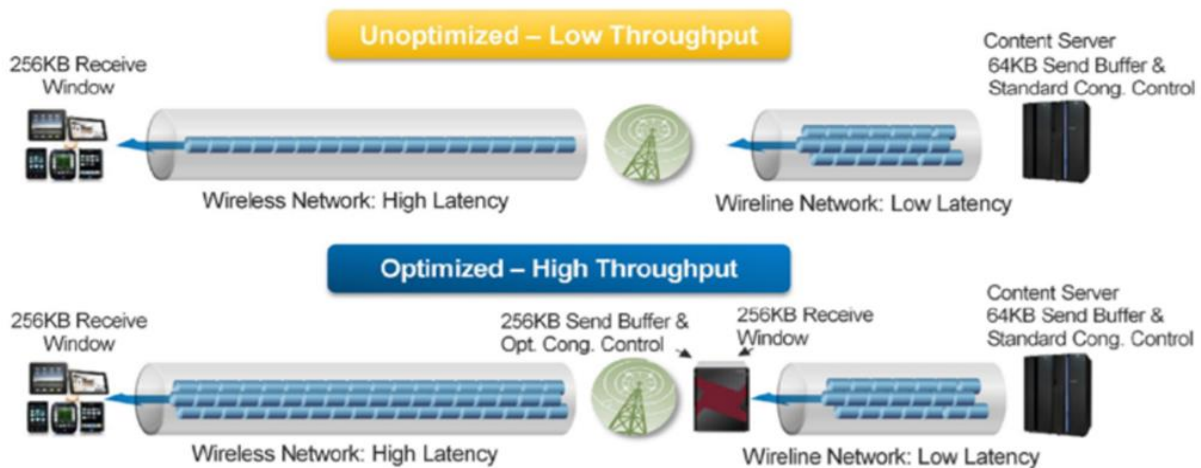


**Σχήμα 4.18** Σύγκριση της διαδικασίας αργής εκκίνησης με και χωρίς τον TCP accelerator

Στα ενσύρματα δίκτυα, η συνεισφορά του TCP accelerator είναι σημαντική αλλά όχι καθοριστική. Τα ενσύρματα δίκτυα χαρακτηρίζονται από μικρή καθυστέρηση, σταθερό εύρος ζώνης ενώ η κυριότερη αιτία απώλειας πακέτων είναι η συμφόρηση στο δίκτυο. Τα παράθυρα συμφόρησης των εξυπηρετητών web είναι συνήθως μικρά, ενώ τα παράθυρα λήψης των τερματικών είναι αρκετά μεγαλύτερα. Επομένως, στα ενσύρματα δίκτυα, η ασυμφωνία μεταξύ των παραθύρων συμφόρησης (εξυπηρετητή) και λήψης (τερματικών) δεν επηρεάζει σημαντικά τη μετάδοση δεδομένων λόγω των ικανοποιητικών συνθηκών μετάδοσης. Αντίθετα, τα ασύρματα δίκτυα χαρακτηρίζονται από υψηλή καθυστέρηση, μεταβλητό εύρος ζώνης ενώ η απώλεια πακέτων μπορεί να οφείλεται σε συμφόρηση του δικτύου, στη χαμηλή ισχύ λήψης στο δέκτη και σε συμφόρηση στην κυψέλη. Χωρίς την παρεμβολή του TCP accelerator, η ασυμφωνία μεταξύ του παραθύρου συμφόρησης των εξυπηρετητών web (μικρά παράθυρα) και του παραθύρου λήψης των τερματικών (μεγάλα παράθυρα) έχει ως αποτέλεσμα την υποβαθμισμένη ποιότητα υπηρεσίας, ιδιαίτερα στην περίπτωση εφαρμογών video streaming όπου απαιτείται υψηλός ρυθμός λήψης δεδομένων και χαμηλή καθυστέρηση. Ο TCP accelerator επιτυγχάνει τη βελτιστοποίηση και των δύο πλευρών μετάδοσης (ασύρματα και ενσύρματα) και εξομοιώνει τα παράθυρα συμφόρησης και λήψης σε κάθε πλευρά. Συνεπώς, η



λήψη δεδομένων στο χρήστη γίνεται με υψηλότερο ρυθμό και η αρνητική επίδραση της αυξημένης καθυστέρησης και του μεταβλητού εύρους ζώνης περιορίζεται σημαντικά. Στο Σχ.4.19 παρουσιάζεται σχηματικά η συμβολή του TCP accelerator στη μετάδοση δεδομένων στα ασύρματα δίκτυα.



Σχήμα 4.19 Συμβολή του TCP accelerator στην αύξηση των ρυθμών λήψης στα ασύρματα δίκτυα

#### Διατήρηση του διαθέσιμου εύρους ζώνης

Όταν η ταχύτητα μετάδοσης του εξυπηρετητή web –ταχύτητα που καθορίζεται από το μέγεθος του παραθύρου συμφόρησης– που επικοινωνεί με το χρήστη φθάσει το διαθέσιμο εύρος ζώνης, η τιμή της πρέπει να διατηρηθεί, εφόσον υποστηρίζεται από το δίκτυο. Η διατήρηση του εύρους ζώνης αποσκοπεί στην καλύτερη δυνατή αξιοποίηση των διαθέσιμων τηλεπικοινωνιακών πόρων και στην παροχή βέλτιστης ποιότητας υπηρεσίας του χρήστη. Ωστόσο, οι αλγόριθμοι συμφόρησης του TCP αποδίδουν την απώλεια πακέτων σε συμφόρηση στο δίκτυο, συσχέτιση που δεν είναι πάντα ορθή. Συνέπεια αυτής της εσφαλμένης θεώρησης είναι η μείωση του παραθύρου συμφόρησης του εξυπηρετητή που συνακόλουθα προκαλεί μειωμένες ταχύτητες λήψης στους χρήστες. Οι πλέον συνηθισμένες αιτίες μειωμένων ρυθμών λήψης είναι η καθυστέρηση λόγω της ταξινόμησης των πακέτων στην ορθή σειρά στο τερματικό (*packet re-ordering*), η διακύμανση της καθυστέρησης που υπεισέρχεται σε κάθε πακέτο (*jitter*) και ο τερματισμός λήψης δεδομένων λόγω μεταπομπής του τερματικού. Παράλληλα, η απώλεια πακέτων που οφείλεται στην ξαφνική αποστολή μεγάλου όγκου δεδομένων σε μικρό χρονικό διάστημα (*micro-burst*) προκαλεί μειωμένους ρυθμούς λήψης στους χρήστες. Ο TCP accelerator διασφαλίζει ότι ο εξυπηρετητής web δεν θα μειώσει το παράθυρο συμφόρησής του. Επίσης, όταν αυτό συμβεί λόγω απώλειας πακέτων, θα συμβάλει στην ταχύτερη αύξηση της ταχύτητας αποστολής. Συγκεκριμένα, ο TCP accelerator εντοπίζει τα περιστατικά που συνδέονται (λανθασμένα) με συμφόρηση και παρεμποδίζει το TCP από το να δράσει περιοριστικά στους ρυθμούς μετάδοσης του αποστολέα. Επομένως, μειώνονται οι άσκοπες αναμεταδόσεις πακέτων ώστε το σύνολο των αναμεταδόσεων να προσεγγίζει ικανοποιητικά το σύνολο των απολεσθέντων πακέτων.

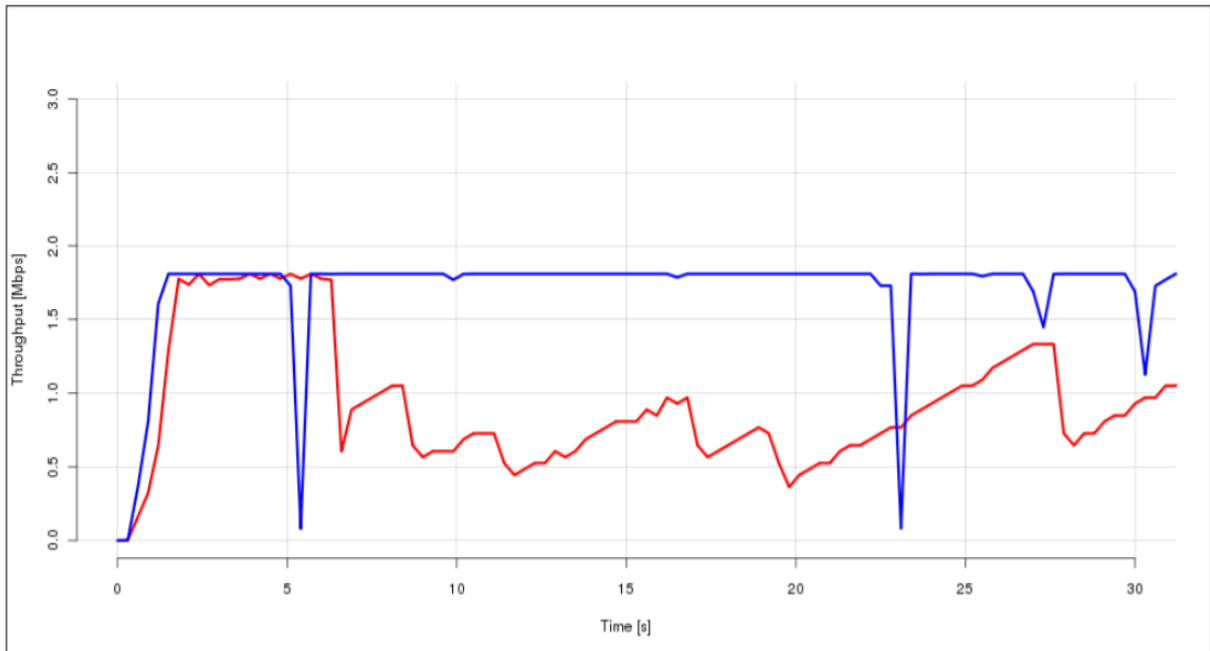
## Ταχεία προσαρμογή σε αλλαγές του διαθέσιμου εύρους ζώνης

Η μεταβλητότητα του διαθέσιμου εύρους ζώνης που παρατηρείται κατά κύριο λόγο στα ασύρματα δίκτυα και η αργή προσαρμογή του TCP στις αλλαγές του εύρους ζώνης καθιστά τη συμβολή του TCP accelerator επιτακτική. Για παράδειγμα, όταν το διαθέσιμο εύρος ζώνης μειώνεται, ο αποστολέας πρέπει άμεσα να μειώσει τους ρυθμούς αποστολής του, προς αποφυγή σφαλμάτων μετάδοσης. Αντίθετα, όταν το διαθέσιμο εύρος ζώνης αυξηθεί, ο αποστολέας πρέπει, εφόσον αυτό είναι απαραίτητο για την παροχή της καλύτερης δυνατής ποιότητας υπηρεσίας στο χρήστη, να το χρησιμοποιήσει αμέσως. Ο TCP accelerator, έχοντας γνώση της κατάστασης του δικτύου μέσω των μετρήσεων που πραγματοποιεί στις συνδέσεις των χρηστών, μπορεί να συμβάλει στην υλοποίηση των δύο προαναφερθεισών διαδικασιών. Ο ρυθμός με τον οποίο ο TCP accelerator λαμβάνει τις επιβεβαιώσεις του χρήστη είναι μια ένδειξη για το εκτιμώμενο εύρος ζώνης στη σύνδεσή του. Έτσι, ανάλογα με το ρυθμό άφιξης των επιβεβαιώσεων σε εκείνον, ο TCP accelerator καθορίζει το ρυθμό αποστολής δεδομένων στο χρήστη και τον προσαρμόζει σε αλλαγές του διαθέσιμου εύρους ζώνης.

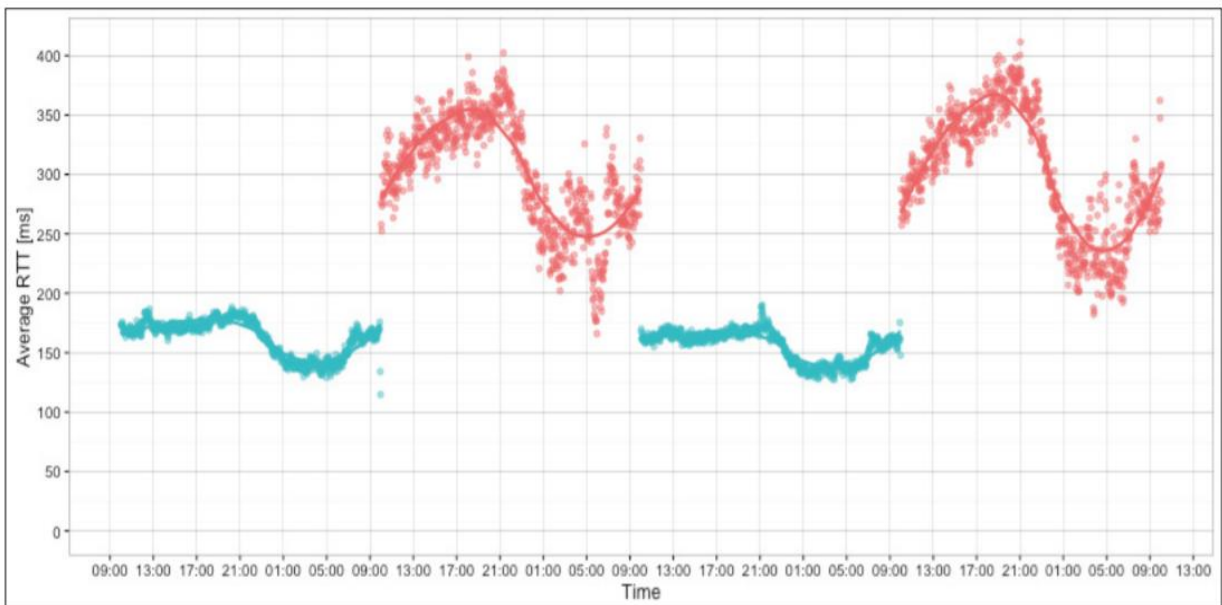
## Αλγόριθμοι συμφόρησης

Ο TCP accelerator μπορεί να διαθέτει διαφορετικούς αλγορίθμους ελέγχου συμφόρησης και να εφαρμόζει αυτούς κατά περίπτωση. Οι πλέον διαδεδομένοι αλγόριθμοι ελέγχου συμφόρησης εκτός από αυτόν που χρησιμοποιείται στην έκδοση του TCP Reno είναι οι *Westwood+*, *BIC* και *CUBIC*. Ο *Westwood+* πραγματοποιεί εκτίμηση του εύρους ζώνης από άκρο σε άκρο και καθορίζει ανάλογα το παράθυρο συμφόρησης και το *ssthresh* μετά από ένα περιστατικό απώλειας. Η χρήση του *Westwood* βελτιώνει αυξάνει σημαντικά τη χωρητικότητα, τόσο στα ασύρματα όσο και στα ενσύρματα δίκτυα. Ο *BIC* βελτιώνει σημαντικά την επίδοση δικτύων υψηλής χωρητικότητας που εμφανίζουν υψηλή καθυστέρηση. Η λειτουργία του *BIC* βασίζεται στην εύρεση του μέγιστου παραθύρου συμφόρησης πραγματοποιώντας αυξήσεις σε αυτό κάνοντας χρήση του αλγορίθμου δυαδικής αναζήτησης. Τέλος, στον αλγόριθμο *CUBIC*, το παράθυρο συμφόρησης αυξάνεται με κυβικό ρυθμό μετά από περιστατικό συμφόρησης για να φθάσει στην τιμή που είχε πριν. Όταν επιτευχθεί αυτό, η αύξηση του παραθύρου συμφόρησης συνεχίζεται με αργούς ρυθμούς για ένα μικρό χρονικό διάστημα, ενώ ακολούθως επιταχύνεται. Οι αργοί ρυθμοί αύξησης του παραθύρου συμφόρησης οφείλονται στο ότι η τιμή του παραθύρου συμφόρησης είναι ίση με αυτή που είχε όταν συνέβη το περιστατικό συμφόρησης την τελευταία φορά. Επομένως, με αυτό τον τρόπο διερευνάται αν μπορεί να αυξηθεί το παράθυρο συμφόρησης πέρα από αυτή την τιμή.

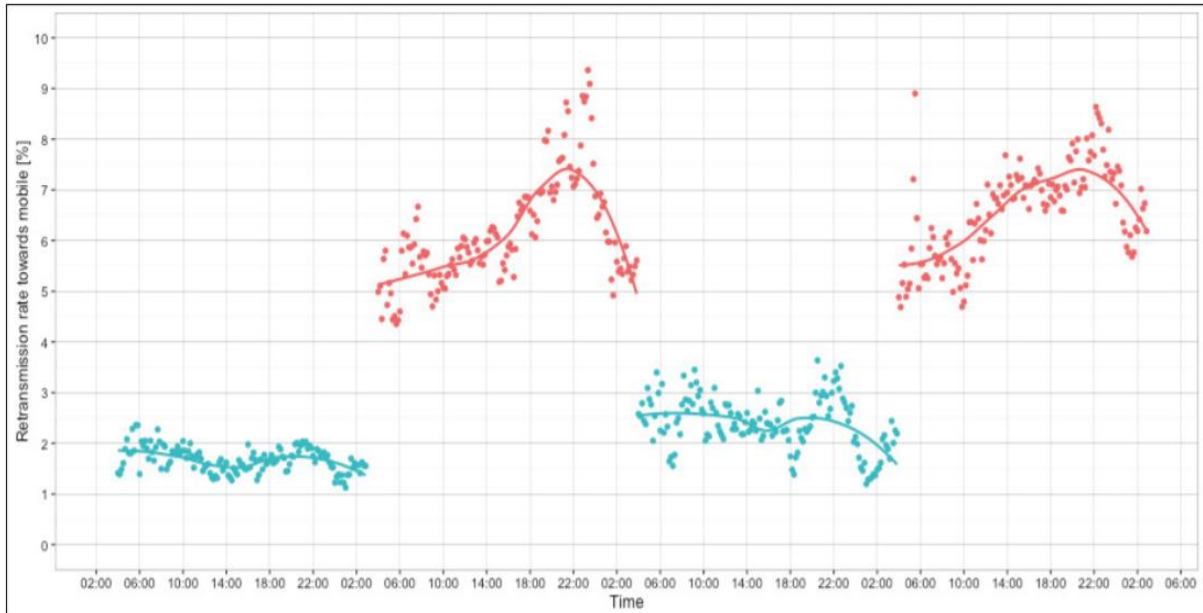
Στα διαγράμματα των Σχ. 4.20, 4.21 και 4.22 πραγματοποιείται σύγκριση των ταχυτήτων λήψης, των χρόνων RTT και του ποσοστού αναμεταδόσεων σε μια σύνδεση TCP με ενεργοποιημένο (μπλε χρώμα) και απενεργοποιημένο (κόκκινο χρώμα) τον TCP accelerator. Τα αποτελέσματα είναι εμφανώς καλύτερα στην περίπτωση όπου έχει ενεργοποιηθεί ο TCP accelerator.



**Σχήμα 4.20** Ταχύτητα λήψης δεδομένων με ενεργοποιημένο (μπλε) και απενεργοποιημένο (κόκκινο) TCP accelerator



**Σχήμα 4.21** Μέσοι χρόνοι RTT με ενεργοποιημένο (μπλε) και απενεργοποιημένο (κόκκινο) TCP accelerator



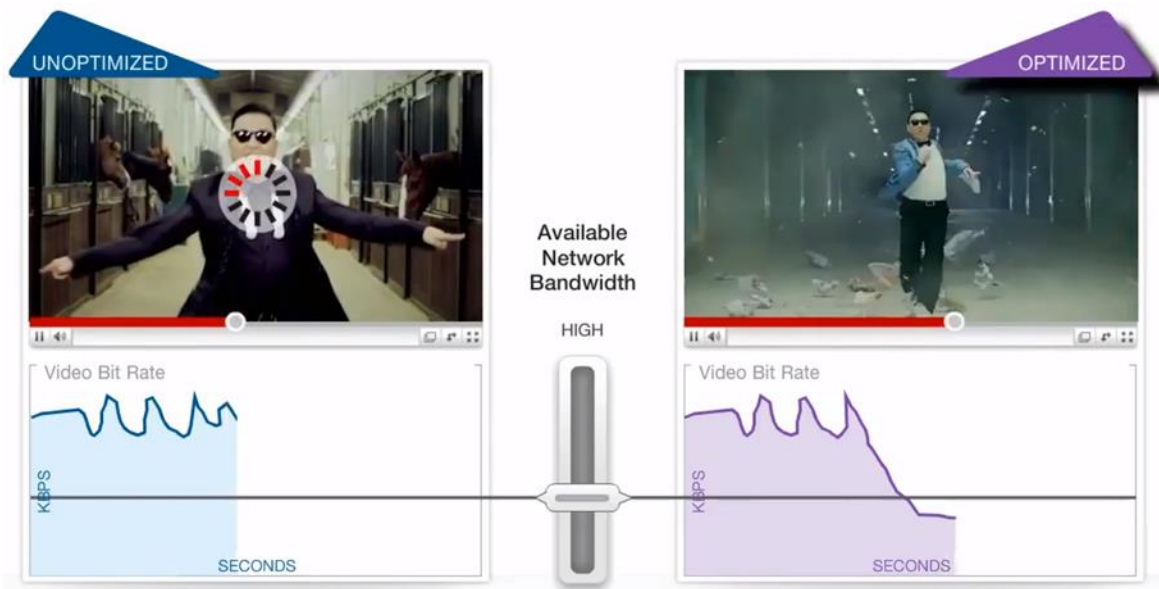
**Σχήμα 4.22** Ποσοστό επαναμεταδόσεων με ενεργοποιημένο (μπλε) και απενεργοποιημένο (κόκκινο) TCP accelerator

### 4.3.2 Βελτίωση άλλων εφαρμογών

Εκτός από την επιτάχυνση των προαναφερθεισών διαδικασιών του TCP, ο TCP accelerator συμβάλλει και στη βελτίωση της λειτουργίας ορισμένων διαδικτυακών εφαρμογών:

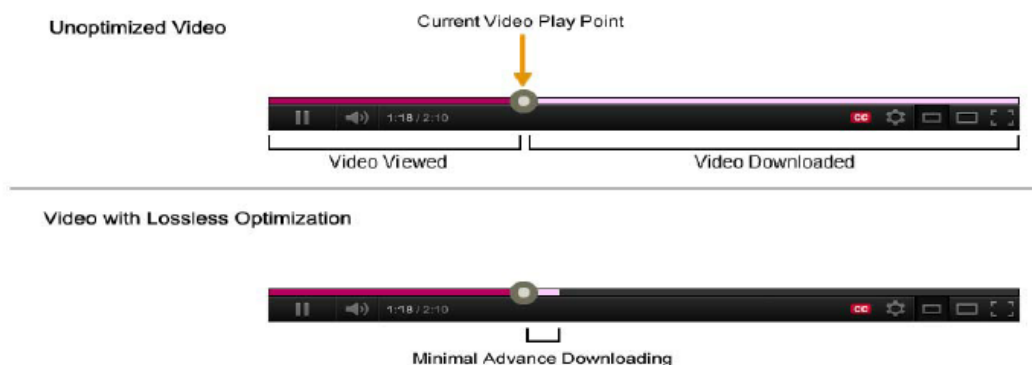
#### Βελτιστοποίηση Video

Η μεταφόρτωση video αποτελεί μια από τις πλέον συνηθισμένες και δημοφιλείς εφαρμογές που χρησιμοποιούν οι τηλεπικοινωνιακοί χρήστες. Ωστόσο, τα video χαρακτηρίζονται από υψηλό όγκο δεδομένων, ιδιαίτερα εκείνα που είναι υψηλής ανάλυσης. Συνεπώς, η ταυτόχρονη μεταφόρτωση video από πολυάριθμους χρήστες μπορεί να προκαλέσει συμφόρηση στο δίκτυο και μειωμένη ποιότητα υπηρεσίας για το μεγαλύτερο ποσοστό αυτών. Ο TCP accelerator εφαρμόζει συγκεκριμένες διαδικασίες για τη μείωση της συμφόρησης δεδομένων στο δίκτυο και για την αποφυγή κατασπατάλησης του διαθέσιμου εύρους ζώνης από κάποιους χρήστες έναντι άλλων. Αρχικά, ο TCP accelerator κωδικοποιεί εκ νέου το video (που έχει ήδη κωδικοποιηθεί από τον εξυπηρετητή σε υψηλούς ρυθμούς μετάδοσης) σε κατάλληλους ρυθμούς μετάδοσης προσαρμοσμένους στις δυνατότητες της οθόνης του εκάστοτε χρήστη, χωρίς να μειωθεί η ποιότητα του αρχικού video. Αυτή η τεχνική ονομάζεται *Quality Aware Transcoding (QAT)*. Επιπλέον, ο TCP accelerator προσαρμόζει το ρυθμό λήψης των χρηστών στο διαθέσιμο εύρος ζώνης. Συγκεκριμένα και ιδιαίτερα στα ασύρματα δίκτυα όπου το εύρος ζώνης είναι μεταβλητό, η αποστολή δεδομένων από τον εξυπηρετητή video με σταθερούς ρυθμούς μετάδοσης δεν αποτελεί βέλτιστη τακτική. Χρησιμοποιώντας την τεχνική *Dynamic Bandwidth Shaping (DBS)*, ο TCP accelerator παρεμβαίνει στην επικοινωνία μεταξύ εξυπηρετητών video και χρηστών και προσαρμόζει το ρυθμό αποστολής στο ρυθμό λήψης που μπορεί να υποστηρίξουν οι χρήστες, χωρίς να μεταβάλλει (εφόσον δεν απαιτείται) την ποιότητα του video.



Σχήμα 4.23 Τεχνική *Dynamic Bandwidth Shaping (DBS)*

Στο Σχ.4.23 απεικονίζεται ένα στιγμιότυπο μεταφόρτωσης video με (δεξιά) και χωρίς (αριστερά) τη χρήση του TCP accelerator. Διαπιστώνεται ότι στην περίπτωση χρήσης του TCP accelerator, ο ρυθμός λήψης του video προσαρμόζεται στο διαθέσιμο εύρος ζώνης (το οποίο έχει μειωθεί) ώστε να μην παρατηρούνται διακοπές στη μεταφόρτωση του video (stalls). Αντίθετα, χωρίς τη συμβολή του TCP accelerator, η μεταφόρτωση video διακόπτεται καθώς ο ρυθμός λήψης του video παραμένει ίδιος, χωρίς να προσαρμόζεται στη μείωση του διαθέσιμου εύρους ζώνης. Τέλος, μέσω της τεχνικής *Just-In-Time (JIT)*, ο TCP accelerator εξασφαλίζει ότι έχει προηγηθεί η λήψη συγκεκριμένου ποσοστού του video πριν το χρονικό σημείο παρακολούθησης που βρίσκονται οι χρήστες. Στο Σχ.4.24 απεικονίζεται στιγμιότυπο μεταφόρτωσης video με (κάτω) και χωρίς (πάνω) τη χρήση του TCP accelerator. Στην περίπτωση που χρησιμοποιείται ο TCP accelerator, έχει γίνει λήψη ενός μικρού ποσοστού του video μετά από το χρονικό σημείο παρακολούθησής του. Σε αντίθετη περίπτωση, (εφόσον η χωρητικότητα το επιτρέπει) έχει γίνει λήψη ολόκληρου του video χωρίς να χρειάζεται άμεσα. Η τεχνική JIT, αποτρέπει την κατασπατάληση εύρους ζώνης και τη χρέωση των χρηστών (στα ασύρματα δίκτυα) στις περιπτώσεις όπου οι αυξημένες ταχύτητες μετάδοσης επιτρέπουν την αδιάκοπη λήψη δεδομένων.



Σχήμα 4.24 Τεχνική *Just-In-Time (JIT)*

## Βελτιστοποίηση Web

Αυτό το είδος βελτιστοποίησης αφορά την εφαρμογή τεχνικών με σκοπό τη βελτιστοποίηση της περιήγησης των χρηστών στο Διαδίκτυο. Μια από τις τεχνικές αυτές είναι η αφαίρεση των σχόλιων από τον html κώδικα των ζητούμενων από τους χρήστες ιστοσελίδων, με στόχο να αποφεύγεται η διακίνηση δεδομένων που δεν σχετίζονται με το περιεχόμενο της ιστοσελίδας. Επιπλέον, πραγματοποιείται συμπίεση των πολυμέσων που πρόκειται να μεταδοθούν στο χρήστη. Η συμπίεση αυτή μπορεί να είναι είτε *lossless*, δηλαδή να πραγματοποιείται μόνο μείωση του μεγέθους του πολυμέσου χωρίς να επηρεαστεί η ποιότητά του, είτε *lossy*, κατά την οποία μειώνεται ακόμα περισσότερο σε σχέση με τη *lossless* συμπίεση το μέγεθός του πολυμέσου με υποβάθμιση της αρχικής του ποιότητας. Ο τύπος συμπίεσης που επιλέγεται εξαρτάται από το διαθέσιμο εύρος ζώνης και από την ανοχή σε αλλοίωση του ζητούμενου περιεχομένου. Μια άλλη τεχνική που χρησιμοποιεί ο TCP accelerator είναι η ενεργοποίηση παράλληλων TCP συνδέσεων με σκοπό την ταχύτερη μεταφόρτωση ιστοσελίδων. Οι χρήστες επωφελούνται από την τεχνική αυτή καθώς η μεταφόρτωση των περισσότερων ιστοσελίδων απαιτεί την άντληση περιεχομένου από διαφορετικούς εξυπηρετητές, δηλαδή τη χρήση πολλαπλών συνδέσεων TCP. Ο TCP accelerator λαμβάνει τα αιτήματα χρηστών για τη μεταφόρτωση ιστοσελίδων και αντλεί τα περιεχόμενα τους από τους πολλαπλούς εξυπηρετητές μέσω των παράλληλων και γρήγορων TCP συνδέσεων. Στη συνέχεια, μεταβιβάζει τα περιεχόμενα στους χρήστες ως ενιαίο περιεχόμενο αντί να τα αποστέλλει σε εκείνους σειριακά. Τέλος, ο TCP accelerator αποθηκεύει προσωρινά ιστοσελίδες που αναζητούνται συχνά από τους χρήστες με σκοπό την ταχύτερη μεταφόρτωσή τους.

## Προσαρμοστική βελτιστοποίηση

Αυτό το είδος βελτιστοποίησης αφορά τη διαχείριση των εφαρμογών των χρηστών με στόχο την παροχή βελτιωμένης ποιότητας υπηρεσίας. Αρχικά, ο TCP accelerator μεριμνά για την ισότιμη χρήση του διαθέσιμου εύρους ζώνης από τους χρήστες. Οι περισσότεροι εξυπηρετητές video υποστηρίζουν την τεχνική *Adaptive Bitrate Streaming (ABR)*, η οποία προσαρμόζει την ποιότητα του ζητούμενου video στο ρυθμό μετάδοσης που μπορεί να υποστηριχτεί το εκάστοτε χρονικό διάστημα. Επειδή, κυρίως στα ασύρματα δίκτυα, οι συνθήκες μεταβάλλονται διαρκώς, η τεχνική αυτή μπορεί να δρα περιοριστικά για άλλους χρήστες, καθώς οι διαθέσιμοι πόροι θα είναι αρκετά λιγότεροι λόγω της δέσμευσής τους από άλλους. Ο TCP accelerator επεμβαίνει και ρυθμίζει την ποιότητα video όλων των χρηστών ώστε να δεσμεύουν το ίδιο εύρος ζώνης και να λαμβάνουν την ίδια ποιότητα υπηρεσίας. Επιπλέον, ο TCP accelerator μπορεί να αναβάλλει τις ενημερώσεις των εφαρμογών των χρηστών σε ώρες αιχμής και να τις επαναπρογραμματίζει για μεταγενέστερες χρονικά διαστήματα όπου η κίνηση στο Διαδίκτυο είναι περιορισμένη. Μέσω της πρακτικής αυτής, μπορεί να αποφευχθεί η συμφόρηση στο δίκτυο καθώς οι ταυτόχρονες ενημερώσεις των αναρίθμητων εφαρμογών των χρηστών σε ώρες αιχμής αυξάνουν συνήθως υπερβολικά την κίνηση των δεδομένων.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5

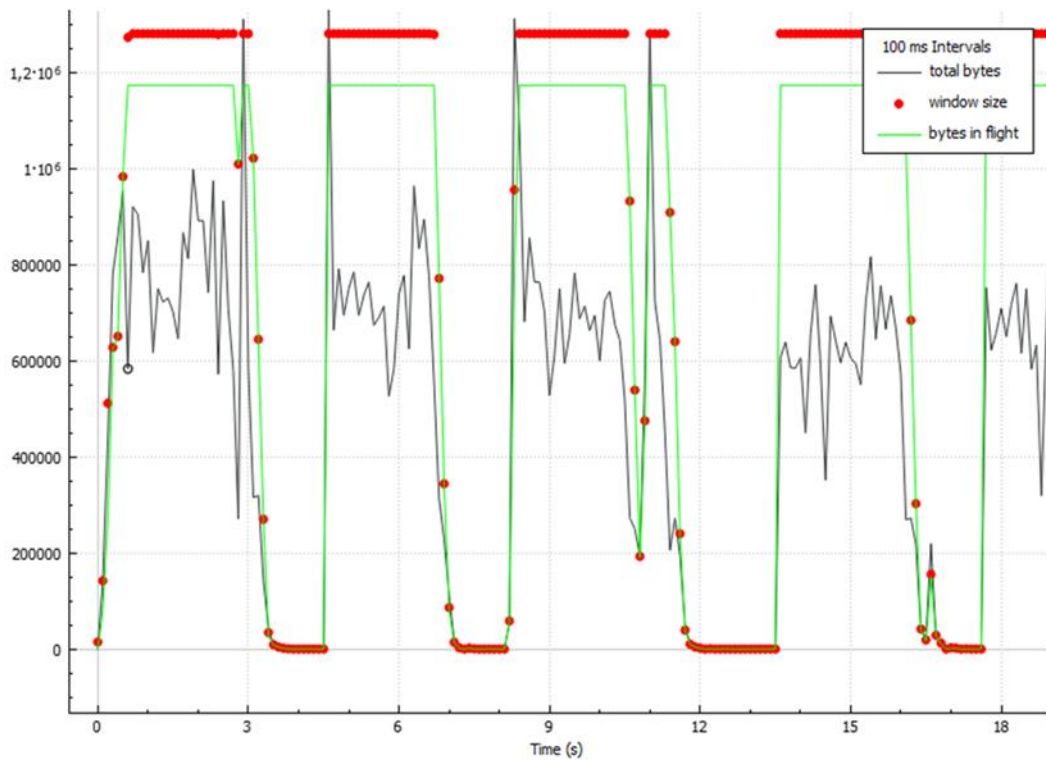
### Πειραματικές δοκιμές και συμπεράσματα

#### 5.1 Πειραματικό περιβάλλον

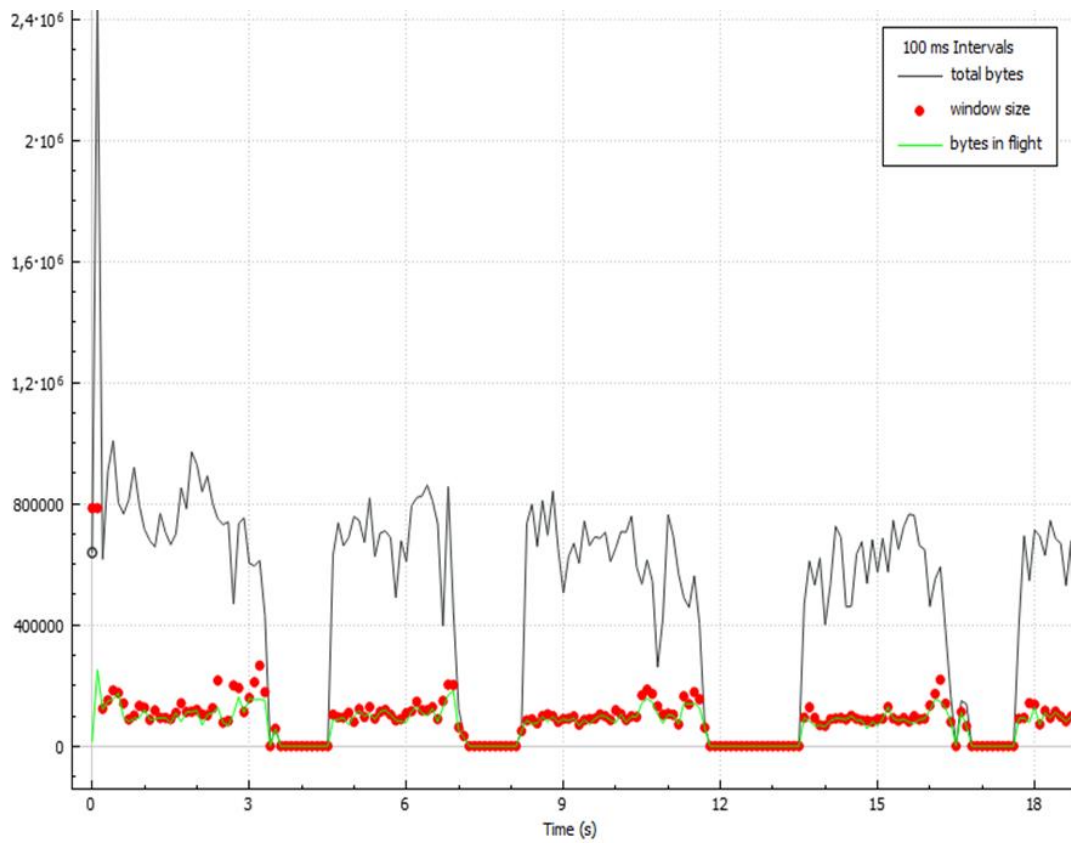
Για την εξαγωγή συμπερασμάτων σχετικά με την αποδοτικότητα του TCP accelerator στα ασύρματα δίκτυα, αξιοποιήθηκε η υποδομή του δικτύου της εταιρείας VODAFONE. Συγκεκριμένα, χρησιμοποιήθηκε μια κινητή συσκευή, η οποία συνδέθηκε σε ένα εξυπηρετητή για να κατεβάσει ένα αρχείο 100MB. Η κίνηση δεδομένων διερχόταν μέσα από την πειραματική πλατφόρμα του TCP accelerator έτσι ώστε να μην επηρεάζονται άλλοι χρήστες από τις ενδεχόμενες αλλαγές στις ρυθμίσεις του. Η κυψέλη όπου ανήκε η κινητή συσκευή εξυπηρετούσε και άλλους χρήστες, οπότε δεν ήταν ιδανικές οι συνθήκες μετάδοσης στην πλευρά του ασύρματου δικτύου. Κατά τη διάρκεια μεταφόρτωσης του αρχείου χρησιμοποιήθηκε λογισμικό καταγραφής πακέτων (tcpdump) για τη λήψη κατάλληλων μετρήσεων. Η καταγραφή πακέτων έγινε στη διεπαφή κινητή συσκευή/TCP accelerator και στη διεπαφή TCP Accelerator/εξυπηρετητής για τη σύγκριση της ασύρματης και της ενσύρματης πλευράς της σύνδεσης.

Τα αποτελέσματα της καταγραφής στις δύο διεπαφές απεικονίζονται στα Σχ.5.1 και 5.2, τα οποία απεικονίζουν τα διαγράμματα των ανεπιβεβαίωτων bytes (bytes in flight), του παραθύρου λήψης (ασύρματου δικτύου και TCP accelerator αντίστοιχα) καθώς και των συνολικών bytes που διακινούνται μέσα από την εκάστοτε διεπαφή ανά χρονική στιγμή. Από τα διαγράμματα αυτά διαπιστώνεται ότι στα ενσύρματα δίκτυα χρησιμοποιούνται μικρά παράθυρα λήψης ενώ στις κινητές συσκευές των ασυρμάτων δικτύων μεγάλα παράθυρα λήψης (κόκκινες γραμμές στα Σχ.5.1 και 5.2). Το πλήθος των ανεπιβεβαίωτων bytes στο ενσύρματο τμήμα της σύνδεσης (βλ. Σχ.5.2) είναι περίπου όσο το παράθυρο λήψης. Επιπλέον, το πλήθος των ανεπιβεβαίωτων bytes και το μέγεθος του παραθύρου λήψης στο ενσύρματο τμήμα σύνδεσης έχουν πολύ μικρότερες τιμές σε σχέση με τις αντίστοιχες του ασύρματου τμήματος της σύνδεσης. Αυτό οφείλεται στη μικρότερη καθυστέρηση που υπεισέρχεται στο ενσύρματο τμήμα της σύνδεσης, οπότε οι επιβεβαιώσεις των bytes πραγματοποιούνται με ταχύτερο ρυθμό σε σχέση με αυτές στο ασύρματο τμήμα. Οι μηδενισμοί του πλήθους των bytes που αποστέλλονται οφείλονται στην αδυναμία της κινητής συσκευής να επεξεργάζεται τα δεδομένα με τον ίδιο ρυθμό που λαμβάνονται, οπότε ο ενταμιευτής λήψης δεν μπορεί να λάβει περισσότερα δεδομένα.

Στα Σχ.5.3 και 5.4 απεικονίζονται οι χρόνοι RTT των διακινούμενων bytes για το ασύρματο και ενσύρματο τμήμα, αντίστοιχα. Στο ενσύρματο τμήμα μετάδοσης οι χρόνοι RTT είναι σαφώς μικρότεροι από αυτούς στο ασύρματο τμήμα, όπως άλλωστε, είναι αναμενόμενο.

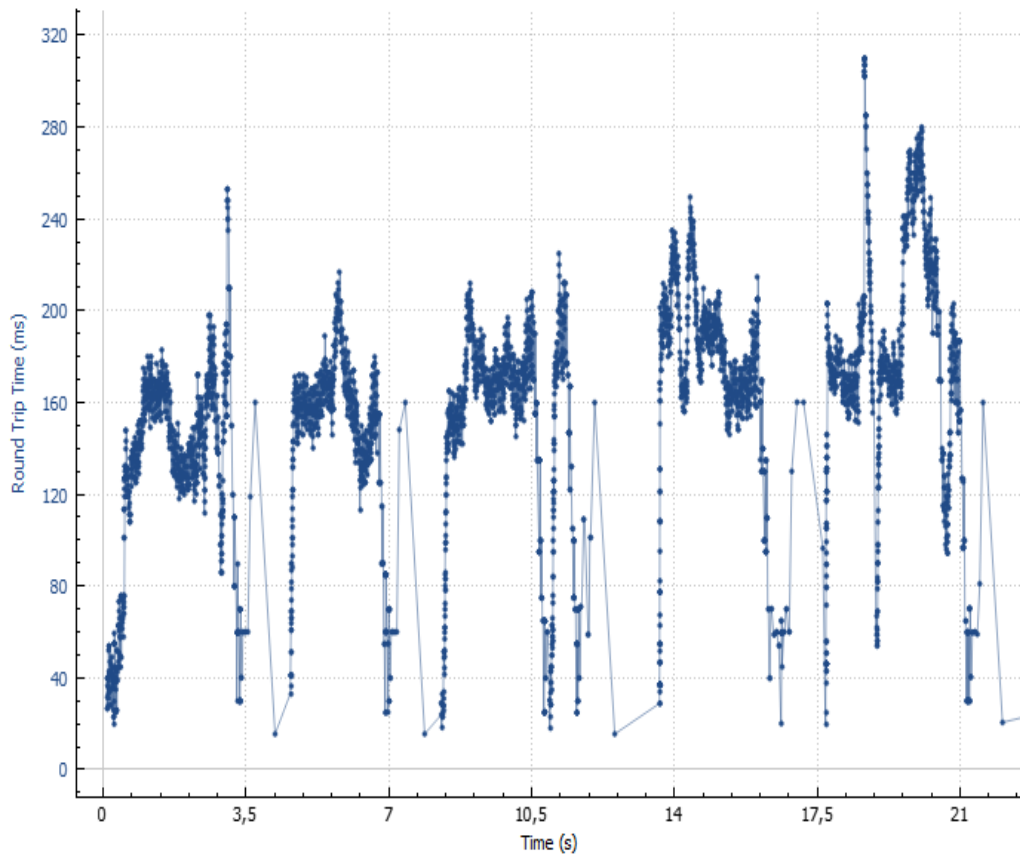


**Σχήμα 5.1** Αποτελέσματα της καταγραφής πακέτων στη διεπαφή κινητή συσκευή/TCP accelerator

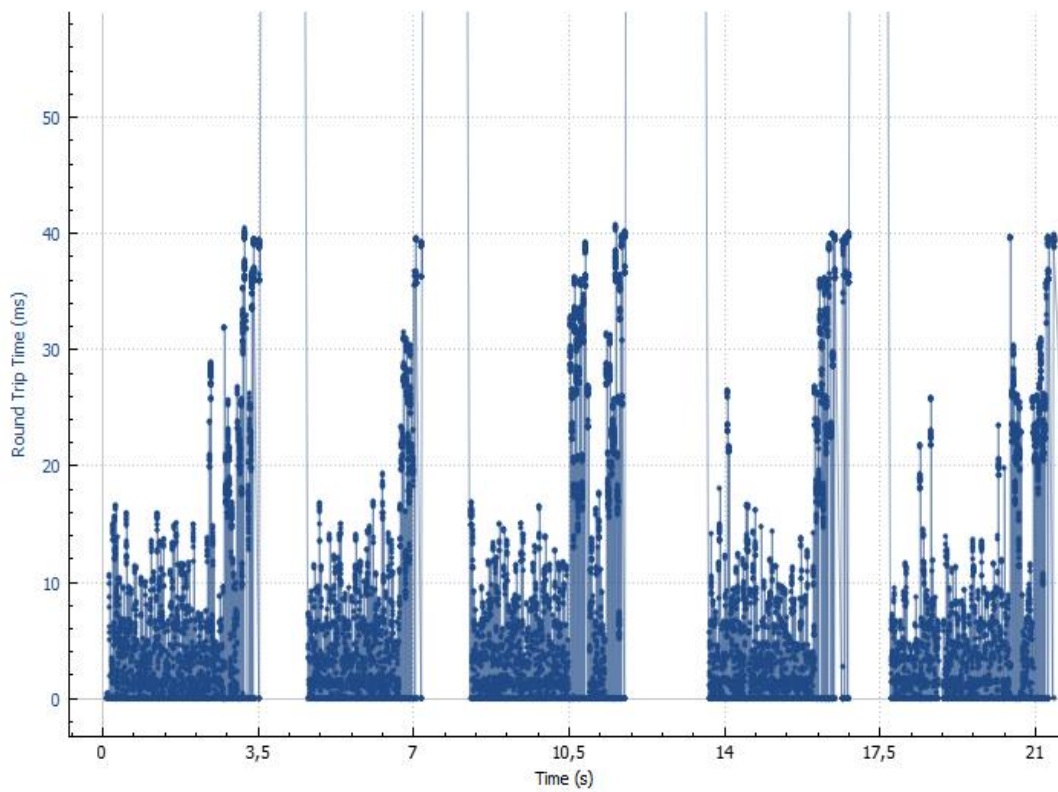


**Σχήμα 5.2** Αποτελέσματα της καταγραφής πακέτων στη διεπαφή TCP accelerator/έξυπρητηής





**Σχήμα 5.3** Χρόνοι RTT στο ασύρματο τμήμα μετάδοσης



**Σχήμα 5.4** Χρόνοι RTT στο ενσύρματο τμήμα μετάδοσης

## 5.2 Περιορισμοί

Στο προηγούμενο εδάφιο, παρουσιάστηκαν τα αποτελέσματα της καταγραφής στις δύο πλευρές μετάδοσης (ενσύρματης και ασύρματης) με τον TCP accelerator να παρεμβάλλεται μεταξύ τους. Από τις μετρήσεις, διαπιστώθηκε η διαφορά μεταξύ των παραθύρων των εξυπηρετητών και των κινητών συσκευών καθώς και η διαφορά της καθυστέρησης ανάμεσα σε ασύρματη και ενσύρματη μετάδοση. Επειδή κατά τα χρονικά διαστήματα της καταγραφής δεν υπήρχε συμφόρηση στο δίκτυο, δεν ήταν δυνατή η εξαγωγή συμπερασμάτων σχετικά με τη λειτουργία του TCP accelerator σε περιπτώσεις συμφόρησης. Η συγκεκριμένη έκδοση του TCP accelerator που χρησιμοποιήθηκε, είχε κάποιους περιορισμούς που παρουσιάζονται ακολούθως:

- Ο συγκεκριμένος TCP accelerator διαχειρίζεται μόνο κίνηση HTTP, ενώ η κίνηση HTTPS και QUIC διέρχεται αναλλοίωτη από αυτόν.
- Ο TCP accelerator δεν λαμβάνει πληροφορίες περί της κατάστασης της κυψέλης όπου ανήκει η κινητή συσκευή. Η βελτιστοποίηση της κίνησης των χρηστών προϋποθέτει ότι έχει γίνει προηγουμένως βελτιστοποίηση της κατανομής των πόρων σε κάθε κυψέλη λαμβάνοντας υπόψη το πλήθος των χρηστών που καθεμία εξυπηρετεί. Στην παρούσα έκδοση του TCP accelerator, αν ένα τερματικό ανήκει σε μια κυψέλη με υψηλή συμφόρηση λόγω πολυάριθμων ταυτοχρόνων χρηστών, ο TCP accelerator θα διαπιστώσει χαμηλό εύρος ζώνης στη σύνδεσή του (όπως και των υπόλοιπων τερματικών που ανήκουν στην εν λόγω κυψέλη) και θα μειώσει το ρυθμό μετάδοσης του. Ωστόσο, με κατάλληλη κατανομή των τηλεπικοινωνιακών πόρων στις κυψέλες, θα μπορούσε να αποφευχθεί η μείωση του ρυθμού μετάδοσης των χρηστών που ανήκουν σε κυψέλες με υψηλή συμφόρηση. Συγκεκριμένα, η αποδοτική κατανομή των πόρων στις κυψέλες προϋποθέτει τη διάθεση περισσότερου εύρους ζώνης στις κυψέλες με πολυάριθμους ενεργούς χρήστες και τη μείωση του εύρους ζώνης των κυψελών με μικρό πλήθος χρηστών ως αντιστάθμισμα.

## 5.3 Προτεινόμενη προσθήκη στη λειτουργία του TCP accelerator

Ο TCP accelerator μπορεί να επωφεληθεί από την εγκατάσταση εξυπηρετητών MEC σε κόμβους του ασύρματου δικτύου πρόσβασης (επί ή πλησίον του σταθμού βάσης). Συγκεκριμένα, ο εξυπηρετητής MEC μπορεί να λαμβάνει μετρήσεις από τους σταθμούς βάσης με τους οποίους επικοινωνεί έτσι ώστε να διαπιστώνει την ύπαρξη συμφόρησης σε κυψέλες που εξυπηρετούνται από τους συγκεκριμένους σταθμούς βάσης. Ανάλογα με το ποσοστό της κίνησης δεδομένων μέσα στην κυψέλη και τις δραστηριότητες των συνδρομητών, ο εξυπηρετητής MEC μπορεί να παρέχει πληροφορία στον TCP accelerator για το μέγεθος της συμφόρησης στην κυψέλη. Για την παροχή τέτοιων πληροφοριών στον TCP accelerator, μπορούν να αξιοποιηθούν τα δύο bits στην επικεφαλίδα IP που χρησιμοποιούνται προαιρετικά για την ειδοποίηση συμφόρησης από άκρο σε άκρο. Αυτή η διαδικασία ονομάζεται *Explicit Congestion Notification (ECN)* και μέσω των δύο bits είναι δυνατό να περιγραφούν τέσσερα επίπεδα συμφόρησης. Επομένως, μέσω αυτών των δύο bits οι εξυπηρετητές MEC μπορούν να ενημερώνουν περιοδικά τον TCP accelerator για το επίπεδο συμφόρησης των κυψελών που εξυπηρετούν. Στη συνέχεια, ο TCP accelerator μέσω κατάλληλου αλγορίθμου θα κατανέμει το εύρος ζώνης στους σταθμούς βάσης των κυψελών αντίστοιχα με το μέγεθος της συμφόρησης.

Επιπλέον, ένα άλλο χαρακτηριστικό που θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί από το ασύρματο τμήμα μιας σύνδεσης είναι η ισχύς λήψης των χρηστών. Στην περίπτωση όπου ένας χρήστης βρίσκεται μακριά από το σταθμό βάσης και το τερματικό του λειτουργεί υπό χαμηλή ισχύ λήψης, ο ρυθμός μετάδοσης προς εκείνον πρέπει να μειωθεί μέχρι η ισχύς λήψης του να φθάσει σε ικανοποιητικά επίπεδα. Ωστόσο, η διαδικασία μείωσης του ρυθμού μετάδοσής του πραγματοποιείται έπειτα από απώλεια σημαντικού αριθμού πακέτων με αποτέλεσμα την άσκοπη χρήση του εύρους ζώνης. Παράλληλα, η διαδικασία αύξησης της ταχύτητας μετάδοσης προς το χρήστη όταν το τερματικό του αποκτήσει ικανοποιητική ισχύ λήψης καθυστερεί ακόμα και με τη χρήση του TCP accelerator. Ο εξυπηρετητής MEC θα μπορούσε να συμβάλει στην επίλυση των προαναφερθέντων προβλημάτων μέσω της ενημέρωσης του TCP accelerator για την ισχύ λήψης κάθε χρήστη. Έτσι, χρησιμοποιώντας τα δύο bits του ECN είναι εφικτή η παροχή υποδείξεων στον TCP accelerator σχετικά με τις χρονικές στιγμές όπου συμβαίνει σημαντική αλλαγή στην ισχύ λήψης του χρήστη. Μέσω των υποδείξεων αυτών, ο TCP accelerator θα μπορεί να προσαρμόζεται άμεσα στις αλλαγές της ισχύος λήψης του χρήστη, ρυθμίζοντας κατάλληλα το ρυθμό μετάδοσης δεδομένων προς εκείνον. Έπειτα από τη βέλτιστη κατανομή των τηλεπικοινωνιακών πόρων στις κυψέλες και τη βελτιστοποίηση ανά χρήστη με βάση την ισχύ λήψης του, ο TCP accelerator μπορεί να βελτιστοποιεί την ατομική ροή TCP μέσω των υπάρχουσών διαδικασιών.

#### **5.4 Μελλοντικές επεκτάσεις**

Η αξιοποίηση των πληροφοριών των κυψελών μπορεί να βελτιώσει περαιτέρω τη λειτουργία του TCP accelerator και η χρήση των εξυπηρετητών MEC να συμβάλει στην περαιτέρω μείωση της συμφόρησης του δικτύου όπως και των σφαλμάτων μετάδοσης. Επιπλέον, η υλοποίηση του QUIC μπορεί να προσδώσει νέες δυνατότητες στη βελτιστοποίηση που παρέχει ο TCP accelerator. Όπως προαναφέρθηκε, η χρήση του QUIC προσφέρει ικανοποιητικά αποτελέσματα στα ασύρματα δίκτυα όπου το διαθέσιμο εύρος ζώνης μεταβάλλεται διαρκώς. Αντίθετα, σε δίκτυα που δεν εμφανίζουν συμφόρηση και έχουν σταθερό εύρος ζώνης, το TCP υπερτερεί του QUIC. Συνεπώς, ο TCP accelerator μπορεί, αφού αποκτήσει τη δυνατότητα επεξεργασίας της κίνησης QUIC, να επιλέγει τη χρήση του πρωτοκόλλου που θα χρησιμοποιούν οι χρήστες ανάλογα με τον τύπο δικτύου όπου έχουν πρόσβαση (ενσύρματο ή ασύρματο) και την ποιότητα της σύνδεσής τους. Φυσικά αυτό προϋποθέτει ότι το QUIC θα γίνει διαθέσιμο για χρήση καθολικά και ότι θα αντιμετωπιστούν τα προβλήματα συμβατότητας.

## **Βιβλιογραφία και Αναφορές**

- [1]. Διπλωματική Εργασία, Πλούτων Γραμματικός, «Εφαρμογή του Mobile Edge Computing στις επικοινωνίες οχημάτων», Οκτώβριος 2018
- [2]. Διπλωματική Εργασία, Αθανάσιος Χ. Γκρίτσης, «Χρήση Υπολογιστικής Υποδομής Παρυφής (MEC) σε δίκτυα 4G και 5G για τη βελτιστοποίηση της περιήγησης στο διαδίκτυο», Ιούλιος 2018
- [3]. ETSI: Mobile-Edge Computing – Introductory Technical White Paper, September 2014
- [4]. Monica Paolini and Senza Fili: MEC and edge computing. The importance of location, November 2016
- [5]. ETSI: Introduction to Mobile Edge Computing, Presented by Alex Reznik (ETSI ISG MEC and InterDigital), 2013
- [6]. ETSI White Paper No. 11: Mobile Edge Computing A key technology towards 5G, September 2015
- [7]. ETSI White Paper No. 24: MEC Deployment in 4G and Evolution Towards 5G, February 2018
- [8]. Fabio Giust, NEC Laboratories Europe, Germany, Xavier Costa-Perez, NEC Laboratories Europe, Germany, and Alex Reznik, Hewlett Packard Enterprise, US: Multi-Access Edge Computing: An Overview of ETSI MEC ISG, IEEE 5G Tech Focus: Volume 1, Number 4, December 2017
- [9]. ETSI GS MEC 011 v1.1.1: Mobile Edge Computing (MEC); Mobile Edge Platform Application Enablement, July 2017
- [10]. ETSI GS MEC 003 V1.1.1: Mobile Edge Computing (MEC); Framework and Reference Architecture, March 2016
- [11]. Yulei Wu, Haojun Huang, Cheng-Xiang Wang, Yi Pan (Eds.): 5G-Enabled Internet of Things, CRC Press, 2019
- [12]. ETSI GS MEC 010-1 V1.1.1: Mobile Edge Computing (MEC); Mobile Edge Management; Part 1: System, host and platform management, October 2017
- [13]. ETSI GS MEC 003 V2.1.1: Multi-access Edge Computing (MEC); Framework and Reference Architecture, January 2019
- [14]. ETSI GS MEC 002 V1.1.1: Mobile Edge Computing (MEC); Technical Requirements, March 2016
- [15]. ETSI GS MEC 013 V1.1.1: Mobile Edge Computing (MEC); Location API, July 2017
- [16]. ETSI GR MEC 018 V1.1.1: Mobile Edge Computing (MEC); End to End Mobility Aspects, October 2017
- [17]. ETSI GS MEC 010-2 V1.1.1: Mobile Edge Computing (MEC); Mobile Edge Management; Part 2: Application lifecycle, rules and requirements management, July 2017

- [18]. ETSI GS MEC 012 V1.1.1: Mobile Edge Computing (MEC); Radio Network Information API, July 2017
- [19]. ETSI White Paper No. 20: Developing Software for Multi-Access Edge Computing, February 2019
- [20]. ETSI GS MEC 015 V1.1.1: Mobile Edge Computing(MEC); Bandwidth Management API, October 2017
- [21]. <http://net-informations.com/q/diff/generations.html>
- [22]. Telesystem Innovations: LTE in a Nutshell: Protocol Architecture, 2010
- [23]. ETSI TS 136 201 V9.1.0: LTE; Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); Long Term Evolution (LTE) physical layer; General description (3GPP TS 36.201 version 9.1.0 Release 9), April 2010
- [24]. <https://www.3gpp.org/technologies/keywords-acronyms/96-nas>
- [25]. <https://www.techopedia.com/definition/24978/gprs-tunneling-protocols-gtp>
- [26]. <http://www.lteandbeyond.com/2012/01/offline-charging-system-ofcs.html>
- [27]. Netmanias: LTE Network Architecture: Basic, July 10, 2013  
<https://www.netmanias.com/en/post/techdocs/5904/lte-network-architecture/lte-network-architecture-basic>
- [28]. [https://www.tutorialspoint.com/lte/lte\\_protocol\\_stack\\_layers.htm](https://www.tutorialspoint.com/lte/lte_protocol_stack_layers.htm)
- [29]. ETSI TS 136 300 V9.4.0: LTE; Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA) and Evolved Universal Terrestrial Radio Access Network (E-UTRAN); Overall description; Stage 2 (3GPP TS 36.300 version 9.4.0 Release 9), July 2010
- [30]. <http://www.techplayon.com/explain-lte-frame-structure-both-for-fdd-and-tdd>
- [31]. [https://www.sharetechnote.com/html/LTE\\_TDD\\_Overview.html](https://www.sharetechnote.com/html/LTE_TDD_Overview.html)
- [32]. <https://www.sciencedirect.com/topics/engineering/normal-cyclic-prefix>
- [33]. Murtadha Ali Nsaif Sukar and Maninder Pal: SC-FDMA & OFDMA in LTE physical layer, International Journal of Engineering Trends and Technology (IJETT) - Volume12 Number 2, June 2014
- [34]. <https://www.electronics-notes.com/articles/connectivity/4g-lte-long-term-evolution/ofdm-ofdma-scdma-modulation.php>
- [35]. Telesystem Innovations: LTE in a Nutshell: The Physical Layer, 2010
- [36]. <https://osi-model.com/>
- [37]. Jim Kurose & Keith Ross: Δικτύωση Υπολογιστών Προσέγγιση από Πάνω προς τα Κάτω, Μαυρίδης Ιωάννης & Φουληράς Παναγιώτης (επιμ), Έκτη έκδοση, Δεκέμβριος 2013
- [38]. Κωνσταντίνου Φίλιππος, Κανατάς Αθανάσιος και Γεώργιος Πάντος: Συστήματα Κινητών Επικοινωνιών, Δεύτερη έκδοση, 2013

- [39]. <https://www.chromium.org/quic>
- [40]. <https://medium.com/@nirosh/understanding-quic-wire-protocol-d0ff97644de7>
- [41]. Sarah Cook, Bertrand Mathieu, Patrick Truong and Isabelle Hamchaoui: QUIC: Better For What And For Whom, 2017
- [42]. <https://www.ionos.com/digitalguide/hosting/technical-matters/quic-the-internet-transport-protocol-based-on-udp>
- [43]. Yueming Zheng, Ying Wang, Mingda Rui, Andrei Palade, Shane Sheehan and Eamonn O Nuallain: Performance Evaluation of HTTP/2 over TLS+TCP and HTTP/2 over QUIC in a Mobile Network, March 2018
- [44]. <https://wiki.geant.org/display/public/EK/SelectiveAcknowledgements>
- [45]. <https://www.briantorti.com/tcp-flow-control/>
- [46]. Sandvine Intelligent Broadband Networks: TCP Accelerator Overview, 2017
- [47]. Sandvine Intelligent Broadband Networks: TCP Optimization: Opportunities, KPIs, and Considerations An Industry Whitepaper, 2016
- [48]. Citrix: NetScaler TCP Optimization, 2017
- [49]. Citrix: Optimizing Web Application Delivery with Citrix® NetScaler®, 2007
- [50]. <https://investors.citrix.com/press-releases/press-release-details/2013/Citrix-Supercharges-Mobile-Subscriber-Experience-with-ByteMobile-7/default.aspx>
- [51]. <https://www.businesswire.com/news/home/20110830005570/en/Bytemobile-Unveils-Industry%E2%80%99s-Adaptive-Traffic-Management-System>