



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

**Χρήση Υπολογιστικής Υποδομής Παρυφής (MEC) σε δίκτυα
4G και 5G για τη βελτιστοποίηση της περιήγησης στο
διαδίκτυο**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Αθανάσιος Χ. Γκρίτσης

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

Αθήνα, Ιούλιος 2018



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

Χρήση Υπολογιστικής Υποδομής Παρυφής (MEC) σε δίκτυα 4G και 5G για τη βελτιστοποίηση της περιήγησης στο διαδίκτυο

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Αθανάσιος Χ. Γκρίσης

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

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή την 25^η Ιουλίου 2018.

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

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

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

Αθήνα, Ιούλιος 2018

.....
Αθανάσιος Χ. Γκρίτσης

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

Copyright © Αθανάσιος, Γκρίτσης, 2018

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

Απαγορεύεται η αντιγραφή, αποθήκευση και διανομή της παρούσας εργασίας, εξ ολοκλήρου ή τμήματος αυτής, για εμπορικό σκοπό. Επιτρέπεται η ανατύπωση, αποθήκευση και διανομή για σκοπό μη κερδοσκοπικό, εκπαιδευτικής ή ερευνητικής φύσης, υπό την προϋπόθεση να αναφέρεται η πηγή προέλευσης και να διατηρείται το παρόν μήνυμα. Ερωτήματα που αφορούν τη χρήση της εργασίας για κερδοσκοπικό σκοπό πρέπει να απευθύνονται προς τον συγγραφέα.

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

Περίληψη

Στην εργασία αυτή παρουσιάζεται η υπολογιστική υποδομή παρυφής (MEC) και οι δυνατότητες που προσθέτει στις προσφερόμενες υπηρεσίες των δικτύων κινητής τηλεφωνίας τέταρτης και πέμπτης γενιάς. Στο πλαίσιο αυτό εξετάζεται η χρήση μιας συγκεκριμένης λειτουργικότητας της υπολογιστικής υποδομής παρυφής, της υπηρεσία πληροφορίας ραδιοδιαύλου (RNIS), για τη βελτιστοποίηση της αποδοτικότητας του ραδιοδιαύλου και της εμπειρίας χρήσης κατά τη περιήγηση στο διαδίκτυο. Ειδικότερα, εστιάζουμε στο καθορισμό και τις εναλλακτικές υλοποιήσεις ενός αλγορίθμου βελτιστοποίησης της λειτουργίας του TCP πρωτοκόλλου όταν αυτό εξυπηρετεί τη μεταφόρτωση ιστοσελίδων. Στο Κεφάλαιο 1 γίνεται εισαγωγή στην έννοια της υπολογιστικής υποδομής παρυφής. Κατόπιν παρατίθενται εκδοχές μελλοντικών εφαρμογών, τόσο για λόγους καλύτερης κατανόησης όσο και για την συνεισφορά των συγκεκριμένων παραδειγμάτων στον καθορισμό των επίσημων προδιαγραφών. Στο Κεφάλαιο 2 παρουσιάζεται η δομή της υπολογιστικής υποδομής παρυφής από τρεις διαφορετικές γωνίες θεώρησης. Μακροσκοπικά ως το βασικό μοντέλο MEC. Στη συνέχεια με μεγαλύτερη λεπτομέρεια στα συστατικά στοιχεία και τις εσωτερικές λειτουργίες, ως η αρχιτεκτονική αναφοράς. Και τελικά ως μια εκδοχή προσαρμοσμένη στην εικονικοποίηση των λειτουργιών δικτύου, που θα αποτελεί τη βάση των μελλοντικών υλοποιήσεων του υποκείμενου δικτύου. Επίσης παρουσιάζεται η υπηρεσία πληροφορίας ραδιοδιαύλου, η οποία είναι ουσιαστική για την επιτυχή υλοποίηση του αλγορίθμου. Το Κεφάλαιο 3 επικεντρώνεται στην ανάπτυξη της υπολογιστικής υποδομής παρυφής σε δίκτυα κινητής τηλεφωνίας τέταρτης γενιάς. Παρουσιάζονται και αναλύονται οι διαφορετικές τοπολογίες εγκατάστασης καθώς και οι προκλήσεις που εμφανίζουν για μια σειρά απαραίτητων λειτουργιών του δικτύου κινητής τηλεφωνίας. Το Κεφάλαιο 4 εστιάζει στην ανάπτυξη της υπολογιστικής υποδομής παρυφής σε δίκτυα κινητής τηλεφωνίας πέμπτης γενιάς. Εξετάζεται η αντιστοίχιση των λειτουργικών οντοτήτων, της αρχιτεκτονικής αναφοράς της υπολογιστικής υποδομής παρυφής, με τις λειτουργίες της αρχιτεκτονικής βασιζόμενης σε υπηρεσίες που διέπει τα δίκτυα πέμπτης γενιάς. Στη συνέχεια παρουσιάζονται και αναλύονται απαραίτητες λειτουργίες δικτύου κινητής τηλεφωνίας και οι διαφοροποιήσεις που επιφέρει η αρχιτεκτονικής βασιζόμενης σε υπηρεσίες. Στο Κεφάλαιο 5 αναφερόμαστε στο πρωτόκολλο TCP και επικεντρωνόμαστε στα τεχνικά χαρακτηριστικά και τους μηχανισμούς λειτουργίας που θα επιχειρηθεί να βελτιστοποιηθούν με τη χρήση της υπηρεσίας πληροφορία που παρέχει η υπολογιστική υποδομή παρυφής. Τέλος στο Κεφάλαιο 6 παρουσιάζεται ο προτεινόμενος αλγόριθμος βελτιστοποίησης που βασίζεται στο μέγεθος αρχικού παραθύρου σε συνδυασμό με τις επιλογές υλοποίησης που καθιστούν εφικτή την εκτέλεση του.

Λέξεις κλειδιά

Υπολογιστική υποδομή παρυφής, αρχικό παράθυρο TCP, αλγόριθμος, βελτιστοποίηση περιήγησης, δίκτυα κινητής τηλεφωνίας, τέταρτη γενιά, πέμπτη γενιά, αρχιτεκτονική βασιζόμενη σε υπηρεσίες, υπηρεσία πληροφορίας ραδιοδιαύλου.

Abstract

This thesis presents Mobile Edge Computing (MEC) and the capabilities it adds to the services offered by the fourth and fifth generation mobile networks. In this context, we examine how a specific functionality of Mobile Edge Computing, the Radio Network Information Service (RNIS) in particular, can be used to optimize radio channel efficiency and user experience while browsing the Internet. We focus on the description and the possible implementations of an algorithm that optimizes TCP's performance while downloading webpages. In Chapter 1 the concept of Mobile Edge Computing is introduced. It is followed by the presentation of several proof-of-concept cases, so that the concept of MEC is better understood and to underline the fact that these cases have materially contributed to the shaping of MEC specifications. In Chapter 2 the framework and reference architecture of Mobile Edge Computing is provided and its functions and entities described. Also the Radio Network Information Service is presented. Chapter 3 focuses on the deployment of Mobile Edge Computing in 4G networks, by showing different options to install the MEC host along with the 4G system architecture components, and observing how such installation choices impact on the running system and architecture. Chapter 4 focuses on the deployment of Mobile Edge Computing in 5G networks and how an integrated MEC deployment in 5G networks can be achieved. The functional entities of MEC can be mapped to native functions of 5G Service Based Architecture. In Chapter 5 we examine some of TCPs technical characteristics and operations in order to identify which could be levered by RNIS in order to optimize performance. Lastly, in Chapter 6 the proposed optimizing algorithm based on the initial window size is presented, along with the implementation options that make it a viable option.

Keywords

Mobile Edge Computing, TCP Initial Window, algorithm, browsing optimization, mobile networks, 4G, 5G, Service Based Architecture, Radio Network Information Service.

Ευχαριστίες

Θα ήθελα να εκφράσω τις θερμότερες ευχαριστίες μου προς τον Καθηγητή κ. Κωστή για τη διαρκή και καίρια καθοδήγηση και την υποστήριξη που γενναιόδωρα μου προσέφερε σε όλη τη διάρκεια εκπόνησης της διπλωματικής εργασίας. Η συνεργασία μαζί του υπήρξε μια πολύτιμη εμπειρία και παρακαταθήκη ουσίας για το προσωπικό και επαγγελματικό μου μέλλον.

Επίσης θα ήθελα να ευχαριστήσω τα άλλα δύο μέλη της επιτροπής, τους Καθηγητές κ. Καψάλη και κ. Φικιώρη, για το χρόνο που διέθεσαν στη μελέτη της εργασίας και την ενθαρρυντική συμβολή τους

Στον πατέρα μου,

Χρήστο

Περιεχόμενα

Περίληψη.....	5
Abstract	7
Ευχαριστίες.....	9
Ευρετήριο	13
Ευρετήριο Σχημάτων	16
Συνομογραφίες.....	18
Κεφάλαιο 1:Περιγραφή MEC και βασικά σενάρια χρήσης.....	21
1.1 Εισαγωγή.....	21
1.2 Γενικά περί MEC.....	21
1.3 Σενάρια Υπηρεσιών	25
1.3.1 Υπηρεσία έξυπνης βελτιστοποίησης βίντεο.....	26
1.3.2 Υπηρεσία ανάλυσης ροής βίντεο	27
1.3.3 Υπηρεσία επαυξημένης πραγματικότητας	28
1.3.4 Υπηρεσία υποβοήθησης σε υπολογιστικό φορτίο υψηλής έντασης	29
1.3.5 Υπηρεσία Εταιρικής υλοποίησης.....	30
1.3.6 Διασυνδεδεμένα οχήματα	31
1.3.7 Υπηρεσία Πύλης IoT	32
Κεφάλαιο 2: Βασικό πλαίσιο και αρχιτεκτονική αναφοράς MEC	34
2.1 Βασικό πλαίσιο MEC.....	34
2.2 Αρχιτεκτονική αναφοράς MEC.....	35
2.2.1 Επίπεδο Συστήματος.....	36
2.2.2 Επίπεδο Host	37
2.2.3 Υπηρεσίες MEC	38
2.3 MEC και NFV	42
2.4 Υπηρεσία Πληροφορίας Ραδιοδιαύλου (RNIS).....	44
Κεφάλαιο 3: Ανάπτυξη MEC σε δίκτυα 4G.....	46
3.1 Ανάπτυξη MEC σε 4G δίκτυα	46
3.2 Περιπτώσεις εγκατάστασης MEC σε 4G δίκτυα.....	47
3.2.1 Εγκατάσταση σε Κατανεμημένο Εξελιγμένο Κορμό Πακέτου (EPC)	47
3.2.2 Εγκατάσταση σε Κατανεμημένη Υπηρετούσα Πύλη(SGW) και Πύλη Δικτύου Πακέτων Δεδομένων(PGW).....	49
3.2.3 Εγκατάσταση σε Κατανεμημένη Υπηρετούσα Πύλη (S-GW) με τοπική διαφυγή (LBO)	50
3.2.4 Εγκατάσταση ως “Προεξοχή στη γραμμή”.....	51

3.3 Προκλήσεις των εναλλακτικών προσεγγίσεων	52
3.3.1 Διαχείριση συνεδρίας.....	52
3.3.2 Διαχείριση κινητικότητας.....	54
3.3.3 Ασφάλεια.....	55
3.3.4 Τιμολόγηση	56
3.3.5 Νόμιμη συνακρόαση	56
Κεφάλαιο 4: Ανάπτυξη MEC σε δίκτυα 5G.....	58
4.1 Υποστήριξη του MEC στις 3GPP προδιαγραφές των δικτύων 5G	58
4.2 Αρχιτεκτονική συστήματος 5G και MEC	59
4.2.1 Λειτουργία Διαχείρισης Ενοποιημένων Δεδομένων (UDM).....	61
4.2.2 Λειτουργία Επιπέδου Χρήστη (UPF).....	61
4.2.3 Λειτουργία Διαχείρισης Πρόσβασης και Κινητικότητας (AMF).....	62
4.2.4 Λειτουργία Διαχείρισης Συνεδρίας (SMF)	63
4.3 Περιπτώσεις εγκατάστασης MEC σε 5G δίκτυα.....	63
4.4 Καθοδήγηση κίνησης.....	65
4.5 Κινητικότητα UE και εφαρμογής	66
4.6 Έκθεση δυνατοτήτων.....	68
4.7 Τιμολόγηση	70
4.8 Κανονιστικές απαιτήσεις	70
Κεφάλαιο 5: TCP σε ασύρματα δίκτυα και έλεγχος συμμόρφωσης	72
5.1 Γενικά για TCP	72
5.1.1 Επικεφαλίδα TCP	72
5.1.2 Ορισμοί βασικών εννοιών TCP	73
5.1.3 Βασική λειτουργία TCP	74
5.1.4 3-μερής Χειραψία.....	75
5.2 Μηχανισμοί TCP	76
5.2.1 Έλεγχος ροής	76
5.2.2 Έλεγχος Συμμόρφωσης	76
5.2.3 Αργή εκκίνηση (Slow Start)	77
5.3 Γινόμενο Εύρους ζώνης – Καθυστέρησης (BDP).....	77
Κεφάλαιο 6: Αλγόριθμος Βελτιστοποίησης περιήγησης διαδικτύου με χρήση MEC.....	79
6.1 Κίνηση υπηρεσίας περιήγησης διαδικτύου.....	79
6.2 Ασύρματο δίκτυο και TCP	81
6.2.1 Γινόμενο Εύρους Ζώνης – Καθυστέρησης (BDP) σε πραγματικό χρόνο.....	82

6.3	Αλγόριθμος καθορισμού μεγέθους αρχικού παραθύρου IW	82
6.3.1	Κριτήρια μεγέθους αρχικού παραθύρου IW	82
6.3.2	Επιλογή BDP.....	83
6.3.3	Αλγόριθμος	83
6.4	Υλοποίηση αλγορίθμου με χρήση MEC.....	85
6.4.1	Διαδικασία ενημέρωσης εξυπηρετητή για το προτεινόμενο μέγεθος IW	85
6.4.2	Χρησιμοποιούμενες εφαρμογές MEC.....	86
6.4.2.1	MEC Εφαρμογή Ανίχνευσης Μεταφόρτωσης Ιστοσελίδας (app MEC- AMI)	86
6.4.2.2	MEC Εφαρμογή Δικτυακών Συνθηκών (app MEC - ΔΣ).....	86
6.4.2.3	MEC Εφαρμογή Εκτέλεσης Αλγορίθμου IW (app MEC- EA)	87
6.5	Υλοποίηση σε εγκαταστάσεις MEC σε 4G.....	89
6.5.1	Υλοποίηση σε εγκατάσταση “Προεξοχής στη γραμμή”	89
6.5.2	Υλοποίηση σε εγκατάσταση κατανεμημένου EPC	89
6.5.3	Υλοποίηση σε εγκατάσταση κατανεμημένης SGW + PGW.....	90
6.5.4	Υλοποίηση σε εγκατάσταση κατανεμημένης SGW με τοπική διαφυγή (LBO)	90
6.6	Υλοποίηση σε εγκαταστάσεις MEC σε 5G.....	90
	Βιβλιογραφία	92

Ευρετήριο Σχημάτων

Σχήμα 1.1: Γενικό μοντέλο ανάπτυξης MEC.....	23
Σχήμα 1.2:Συγκεντρωτική αναπαράσταση σημείων πρόσβασης.....	25
Σχήμα 1.3:Υλοποίηση MEC υπηρεσίας έξυπνης βελτιστοποίησης βίντεο.....	27
Σχήμα 1.4:Υλοποίηση MEC υπηρεσίας ανάλυσης ροής βίντεο	28
Σχήμα 1.5:Υπηρεσία επαυξημένης πραγματικότητας	29
Σχήμα 1.6:Εταιρική υλοποίηση	30
Σχήμα 1.7:MEC για διασυνδεδεμένα οχήματα σε LTE σταθμό βάσης.....	32
Σχήμα 1.8:Πύλη IoT	33
Σχήμα 2.1:Βασικό πλαίσιο MEC	34
Σχήμα 2.2:Αρχιτεκτονική αναφοράς MEC	36
Σχήμα 2.3:Ροή δημιουργίας στιγμιότυπου εφαρμογής από το OSS.....	38
Σχήμα 2.4:Διάγραμμα ροής καταστάσεων εφαρμογής MEC.....	40
Σχήμα 2.5:Διάγραμμα ροής δημιουργίας στιγμιότυπου εφαρμογής από OSS.....	41
Σχήμα 2.6:MEC αρχιτεκτονική αναφοράς σε NFV περιβάλλον.....	43
Σχήμα 3.1:Βασικό μοντέλο αρχιτεκτονικής Συστήματος Εξελιγμένου Πακέτου (EPS).....	47
Σχήμα 3.2:Εγκατάσταση MEC σε κατανεμημένο EPC	48
Σχήμα 3.3:Εγκατάσταση MEC σε κατανεμημένο EPC ως VNFs.....	49
Σχήμα 3.4:Εγκατάσταση MEC σε κατανεμημένη PGW και SGW	50
Σχήμα 3.5:Εγκατάσταση MEC σε κατανεμημένη SGW με LBO	50
Σχήμα 3.6:Εγκατάσταση MEC με προσέγγιση τύπου “ προεξοχή στη γραμμή”	51
Σχήμα 3.7:Επιθεώρηση πακέτων επίπεδου χρήστη.....	53
Σχήμα 3.8:MEC Ελεγχόμενο από το PGW	53
Σχήμα 4.1:Αρχιτεκτονική Βασιζόμενη σε Υπηρεσίες για 5G και Βασικό Πλαίσιο MEC	60
Σχήμα 4.2:Ανάπτυξη MEC ολοκληρωμένη εντός δικτύου 5G	62
Σχήμα 4.3:Συνεγκατάσταση MEC και τοπικής UPF στο σταθμό βάσης.....	63
Σχήμα 4.4:Συνεγκατάσταση MEC με ένα κόμβο εκπομπής, πιθανόν με τοπική UPF	64
Σχήμα 4.5:Συνεγκατάσταση MEC και τοπικής UPF σε ένα δικτυακό σημείο συγκέντρωσης.....	64
Σχήμα 4.6:Συνεγκατάσταση MEC με λειτουργίες του δικτύου κορμού	64
Σχήμα 4.7:Βασικό σενάριο κινητικότητας εφαρμογής για MEC ολοκληρωμένο με 5G δίκτυο	67
Σχήμα 4.8:Έκθεση δυνατοτήτων, περίπτωση ανάπτυξης MEC σε τοπικό δίκτυο δεδομένων.....	69
Σχήμα 4.9:Αρχιτεκτονική νόμιμης συνακρόασης (πρόταση, 3GPP).....	71
Σχήμα 5.1:Επικεφαλίδα TCP πρωτοκόλλου	72

Σχήμα 5.2:Παράδειγμα αποστολών σε TCP σύνδεση χωρίς και με απώλεια τεμαχίου	74
Σχήμα 5.3:3-μερής χειραψία TCP.....	75
Σχήμα 5.4:Μηχανισμός συρόμενου παραθύρου στο TCP	76
Σχήμα 6.1:Καμπύλες TCP παραθύρου συμφόρησης.....	79
Σχήμα 6.2:TCP latency για διαφορετικές τιμές αρχικού παραθύρου	80
Σχήμα 6.3:Διάγραμμα ροής για τον υπολογισμό μεγέθους του IW	88

Συντομογραφίες

3GPP - 3rd Generation Partnership Project

AF - Application Functions

APN – Access Point Name

AR – Augmented Reality

CFS - Customer Facing Service

CU- Centralized Units

CUPS – Control/User Plane Separation

DNAI - Data Network Access Identifier

DNS - Domain Name Server

DSRC - Dedicated short-range communications

DU - Distributed Units

eNB ή eNodeB - Evolved Node B

EPC – Evolved Packet Core

EPC – Evolved Packet Core

EPS – Evolved Packet System

ETSI - European Telecommunications Standards Institute

HSS - Home Subscriber Server

HTC - Human Type Communication

ISG - Industry Specification Group

KPI – Key Performance Indicator

LADN - Local Area Data Network

LBO –Local Breakout

LCM - Lifecycle Management

LI - Lawful Interception

LTE- Long-Term Evolution

MANO - Management and Orchestration

MEAO - Mobile Edge Application Orchestrator

MEC - Multi Access Computing (προηγούμενος Mobile-Edge Computing)

MEO – Mobile Edge Orchestrator

MEPM - Mobile Edge Platform Manager

MEPM-V - Mobile Edge Platform Manager - NFV

MME – Mobility Management Entity

MSS – Maximum Segment Size

MTC - Machine Type Communication

NEF - Network Exposure Function

NFV - Network Function Virtualization

NFVI – Network Function Virtualization Infrastructure

NFVO - Network Functions Virtualization Orchestrator

NRF - Network Resource Function

OSS – Operations Support System

OTT - Over The Top

PCF - Policy Control Function

PDN – Packet Data Network

PDU – Packet Data Unit

PGW – PDN Gateway

PoC - Proof of Concept

QoE - Quality of Experience

RAN - Radio Access Network

RD – Retained Data

RNC - Radio Network Controller

RTT - Round Trip Time

SBA - Service Based Architecture

SGW – Serving Gateway

SMF - Session Management Function

TAC – Tracking Area Code

TCP - Transmission Control Protocol

TEID – Tunnel Endpoint Identifier

UDM - Unified Data Management

UE - User Equipment

UPF – User Plane Function

VIM - Virtualization Infrastructure Manager

VNF - Virtualized Network Functions

VNFM - Virtual Network Function Manager

Κεφάλαιο 1: Περιγραφή MEC και βασικά σενάρια χρήσης

1.1 Εισαγωγή

Η ανάπτυξη και εξέλιξη των συστημάτων επικοινωνίας έγινε με πρωταρχικό μέλημα την εξυπηρέτηση της επικοινωνίας μεταξύ ανθρώπων. Είτε αυτή αφορούσε επικοινωνία φωνής είτε, μετέπειτα, πολυμέσων, κοινωνικών δικτύων και ιστοσελίδων ο βασικός παραγωγός και καταναλωτής ήταν ο άνθρωπος. Ωστόσο, με τη ραγδαία αύξηση των διασυνδεδεμένων συσκευών, το είδος της τηλεπικοινωνιακής κίνησης και οι απαιτήσεις υπηρεσίας προβλέπεται να μεταβληθούν θεμελιωδώς. Υπολογίζεται ότι μέχρι το 2020 το πλήθος των διασυνδεδεμένων συσκευών θα πλησιάζει τα 50 δισεκατομμύρια[1], καθιστώντας την επικοινωνιακή κίνησης μηχανών (MTC) ισάξιο παράγοντα με την επικοινωνιακή κίνηση ανθρώπων (HTC) στο σχεδιασμό και τη διαστασιολόγηση των δικτυακών υποδομών.

Επιπλέον η ανάπτυξη νέων διαδραστικών εφαρμογών και η διείσδυση διασυνδεδεμένων μηχανών σε κρίσιμους επιχειρησιακούς τομείς εγείρει νέες αυξημένες απαιτήσεις αξιοπιστίας, ασφάλειας και ποιότητας εμπειρίας (QoE).

Η προσέγγιση Υπολογιστικού Νέφους (Cloud Computing) προσφέρει μια ατελή απάντηση στις παρούσες και μελλοντικές απαιτήσεις του αυξανόμενου ετερογενούς πλήθους διασυνδεδεμένων συσκευών. Ενώ πετυχαίνει υψηλότερο βαθμό αποδοτικότητας για τους υπολογιστικούς πόρους, κυρίως αποθηκευτικό χώρο και υπολογιστική ισχύ, αυτό γίνεται εις βάρος της αυξημένης κίνησης στο δίκτυο κορμού και με το επιπλέον κόστος του latency. Επιπρόσθετα περιπλέκει σημαντικά την εξυπηρέτηση αιτημάτων στη βάση συγκεκριμένου γεωγραφικού πλαισίου και δεν προσαρμόζεται εγκαίρως στις δυναμικές συνθήκες φορτίου στις παρυφές του δικτύου. Ο δείκτης Cisco Global Cloud[2] προβλέπει ότι το 2019 η συνδυασμένη παραγωγή δεδομένων από ανθρώπους και μηχανές θα είναι της τάξης των 500 zetabytes (1 zetabyte = 10^{21} bytes) ενώ η κίνηση προς τα παγκόσμια datacenters μέσω IP δικτύων θα είναι μόλις 10,4 zetabytes, κάνοντας εμφανή την δυσκολία ανταπόκρισης του μοντέλου Υπολογιστικού Νέφους στον τεράστιο όγκο δεδομένων που θα παράγεται.

Προκειμένου να ξεπεραστούν αποδοτικά και με συστηματικό τρόπο οι προαναφερθείσες εγγενείς αδυναμίες των επικρατούντων μοντέλων, οι τηλεπικοινωνιακοί πάροχοι, οι κατασκευαστές τηλεπικοινωνιακού εξοπλισμού, οι πάροχοι υπηρεσιών IT και οι επίδοξοι πάροχοι επιπρόσθετων υπηρεσιών συνέστησαν, στα πλαίσια του Ευρωπαϊκού Ινστιτούτου Τηλεπικοινωνιακών Προτύπων (ETSI), την πρωτοβουλία του Multi Access Computing (MEC). Σκοπός είναι η προτυποποίηση μια πλατφόρμας για την ανάπτυξη και

διαλειτουργική εγκατάσταση εξοπλισμού και εφαρμογών στις παρυφές του δικτύου καθώς και η προετοιμασία των δικτυακών υποδομών για τη μετάβαση στην επόμενη γενιά 5G.

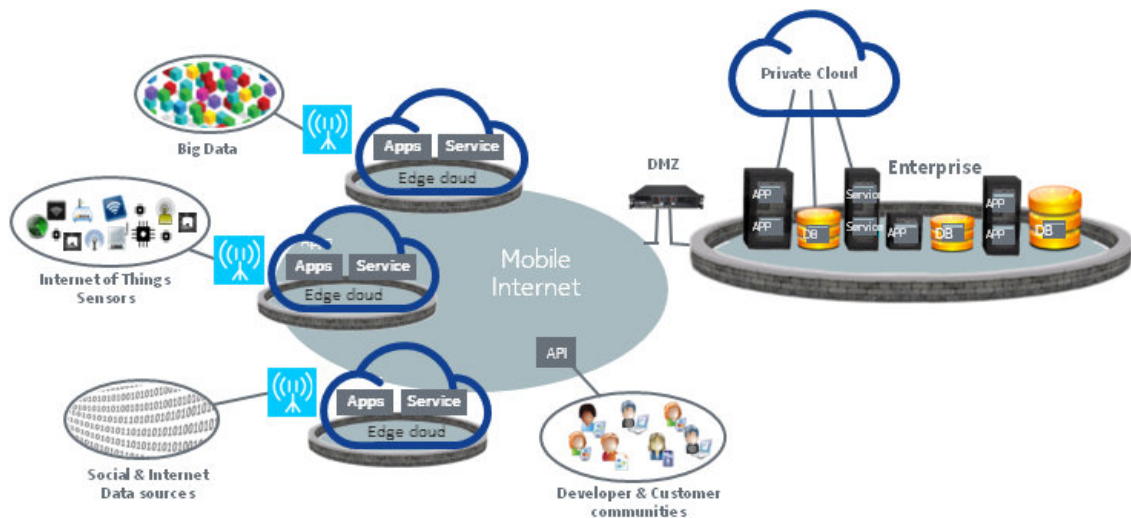
1.2 Γενικά περί MEC

Η ιδρυτική σύγκλιση της Ομάδας Προτυποποίησης της Βιομηχανίας (ISG) για το MEC έλαβε χώρα το 2014 με έργο “να δημιουργήσει ένα τυποποιημένο, ανοιχτό περιβάλλον το οποίο θα επιτρέπει την αποδοτική και απρόσκοπτη ενσωμάτωση εφαρμογών από προμηθευτές, παρόχους υπηρεσιών και τρίτα μέρη σε, μικτής προέλευσης, πλατφόρμες Mobile-edge Computing.” [3]

Ως Mobile Edge Computing ορίζεται το σύνολο των υποδομών υλικού και λογισμικού που είναι εγκατεστημένες στην παρυφή του δικτύου κινητών τηλεπικοινωνιών και οι οποίες προσφέρουν υπηρεσίες Υπολογιστικού Νέφους στους χρήστες του ασύρματου δικτύου πρόσβασης (RAN).

Το περιβάλλον αυτό χαρακτηρίζεται από εξαιρετικά χαμηλό latency και ταυτόχρονα υψηλό εύρος ζώνης, ενώ οι εφαρμογές θα μπορούν να εκμεταλλεύονται την ενημέρωση σε πραγματικό χρόνο για τις επικρατούσες συνθήκες του ασύρματου δικτύου πρόσβασης [3]

Μια αναπαράσταση του γενικευμένου μοντέλου δίνεται στο Σχήμα 1.1. Γίνεται εμφανές ότι οι τελικοί χρήστες μπορεί να είναι είτε άνθρωποι και εφαρμογές επικοινωνίας μεταξύ ανθρώπων με το αντίστοιχο HTC προφίλ τηλεπικοινωνιακής κίνησης και απαιτήσεις ποιότητας υπηρεσίας, είτε μηχανές με MTC προφίλ τηλεπικοινωνιακής κίνησης αλλά το MEC προσφέρει μια διάφανη ομογενή πλατφόρμα για τη διαχείριση των δύο διαφορετικών ειδών κίνησης και απαιτήσεων. Η “Παρυφή” (Edge) που φιλοξενείται ο MEC εξυπηρετητής μπορεί να αναφέρεται είτε στον σταθμό βάσης [evolved Node B στο LTE,(eNB)], είτε σε κάποιον άλλο ελεγκτή ασύρματου δικτύου (Radio Network Controller, RNC), είτε στο σημείο συνάθροισης (Aggregation Point) στο οποίο συγκεντρώνονται τα δεδομένα από περισσότερες της μιας (και συνήθως μικρότερες) κυψέλες.



Σχήμα 1.1, Γενικό μοντέλο ανάπτυξης MEC [4]

Το περιβάλλον του MEC δημιουργεί μια νέα αλυσίδα αξίας και ένα δυναμικό οικοσύστημα που θα αναδείξει νέες ευκαιρίες για τους τηλεπικοινωνιακούς παρόχους και τους παρόχους εφαρμογών και περιεχομένου επιτρέποντας τους να διαφοροποιηθούν από την εμπειρία της τρέχουσας ευρυζωνικής κινητής τηλεφωνίας, Επιπλέον θα επιτρέψει την προσφορά προσωποποιημένων υπηρεσιών καθώς και το άνοιγμα των τηλεπικοινωνιακών δικτύων σε τρίτους συνεργάτες. Καθίσταται έτσι δυνατή η ανάπτυξη και υλοποίηση κάθετων υπηρεσιών από Υπερκείμενους συμμετέχοντες (OTT players) με αποδοτικό τρόπο και σε σύντομο χρονικό διάστημα χωρίς να επιβάλλεται συμβιβασμός στην ποιότητα της εμπειρίας χρήσης ή την αποκρισιμότητα του δικτύου.

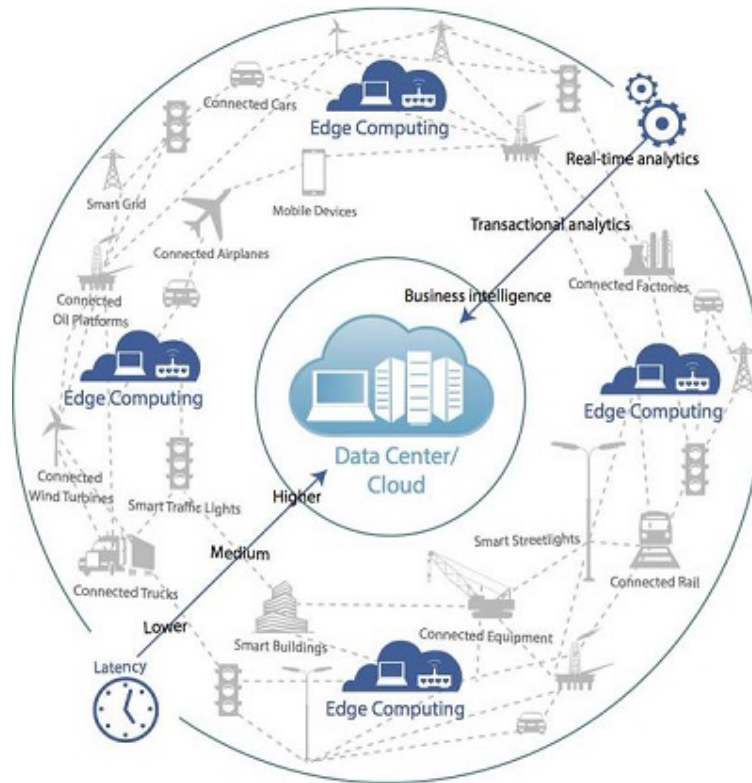
Το περιβάλλον που δημιουργεί η ανάπτυξη MEC χαρακτηρίζεται από

- **Εγγύτητα** : Η τοποθέτηση του εξυπηρετητή MEC κοντά στους τελικούς χρήστες-παραγωγούς δεδομένων επιτρέπει την ευκολότερη και ασφαλέστερη πρόσβαση σε κρίσιμες πληροφορίες για analytics και big data επεξεργασία. Επιπρόσθετα δίνει τη δυνατότητα απευθείας σύνδεσης με κάθε ξεχωριστή συσκευή ανοίγοντας διάυλο παροχής εξειδικευμένων υπηρεσιών.
- **Εντοπιότητα**: Η επιτόπια εγκατάσταση του εξυπηρετητή MEC σημαίνει ότι μπορεί να προσφέρει υπηρεσίες στους τοπικούς χρήστες ακόμα και όντας αποκομμένος από το υπόλοιπο δίκτυο. Αυτό επιτρέπει σε εταιρικά και λοιπά ευαίσθητα δίκτυα να διατηρούν την πρόσβαση στους τοπικούς πόρους αυξάνοντας έτσι σημαντικά την ανθεκτικότητα και αξιοπιστία τους, ενώ η δυνατότητα που παρέχεται να εφαρμόζονται πρόσθετες, εξειδικευμένες πολιτικές ασφάλειας αυξάνει τη θωράκιση υπηρεσιών και δεδομένων έναντι μη εξουσιοδοτημένης πρόσβασης.

- **Χαμηλό latency:** Δεδομένης της εγγύτητας του MEC εξυπηρετητή, ο χρόνος πλήρους διαδρομής RTT είναι σημαντικά μικρότερος με αποτέλεσμα το latency να είναι συνολικά αισθητά χαμηλότερο. Αυτό επιτρέπει να μειωθεί ο χρόνος απόκρισης με αποτέλεσμα τη βελτίωση της εμπειρίας χρήσης αλλά και να γίνει δυνατή η ανάπτυξη νέων εφαρμογών που απαιτούν πολύ μικρότερο latency για την επιτυχή λειτουργία τους. Επιπλέον μπορεί να βοηθήσει σε μερική αποσυμφόρηση άλλων περιοχών του δικτύου καθώς δεν χρειάζεται να εμπλακούν άλλοι, απομακρυσμένοι, πόροι στην βελτίωση της εμπειρίας χρήσης.
- **Επίγνωση θέσης:** Η συνύπαρξη του MEC εξυπηρετητή με τον ελεγκτή του ασύρματου δικτύου στη παρυφή του δίνει πρόσβαση σε πληροφόρηση από τα χαμηλά στρώματα της στοίβας πρωτοκόλλων, γεγονός που μπορεί να γίνει εκμεταλλεύσιμο για ακριβέστερο και ταχύτερο καθορισμό της θέσης των συνδεδεμένων συσκευών. Γεννιέται έτσι μια ολόκληρη νέα κατηγορία υπηρεσιών και εφαρμογών που βασίζονται στη ακριβή γνώση της γεωγραφικής θέση της συνδεδεμένης συσκευής
 - **Γνώση συνθηκών δικτύου:** Η γνώση, σε πραγματικό χρόνο, χαρακτηριστικών του δικτύου (όπως συνθήκες στο ασύρματο σκέλος, στατιστικά του δικτύου κλπ) μπορεί να χρησιμοποιηθεί από εφαρμογές και υπηρεσίες ώστε να προσφέρουν διαβαθμίσιμη εμπειρία χρήσης του δικτύου, καθιστώντας το έτσι περισσότερο ελκυστικό εμπορικά τόσο για τους παρόχους όσο και για περιστασιακούς συνεργάτες.

Για τα περισσότερα από τα προαναφερθέντα χαρακτηριστικά δεν είναι αποκλειστικά απαραίτητο να βρισκόμαστε στην παρυφή ενός ασύρματου δικτύου κινητών υπηρεσιών. Είναι δυνατόν να υπάρξει παρόμοια διαμόρφωση και χαρακτηριστικά από διαφορετικά είδη πρόσβασης στη παρυφή του δικτύου. Αυτό έγινε ξεκάθαρο στους αρμόδιους ειδικούς και αναγνωρίστηκε το Σεπτέμβριο του 2017 με την μετονομασία του MEC από Mobile Edge Computing σε Multi-Access Edge Computing [5] (διατηρώντας έτσι τα ήδη διαδεδομένα αρχικά MEC).

Το Σχήμα 1.2 είναι μια συγκεντρωτική αναπαράσταση των υπάρχοντων και μελλοντικών σημείων πρόσβασης.



Σχήμα 1.2, συγκεντρωτική αναπαράσταση σημείων πρόσβασης

Ως κριτήριο για το ποια από αυτά τα σημεία πρόσβασης μπορούν να θεωρηθούν παρυφή του δικτύου θα χρησιμοποιηθεί η ελάχιστη απόσταση ενός άλματος (hop) από τον τελικό χρήστη. Επομένως παρυφή μπορούν να θεωρηθούν όλα τα παρακάτω

- Σταθμοί βάσης κινητής τηλεφωνίας
- Ελεγκτές ασύρματου δικτύου (RNC)
- Δρομολογητές και σημεία πρόσβασης wi-fi
- Τερματικός εξοπλισμός ενσύρματων δικτύων, πχ DSL, Cable modems
- Σημεία πρόσβασης ιδιοταγών προτύπων, πχ Zigbee[6], LoRa[7]
- Μικροκέντρα δεδομένων (micro data centers)

1.3 Σενάρια Υπηρεσιών

Προκειμένου να εξασφαλιστεί η επιτυχία και η ευρεία εφαρμογή του MEC, είναι σημαντικό οι προδιαγραφές που αναπτύσσονται και προτείνονται από το ETSI MEC ISG να δικαιολογούνται αποδεδειγμένα από παραδείγματα εφαρμογών. Για το λόγο εφαρμόστηκε μια διαδικασία σύμπραξης εμπλεκόμενων και κατάθεσης προτάσεων [8], η οποία είχε ως ελάχιστη απαίτηση την συμμετοχή ενός τηλεπικοινωνιακού παρόχου, ενός

κατασκευαστή εξοπλισμού και ενός παρόχου εφαρμογής/περιεχομένου ανά περίπτωση επιβεβαίωσης ιδέας (PoC).

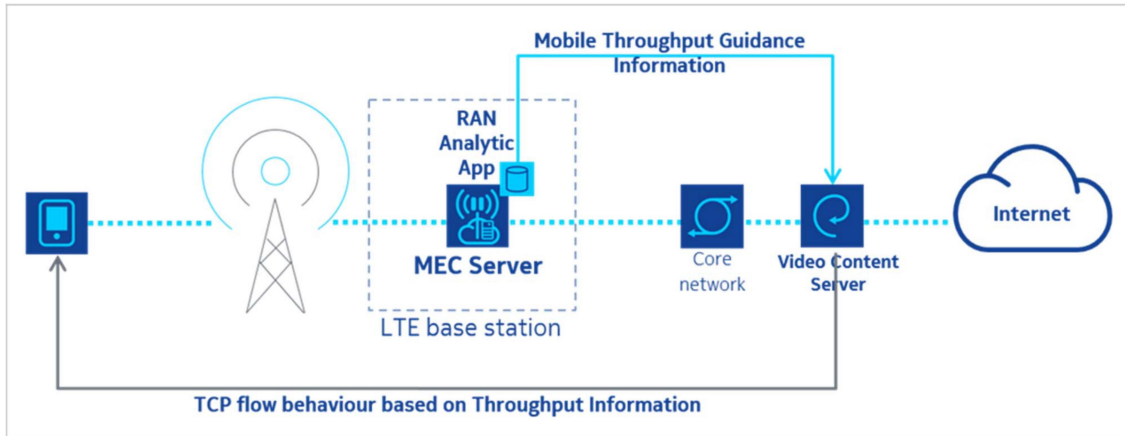
Στη συνέχεια θα γίνει παράθεση των εγκεκριμένων PoC και των σεναρίων προσφερόμενης υπηρεσίας και μεθόδου υλοποίησης που αντιστοιχούν στο κάθε ένα [9]. Έτσι θα γίνει εμφανές ποιες απαιτήσεις οδήγησαν στο καθορισμό του βασικού μοντέλου αναφοράς και του πλαισίου λειτουργίας του MEC.

1.3.1 Υπηρεσία έξυπνης βελτιστοποίησης βίντεο

Η μετάδοση βίντεο με βάση το πρωτόκολλο TCP δεν επιτρέπει την βέλτιστη χρησιμοποίηση του ασύρματου δικτύου πρόσβασης. Αυτό οφείλεται στο σχεδιασμό του TCP πρωτοκόλλου που έχει σαν υπόθεση εργασίας ότι η απώλεια πακέτων και η μεγάλη καθυστέρηση οφείλεται κυρίως στη συμφόρηση του δικτύου. Έτσι ο μηχανισμός ελέγχου του είναι συντηρητικός και αργός σε σχέση με το ρυθμό μεταβολής των συνθηκών στο RAN τόσο σε επίπεδο ραδιοκαναλιού όσο και σε επίπεδο φορτίου λόγω εισόδου ή εξόδου τερματικών.

Η εγκατάσταση μιας εφαρμογής ανάλυσης και αξιολόγησης των συνθηκών RAN στον εξυπηρετητή MEC δίνει την δυνατότητα να παρακαμφθεί η εγγενής αδυναμία του TCP που επισημάνθηκε. Όπως φαίνεται στο Σχήμα 1.3, αυτό επιτυγχάνεται με την ενημέρωση του εξυπηρετητή περιεχομένου βίντεο για το εκτιμώμενο διαθέσιμο εύρος ζώνης σε σχεδόν πραγματικό χρόνο. Με αυτόν τον τρόπο καθίσταται δυνατή η παράκαμψη του αργού μηχανισμού ελέγχου του TCP μέσω της ενεργής προσαρμογής των παραμέτρων, όπως αρχικό μέγεθος παραθύρου και παράθυρο συμφόρησης, από τον ίδιο τον εξυπηρετητή περιεχομένου βίντεο. Η ίδια πληροφορία μπορεί να μεταβιβαστεί και ένα επίπεδο πάνω, στο επίπεδο εφαρμογής, και να ενεργοποιήσει την προσαρμογή της ροής δεδομένων στο διαθέσιμο εύρος ζώνης μέσω υποβιβασμού της ανάλυσης, του λόγου συμπίεσης ή άλλων ποιοτικών χαρακτηριστικών του μεταδιδόμενου βίντεο.

Ο μηχανισμός αυτός επιτυγχάνει την ελαχιστοποίηση του χρόνου έναρξης της αναπαραγωγής βίντεο καθώς και των περιπτώσεων προσωρινής παύσης αναπαραγωγής, προσδίδοντας ανώτερη ποιότητα εμπειρίας στον τελικό χρήστη ενώ εξασφαλίζει μέγιστο βαθμό αποδοτικότητας στη χρήση των δικτυακών πόρων.



Σχήμα 1.3, Υλοποίηση MEC υπηρεσίας έξυπνης βελτιστοποίησης βίντεο

1.3.2 Υπηρεσία ανάλυσης ροής βίντεο

Η ανάλυση ροών βίντεο γνωρίζει διευρυνόμενη χρήση και εφαρμογές. Από ιχνηλασία αντικειμένων για σκοπούς τεκμηρίωσης θέσης και ασφάλειας, ταυτοποίηση εγκεκριμένων χρηστών σε χώρους περιορισμένης πρόσβασης, αναγνώριση μη τυπικών συνθηκών σε δημόσιους χώρους και έκτακτες καταστάσεις στο οδικό δίκτυο μέχρι μηχανική ανάγνωση πινακίδων σε χώρους στάθμευσης.

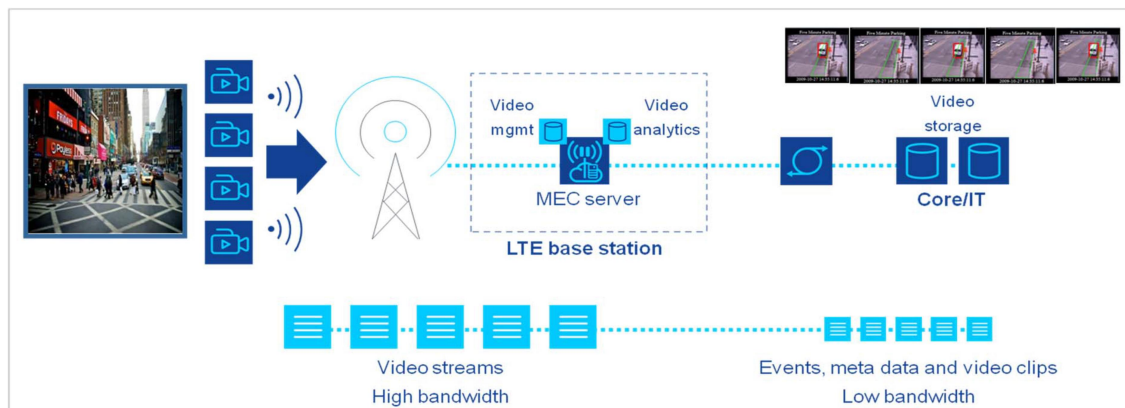
Έως τώρα η διαχείριση αυτής της τεράστιας ροής πληροφορίας γίνεται είτε με επιτόπια επεξεργασία και αποθήκευση, οπότε κοστοβόρος εξοπλισμός θα πρέπει να διατίθεται σε κάθε σημείο παραγωγής ροής βίντεο ενώ και η ασφάλεια είναι κυμαινόμενη ανάλογα του σημείου εγκατάστασης, είτε με αποστολή σε κεντρικούς εξυπηρετητές ανάλυσης βίντεο προκαλώντας δυσανάλογη συμφόρηση του κορμού του δικτύου σε σχέση με τη χρηστική αξία των αποτελεσμάτων της ανάλυσης.

Η δυνατότητα που προσφέρει το MEC είναι η εγκατάσταση υπηρεσίας ανάλυσης βίντεο τοπικά χωρίς όμως την υποχρέωση αντιστοίχισης ξεχωριστού εξοπλισμού ανά μια κάμερα. Εξασφαλίζει έτσι οικονομία κλίμακας και αυξημένη ασφάλεια χωρίς να επιβαρύνει το δίκτυο κορμού.

Η προτεινόμενη υλοποίηση προβλέπει την εγκατάσταση ενός εξυπηρετητή ανάλυσης βίντεο στη παρυφή του δικτύου, ο οποίος θα χρησιμοποιεί την υψηλή διαθεσιμότητα εύρους ζώνης του RAN για να δέχεται την ροές βίντεο υψηλής ανάλυσης απευθείας από τις κάμερες. Στη συνέχεια, με ευέλικτα προγραμματίσιμο τρόπο, θα τις αναλύει και θα ενεργοποιεί τις προκαθορισμένες λειτουργίες. Σε αυτές περιλαμβάνεται η ενημέρωση του κεντρικού πληροφοριακού συστήματος μόνο με τα αξιοποιήσιμα τμήματα βίντεο, καθώς και με απλά στιγμιότυπα βίντεο και μεταδεδομένα για λόγους τεκμηρίωσης

εξοικονομώντας έτσι σημαντικό εύρος ζώνης στο δίκτυο κορμού. Επιπλέον η ελάχιστη ασφάλεια που προσφέρεται είναι τουλάχιστον ίση με αυτή της παρυφής του δικτύου.

Στο Σχήμα 1.4 δίνεται εποπτικά η ροή του βίντεο, ο ρόλος του MEC εξυπηρετητή ανάλυσης στο μετασχηματισμό αυτής της ροής, οι παράπλευρες λειτουργίες που ενεργοποιεί και οι μεταβολές στις απαιτήσεις εύρους ζώνης που επιφέρει.



Σχήμα 1.4, Υλοποίηση MEC υπηρεσίας ανάλυσης ροής βίντεο

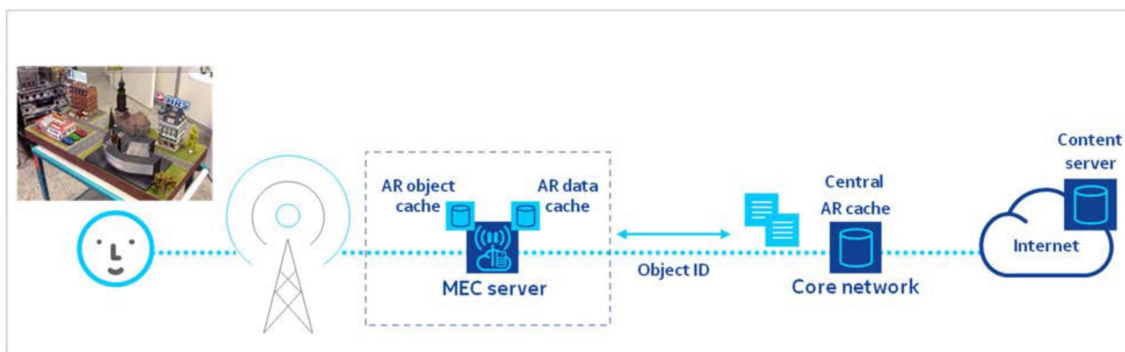
1.3.3 Υπηρεσία επαυξημένης πραγματικότητας

Οι εφαρμογές επαυξημένης πραγματικότητας έχουν αναδείξει νέες προοπτικές στο τρόπο που αλληλεπιδρούμε με τον περιβάλλοντα χώρο. Η δυνατότητα μιας πολυεπίπεδης και εξατομικευμένης εμπειρίας χρήσης σε ψυχαγωγικό, εκπαιδευτικό ή επαγγελματικό πλαίσιο προσελκύει τελικούς χρήστες και εμπορικούς παρόχους εξίσου έντονα. Μουσεία, κινηματογραφικές αίθουσες, εμπορικές εκθέσεις, εκπαιδευτικά ιδρύματα, ιατρικές μονάδες είναι μερικές μόνο από τις προτεινόμενες δυνατότητες εφαρμογής.

Το κοινό χαρακτηριστικό των εφαρμογών επαυξημένης πραγματικότητας είναι ότι η επιπλέον πληροφορία που προσφέρουν έχει υψηλή συσχέτιση με τη θέση του χρήστη. Η εγκατάσταση ενός κατάλληλου MEC εξυπηρετητή επαυξημένης πραγματικότητας, που παρεμβάλλεται μεταξύ του τελικού χρήστη και του κεντρικού εξυπηρετητή περιεχομένου, δύναται να μοχλεύσει τη συσχέτιση θέσης-περιεχομένου μέσω προληπτικής προσωρινής αποθήκευσης της πληροφορίας που αντιστοιχεί στα γειτονικά αντικείμενα με κέρδος μικρότερο latency και μειωμένο φορτίο στο δίκτυο κορμού.

Στο Σχήμα 1.5 φαίνεται πως η μεσολάβηση του εξυπηρετητή AR στη παρυφή του δικτύου επιτυγχάνει το στόχο του χαμηλού latency ενώ ταυτόχρονα εξομαλύνει τις αιχμές τηλεπικοινωνιακού φορτίου και το συνολικό όγκο αυτού προς το δίκτυο κορμού μέσω της προληπτικής λήψης των τοπικά σχετικών δεδομένων και την αποθήκευσή τους στη

προσωρινή μνήμη του. Ουσιαστικά διασφαλίζει ότι η απαραίτητη ποιότητα υπηρεσίας είναι διαρκώς διαθέσιμη ώστε η εφαρμογή εικονικής πραγματικότητας να είναι αξιόπιστη, εύχρηστη και ελκυστική.



Σχήμα 1.5, Υπηρεσία επαυξημένης πραγματικότητας

1.3.4 Υπηρεσία υποβοήθησης σε υπολογιστικό φορτίο υψηλής έντασης

Αρκετές έξυπνες συσκευές επιβάλλεται να είναι αρκετά πολύπλοκες προκειμένου να μπορούν να ανταπεξέλθουν στο υπολογιστικό φορτίο τους όταν λειτουργούν αυτοτελώς. Ωστόσο η προσθήκη δυνατότητας διασύνδεσης μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να αναθέσει μέρος του υπολογιστικού φορτίου σε κάποιο τμήμα του Υπολογιστικού Νέφους μειώνοντας αντίστοιχα την απαιτούμενη υπολογιστική ισχύ της συσκευής και άρα την πολυπλοκότητα της. Η χαμηλότερη πολυπλοκότητα με τη σειρά της μειώνει το κόστος ενώ παράλληλα αυξάνει την ενεργειακή αυτονομία.

Ειδικά για τις εφαρμογές που απαιτείται η συλλογή πληροφορίας από διαφορετικές πηγές η ανάθεση του υπολογιστικού σκέλους σε μια κεντρικότερη δομή εξαλείφει το αθροιστικό latency που θα προέκυπτε από τη διαδοχική επικοινωνία της συσκευής με κάθε μια πηγή ξεχωριστά και έτσι αυξάνει την αποκρισιμότητα της συσκευής.

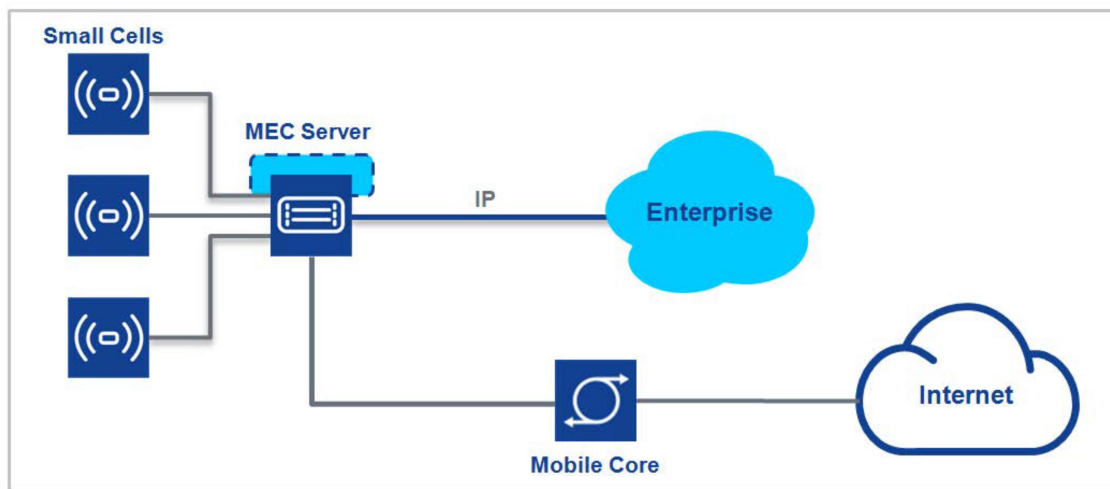
Η παρεμβολή ενός MEC εξυπηρετητή στη παρυφή του δικτύου παρέχει αυξημένη υπολογιστική ισχύ, χαμηλό latency και χαμηλές απαιτήσεις συνδεσιμότητας συγκριτικά με μια απομακρυσμένη εφαρμογή του κλασσικού Υπολογιστικού Νέφους επιτρέποντας έτσι την ανάπτυξη απλοποιημένων έξυπνων συσκευών με ικανοποιητική αυτονομία και προσιτό κόστος που όμως δεν υπολείπονται σε λειτουργικότητα.

1.3.5 Υπηρεσία Εταιρικής υλοποίησης

Ενώ όλο και μεγαλύτερο τμήμα των εταιρικών υποδομών πληροφορικής μετακινείται προς τη πλατφόρμα του Υπολογιστικού Νέφους, παράλληλα η πρόσβαση προς τους υπολογιστικούς πόρους μετακινείται από τα κλασικά ενσύρματα δικτυωμένα τερματικά σε ασύρματα και κινητά τερματικά , προσωπικούς υπολογιστές και τηλέφωνα. Η έννοια του κινητού γραφείου προϋποθέτει την ισοδύναμη πρόσβαση στους εταιρικούς πόρους για τα πιστοποιημένα τερματικά και χρήστες ανεξάρτητα από το είδος του τερματικού ή το μέσο σύνδεσης.

Η εγκατάσταση ενός εξυπηρετητή MEC ως υπερκείμενη υπηρεσία στο κέντρο διαμεταγωγής που συγκλίνουν οι παρυφές του ασύρματου εταιρικού δικτύου και της μικροκυψέλης του δικτύου κινητής τηλεφωνίας, μπορεί να παράσχει μια διάφανη ομογενή διεπαφή πρόσβασης των διαπιστευμένων εταιρικών χρηστών στους υπολογιστικούς πόρους της επιχείρησης.

Στο Σχήμα 1.6 φαίνεται το στρατηγικό σημείο ανάπτυξης της MEC εφαρμογής που της επιτρέπει να παίζει το ρόλο του κομβικού σημείου πρόσβασης προς την εταιρική υπολογιστική υποδομή ανεξάρτητα της προέλευσης των αιτημάτων. Η εφαρμογή MEC όχι μόνο επιτελεί τις βασικές λειτουργίες δρομολόγησης αλλά μέσω αυτών επιτυγχάνει την εξισορρόπηση του δικτυακού φορτίου μεταξύ των διαφορετικών δικτύων πρόσβασης και προσφέρει υπηρεσία βαθμιδωτών προνομίων πρόσβασης σε υπολογιστικές υπηρεσίες και εταιρικά δεδομένα.



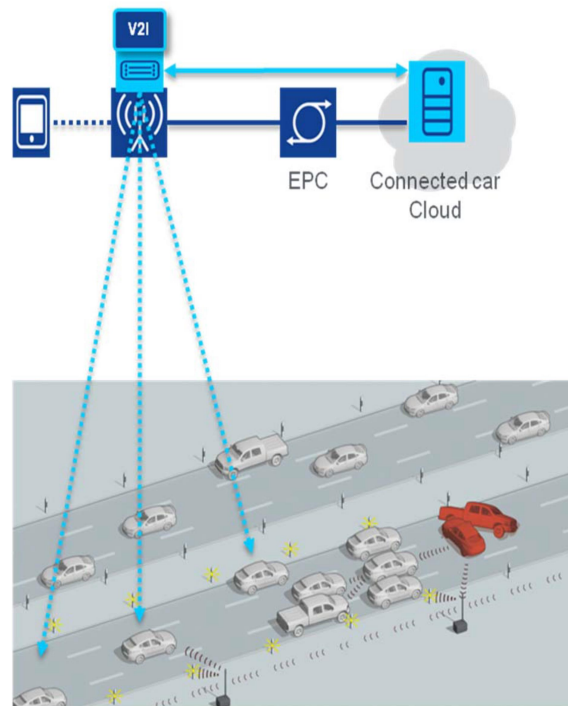
Σχήμα 1.6, Εταιρική υλοποίηση

1.3.6 Διασυνδεδεμένα οχήματα

Ο αριθμός των αυτοκινήτων και λοιπών οχημάτων με δυνατότητα δικτύωσης αυξάνεται με ταχείς ρυθμούς. Κατά αντιστοιχία αυξάνεται και η ανάγκη επικοινωνίας τόσο των οχημάτων μεταξύ τους όσο και των οχημάτων με τους αισθητήρες παρακείμενα των οδών ώστε να εξασφαλίζεται η απαραίτητη ασφάλεια, η αποδοτικότητα στη κυκλοφορία στο οδικό δίκτυο και η άνεση του επιβάτη.

Τα οχήματα επικοινωνούν είτε απευθείας, κυρίως όταν βρίσκονται σε απόσταση οπτικής επαφής, με χρήση τεχνολογίας αποκλειστικής σύνδεσης μικρής εμβέλειας (DSRC), είτε μέσω LTE όταν βρίσκονται εκτός οπτικής επαφής. Το LTE μπορεί να ανταποκριθεί στις απαιτήσεις χαμηλού latency που είναι αναγκαίες για διασυνδεδεμένα οχήματα και μπορεί να συνυπάρξει με υπάρχοντα τοπικά δίκτυα DSRC καθιστώντας το προτιμητέα πλατφόρμα ανάπτυξης.

Στο σενάριο των διασυνδεδεμένων οχημάτων, όπως φαίνεται και στο Σχήμα 1.7, η εγκατάσταση ενός MEC εξυπηρετητή δρα συμπληρωματικά και βελτιωτικά στην LTE υποδομή. Η ευρέως αποκεντρωμένη διάταξη των LTE σταθμών βάσης ουσιαστικά εξασφαλίζει το χαμηλό latency για κάθε παρακείμενα εγκατεστημένο MEC εξυπηρετητή, ικανοποιώντας έτσι τη βασική απαίτηση. Με τον MEC εξυπηρετητή επιτυγχάνεται η προσθήκη ενός αφηρημένου στρώματος μεταξύ των οχημάτων και αισθητήρων από τη μια μεριά και του δικτύου κορμού και των διαδικτυακών εφαρμογών από την άλλη, προσφέροντας μια συνεκτική και ανθεκτική διεπαφή ικανή να απορροφήσει το διαφορετικό ρυθμό εξέλιξης και διάδοσης υλικού, λογισμικού και υπηρεσιών. Επιπρόσθετα διευρύνει τις υπηρεσίες προστιθέμενης αξίας που μπορεί να προσφέρει ο σταθμός βάσης, όπως άμεση ενημέρωση κυκλοφοριακής κατάστασης προς το όχημα και τον επιβλέποντα του οδικού δικτύου, διαθέσιμες θέσεις στάθμευσης σε πραγματικό χρόνο, ενημέρωση κοινού για επικίνδυνες οδικές συνθήκες και ατυχήματα και ενημέρωση των γειτονικών εξυπηρετητών MEC ώστε να διαδοθεί η εκτίμηση της τρέχουσας κατάστασης τμήματος του οδικού δικτύου ταχύτερα από ότι σε ένα μοντέλο λειτουργίας με κεντρικό εξυπηρετητή.

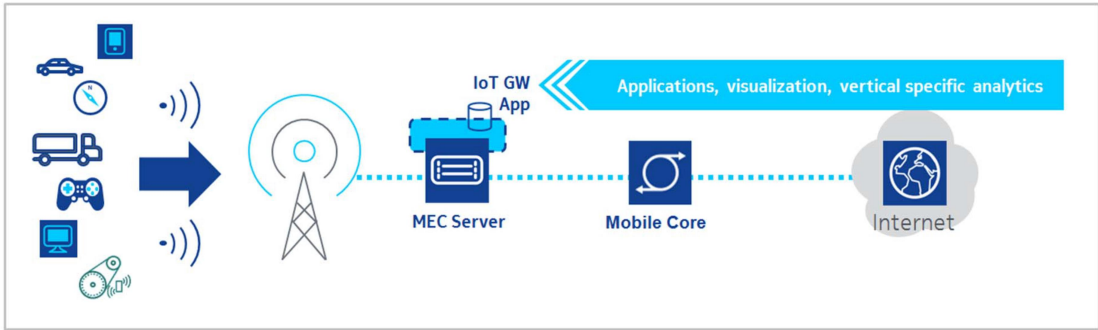


Σχήμα 1.7, MEC για διασυνδεδεμένα οχήματα σε LTE σταθμό βάσης

1.3.7 Υπηρεσία Πύλης IoT

Το Διαδίκτυο των Πραγμάτων (IoT) χαρακτηρίζεται από πληθώρα ανομοιογενών συσκευών με διαφορετικές απαιτήσεις επικοινωνίας και ποιότητας υπηρεσίας. Η συγκέντρωση, οργάνωση και εξομάλυνση της ροής πληροφορίας από και προς τις συσκευές είναι μια διαρκής εργασία που μπορεί να εκτελεστεί αποδοτικότερα με μια υπηρεσία αποκλειστικά αφιερωμένη σε αυτήν.

Το ρόλο αυτό αναλαμβάνει, όπως φαίνεται στο Σχήμα 1.8, μια εφαρμογή Πύλης IoT η οποία είναι τμήμα του MEC εξυπηρετητή. Η εφαρμογή Πύλης IoT αναλαμβάνει να αναλύσει τη ροή πληροφορίας από και προς τις IoT συσκευές, να την ταξινομήσει ανάλογα με τις απαιτήσεις latency, να κρατήσει αρχείο και στατιστικά της κίνησης όταν χρειάζεται, να επιλέξει τη κατάλληλη δρομολόγηση προς το δίκτυο κορμού και το ίντερνετ, να συνενώσει χρονικά ή ανά κατηγορία τα σποραδικά μηνύματα IoT συσκευών χαμηλής επεξεργαστικής ισχύος ή/και υψηλής τυχαιότητας επικοινωνίας, να ελέγχει τη κατάσταση των IoT συσκευών και να ρυθμίζει τη πρόσβαση προς αυτές. Όλες τις παραπάνω λειτουργίες τις επιτελεί με το χαμηλότερη δυνατό latency όντας εγκατεστημένη πλησίον του σταθμού βάσης ή στο σημείο συγκέντρωσης της ροής από 3G, LTE, Wi-fi ασύρματο δίκτυο, bluetooth ή άλλα πρωτόκολλα ασύρματης σύνδεσης.



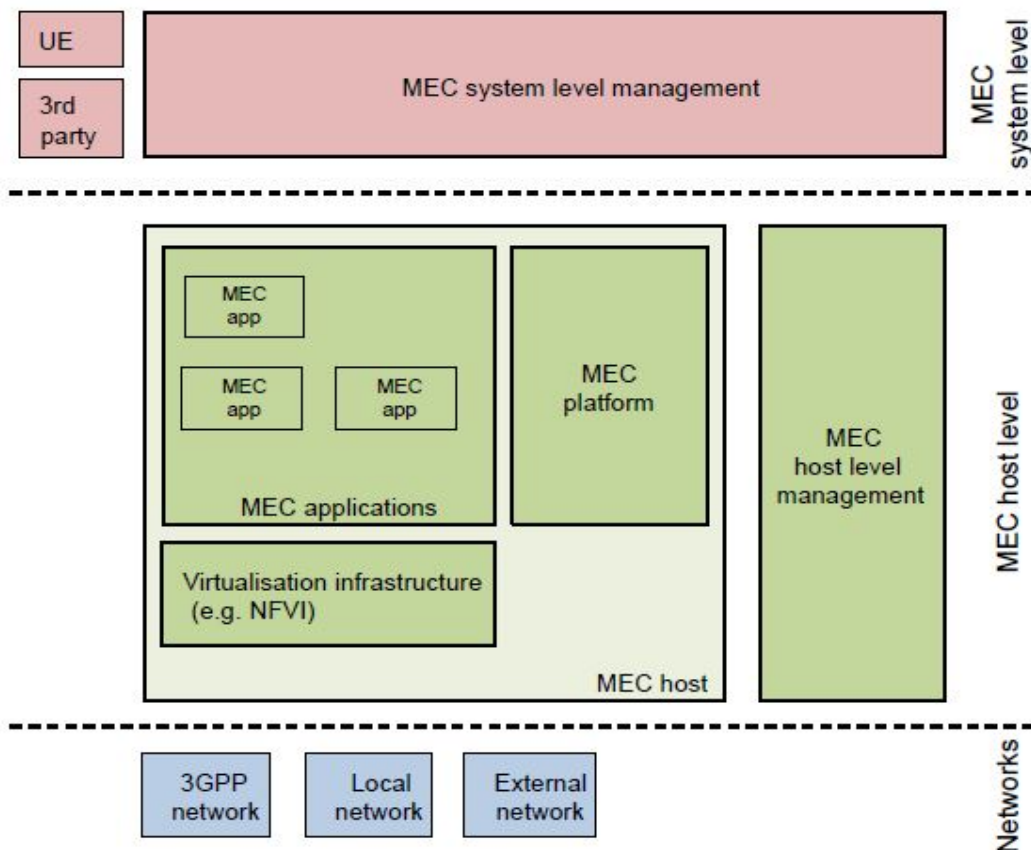
Σχήμα 1.8, Πύλη IoT

Κεφάλαιο 2: Βασικό πλαίσιο και αρχιτεκτονική αναφοράς MEC

Ο συνδυασμός των λειτουργικών απαιτήσεων και των προσφερόμενων υπηρεσιών από τα σενάρια εφαρμογών που αναλύθηκαν στο προηγούμενο κεφάλαιο οδήγησε στη κωδικοποίηση των προδιαγραφών του MEC κατά ETSI στο βασικό πλαίσιο και την αρχιτεκτονική αναφοράς που θα παρουσιαστεί ακολούθως.

2.1 Βασικό πλαίσιο MEC

Στο Σχήμα 2.1 παρουσιάζεται το βασικό πλαίσιο MEC όπως προτείνεται από τον ETSI. Πρόκειται για μια παρουσίαση σε υψηλό επίπεδο των οντοτήτων που εμπλέκονται στη λειτουργία του MEC. Σύμφωνα με το πλαίσιο αυτό οι MEC εφαρμογές υλοποιούνται αποκλειστικά σαν οντότητες λογισμικού και τρέχουν πάνω από την υποδομή εικονικότητας δικτύου(NFVI) που λειτουργεί στη παρυφή του δικτύου. Οι MEC εφαρμογές κατηγοριοποιούνται σε τρία επίπεδα οντοτήτων, επίπεδο συστήματος (system level), επίπεδο ξενιστή (host level) και επίπεδο δικτύου(network level).[10]



Σχήμα 2.1, Βασικό πλαίσιο MEC

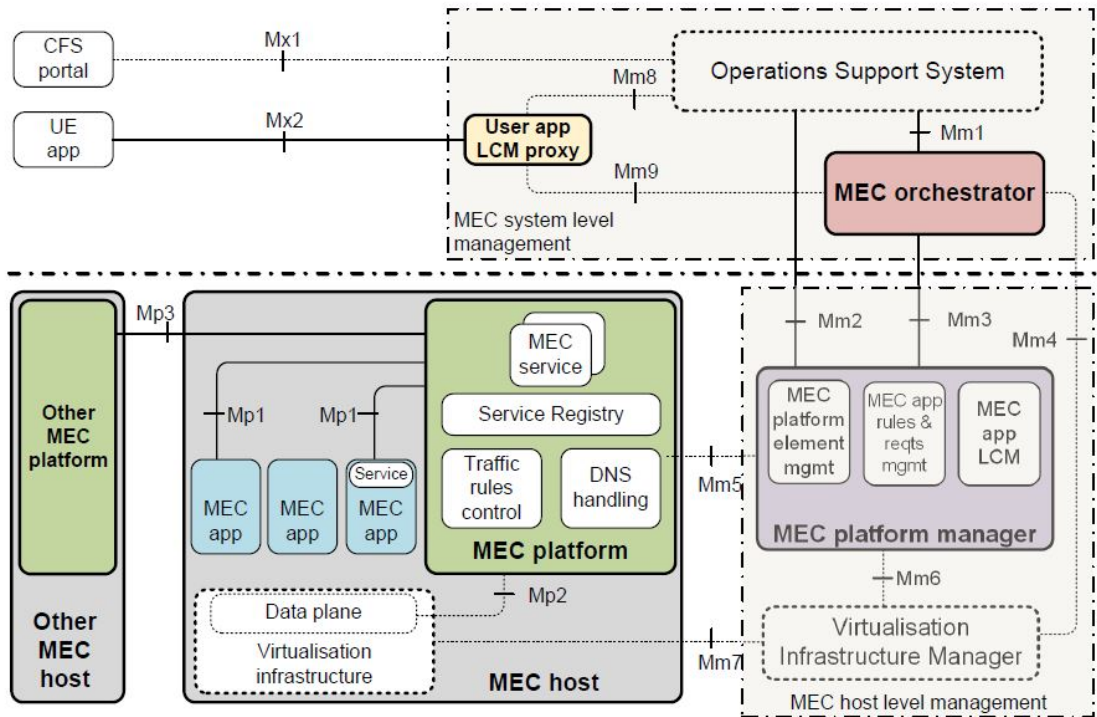
Στη βάση βρίσκεται το επίπεδο δικτύου, το οποίο περιλαμβάνει όλες τις σχετιζόμενες με δικτύωση εξωτερικές οντότητες. Το επίπεδο αυτό αντιπροσωπεύει την συνδεσιμότητα με το τοπικό δίκτυο, με το δίκτυο κινητής τηλεφωνίας (3GPP) αλλά και με εξωτερικά δίκτυα όπως το Internet.

Αμέσως ψηλότερα βρίσκεται το επίπεδο host που αποτελείται από την οντότητα του MEC host και την αντίστοιχη οντότητα διαχείρισης του MEC host. Με τη σειρά της η οντότητα του MEC host περιλαμβάνει την MEC πλατφόρμα, τις MEC εφαρμογές και την υποδομή εικονικότητας δικτύου και προσφέρει υπολογιστικούς, αποθηκευτικούς και δικτυακούς πόρους για την εκτέλεση των MEC εφαρμογών. Η MEC πλατφόρμα είναι το σύνολο της στοιχειώδους λειτουργικότητας που απαιτείται για να εκτελεστούν οι MEC εφαρμογές πάνω στην συγκεκριμένη υποδομή εικονικότητας δικτύου του εκάστοτε MEC εξυπηρετητή.

Τέλος, στο ανώτερο στρώμα βρίσκεται το επίπεδο συστήματος με κύρια οντότητα την διαχείριση επιπέδου συστήματος MEC. Η οντότητα αυτή έχει εποπτική εικόνα ολόκληρου του MEC συστήματος, πχ βλέπει όλους τις οντότητες MEC host, και επιτελεί τις αναγκαίες ενέργειες διαχείρισης επικοινωνώντας με την αντίστοιχη οντότητα διαχείρισης host του κατώτερου επιπέδου.

2.2 Αρχιτεκτονική αναφοράς MEC

Μια λεπτομερέστερη παρουσίαση των οντοτήτων και αναλυτικότερη περιγραφή των λειτουργιών που επιτελούν γίνεται στην MEC αρχιτεκτονική αναφοράς, όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.2. Διατηρείται η βασική διάκριση σε επίπεδο συστήματος, επίπεδο host και επίπεδο δικτύου, όπως στο βασικό πλαίσιο, αλλά οι οντότητες του επιπέδου δικτύου δεν περιγράφονται ρητά καθώς δεν χρειάζονται ειδικά για το MEC σημεία αναφοράς για πρόσβαση στις οντότητες δικτύου.



Σχήμα 2.2, Αρχιτεκτονική αναφοράς MEC

Η πρόσβαση στις λειτουργίες του MEC από τους εξωτερικούς χρήστες γίνεται μέσω των σημείων αναφοράς Mx1, Mx2. Στο Mx1 συνδέονται οι πύλες διεπαφής πελάτη (CFS portal) τις οποίες λειτουργούν τρίτα μέρη(πχ εμπορικές επιχειρήσεις), και οι οποίες επιλέγουν και παραγγέλνουν ένα υποσύνολο διαθέσιμων υπηρεσιών MEC προς διάθεση στους τελικούς χρήστες και ανατροφοδοτούνται με πληροφορίες για το επίπεδο της παρεχόμενης υπηρεσίας. Στο Mx2 συνδέονται οι εφαρμογές που τρέχουν στο τερματικό εξοπλισμό χρήστη(UE) και επικοινωνούν πρωτίστως με την οντότητα-πληρεξούσιο διαχείρισης του κύκλου ζωής της εφαρμογής χρήστη. Μέσω αυτής, η εφαρμογή στο UE ζητά από το MEC σύστημα να εκτελέσει μια εφαρμογή στο σύστημα ή να την μετακινήσει εντός ή εκτός συστήματος. Το Mx2 είναι αποκλειστικά προσβάσιμο από χρήστες του δικτύου κινητής τηλεφωνίας.

2.2.1 Επίπεδο Συστήματος

Η διαχείριση στο επίπεδο συστήματος MEC περιλαμβάνει τρεις οντότητες, τον ενορχηστρωτή MEC (MEO), το σύστημα υποστήριξης λειτουργιών (OSS) και τον πληρεξούσιο διαχείρισης του κύκλου ζωής (LCM) της εφαρμογής χρήστη που αναφέρθηκε προηγουμένως.

Ο ενορχηστρωτής MEC έχει τον κομβικό ρόλο καθώς έχει αρμοδιότητα να διατηρεί συνολική εικόνα του MEC συστήματος, ποιοι MEC ξενιστές είναι σε λειτουργία, ποιοι πόροι είναι διαθέσιμοι, ποιες υπηρεσίες προσφέρονται καθώς και ποια είναι η τοπολογία των παραπάνω. Είναι υπεύθυνος για τα πακέτα εφαρμογών που φορτώνονται στο MEC σύστημα και ελέγχει την αυθεντικότητα και ακεραιότητα τους. Πιστοποιεί τους κανόνες και τις απαιτήσεις των εφαρμογών και τα τροποποιεί όποτε είναι απαραίτητο ώστε να συμμορφώνονται με τις πολιτικές χρήσης των παρόχων. Διατηρεί αρχείο όλων των φορτωμένων πακέτων εφαρμογών και προετοιμάζει τους διαχειριστές υποδομής εικονικότητας για τον χειρισμό των εφαρμογών. Ο ενορχηστρωτής MEC είναι αυτός που επιλέγει τον κατάλληλο MEC host για κάθε στιγμιότυπο εφαρμογής με βάση τους διαθέσιμους πόρους κατά το χρόνο της εκτέλεσης και τις απαιτήσεις της εφαρμογής, πχ latency. Ο ενορχηστρωτής MEC ενεργοποιεί την δημιουργία και τον τερματισμό των στιγμιότυπων των εφαρμογών ή την μεταφορά τους σε άλλο MEC ή στο Υπολογιστικό Νέφος εφόσον αυτή η λειτουργία υποστηρίζεται.

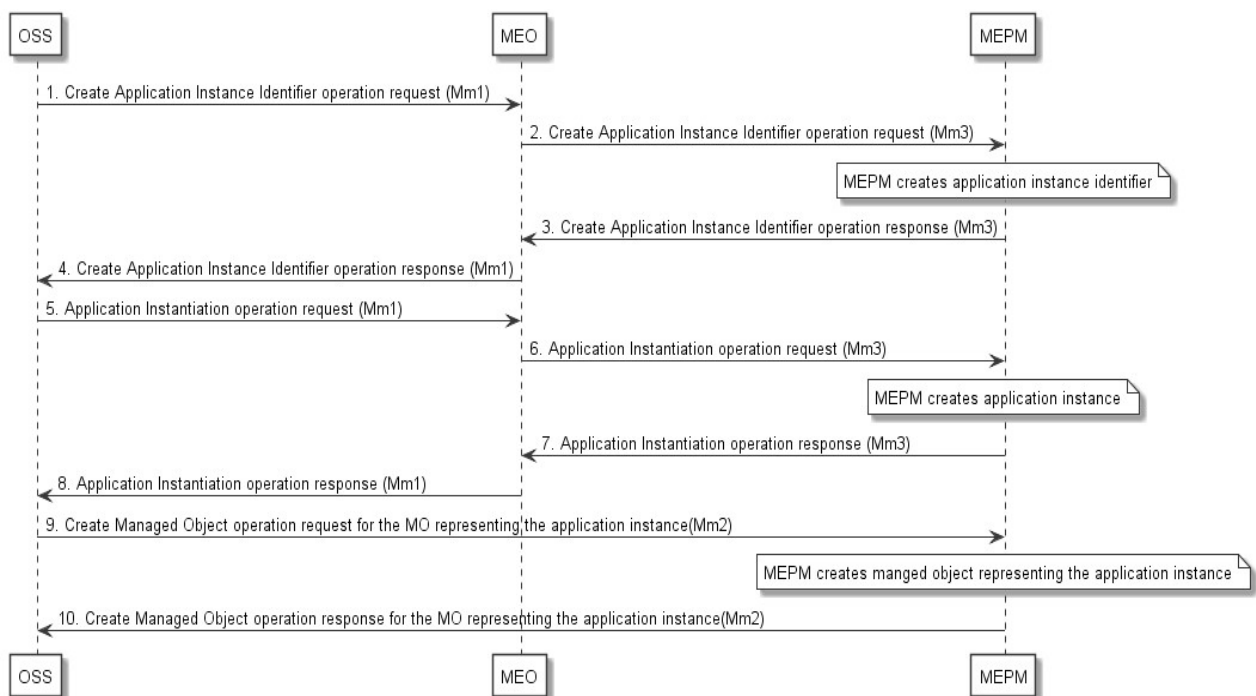
Η μεταφορά των αιτημάτων φόρτωσης, εκκίνησης, τερματισμού ή μεταφοράς εφαρμογής προς τον ενορχηστρωτή MEC γίνεται μέσω δύο διαύλων. Ο ένας διάυλος περνά από τον πληρεξούσιο διαχείρισης του κύκλου ζωής(LCM) της εφαρμογής χρήστη, ο οποίος μέσω του σημείου αναφοράς Mm9, μεταφέρει τα αιτήματα της εφαρμογής που τρέχει στον εξοπλισμό χρήστη(UE) απευθείας στον ενορχηστρωτή MEC και επιστρέφει τις απαντήσεις του ενορχηστρωτή σχετικά με την κατάσταση της αντιστοιχούμενης εφαρμογής MEC στην εφαρμογή UE που την αιτήθηκε. Ο δεύτερος διάυλος περνά από το σύστημα υποστήριξης λειτουργιών (OSS). Το OSS δέχεται είτε απευθείας τα αιτήματα από μια πύλη διεπαφής χρήστη, μέσω του σημείου αναφοράς Mx1, είτε τα αιτήματα από μια εφαρμογή UE αφού πρώτα τα επεξεργαστεί ο πληρεξούσιος LCM, μέσω του σημείου αναφοράς Mm8. Τα αιτήματα για φόρτωση πακέτων εφαρμογών και για δημιουργία ή τερματισμό στιγμιότυπων εφαρμογών που γίνονται δεκτά από το OSS, προωθούνται προς τον ενορχηστρωτή MEC μέσω του σημείου αναφοράς Mm1.

2.2.2 Επίπεδο Host

Η πορεία των αιτημάτων συνεχίζει από τη διαχείριση του επιπέδου συστήματος προς το κατώτερο επίπεδο στη διαχείριση του επιπέδου host. Ο ενορχηστρωτής MEC προωθεί, μέσω του σημείου αναφοράς Mm3, στη διαχείριση πλατφόρμας MEC (MEPM) τα αιτήματα διαχείρισης κύκλου ζωής της εφαρμογής, τους κανόνες και τις απαιτήσεις της εφαρμογής (συμπεριλαμβανομένων της εξουσιοδότησης υπηρεσίας, κανονισμών κίνησης δικτύου, ρύθμιση DNS και επίλυση ασυμβατοτήτων) και διατηρεί μητρώο των διαθέσιμων υπηρεσιών.[11] Αντίστοιχα μέσω του σημείου αναφοράς Mm2, το OSS επικοινωνεί στο

MEPM τα αιτήματα διαχείρισης κύκλου ζωής της εφαρμογής, κανόνες και απαιτήσεις εφαρμογής και τις ρυθμίσεις της MEC πλατφόρμας, και λαμβάνει πίσω ειδοποιήσεις σφαλμάτων και αλλαγές στην λειτουργική κατάσταση της εφαρμογής.[12] Τα αιτήματα προς MEPM που προαναφέρθηκαν εξυπηρετούνται ανά κατηγορία από τις τρεις εξειδικευμένες υποοντότητες που αποτελούν το MEPM και φαίνονται στο διάγραμμα του Σχήματος 2.2.

Στο Σχήμα 2.3 φαίνεται διαγραμματικά η διαδικασία ανταλλαγής αιτημάτων μεταξύ OSS, ενορχηστρωτή MEC και MEPM, μέσω των καθορισμένων σημείων αναφοράς, η οποία ακολουθείται κατά την δημιουργία ενός στιγμιότυπου μιας από τις διαθέσιμες εφαρμογές MEC.



Σχήμα 2.3, Ροή δημιουργίας στιγμιότυπου εφαρμογής από το OSS [12]

Η δεύτερη σημαντική οντότητα της διαχείρισης επιπέδου host είναι η διαχείριση υποδομής εικονικότητας (VIM). Η διαχείριση υποδομής εικονικότητας είναι υπεύθυνη για την χορήγηση, διαχείριση και απελευθέρωση των εικονικών (υπολογιστικών, αποθηκευτικών, δικτυακών) πόρων της υποδομής εικονικότητας. Είναι επίσης υπεύθυνη να προετοιμάσει την υποδομή εικονικότητας για την εκτέλεση του στιγμιότυπου μιας εφαρμογής, εργασία που ενδεχομένως περιλαμβάνει και την αποθήκευση ενός λογισμικού αντιτύπου της εφαρμογής για ταχύτερο φόρτωμα. Η επικοινωνία μεταξύ VIM και της υποδομής εικονικότητας για την εκτέλεση των ανωτέρω λειτουργιών γίνεται μέσω του σημείου αναφοράς Mm7. Η VIM επιπρόσθετα συλλέγει πληροφορίες και παρέχει αναφορά

σχετικά με την απόδοση και τα σφάλματα των εικονικών πόρων. Τις πληροφορίες αυτές και τα αιτήματα διαχείρισης των πόρων εικονικότητας ανταλλάζονται μεταξύ VIM και MEPM μέσω του σημείου αναφοράς Mm6. Η VIM διατηρεί ένα ακόμα σημείο αναφοράς, το Mm4, μέσω του οποίου επικοινωνεί απευθείας με τον ενορχηστρωτή MEC για τις ανάγκες της διαχείρισης πόρων εικονικότητας και στιγμιοτύπων εφαρμογής και για παρακολούθηση της διαθεσιμότητας των πόρων. Τέλος, εφόσον υποστηρίζεται, η VIM είναι υπεύθυνη για την μεταφορά εφαρμογής σε διαφορετική υποδομή εικονικότητας ή στο Υπολογιστικό Νέφος.

Ο host MEC είναι η οντότητα που αποτελεί τον πυρήνα της αρχιτεκτονικής MEC. Περιλαμβάνει την πλατφόρμα MEC και την υποδομή εικονικότητας, που παρέχει υπολογιστικούς, αποθηκευτικούς και δικτυακούς πόρους στις MEC εφαρμογές. Η υποδομή εικονικότητας περιλαμβάνει ένα επίπεδο δεδομένων στο οποίο εφαρμόζονται οι κανονισμοί κίνησης δικτύου που λαμβάνονται από την πλατφόρμα MEC, μέσω του σημείου αναφοράς Mr2, και δρομολογούν την κίνηση μεταξύ εφαρμογών, υπηρεσιών, εξυπηρετητή DNS, 3GPP δικτύου, τοπικών και εξωτερικών δικτύων.

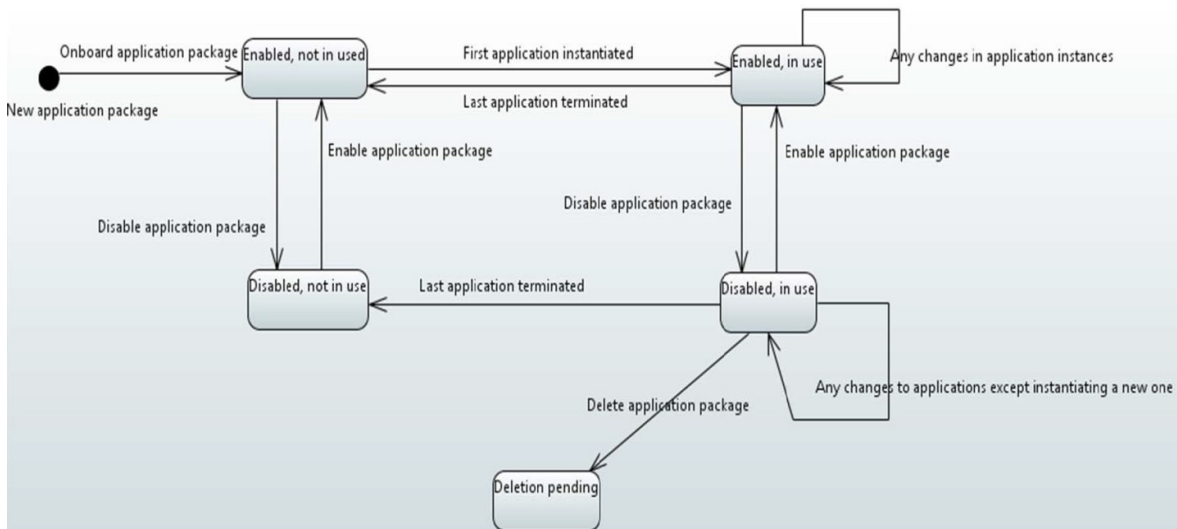
Η οντότητα της πλατφόρμας MEC αντιπροσωπεύει το σύνολο της θεμελιώδους λειτουργικότητας που απαιτείται για την εκτέλεση εφαρμογών MEC σε έναν συγκεκριμένο MEC host και που επιτρέπει στις MEC εφαρμογές να παρέχουν, να καταναλώνουν, να διαφημίζουν και να ανακαλύπτουν MEC υπηρεσίες. Η πλατφόρμα MEC λαμβάνει μέσω του σημείου αναφοράς Mm5 τους κανονισμούς κίνησης δικτύου από το MEPM, τις εφαρμογές και τις υπηρεσίες MEC και ενημερώνει το επίπεδο δεδομένων της υποδομής εικονικότητας. Από το MEPM λαμβάνει επιπλέον τα μητρώα DNS και ενημερώνει τον τοπικό εξυπηρετητή DNS. Άλλες λειτουργίες που επιτελεί η πλατφόρμα MEC είναι η παροχή μόνιμου χώρου αποθήκευσης, πληροφορίες ημερομηνίας και ώρας καθώς και υπηρεσίες πλατφόρμας (σε αντιδιαστολή με τις υπηρεσίες εφαρμογής). Η πλατφόρμα MEC μπορεί να επικοινωνήσει απευθείας με άλλες πλατφόρμες MEC μέσω του σημείου αναφοράς Mr3 και να δημιουργήσουν δικτυακό πλέγμα (grid).

Οι εφαρμογές MEC εκτελούνται σαν εικονικές μηχανές πάνω στην υποδομή εικονικότητας που παρέχει ο MEC ξενιστής. Επικοινωνούν, μέσω του σημείου αναφοράς Mr1, με την πλατφόρμα MEC για να προσφέρουν και να καταναλώσουν MEC υπηρεσίες, είτε της πλατφόρμας είτε άλλων εφαρμογών. Κάθε εφαρμογή MEC έχει συγκεκριμένους κανόνες και απαιτήσεις, όπως απολύτως αναγκαίους ελάχιστα πόρους ή μέγιστο ανεκτό latency, τα οποία επικυρώνει και αρχικοποιεί το MEPM αφού πρώτα εγκριθούν στο επίπεδο συστήματος και επιλεγθεί ο κατάλληλος host. Το MEPM, μέσω του Mr1, επιτελεί και δευτερεύουσες εργασίες για λογαριασμό των εφαρμογών MEC όπως καταγραφή και

διερεύνηση υπηρεσιών, ανακοίνωση κατάστασης διαθεσιμότητας, προετοιμασία για τη μεταφορά της τρέχουσας κατάστασης εφαρμογής, ενεργοποίηση κανονισμών κίνησης και ενημέρωση DNS. Από τη στιγμή που φορτώνεται, η κατάσταση μιας εφαρμογής MEC καθορίζεται από το συνδυασμό δύο θεμελιωδών φάσεων.

- i. Λειτουργική (ενεργή/ ανενεργή)
- ii. Σε χρήση/ όχι σε χρήση

Στο Σχήμα 2.4 δίνεται το διάγραμμα ροής καταστάσεων εφαρμογής

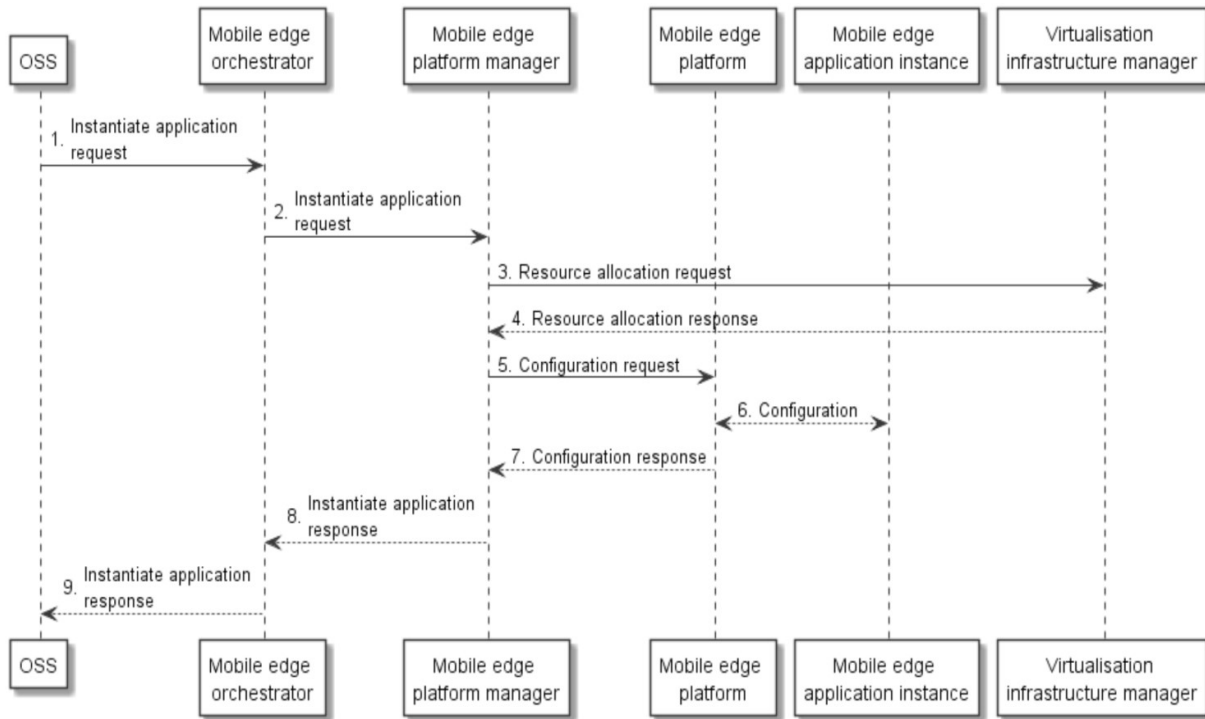


Σχήμα 2.4, Διάγραμμα ροής καταστάσεων εφαρμογής MEC

2.2.3 Υπηρεσίες MEC

Υπηρεσία MEC είναι μια υπηρεσία που μπορεί να παρέχεται ή να καταναλώνεται τόσο από τη πλατφόρμα MEC όσο και από τις εφαρμογές MEC. Πρόσβαση σε μια υπηρεσία MEC έχει η πλατφόρμα MEC και όσες από τις εφαρμογές MEC είναι πιστοποιημένες για τη συγκεκριμένη υπηρεσία. Οι εφαρμογές MEC ανακοινώνουν στο MEPM τις υπηρεσίες που προσφέρουν και αποκτούν πρόσβαση στις υπηρεσίες για τις οποίες έχουν πιστοποίηση μέσω του σημείου αναφοράς Mp1. Σε κάποιες περιπτώσεις, ειδικά σε περιβάλλον πολλαπλών παρόχων, η ίδια υπηρεσία μπορεί να προσφέρεται ταυτόχρονα από πολλαπλές πηγές.

Ως παράδειγμα της ροής αιτημάτων που διατρέχουν πολλαπλές οντότητες και από τα δύο επίπεδα της αρχιτεκτονικής αναφοράς MEC παρατίθεται το διάγραμμα ροής των αιτημάτων για δημιουργία στιγμιότυπου μιας εφαρμογής με αφετηρία το OSS.



Σχήμα 2.5, Διάγραμμα ροής δημιουργίας στιγμιότυπου εφαρμογής από OSS

Η αναλυτική περιγραφή των επιμέρους βημάτων και των εμπλεκόμενων οντοτήτων σε κάθε βήμα είναι η εξής:

- 1) Το OSS στέλνει ένα αίτημα δημιουργίας στιγμιότυπου εφαρμογής στον ενορχηστρωτή MEC.
- 2) Ο ενορχηστρωτής MEC ελέγχει τις παραμέτρους αρχικοποίησης του στιγμιότυπου εφαρμογής και εγκρίνει το αίτημα.. Στη συνέχεια ο ενορχηστρωτής MEC επιλέγει MEC host (και το MEPM που αντιστοιχεί στον επιλεγμένο host) και στέλνει αίτημα δημιουργίας στιγμιότυπου εφαρμογής στο συγκεκριμένο MEPM.
- 3) Το MEPM στέλνει αίτημα ανάθεσης πόρων στη διαχείριση υποδομής εικονικότητας που περιλαμβάνει τις απαιτήσεις σε υπολογιστικούς, αποθηκευτικούς και δικτυακούς πόρους. Η πλατφόρμα MEC θα συμπεριλάβει πληροφορίες του στιγμιότυπου της εφαρμογής στην αίτηση (π.χ. ένα σύνδεσμο στο στιγμιότυπο ή την ταυτότητα του στιγμιότυπου)..
- 4) Η διαχείριση υποδομής εικονικότητας χορηγεί τους πόρους σύμφωνα με το αίτημα του MEPM. Εάν το στιγμιότυπο της εφαρμογής είναι διαθέσιμο τότε το φορτώνει στην μηχανή εικονικότητας και το εκτελεί. Η διαχείριση υποδομής εικονικότητας στέλνει απάντηση για την χορήγηση πόρων στο MEPM.
- 5) Το MEPM στέλνει αίτημα παραμετροποίησης στη πλατφόρμα MEC στο οποίο περιλαμβάνει τους κανονισμούς κίνησης δικτύου και DNS προς διαμόρφωση, τις

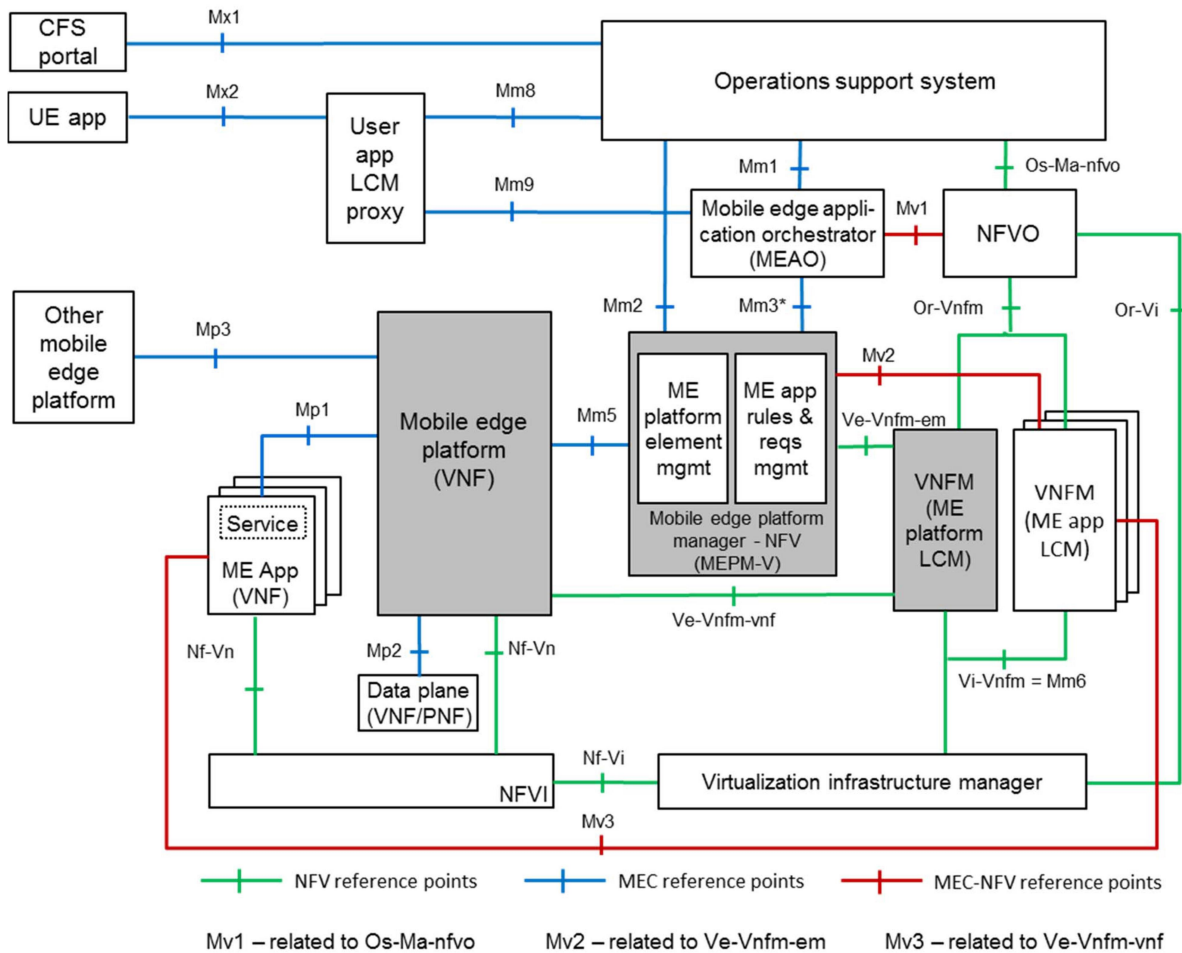
απαραίτητες και προαιρετικές υπηρεσίες καθώς και ποιες υπηρεσίες θα προκύψουν από την εκτέλεση του στιγμιότυπου της εφαρμογής.

- 6) Η πλατφόρμα MEC διαμορφώνει τις παραμέτρους για τους κανονισμούς δικτύου και DNS του στιγμιότυπου της εφαρμογής. Η πλατφόρμα MEC χρειάζεται να περιμένει έως ότου το στιγμιότυπο εκτελείται κανονικά για να ενεργοποιήσει τους κανονισμούς δικτύου και DNS , για το λόγο αυτό χρειάζεται να επικοινωνήσει με το στιγμιότυπο και να πληροφορηθεί για τη κατάσταση στην οποία αυτό βρίσκεται. Η επικοινωνία αυτή γίνεται μέσω του σημείου αναφοράς Mp1. Εφόσον το στιγμιότυπο της εφαρμογής εκτελείται κανονικά η πλατφόρμα MEC παρέχει στο στιγμιότυπο πληροφορίες για τις διαθέσιμες υπηρεσίες.
- 7) Η πλατφόρμα MEC στέλνει απάντηση για την παραμετροποίηση στο MEPM.
- 8) Το MEPM στέλνει απάντηση για τη δημιουργία στιγμιότυπου εφαρμογής στον ενορχηστρωτή MEC στην οποία περιλαμβάνει πληροφορίες για τους πόρους που χορηγήθηκαν.
- 9) Ο ενορχηστρωτής MEC στέλνει απάντηση για τη δημιουργία στιγμιότυπου εφαρμογής στο OSS με τα αποτελέσματα της διαδικασίας δημιουργίας στιγμιότυπου εφαρμογής και την ταυτότητα του στιγμιότυπου που δημιουργήθηκε εφόσον η διαδικασία ήταν επιτυχής.

2.3 MEC και NFV

Το Multi-access Edge Computing και η Εικονικοποίηση Λειτουργιών Δικτύου (NFV) είναι δύο αλληλοσυμπληρούμενες λειτουργικότητες που όμως μπορούν να υπάρχουν και ξεχωριστά. Ωστόσο MEC και NFV βασίζονται και οι δύο στη χρήση της τεχνολογίας εικονικοποίησης, και καθώς οι πάροχοι δικτύου κινητής τηλεφωνίας αναμένεται να εικονικοποιήσουν τα δίκτυά τους χρησιμοποιώντας NFV, στοχεύουν να επιτύχουν την συνένωση στοιχείων εικονικής λειτουργίας δικτύου (VNF), στοιχείων MEC και εφαρμογών MEC πάνω από την υποδομή εικονικότητας. Η κοινή χρήση των πόρων (υποδομής και διαχείρισης) επιτρέπει την μέγιστη αξιοποίηση των επενδύσεων στη εικονικοποίηση και εξασφαλίζει οικονομική βιωσιμότητα και κίνητρα εξάπλωσης.

Στο Σχήμα 2.6 φαίνεται πως το πρότυπο αρχιτεκτονικής MEC μπορεί να αναπτυχθεί σε NFV περιβάλλον. Οι βασικές υποθέσεις εργασίας που επιτρέπουν την υπέρθεση της αρχιτεκτονικής αναφοράς MEC είναι ότι πλατφόρμα MEC υλοποιείται σαν στοιχείο VNF και οι εφαρμογές MEC παρουσιάζονται σαν στοιχεία VNF προς την οντότητα διαχείρισης και ενορχήστρωσης NFV (MANO).[14] [15]



Σχήμα 2.6, MEC αρχιτεκτονική αναφοράς σε NFV περιβάλλον

Ο ενορχηστρωτής MEC, όπως ορίστηκε στη παράγραφο 2.2, μετασχηματίζεται σε ενορχηστρωτή εφαρμογής MEC (MEAO) και κάνει χρήση του ενορχηστρωτή NFV (NFVO) για την ενορχήστρωση των πόρων. Η διαχείριση πλατφόρμας MEC (MEPM), όπως ορίστηκε στη παράγραφο 2.2, μετασχηματίζεται σε διαχείριση πλατφόρμας MEC – NFV (MEPM-V) και αναθέτει τη διαχείριση κύκλου ζωής εφαρμογής σε κάποια διαχείριση VNF (VNFM).

Εισάγονται τρία νέα σημεία αναφοράς μεταξύ οντοτήτων MEC και οντοτήτων NFV ώστε να εξυπηρετείται η διαχείριση των εφαρμογών MEC σαν VNF.

- **Mv1**, σημείο αναφοράς μεταξύ MEAO και NFVO. (σχετίζεται με το Os-Ma-nfvo σημείο αναφοράς της NFV αρχιτεκτονικής)
- **Mv2**, σημείο αναφοράς μεταξύ VNFM, που διαχειρίζεται το κύκλο ζωής εφαρμογής MEC σαν VNF, και του MEPM-V ώστε να λαμβάνει ενημερώσεις για την κατάσταση στην οποία βρίσκεται η εφαρμογή. (σχετίζεται με το Ve-Vnfm-em σημείο αναφοράς της NFV αρχιτεκτονικής)

- **Mn3**, σημείο αναφοράς μεταξύ VNFM και του στιγμιότυπου της MEC εφαρμογής, που το βλέπει σαν VNF, για αρχικοποίηση και άλλες ενέργειες του κύκλου ζωής εφαρμογής. (σχετίζεται με το Ve-Vnfm-vnf σημείο αναφοράς της NFV αρχιτεκτονικής)

Τα υπόλοιπα σημεία αναφοράς είναι όμοια με αυτά που ορίζονται στις αντίστοιχες αρχιτεκτονικές αναφοράς MEC και NFV.

Από τα ανωτέρω γίνεται εμφανές ότι με συγκεκριμένες αλλά περιορισμένες αλλαγές στην αρχιτεκτονική αναφοράς είναι δυνατόν να επιτευχθεί η ανάπτυξη MEC σε περιβάλλον NFV που εξασφαλίζει σημαντικές συνέργειες σε πόρους και στοιχεία διαχείρισης.

2.4 Υπηρεσία Πληροφορίας Ραδιοδιαύλου (RNIS)

Η Υπηρεσία Πληροφορίας Ραδιοδιαύλου (Radio Network Information Service, RNIS) είναι μια υπηρεσία η οποία παρέχει πληροφορίες για το ραδιοδιάλο στη πλατφόρμα MEC και στις εφαρμογές MEC, ικανοποιώντας μια βασική απαίτηση των προδιαγραφών ETSI MEC[16]. Η RNIS προσφέρεται σε εξουσιοδοτημένες εφαρμογές MEC και είναι προσβάσιμη μέσω του σημείου αναφοράς Mp1. Η κλιμάκωση των πληροφοριών του ραδιοδιαύλου μπορεί να ρυθμιστεί βάσει παραμέτρων σε πληροφορίες ανά κυψέλη, ανά εξοπλισμό χρήστη UE, ανά κλάση QCI ή μπορεί να ζητηθεί για μια χρονική περίοδο. Τυπικές πληροφορίες που μπορεί να παρέχονται είναι οι ακόλουθες:

- πληροφορίες ραδιοδιαύλου σε πραγματικό χρόνο σχετικά με τις συνθήκες στο ραδιοδιάλο.
- πληροφορίες μετρήσεων σχετικές με το επίπεδο χρήστη βάσει των προδιαγραφών 3GPP.
- πληροφορίες σχετικά με τα UE που είναι συνδεδεμένα με τους ασύρματους κόμβους με τους οποίους σχετίζεται το MEC, με το γενικό πλαίσιο των UE και το σχετιζόμενο φέρον πρόσβασης στο ραδιοδιάλο
- αλλαγές στις πληροφορίες σχετικά με τα UE που είναι συνδεδεμένα με τους ασύρματους κόμβους με τους οποίους σχετίζεται το MEC, με το γενικό πλαίσιο των UE και το σχετιζόμενο φέρον πρόσβασης στο ραδιοδιάλο

Η πληροφορία ραδιοδιαύλου μπορεί να χρησιμοποιηθεί από τη πλατφόρμα MEC και τις εφαρμογές MEC για να βελτιστοποιήσουν τις υπάρχουσες υπηρεσίες και να παράσχουν νέους τύπους υπηρεσιών που βασίζονται σε πληροφορίες πραγματικού χρόνου σχετικά με τις συνθήκες στο ραδιοδιάλο.

Η πληροφορία ραδιοδιαύλου μπορεί επίσης να χρησιμοποιηθεί από τη πλατφόρμα MEC για να βελτιστοποιήσει τις διαδικασίες κινητικότητας που είναι απαραίτητες στην υποστήριξη της συνέχειας υπηρεσίας.

Η πληροφορία ραδιοδιαύλου μπορεί να εξυπηρετήσει ένα ευρύ φάσμα περιπτώσεων χρήσης. Από τη περίπτωση όπου ορισμένες εφαρμογές MEC ζητούν ένα μόνο κομμάτι πληροφορίας, χρησιμοποιώντας ένα απλό μοντέλο απάντησης αίτησης. Μέχρι την περίπτωση όπου εφαρμογές MEC αποκτούν συνδρομή σε πολλές διαφορετικές ειδοποιήσεις σχετικά με αλλαγές πληροφοριών.

Κεφάλαιο 3: Ανάπτυξη MEC σε δίκτυα 4G

Το MEC, ως μετεξέλιξη της υπηρεσίας Υπολογιστικού Νέφους, μεταφέρει το σημείο φιλοξενίας εφαρμογών από κεντρικές υποδομές δεδομένων στην δικτυακή υποδομή του παρόχου και εγγύτερα στο τελικό χρήστη. Αν και όπως προδίδει το όνομα, Multi-access Edge Computing, υπάρχει ένα ευρύ φάσμα ειδών πρόσβασης που ωφελούνται σημαντικά από τα χαρακτηριστικά που φέρνει το MEC, η αρχική σύλληψη και περαιτέρω ανάπτυξη του έγινε με βάση τα δίκτυα κινητής τηλεφωνίας και στόχο την ενσωμάτωση στην επερχόμενη πέμπτη γενιά, 5G. Το MEC θεωρείται από τους απαραίτητους πυλώνες για την επίτευξη των βασικών δεικτών επίδοσης (KPI) για το 5G, ειδικά όσον αφορά τις απαιτήσεις για χαμηλό latency και αποδοτικότητα εύρους ζώνης.

Ωστόσο το MEC δεν είναι συστατικό αποκλειστικά του 5G. Μάλιστα το πρότυπο αρχιτεκτονικής MEC, το οποίο εξετάστηκε αναλυτικά στη παράγραφο 2.2, είναι αγνωστικιστικό ως προς τη γενιά του δικτύου κινητής που υλοποιείται το πρότυπο MEC. Δεδομένου ότι τα δίκτυα τέταρτης γενιάς προβλέπεται να είναι λειτουργικά και επιτυχημένα για αρκετό διάστημα στο μέλλον, έχει αξία να εξεταστεί ποιες είναι οι δυνατές επιλογές ενσωμάτωσης του MEC στα υπάρχοντα 4G δίκτυα και πως η εισαγωγή του διευκολύνει τη μετάβαση στα δίκτυα 5G.

Στη συνέχεια θα παρουσιαστούν οι τρόποι που το πρότυπο MEC μπορεί να εγκατασταθεί σε ένα 4G δίκτυο, διατηρώντας τη συμβατότητα με τις 3GPP προδιαγραφές του 4G, και τις προκλήσεις που θέτει η κάθε δυνατή υλοποίηση.

3.1 Ανάπτυξη MEC σε 4G δίκτυα

Η δρομολόγηση κίνησης δεδομένων από και προς τις MEC εφαρμογές είναι μια από τις θεμελιακές λειτουργίες της πλατφόρμας MEC. Η κίνηση δεδομένων διέρχεται από τις εφαρμογές MEC κατά έναν από τους ακόλουθους τρόπους[17].

- **Διαφυγή** Στη περίπτωση αυτή η κίνηση ανακατευθύνεται προς μια εφαρμογή MEC που φιλοξενείται τοπικά στο MEC ή σε κάποιον απομακρυσμένο εξυπηρετητή (Αντιπροσωπευτικές εφαρμογές είναι υπηρεσίες περιεχομένου πολυμέσων, υπηρεσίες gaming και πρόσβαση σε εταιρικό δίκτυο)
- **Εν σειρά** Στη περίπτωση αυτή η σύνδεση με τον αρχικό (απομακρυσμένο) εξυπηρετητή διατηρείται αλλά πλέον όλη η κίνηση προς αυτόν περνά μέσα από την εφαρμογή MEC. (Αντιπροσωπευτικές εφαρμογές είναι η διάφανη προσωρινή αποθήκευση περιεχομένου και εφαρμογές ασφαλείας)

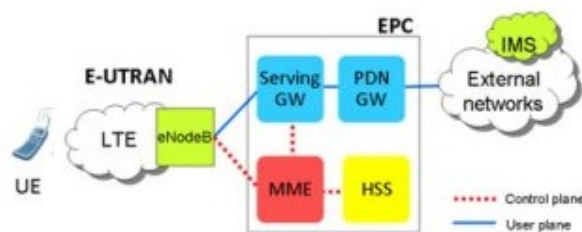
- **Συνακρόαση** Στην περίπτωση αυτή η κίνηση αντιγράφεται και προωθείται εκτός από τον αρχικό προορισμό και στην εφαρμογή MEC συνακρόασης. (Αντιπροσωπευτικές είναι εφαρμογές ασφαλείας και εικονικοί ανιχνευτές δικτύου)
- **Ανεξάρτητα** Στην περίπτωση αυτή δεν υφίσταται ανάγκη ανάθεσης της κίνησης στην εφαρμογή MEC αλλά γίνεται καταγραφή της εφαρμογής στη πλατφόρμα MEC ώστε να μπορεί να λάβει άλλες MEC υπηρεσίες.

Η πλατφόρμα MEC, μέσω του Mip2 σημείου αναφοράς, διαμορφώνει κατάλληλα τον τοπικό εξυπηρετητή DNS και το επίπεδο δεδομένων του host, ώστε να επιτευχθεί η επιθυμητή δρομολόγηση. Επομένως τόσο η υλοποίηση του πεδίου δεδομένων του host όσο και της πλατφόρμας MEC επηρεάζεται από το σημείο εγκατάστασης τους στην 4G αρχιτεκτονική. Οι πιθανοί συνδυασμοί υλοποίησης των δύο αυτών οντοτήτων MEC μπορούν να συμπυκνωθούν στις ακόλουθες κατηγορίες ανάλογα με την τοπολογία.

3.2 Περιπτώσεις εγκατάστασης MEC σε 4G δίκτυα

3.2.1 Εγκατάσταση σε Κατανεμημένο Εξελιγμένο Κορμό Πακέτου (EPC)

Σε αυτήν την εκδοχή εγκατάστασης, ο MEC host συμπεριλαμβάνεται μαζί με, όλα ή μέρος, τα στοιχεία του Εξελιγμένου Κορμού Πακέτου (EPC). Στο Σχήμα 3.1 φαίνεται η γενική αρχιτεκτονική του Συστήματος Εξελιγμένου Πακέτου (EPS) του οποίου το EPC είναι κεντρικό τμήμα.[19]



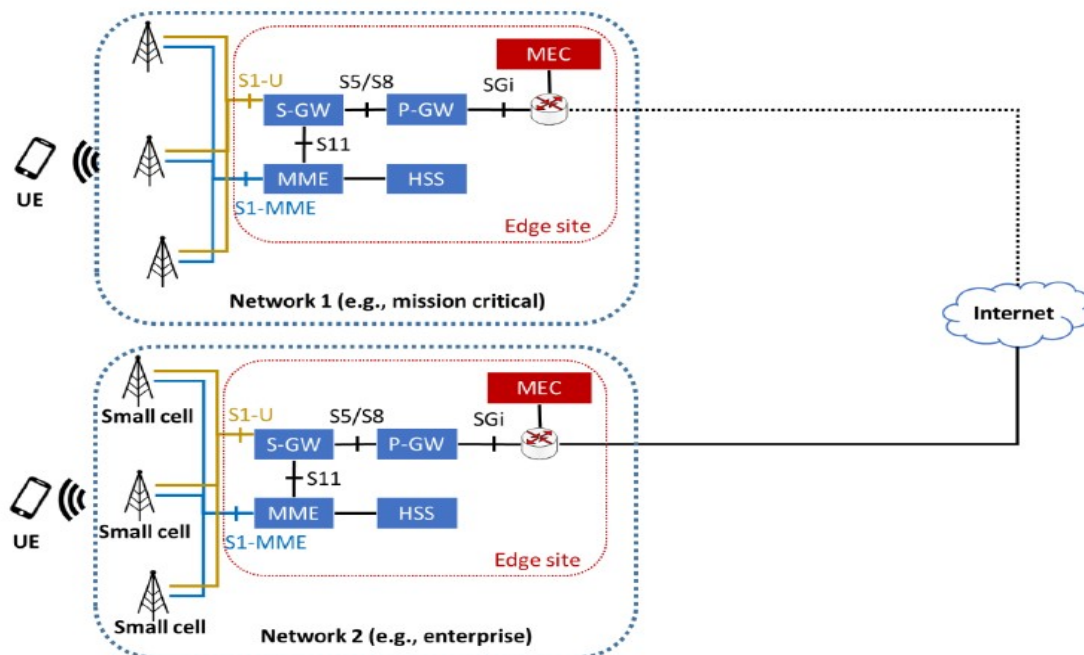
Σχήμα 3.1, Βασικό μοντέλο αρχιτεκτονικής Συστήματος Εξελιγμένου Πακέτου (EPS)

Στη περίπτωση αυτή το επίπεδο δεδομένων του MEC εδράζεται πάνω στο σημείο αναφοράς SGi, της αρχιτεκτονικής αναφοράς του EPC [20], ώστε να μπορεί να κατευθύνει τη κίνηση του επιπέδου χρήστη (U-plane) προς το MEC. Ο τοπικός εξυπηρετητής DNS του MEC και η Πύλη προς το δημόσιο δίκτυο πακέτου (PGW) είναι τα δύο κρίσιμα μέρη στην εκτέλεση της ανακατεύθυνσης. Όταν το τερματικό χρήστη (UE) εγγράφεται στο EPC στο οποίο φιλοξενείται το MEC, τότε η PGW τερματίζει τη σύνδεση του UE με το PDN και δίνει την IP και τις ρυθμίσεις του τοπικού εξυπηρετητή DNS του MEC στο UE. Με

την αλλαγή αυτή τα DNS αιτήματα του UE μεταφράζονται σε τοπικές IP των εφαρμογών MEC και η κίνηση κατευθύνεται και εξυπηρετείται από αυτές. Η εκδοχή εγκατάστασης που περιγράφηκε απαιτεί τις λιγότερες δυνατές αλλαγές από τη πλευρά του δικτύου παρόχου καθώς χρησιμοποιεί τυπικά 3GPP τμήματα και σημεία αναφοράς για τις αναγκαίες λειτουργίες.

Στην περίπτωση που ο εξυπηρετητής οικιακού συνδρομητή (HSS) είναι εγκατεστημένος μαζί με τα υπόλοιπα στοιχεία του EPC τότε δεν είναι απαραίτητη διαρκώς μια λειτουργική σύνδεση με το δίκτυο κορμού προκειμένου να προσφέρεται αδιάκοπα η τοπική υπηρεσία. Η δυνατότητα αυτή καθιστά την συγκεκριμένη διαρρύθμιση ιδανική για υλοποιήσεις κρίσιμου ρόλου που η αδιάλειπτη διαθεσιμότητα είναι αναγκαία. Χαρακτηριστικά παραδείγματα είναι εφαρμογές παρακολούθησης λειτουργικών παραμέτρων σε βιομηχανικό περιβάλλον, ασφάλειας κοινού ή πρώτης ανταπόκρισης σε έκτακτη ανάγκη. Η πρόσβαση σε τοπικά εγκατεστημένο HSS επιτρέπει στο MEC να προσφέρει επακριβώς ανά εταιρικό χρήστη το QoS και την διαβάθμιση πρόσβασης ανά υπηρεσία που καθορίζουν οι εταιρικές προδιαγραφές, καθιστώντας αυτήν την υλοποίηση ιδανική για εταιρική εγκατάσταση.

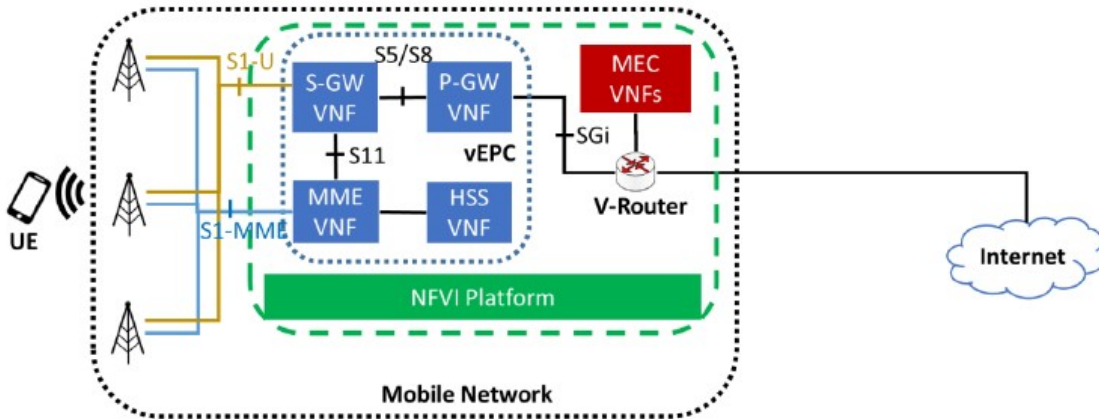
Το Σχήμα 3.2 παρουσιάζει την τοπολογία της εγκατάστασης σε καταναμημένο EPC και τις δύο εκδοχές χρήσης ανάλογα με την, διαρκή ή μη, σύνδεση με το δίκτυο κορμού.



Σχήμα 3.2 Εγκατάσταση MEC σε καταναμημένο EPC

Εφόσον τα στοιχεία του καταναμημένου EPC έχουν υλοποιηθεί ως εικονικές λειτουργίες δικτύου (VNFs), τότε η υλοποίηση και των στοιχείων του MEC ως VNFs

πάνω στην ίδια υποδομή εικονικότητας(NFVI), όπως παρουσιάζεται στη παράγραφο 2.3, συνεισφέρει στην βελτίωση της ευελιξίας και αποδοτικότητας πόρων της εγκατάστασης. Στο Σχήμα 2.3 φαίνεται η μορφή που παίρνει η εγκατάσταση με υλοποίηση ως VNFs.

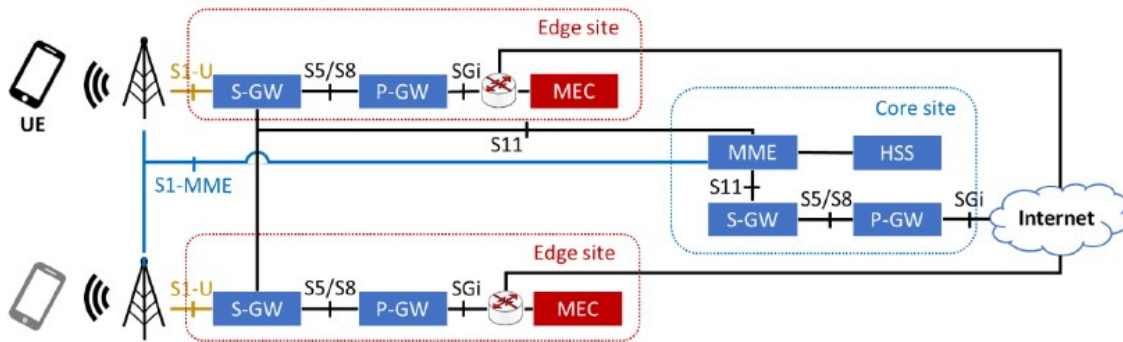


Σχήμα 3.3 Εγκατάσταση MEC σε κατακευμαμένο EPC ως VNFs

3.2.2 Εγκατάσταση σε Κατακευμαμένη Υπηρετούσα Πύλη(SGW) και Πύλη Δικτύου Πακέτων Δεδομένων(PGW)

Όπως στη περίπτωση του κατακευμαμένου EPC, έτσι και σε αυτή τη περίπτωση ο MEC host συμπεριλαμβάνεται μαζί με στοιχεία του EPC. Ωστόσο, από τα στοιχεία αυτά μόνο η υπηρετούσα πύλη (SGW) και η Πύλη προς το δημόσιο δίκτυο πακέτου (PGW) βρίσκονται ως κατακευμαμένα στην παρυφή του δικτύου μαζί με το MEC. Ο HSS και η οντότητα διαχείρισης κινητικότητας (MME) αντιθέτως είναι υλοποιημένα στη πλευρά του δικτύου κορμού του παρόχου.

Το επίπεδο δεδομένων του MEC εδράζεται και σε αυτή τη περίπτωση στο σημείο αναφοράς SGi, της αρχιτεκτονικής αναφοράς του EPC, ώστε να έχει πρόσβαση στη PGW. Η επιλογή του τοπικού SGW γίνεται κεντρικά από την MME βάσει του κωδικού περιοχής εντοπισμού (TAC) του ραδιοδιαύλου στον οποίο συνδέεται το UE, ακολουθώντας τις τυπικές 3GPP διαδικασίες. Η τοπολογία αυτή, όπως παρουσιάζεται στο Σχήμα 3.4, επιτρέπει την αποφόρτιση κίνησης βάσει APN, ενώ ταυτόχρονα ο πάροχος διατηρεί τον πλήρη έλεγχο της MME.

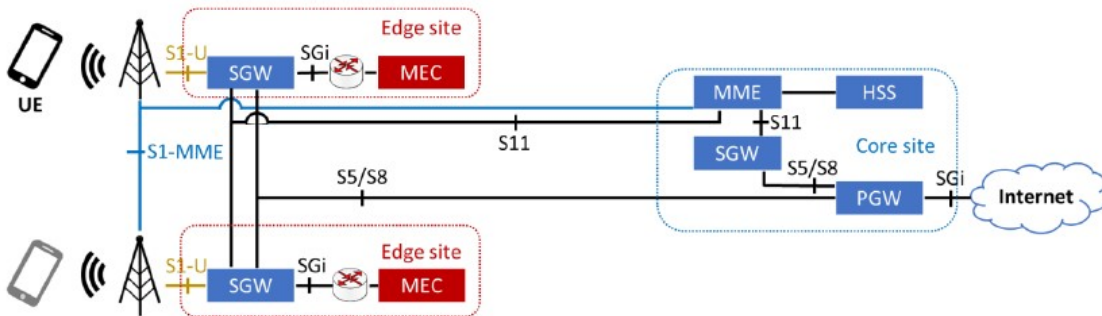


Σχήμα 3.4 Εγκατάσταση MEC σε κατανεμημένη PGW και SGW

3.2.3 Εγκατάσταση σε Κατανεμημένη Υπηρετούσα Πύλη (S-GW) με τοπική διαφυγή (LBO)

Η πρόθεση των παρόχων να αποκτήσουν μεγαλύτερο έλεγχο στη διαβάθμιση της κίνησης που ανακατευθύνεται υπαγορεύει την τοπολογία του Σχήματος 3.5. Η βασική αρχή είναι ότι πρέπει να εξυπηρετηθεί η ανάγκη πρόσβασης τόσο σε εφαρμογές στο MEC όσο και σε εφαρμογές στο δίκτυο κορμού από το ίδιο APN με επιλεκτικό τρόπο. Ο MEC host εγκαθίσταται μαζί με κατανεμημένη SGW ενώ τα υπόλοιπα στοιχεία του EPC παραμένουν κεντρικά, στο κορμό του δικτύου. Η SGW υλοποιεί την τοπική διαφυγή (LBO) σύμφωνα με την τυποποιημένη διαδικασία κατά 3GPP.

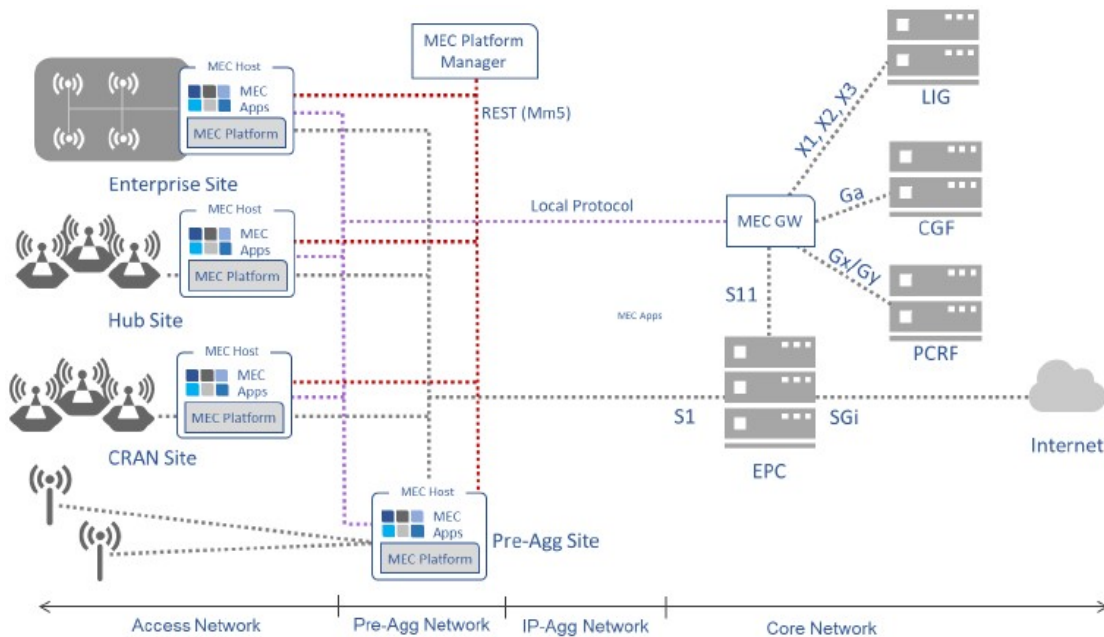
Η ανακατεύθυνση της κίνησης γίνεται με χρήση της διεπαφής SGi- LBO η οποία υποστηρίζει το διαχωρισμό κίνησης ενώ εξασφαλίζει το επίπεδο ασφάλειας που αναμένει ο πάροχος για 3GPP συμβατές λύσεις. Η λύση αυτή επιτρέπει στο πάροχο να καθορίσει φίλτρα κίνησης με συνδυασμό πληθώρας παραμέτρων όπως APN, αναγνωριστικό χρήστη, 5-tuple πακέτου ή άλλες παραμέτρους επιπέδου IP, επιτυγχάνοντας αποτελέσματα αντίστοιχα με τους ταξινομητές ανερχόμενης κίνησης σε δίκτυα 5G [21]. Η τοπολογία μπορεί να υποστηρίξει κινητικότητα MEC host και εφαρμογές με απαιτήσεις πολύ μικρού latency.



Σχήμα 3.5 Εγκατάσταση MEC σε κατανεμημένη SGW με LBO

3.2.4 Εγκατάσταση ως “Προεξοχή στη γραμμή”

Η έκφραση “προεξοχή στη γραμμή” περιλαμβάνει όλες τις εκδοχές που το σημείο εγκατάστασης του συστήματος MEC βρίσκεται μεταξύ σταθμού βάσης και δικτύου κορμού. Στο Σχήμα 3.6 παρουσιάζονται οι εκδοχές υλοποιήσεων που ικανοποιούν αυτή την τοπολογία.



Σχήμα 3.6 Εγκατάσταση MEC με προσέγγιση τύπου “προεξοχή στη γραμμή”

Διακρίνονται δύο υποπεριπτώσεις ανάλογα με το αν το σύστημα MEC είναι υλοποιημένο μαζί με τον Εξελιγμένο Κόμβο Β (eNB) ή βρίσκεται σε ξεχωριστή θέση (είτε κοντά στο κόμβο κινητής, είτε κοντά σε ένα σημείο συγκέντρωσης).

Στην περίπτωση που το σύστημα MEC έχει υλοποιηθεί ως τμήμα του eNB τότε έχει ευρεία πρόσβαση στα δεδομένα επιπέδου χρήστη. Οπότε μπορεί να δρομολογεί IP πακέτα απο και προς τις MEC εφαρμογές, σε κατάσταση λειτουργίας τοπικού μεταγωγέα. Ενώ ταυτόχρονα μπορεί να δρομολογεί GTP ενθυλακωμένα πακέτα απο και προς την υπηρετούσα πύλη SGW όπως η συνηθισμένη κίνηση προς PDN, που ρυθμίζεται απο τον πάροχο. Το είδος αυτό της εγκατάστασης είναι κατάλληλο για εταιρική υλοποίηση, όπως περιγράφεται στη παράγραφο 1.3.5, καθώς διευκολύνει την κίνηση του εσωτερικού δικτύου να αποκτήσει πρόσβαση σε εξωτερικά προσφερόμενες υπηρεσίες

Στις υπόλοιπες περιπτώσεις η πλατφόρμα MEC στηρίζεται στη διεπαφή S1 της αρχιτεκτονικής 4G [18]. Τότε το επίπεδο δεδομένων του MEC host χρειάζεται να επεξεργαστεί την ενθυλακωμένη σε GTP-U πακέτα κίνηση χρήστη για να αποκτήσει

πρόσβαση στα δεδομένα. Επομένως χρειάζεται να ενσωματώνει την λειτουργικότητα που απαιτείται για τον χειρισμό αυτών των τούνελ. Σε αυτή τη περίπτωση εγκατάστασης η ελαχιστοποίηση του latency επιτυγχάνεται με την όσο το δυνατόν κοντινότερη εγκατάσταση της πλατφόρμας MEC στον σταθμό βάσης eNB. Επιπλέον δίνει την δυνατότητα δρομολόγησης της κίνησης με διαβάθμιση συνεδρίας ή ακόμα και πακέτου, και ευέλικτο φιλτράρισμα.

Για τα δεδομένα που παράγουν οι εφαρμογές MEC ή που προσέρχονται στον διακριτό MEC host μέσω τοπικής διαφυγής χωρίς να έχουν περάσει απο το δίκτυο κορμού, απαιτείται ξεχωριστή μεταχείριση ώστε να καλύπτουν τις απαιτήσεις λειτουργιών όπως νόμιμη συνακρόαση και τιμολόγηση. Ένας τρόπος χειρισμού των περιπτώσεων αυτών είναι μέσω υλοποίησης διαχωρισμού των επιπέδων χρήστη και διαχείρισης (CUPS), επιτυγχάνεται έτσι και 3GPP συμβατότητα βάσει του 3GPP Release 14 [22].

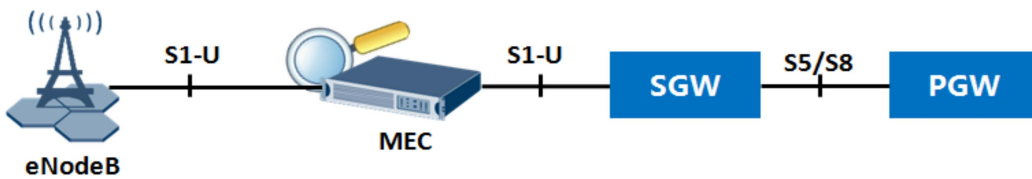
3.3 Προκλήσεις των εναλλακτικών προσεγγίσεων

Μια εμφανής διάκριση μεταξύ των εναλλακτικών ειδών εγκατάστασης που παρουσιάστηκαν είναι εάν ο MEC host κάνει χρήση των δυνατοτήτων του κορμού εξελεγκμένου πακέτου (EPC) ή όχι. Στη συνέχεια θα εξεταστεί η επίδραση που έχει κάθε εναλλακτικό είδος εγκατάστασης στους τομείς της διαχείρισης συνεδρίας και κινητικότητας, της ασφάλειας, της τιμολόγησης και της νόμιμης συνακρόασης.

3.3.1 Διαχείριση συνεδρίας

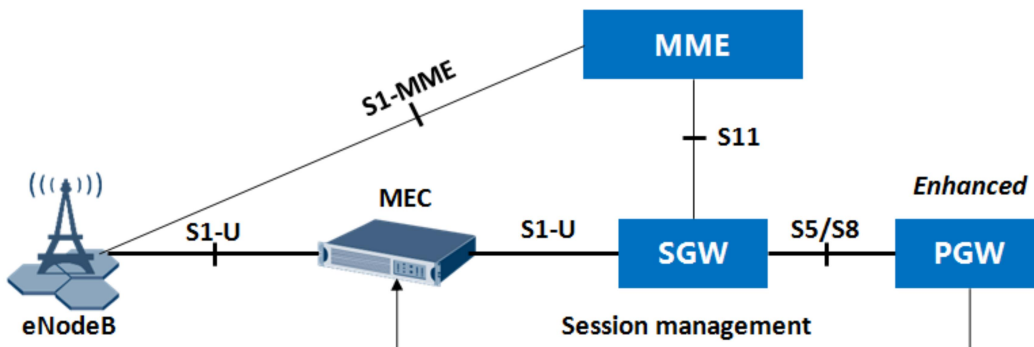
Για την περίπτωση εγκατάστασης “προεξοχή στη γραμμή” το MEC βρίσκεται στο S1-U σημείο αναφοράς. Ο σταθμός βάσης eNB και η υπηρετούσα πύλη SGW δεν γνωρίζουν την ύπαρξη του καθώς τα στοιχεία του MEC δεν συμμετέχουν στις διαδικασίες διαχείρισης συνεδρίας, σύμφωνα με το 3GPP πρότυπο. Ωστόσο είναι απαραίτητο για το MEC να λάβει πληροφόρηση για το UE ώστε να μπορεί να δρομολογήσει ορθά την κίνηση. Υπάρχουν δύο εναλλακτικές προσεγγίσεις είναι σχετικά με το πώς μπορεί να γίνει αυτό:

1. Επιθεώρηση πακέτων επίπεδου χρήστη: Το MEC επιθεωρώντας τα πακέτα επιπέδου χρήστη μπορεί, χρησιμοποιώντας τις IP διευθύνσεις του S1-U τούνελ και τα αναγνωριστικά τερματισμού τούνελ(TEID), να δημιουργήσει το πλαίσιο λειτουργίας του UE. Για την κίνηση που πρέπει να ανακατευθυνθεί, το MEC δρομολογεί τα συγκεκριμένα πακέτα σε συγκεκριμένες εφαρμογές μέσω μιας λειτουργίας ανακατεύθυνσης. Για την κίνηση που δεν χρειάζεται ανακατεύθυνση το MEC συμπεριφέρεται ως διάφανη συσκευή. Στο Σχήμα 3.7 παριστάνεται αυτή ακριβώς η διαδικασία.



Σχήμα 3.7 Επιθεώρηση πακέτων επίπεδου χρήστη

2. Ελεγχόμενο από το PGW: Το εξελεγμένο PGW παίρνει τον έλεγχο της διαχείρισης συνεδρίας του MEC για να κατασκευάσει, να ενημερώσει ή να διαγράψει το πλαίσιο λειτουργίας του UE και να μεταβιβάσει τις πληροφορίες της νόμιμης συνακρόασης και χαρακτηριστικά της τιμολόγησης . Παρόλο που χρειάζεται να δημιουργηθεί ένα νέο σημείο αναφοράς μεταξύ PGW και MEC, η τιμολόγηση και η νόμιμη συνακρόαση υποστηρίζονται και μπορούν να αναβαθμιστούν εύκολα σε λειτουργία CUPS και στη συνέχεια να εξελιχθούν ομαλά σε 5G. Το σημείο αναφοράς μεταξύ PGW και MEC θα είναι το (Sx) στη περίπτωση εφαρμογής CUPS και το (N4) σε 5G. Στο Σχήμα 3.8 παριστάνεται η διαδικασία ελέγχου του MEC από το PGW.



Σχήμα 3.8 MEC Ελεγχόμενο από το PGW

Για τις υπόλοιπες τρεις περιπτώσεις που κάνουν χρήση της συν-εγκατάστασης με το EPC, οι λειτουργίες του EPC αναλαμβάνουν τη διαχείριση συνεδρίας όποιου MEC συγκατοικεί με αυτές. Συγκεκριμένα:

- ο Για τις EPC MEC (3.2.1) και SGW+PGW MEC (3.2.2): Η διαχείριση συνεδρίας δεν επηρεάζεται, ακόμα και σε μεταβιβάσεις μεταξύ διαφορετικών MEC, καθώς οι τυποποιημένες 3GPP διαδικασίες χρησιμοποιούνται για να διατηρήσουν το αρχικό PGW ως σταθερά αναφοράς. Αυτό εξασφαλίζει τη συνέχεια της συνεδρίας καθώς και την κλήση αδρανών UEs. Η κινητικότητα επιπέδου εφαρμογής επιτυγχάνεται με την εκ νέου ανάθεση της διεύθυνσης IP στον χρήστη ή την επιβολή μιας πολιτικής διαφυγής

στο επιθυμητό SGW. Η τιμολόγηση και η νόμιμη συνακρόαση υποστηρίζονται εγγενώς από τη λύση.

- Για την SGW-LBO MEC (3.2.3): Η προσέγγιση είναι ίδια με την προηγούμενη περίπτωση με τη διαφορά ότι το κεντρικό PGW επιτελεί τις ενέργειες που περιγράφηκαν.

3.3.2 Διαχείριση κινητικότητας

Η βασική λειτουργία της διαχείρισης κινητικότητας είναι η διασφάλιση της συνέχειας της υπηρεσίας όταν το UE μετακινείται, είτε εντός του ίδιου MEC είτε μεταξύ διαφορετικών MEC. Το MEC θα πρέπει να είναι ενήμερο όταν γίνεται διαπομπή του UE στο δίκτυο και να ενημερώνει το πλαίσιο λειτουργίας του UE ώστε να διατηρείται η συνέχεια υπηρεσίας. Διακρίνονται οι εξής δύο περιπτώσεις:

1. Το UE να μετακινείται από ένα κόμβο eNB σε έναν άλλο που όμως βρίσκεται στη περιοχή κάλυψης του ίδιου MEC host (intra-MEC κινητικότητα.) Τότε το MEC θα πρέπει να μπορεί να δρομολογήσει τη κίνηση του UE μέσω του σωστού νέου eNB.
2. Το UE να μετακινείται εκτός της περιοχής κάλυψης ενός MEC host και εντός της περιοχής κάλυψης ενός άλλου MEC host (inter-MEC κινητικότητα ή MEC διαπομπή). Τότε το MEC αφετηρίας θα πρέπει να μπορεί να μεταφέρει την υπηρεσία στο MEC προορισμού προκειμένου να διατηρηθεί η συνέχεια της υπηρεσίας.

Η διαπομπή MEC υλοποιείται με διαφορετικό τρόπο ανάλογα με το είδος της εγκατάστασης.

- Για τις EPC MEC (3.2.1) και SGW+PGW MEC (3.2.2): Η διαπομπή MEC υποστηρίζεται χρησιμοποιώντας τυπική 3GPP S1 διαπομπή και μεταφορά του SGW ενώ το αρχικό PGW διατηρείται ως σταθερά αναφοράς.
- Για την SGW-LBO MEC (3.2.3): Η προσέγγιση είναι ίδια με την προηγούμενη περίπτωση αλλά το SGW προορισμού πρέπει να επιβάλλει την ίδια πολιτική στην τοπική εφαρμογή MEC, και είναι ευθύνη της εφαρμογής MEC να συγχρονίσει σε επίπεδο εφαρμογής και να διατηρήσει τη μεταφερθείσα κατάσταση της εφαρμογής.
- Για τη “προεξοχή στη γραμμή”(3.2.4): Στη περίπτωση αυτή η κινητικότητα δεν υποστηρίζεται εγγενώς. Μια λύση είναι η υλοποίηση MEC να αντιλαμβάνεται τη διαπομπή και να δρα με κατάλληλο ιδιοταγή τρόπο για τη μεταφορά της κατάστασης της υπηρεσίας στο MEC προορισμού. Δεύτερη λύση είναι., όπως στη περίπτωση της διαχείρισης κινητικότητας, να αναθέσει την ενημέρωση του MEC προορισμού για το πλαίσιο λειτουργίας του UE στο PGW.

3.3.3 Ασφάλεια

Το MEC προσφέρει ένα περιβάλλον υπηρεσιών πληροφορικής και δυνατοτήτων cloud-computing για τη φιλοξενία εφαρμογών στην παρυφή του δικτύου κινητής τηλεφωνίας. Όπως ήδη παρουσιάστηκε, σε ορισμένες περιπτώσεις εγκατάστασης οι εφαρμογές MEC εκτελούνται στις ίδιες φυσικές πλατφόρμες με ορισμένες λειτουργίες δικτύου. Οι εφαρμογές τρίτων δεν ελέγχονται άμεσα από τον πάροχο, επομένως υπάρχει κίνδυνος αυτές τις εφαρμογές να εξαντλούν τους πόρους που χρειάζονται οι λειτουργίες του δικτύου. Υπάρχει επίσης κίνδυνος κακόβουλες ή κακοσχεδιασμένες εφαρμογές να επιτρέπουν σε χάκερς να διεισδύσουν στην πλατφόρμα και κατά συνέπεια να επηρεάσουν τις λειτουργίες δικτύου που λειτουργούν στην πλατφόρμα.

Μια λύση για την αντιμετώπιση αυτών των ζητημάτων είναι η εκτέλεση τόσο των εφαρμογών MEC όσο και των λειτουργιών δικτύου σε αξιόπιστα διαχωρισμένες εικονικές μηχανές. Ταυτόχρονα πρέπει να παρέχεται διαβεβαίωση εμπιστευτικότητας για ευαίσθητα δεδομένα και πληροφορίες μεταξύ VMs που τρέχουν στην ίδια φυσική πλατφόρμα και μεταξύ ενός υπερεπόπτη και του λειτουργικού συστήματος του host. Επιπλέον, να υπάρχει η δυνατότητα για το σύστημα MEC να παρέχει υπηρεσίες ασφάλειας και διασφάλισης για τις φιλοξενούμενες εφαρμογές. Ένα παράδειγμα είναι η εκτέλεση ελέγχων ακεραιότητας σε εφαρμογές κατά την εγκατάσταση και αναβάθμιση τους ή μετά την επανεκκίνηση του host. Ένα άλλο είναι να προσφέρει τα API υπηρεσιών ασφαλείας σε επαρκώς έμπιστες εφαρμογές MEC τρίτων, π.χ. για αναγνώριση χρηστών.

Μια άλλη επιλογή για την επιβολή μεγαλύτερης ασφάλειας, είναι να επιτρέπονται εγκαταστάσεις που εκτελούν εφαρμογές σε ξεχωριστό hardware. Αυτό σχετίζεται ιδιαίτερα με τους CDNs, οι οποίοι συνήθως έχουν αυστηρές απαιτήσεις hardware για λόγους πνευματικής ιδιοκτησίας και ιδιωτικότητας. Η ασφάλεια επιβάλλεται επίσης με κατάλληλο σχεδιασμό δικτύου, της παρυφής που συνδέεται η πλατφόρμα MEC, με τη χρήση διαχωρισμού L2 / L3 κίνησης και firewalls.

Τέλος, για τη περίπτωση εγκατάστασης με καταναμημένο EPC που περιλαμβάνει το HSS στη παρυφή, το σενάριο αυτό απαιτεί ιδιαίτερη προσοχή στο χειρισμό της εμπιστευτικότητας των δεδομένων των συνδρομητών και στην επέκταση των τυποποιημένων 3GPP διεπαφών του δικτύου κορμού στην άκρη του δικτύου.

3.3.4 Τιμολόγηση

Το MEC πρέπει να υποστηρίζει τιμολόγηση τόσο on-line όσο και off-line.

- On-line τιμολόγηση: Κατά το πρώτο χρεώσιμο συμβάν του καταναλωτή, το MEC ενεργοποιεί ένα on-line αίτημα χρέωσης προς τη λειτουργία on-line χρέωσης ώστε να του παραχωρηθεί ένα μερίδιο. Όταν το παραχωρηθέν μερίδιο έχει σχεδόν πλήρως χρησιμοποιηθεί, το MEC αναφέρει την εξάντληση του μεριδίου και ζητά επιπρόσθετο μερίδιο από τη λειτουργία on-line χρέωσης. Η λειτουργία on-line χρέωσης μπορεί να αποδεχτεί το αίτημα ή να το αρνηθεί. Σε περίπτωση άρνησης, το MEC θα απορρίψει με τη σειρά του αίτημα χρήσης πόρων.
- Off-line τιμολόγηση: Το MEC περιοδικά συλλέγει και αναφέρει περιοδικά τα αρχεία εγγραφών στη λειτουργία off-line χρέωσης για συγκέντρωση και αντιστοίχιση. Τα συστήματα τιμολόγησης χρησιμοποιούν τα συγκεντρωτικά και αντιστοιχισμένα αρχεία συμβάντων για να χρεώσουν τον καταναλωτή στο τέλος του κύκλου χρέωσης.

Η περίπτωση της “προεξοχής στη γραμμή” υποστηρίζει εγγενώς τη διέλευση μέσω του MEC κίνησης η οποία συνεχίζει προς το δίκτυο κορμού. Οπότε όσον αφορά την τιμολόγηση αυτή την αναλαμβάνουν οι 3GPPP λειτουργίες. Αντιστρόφως, για κίνηση η οποία τερματίζει σε εφαρμογές MEC ή διαφεύγει σε ένα εξωτερικό δίκτυο, πρέπει να εξεταστούν εναλλακτικές λύσεις που παρέχουν την απαραίτητη λειτουργία χρέωσης. Μια προτεινόμενη λύση είναι η συνεργασία των λειτουργιών MEC και δικτύου κορμού, όπου η MEC αναφέρει τα δεδομένα χρέωσης στο PGW (όπως στο σχήμα 3.8) ή στην πύλη MEC με βάση τις πολιτικές χρέωσης από το PGW (όπως στο σχήμα 3.6). Στη συνέχεια, το PGW τα συγκεντρώνει και τα αναφέρει στο σύστημα χρέωσης.

Οι υπόλοιπες περιπτώσεις εγκατάστασης εκμεταλλεύονται τις λειτουργίες του επιπέδου δεδομένων του EPC. Τόσο η on-line όσο και η off-line τιμολόγηση υποστηρίζονται εγγενώς όπως ισχύει για το τυπικό EPC, για όλα τα πακέτα που τερματίζονται τοπικά ή προωθούνται σε εξωτερικά APN στο EPC του κορμού ρυθμισμένα για κίνηση εσωτερική ή περιαγωγής.

3.3.5 Νόμιμη συνακρόαση

Η νόμιμη συνακρόαση και τα διακρατούμενα δεδομένα διαδραματίζουν κρίσιμο ρόλο, βοηθώντας τις υπηρεσίες επιβολής του νόμου στην καταπολέμηση της τρομοκρατίας και της σοβαρής εγκληματικής δραστηριότητας. Οι πάροχοι δικτύων δημόσιων τηλεπικοινωνιών και υπηρεσιών υποχρεούνται νομίμως να διαθέτουν από τα διακρατούμενα δεδομένα, στις αρχές επιβολής του νόμου, πληροφορίες που είναι

απαραίτητες ώστε να μπορούν να παρακολουθούν την τηλεπικοινωνιακή κίνηση στο πλαίσιο ποινικών ερευνών.

Συνήθως αυτή η λειτουργικότητα υποστηρίζεται από τους κόμβους του δικτύου κορμού. Ωστόσο, η κίνηση που κατευθύνεται από το UE σε μια εφαρμογή στη παρυφή του δικτύου έχει σχεδιαστεί έτσι ώστε να αποφεύγεται ο κορμός και κατά συνέπεια θα αποφεύγει τα συνήθη σημεία διεμβόλισης. Στο πλαίσιο του MEC, συνιστάται οι λειτουργίες νόμιμης συνακρόασης και διακράτησης δεδομένων να υλοποιούνται στην παρυφή του δικτύου ως μέρος της λειτουργικότητας διεμβόλισης. Οποιοσδήποτε κόμβος παρυφής περιλαμβάνει τις λειτουργίες νόμιμης συνακρόασης και διακράτησης δεδομένων, θα πρέπει να πληρεί αυστηρές απαιτήσεις φυσικής ασφάλειας αντίστοιχες με τις τοποθεσίες του δικτύου κορμού. Για το σκοπό αυτό, το ETSI MEC συγκεντρώνει ενημερωτικές και κανονιστικές πτυχές στο GS MEC 026 (εργασία σε εξέλιξη), καθώς αυτό έχει ισχυρό αντίκτυπο στις οντότητες του MEC, ιδίως στην περίπτωση της “προεξοχής στη γραμμή”.

Αντιθέτως, οι περιπτώσεις που περιλαμβάνουν μια πύλη EPC, όπως EPC MEC, SGW + PGW MEC και SGW-LBO MEC, είναι συμβατές με τις απαιτήσεις νόμιμης συνακρόασης καθώς υποστηρίζουν εγγενώς τη χρήση των διεπαφών X1, X2, X3 προς τη συσκευή διαμεσολάβησης του παρόχου, η οποία είναι υπεύθυνη για τη σύνδεση με τις αρχές και τη μεταφορά των απαιτούμενων δεδομένων.

Κεφάλαιο 4: Ανάπτυξη MEC σε δίκτυα 5G

Το MEC, ως μετεξέλιξη της υπηρεσίας Υπολογιστικού Νέφους, μεταφέρει το σημείο φιλοξενίας εφαρμογών από κεντρικές υποδομές δεδομένων στην δικτυακή υποδομή του παρόχου και εγγύτερα στο τελικό χρήστη. Το MEC θεωρείται από τους απαραίτητους πυλώνες για την επίτευξη των βασικών δεικτών επίδοσης (KPI) για το 5G, ειδικά όσον αφορά τις απαιτήσεις για χαμηλό latency και αποδοτικότητα εύρους ζώνης.

Τα δίκτυα 5G έχουν στοχευμένα προδιαγραφεί στο 3GPP [21] ώστε να αποτελέσουν περιβάλλον ανάπτυξης MEC. Οι προδιαγραφές του 5G, με την αρχιτεκτονική βασισμένη σε υπηρεσίες (Service Based Architecture, SBA), εκμεταλλεύονται τις αλληλεπιδράσεις βασισμένες σε υπηρεσία μεταξύ διαφορετικών δικτυακών λειτουργιών ώστε να αξιοποιήσουν τα νεοεισαχθέντα χαρακτηριστικά των

- ο Εικονικοποίησης δικτύου (Network Virtualisation)
- ο Δικτύων οριζόμενων από λογισμικό (Software Defined Networks, SDN)

Τα ίδια ακριβώς χαρακτηριστικά που μοιράζεται και το MEC.

4.1 Υποστήριξη του MEC στις 3GPP προδιαγραφές των δικτύων 5G

Στις προδιαγραφές του συστήματος 5G υπάρχει μια σειρά από νέες λειτουργίες που καθιστούν εφικτό το Edge Computing. Οι πιο σημαντικές από αυτές είναι

1. Τοπική Δρομολόγηση και Καθοδήγηση Κίνησης: Το δίκτυο κορμού 5G παρέχει τα μέσα ώστε κίνηση να επιλεγεί και δρομολογηθεί προς το τοπικό δίκτυο δεδομένων. Μια PDU συνεδρία μπορεί να έχει πολλαπλές N6 διεπαφές προς το δίκτυο δεδομένων. Οι UPF που τερματίζουν αυτές τις διεπαφές υποστηρίζουν λειτουργικότητα Πρόσδεσης Συνεδρίας PDU (Session Anchor PDU). Η καθοδήγηση κίνησης από την UPF υποστηρίζεται από Κατηγοριοποιητές Uplink (Uplink Classifiers) που λειτουργούν με βάση ένα σύνολο φίλτρων κίνησης αντιστοιχίζοντας τα στη καθοδηγούμενη κίνηση (§ 5.6.4.2 του [21]).
2. Η δυνατότητα μιας Λειτουργίας Εφαρμογής να επηρεάσει την επιλογή UPF και τη δρομολόγηση κίνησης. Είτε απευθείας μέσω της Λειτουργία Ελέγχου Πολιτικής (Policy Control Function, PCF), είτε εμμέσως μέσω της Λειτουργίας Έκθεσης Δικτύου (Network Exposure Function, NEF), ανάλογα με τις πολιτικές του παρόχου (§ 5.6.7 του [21])

3. Οι μέθοδοι Συνέχειας Συνεδρίας και Υπηρεσίας (Session and Service Continuity , SSC) για τις διαφορετικές περιπτώσεις κινητικότητας UE ή εφαρμογής. (§5.6.9 του [21])
4. Υποστήριξη του τοπικού δικτύου δεδομένων (Local Area Data Network, LADN) από το δίκτυο κορμού 5G. Η υποστήριξη παρέχεται υπο τη μορφή δυνατότητας σύνδεσης στο LADN σε μια συγκεκριμένη περιοχή που έχουν αναπτυχθεί οι εφαρμογές. Η πρόσβαση σε ένα LADN είναι διαθέσιμη μόνο σε μια συγκεκριμένη περιοχή υπηρεσίας LADN, οριζόμενη ως το σύνολο των περιοχών παρακολούθησης του PLMN που εξυπηρετεί το UE. Το LADN είναι μια υπηρεσία που παρέχει το PLMN που εξυπηρετεί το UE (§5.6.5 του [21])

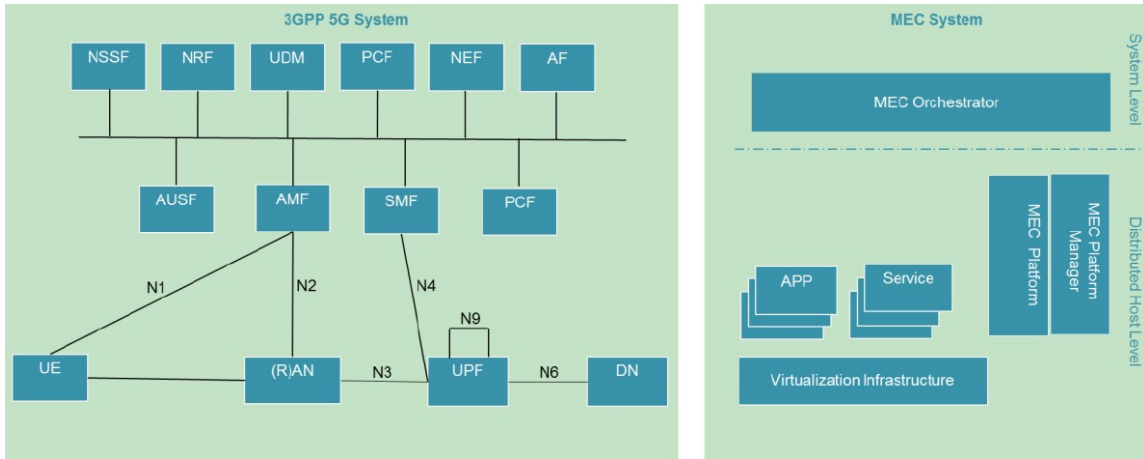
4.2 Αρχιτεκτονική συστήματος 5G και MEC

Η προσέγγιση 3GPP στο σχεδιασμό του συστήματος 5G επιτρέπει την αντιστοίχιση του MEC σε Λειτουργίες Εφαρμογής (Application Functions, AF), οι οποίες μπορούν να χρησιμοποιήσουν τις υπηρεσίες και τις πληροφορίες που προσφέρουν άλλες λειτουργίες 3GPP δικτύου, βάσει των διαμορφωμένων πολιτικών. Επίσης, έχουν καθοριστεί ορισμένες λειτουργικότητες που επιτρέπουν ελαστική υποστήριξη σε διαφορετικές υλοποιήσεις του MEC και στο τρόπο που αυτό διαχειρίζεται περιπτώσεις κινητικότητας χρήστη.

Μια σημαντική αρχιτεκτονική αλλαγή αφορά τις επικοινωνίες μεταξύ των λειτουργιών του δικτύου κορμού, οι οποίες προηγουμένως βασιζόνταν στην αρχή της από σημείο-σε-σημείο επικοινωνίας. Στις προδιαγραφές του συστήματος 5G υπάρχουν δύο διαθέσιμες επιλογές για την αρχιτεκτονική. Η πρώτη είναι με τα παραδοσιακά σημείο αναφοράς και την προσέγγιση διασύνδεσης, όπως περιγράφηκε στην §2.3. Στη δεύτερη οι λειτουργίες κορμού δικτύου επικοινωνούν μεταξύ τους χρησιμοποιώντας αρχιτεκτονική βασιζόμενη σε υπηρεσίες (SBA).

Στην SBA, υπάρχουν λειτουργίες που καταναλώνουν υπηρεσίες και εκείνες που παράγουν υπηρεσίες. Οποιαδήποτε λειτουργία δικτύου μπορεί να προσφέρει μία ή περισσότερες υπηρεσίες. Το πλαίσιο λειτουργίας παρέχει την απαραίτητη λειτουργικότητα για την ταυτοποίηση του καταναλωτή υπηρεσίας και την εξουσιοδότηση των αιτήσεων εξυπηρέτησης. Επίσης υποστηρίζει ευέλικτες διαδικασίες για την αποδοτική έκθεση και κατανάλωση υπηρεσιών. Για απλές αιτήσεις υπηρεσιών ή πληροφοριών, μπορεί να χρησιμοποιηθεί ένα μοντέλο αίτησης-απόκρισης. Για μακρόβιες διεργασίες, το πλαίσιο υποστηρίζει επίσης ένα μοντέλο συνδρομής-ειδοποίησης. Τα API που έχουν καθοριστεί από το ETSI ISG MEC ευθυγραμμίζονται με τις παραπάνω αρχές αφού ουσιαστικά κάνουν για τις εφαρμογές MEC ότι ακριβώς κάνει η SBA για τις λειτουργίες δικτύου και τις υπηρεσίες τους.

Στο Σχήμα 4.1, στο αριστερό μέρος παρουσιάζεται η Αρχιτεκτονική βασιζόμενη σε υπηρεσίες (SBA) για ένα 3GPP 5G σύστημα και στα δεξιά, εν είδει αντιπαραβολής, το Βασικό πλαίσιο MEC. Στη συνέχεια θα περιγραφεί πως μπορεί ένα σύστημα MEC να αναπτυχθεί σε περιβάλλον δικτύου 5G, εν μέρει ολοκληρωμένο καθώς ορισμένες από τις λειτουργικές οντότητες του MEC αλληλεπιδρούν με τις λειτουργίες δικτύου του 5G δικτύου κορμού.



Σχήμα 4.1, Αρχιτεκτονική Βασιζόμενη σε Υπηρεσίες για 5G και Βασικό Πλαίσιο MEC

Οι λειτουργίες δικτύου και οι υπηρεσίες που παράγουν καταχωρούνται σε μια Λειτουργία Πόρων Δικτύου (Network Resource Function, NRF), ενώ οι υπηρεσίες που παράγονται από τις εφαρμογές MEC καταχωρούνται στο μητρώο υπηρεσιών της πλατφόρμας MEC. Η καταχώρηση υπηρεσίας αποτελεί μέρος της λειτουργικότητας Εφαρμογής Ενεργοποίησης [13]. Εφόσον είναι εξουσιοδοτημένη, μια λειτουργία δικτύου μπορεί να αλληλεπιδρά απευθείας με τη λειτουργία δικτύου (που παράγει την υπηρεσία) προκειμένου να χρησιμοποιήσει την υπηρεσία. Η λίστα των διαθέσιμων υπηρεσιών μπορεί να ανακτηθεί από το NRF. Ορισμένες από τις υπηρεσίες είναι προσβάσιμες μόνο μέσω του NEF, το οποίο είναι διαθέσιμο και σε μη αξιόπιστες οντότητες (εκτός domain). Δηλαδή το NEF λειτουργεί ως κεντρικό σημείο έκθεσης για υπηρεσίες και επιτελεί το βασικό ρόλο στην εξουσιοδότηση των αιτήσεων πρόσβασης που προέρχονται από το εξωτερικό του συστήματος.

Μία από τις βασικές έννοιες στο 5G είναι ο Τεμαχισμός Δικτύου (Network Slicing) που επιτρέπει την κατανομή απαιτούμενων λειτουργιών και πόρων από τις διαθέσιμες λειτουργίες δικτύου σε διαφορετικές υπηρεσίες. Η λειτουργία Επιλογής Τεμαχίου Δικτύου (Network Slice Selection Function, NSSF) είναι η λειτουργία που βοηθά στην επιλογή των κατάλληλων στιγμιότυπων δικτυακού τεμαχίου για τους χρήστες και στην κατανομή των

απαραίτητων λειτουργιών Διαχείρισης Πρόσβασης (Access Management Functions, AMF). Μία εφαρμογή MEC μπορεί να ανήκει σε ένα ή περισσότερα τεμάχια δικτύου που έχουν διαμορφωθεί στο 5G δίκτυο κορμού

Οι πολιτικές και οι κανόνες του 5G συστήματος διαχειρίζονται από το PCF. Επίσης το PCF είναι η λειτουργία που εξυπηρετεί τις αιτήσεις μιας AF, όπως είναι η πλατφόρμα MEC, ώστε να επηρεάσει τους κανόνες καθοδήγησης κίνησης. Το PCF είναι προσβάσιμο είτε απευθείας είτε μέσω του NEF, ανάλογα με το αν η AF θεωρείται αξιόπιστη ή όχι. Ενώ, για τη περίπτωση καθοδήγησης κίνησης, ανάλογα εάν η αντίστοιχη συνεδρία PDU είναι γνωστή κατά τη στιγμή της αίτησης.

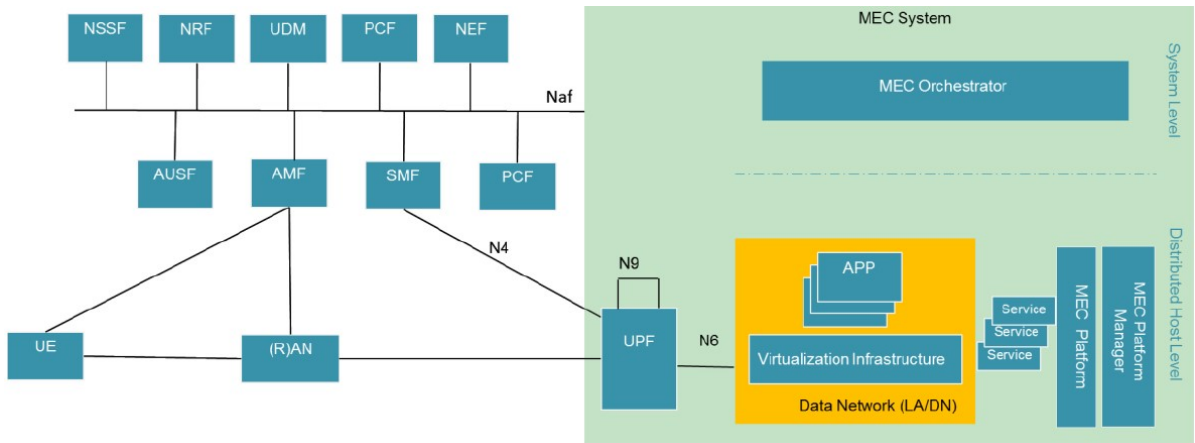
4.2.1 Λειτουργία Διαχείρισης Ενοποιημένων Δεδομένων (UDM)

Η λειτουργία Διαχείρισης Ενοποιημένων Δεδομένων (Unified Data Management, UDM) είναι υπεύθυνη για αρκετές από τις υπηρεσίες που σχετίζονται με χρήστες και συνδρομές.

- Δημιουργεί τα διαπιστευτήρια πιστοποίησης 3GPP AKA
- Χειρίζεται πληροφορίες σχετικά με την ταυτοποίηση χρήστη
- Διαχειρίζεται εξουσιοδοτήσεις πρόσβασης (π.χ. περιορισμούς περιαγωγής)
- Καταχωρεί τα NFs που εξυπηρετούν τον χρήστη (υπηρετούσες AMF, SMF)
- Υποστηρίζει τη συνέχεια της υπηρεσίας διατηρώντας αρχεία των ανατεθειμένων SMF / Data Network Name (DNN)
- Υποστηρίζει νόμιμη συνακρόαση (LI) στην εξερχόμενη περιαγωγή ενεργώντας ως σημείο επαφής
- Εκτελεί διαδικασίες διαχείρισης συνδρομών

4.2.2 Λειτουργία Επιπέδου Χρήστη (UPF)

Η λειτουργία Επιπέδου Χρήστη (UPF) έχει βασικό ρόλο σε μια, ολοκληρωμένη εντός δικτύου 5G, ανάπτυξη MEC. Οι UPFs μπορούν να θεωρηθούν ως ένα καταναεμημένο και διαμορφώσιμο επίπεδο δεδομένων από την προοπτική του συστήματος MEC. Ο έλεγχος αυτού του επιπέδου δεδομένων, δηλαδή η διαμόρφωση των κανόνων κίνησης, ακολουθεί σε αυτή τη περίπτωση τη διαδρομή NEF-PCF-SMF.



Σχήμα 4.2, Ανάπτυξη MEC ολοκληρωμένη εντός δικτύου 5G

Στο Σχήμα 4.2 παρουσιάζεται ένα σύστημα MEC το οποίο έχει υλοποιηθεί με ολοκλήρωση εντός ενός δικτύου 5G. Ο ενορχηστρωτής MEC είναι μια λειτουργική οντότητα του επιπέδου συστήματος MEC η οποία μπορεί, ενεργώντας ως AF, να αλληλεπιδράσει με τη λειτουργία Έκθεσης Δικτύου (NEF). Σε μερικές περιπτώσεις μπορεί να αλληλεπιδράσει ακόμα και απευθείας με τα NFs προορισμού. Στο επίπεδο του MEC host την αλληλεπίδραση με τα NFs αναλαμβάνει η πλατφόρμα MEC, επίσης ενεργώντας ως AF. Οι λειτουργικές οντότητες του host επιπέδου αναπτύσσονται συνήθως σε ένα δίκτυο δεδομένων στο σύστημα 5G. Αντιθέτως, το NEF ως λειτουργία του κορμού του δικτύου μια οντότητα επιπέδου συστήματος που αναπτύσσεται κεντρικά μαζί με παρόμοια NFs. Ένα στιγμιότυπο του NEF μπορεί επίσης να αναπτυχθεί στην παρυφή για να επιτρέψει χαμηλό latency και υψηλό εύρος ζώνης για τη πρόσβαση σε υπηρεσία από ένα MEC host.

4.2.3 Λειτουργία Διαχείρισης Πρόσβασης και Κινητικότητας (AMF)

Η διαχείριση της κινητικότητας των χρηστών αποτελεί κεντρική λειτουργία σε ένα σύστημα κινητών επικοινωνιών. Σε ένα σύστημα 5G η λειτουργία Διαχείρισης Πρόσβασης και Κινητικότητας (AMF) είναι αυτή που χειρίζεται διαδικασίες σχετικές με την κινητικότητα. Επιπλέον, η AMF είναι υπεύθυνη για

- τον τερματισμό των διαδικασιών του επιπέδου ελέγχου του RAN
- την προστασία της ακεραιότητας της σηματοδότησης
- τη διαχείριση των καταχωρήσεων, των συνδέσεων και της προσβασιμότητας
- τη διασύνδεση με τη λειτουργία νόμιμης συνακρόασης για συμβάντα πρόσβασης και κινητικότητας
- τη παροχή πιστοποίησης και εξουσιοδότησης για το στρώμα πρόσβασης
- τη φιλοξενία της λειτουργικότητας Πρόσδεσης Ασφάλειας (Security Anchor Functionality, SEAF)

Βάσει της SBA, η AMF παρέχει υπηρεσίες επικοινωνίας και προσβασιμότητας προς άλλα NFs και επίσης επιτρέπει στις συνδρομές να λαμβάνουν ειδοποιήσεις σχετικά με συμβάντα κινητικότητας.

4.2.4 Λειτουργία Διαχείρισης Συνεδρίας (SMF)

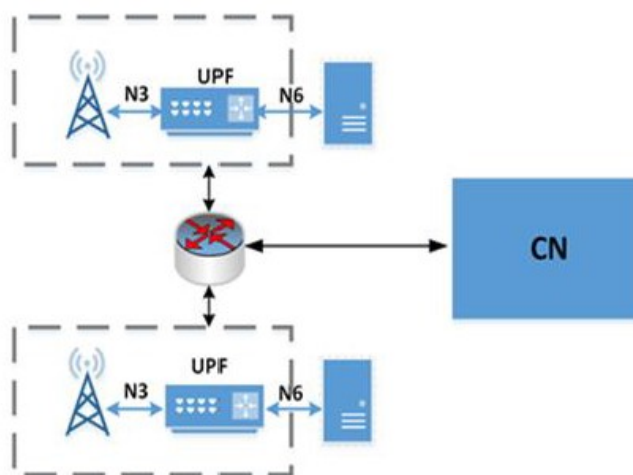
Η λειτουργία Διαχείρισης Συνεδρίας βρίσκεται σε κομβική θέση και έχει εξίσου πολυάριθμες αρμοδιότητες με την AMF. Ορισμένες από τις λειτουργικότητες που προσφέρει η SMF είναι

- ο διαχείριση συνεδρίας
- ο κατανομή και διαχείριση διευθύνσεων IP
- ο υπηρεσία DHCP
- ο επιλογή / επανεπιλογή και έλεγχο της UPF
- ο διαμόρφωση των κανόνων κίνησης για το UPF
- ο νόμιμη συνακρόαση για συμβάντα διαχείρισης συνεδρίας
- ο τιμολόγηση
- ο υποστήριξη περιαγωγής

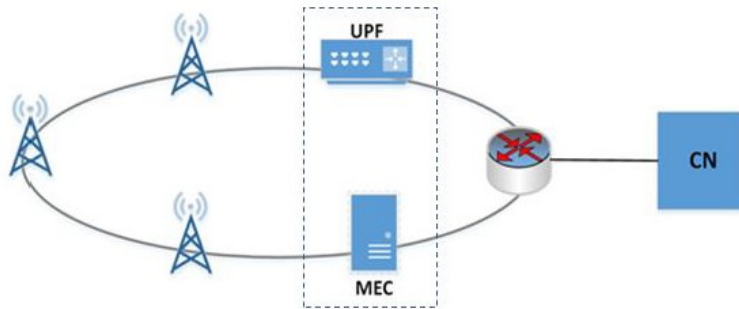
Καθώς υπηρεσίες MEC μπορεί να προσφέρονται τόσο σε κεντρικά όσο και σε νέφη παρυφής, το SMF διαδραματίζει κρίσιμο ρόλο λόγω της συμμετοχής του στην επιλογή και τον έλεγχο της UPF και στη διαμόρφωση των κανόνων για την καθοδήγηση της κίνησης.

4.3 Περιπτώσεις εγκατάστασης MEC σε 5G δίκτυα

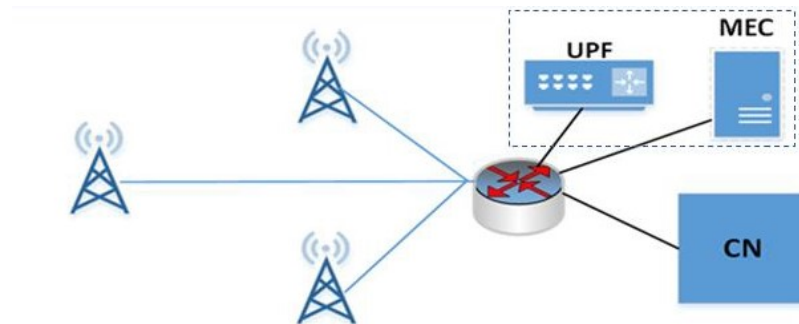
Στα σχήματα 4.1-4.4 που ακολουθούν, παρουσιάζονται ορισμένες από τις πιθανές τοπολογίες εγκατάστασης του MEC host, ανάλογα τις επιμέρους λειτουργικές απαιτήσεις και τις απαιτήσεις ασφάλειας και επιδόσεων.



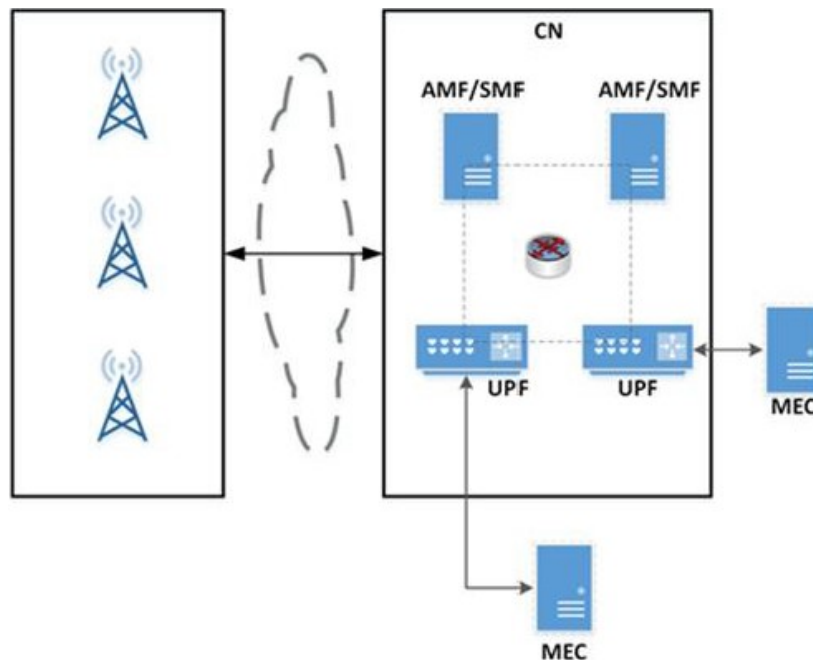
Σχήμα 4.3, Συνεγκατάσταση MEC και τοπικής UPF στο σταθμό βάσης



Σχήμα 4.4, Συνεγκατάσταση MEC με ένα κόμβο εκπομπής, πιθανόν με τοπική UPF



Σχήμα 4.5, Συνεγκατάσταση MEC και τοπικής UPF σε ένα δικτυακό σημείο συγκέντρωσης



Σχήμα 4.6, Συνεγκατάσταση MEC με λειτουργίες του δικτύου κορμού (π.χ. σε ένα data center)

Σε λογικό επίπεδο είτε το MEC εγκαθίσταται στη παρυφή είτε στο κεντρικό δίκτυο δεδομένων, είναι η UPF που αναλαμβάνει την καθοδήγηση της κίνησης επιπέδου χρήστη προς τις επιλεγμένες εφαρμογές MEC.

4.4 Καθοδήγηση κίνησης

Η καθοδήγηση κίνησης στο MEC αναφέρεται στην ικανότητα του συστήματος MEC να δρομολογήσει την κίνηση στις επιλεγμένες εφαρμογές σε ένα καταναμημένο υπολογιστικό νέφος. Στη γενική αρχιτεκτονική αναφοράς MEC η καθοδήγηση της κίνησης γίνεται από τη πλατφόρμα με διαμόρφωση του επιπέδου δεδομένων μέσω του σημείου αναφοράς Mp2. Στο 5G ο ρόλος του επιπέδου δεδομένων έχει ανατεθεί στη λειτουργία Επιπέδου Χρήστη (UPF). Η UPF παίζει τον κεντρικό ρόλο στη δρομολόγηση της κίνησης στις επιθυμητές εφαρμογές και λειτουργίες δικτύου.

Το σύνολο εργαλείων που προσφέρεται από ένα δίκτυο 5G μπορεί να χρησιμοποιηθεί από την AF, η οποία στην περίπτωση του MEC αντιστοιχεί σε λειτουργικές οντότητες (Functional Entities, FE) του συστήματος MEC. Όταν μια εφαρμογή MEC αρχικοποιείται, καμία κίνηση δεν δρομολογείται στην εφαρμογή μέχρι η εφαρμογή να είναι έτοιμη να δεχτεί κίνηση και το υποκείμενο επίπεδο δεδομένων να έχει ρυθμιστεί να δρομολογεί κίνηση προς αυτή. Η ρύθμιση αυτή γίνεται από την πλατφόρμα MEC. Όταν αναπτύσσεται σε ένα δίκτυο 5G, ένα MEC FE όπως μια πλατφόρμα MEC, τότε αναλαμβάνει το ρόλο ενός 5G AF προς το δίκτυο κορμού 5G. Αλληλεπιδρά με τη PCF για να ζητήσει καθοδήγηση κίνησης στέλνοντας πληροφορίες που ταυτοποιούν την κίνηση που πρέπει να καθοδηγηθεί. Η PCF θα μετασχηματίσει το αίτημα σε πολιτικές που ισχύουν για τις επιλεγμένες συνεδρίες PDU, και θα παράσχει τους κανόνες δρομολόγησης στην κατάλληλη λειτουργία Διαχείρισης Συνεδρίας (SMF). Με βάση τις ληφθείσες πληροφορίες, η SMF προσδιορίζει την επιλεγμένη UPF, αν υπάρχει, και εκκινεί τη διαμόρφωση των κανόνων κίνησης σε αυτή. Εάν δεν υπάρχει UPF για να εφαρμοστεί, το SMF μπορεί να εισάγει μια ή περισσότερες UPFs στη διαδρομή δεδομένων της PDU συνεδρίας.

Στην ανάπτυξη ως ολοκληρωμένο με το 5G που περιγράφηκε, η λειτουργικότητα του επιπέδου δεδομένων της γενικής αρχιτεκτονικής MEC αποτελεί πλέον ευθύνη της UPF. Αυτή η UPF επηρεάζεται από το MEC με αλληλεπιδράσεις επιπέδου ελέγχου με τις λειτουργίες του 5G δικτύου κορμού αντί μέσω του συγκεκριμένου σημείου αναφοράς Mp2 της αρχιτεκτονικής MEC.

Η SMF μπορεί επίσης να διαμορφώσει τη UPF για τη καθοδήγηση κίνησης με διαφορετικές επιλογές. Στην περίπτωση των IPv4, IPv6, IPv4v6 ή Ethernet, η SMF μπορεί να εισάγει μια λειτουργία κατηγοριοποιητή Uplink (UL CL) στη διαδρομή δεδομένων. Η UL CL μπορεί να διαμορφωθεί με τους κανόνες κίνησης ώστε να προωθεί την κίνηση uplink προς διαφορετικές επιλεγμένες εφαρμογές και λειτουργίες δικτύου, ενώ στην κατεύθυνση downlink να συγχωνεύει την κίνηση που προορίζεται για τα UE. Εναλλακτικά, για συνεδρίες PDU που χρησιμοποιούν IPv6 ή IPv4v6 και εάν υποστηρίζεται από UE, η SMF μπορεί να χρησιμοποιήσει τη προσέγγιση Multi-homing για

καθοδήγηση κίνησης. Σε αυτή τη περίπτωση, η SMF θα εισάγει μια λειτουργία Σημείου Διακλάδωσης (Branching Point function) στην επιλεγμένη UPF, και θα τη ρυθμίζει να διαχωρίζει την Uplink κίνηση προς ένα τοπικό στιγμιότυπο εφαρμογής ή προς τις υπηρεσίες στο κεντρικό cloud ανάλογα το πρόθεμα προέλευσης των IP πακέτων δεδομένων.

Επίσης το σύστημα 5G παρέχει αποδοτικά εργαλεία προς λειτουργικές οντότητες MEC, π.χ. εργαλεία για μια πλατφόρμα MEC ή έναν εννοχρηστωτή MEC ώστε να παρακολουθούν τα συμβάντα κινητικότητας που σχετίζονται με χρήστες των στιγμιότυπων εφαρμογής MEC σε τοπικά clouds. Οι MEC FEs μπορούν να αποκτήσουν συνδρομή σε ειδοποιήσεις συμβάντων διαχείρισης διαδρομής επιπέδου χρήστη από SMF, οπότε θα λαμβάνουν ειδοποιήσεις σχετικά με τις αλλαγές διαδρομής, π.χ. όταν αλλάζει το αναγνωριστικό πρόσβασης δεδομένων δικτύου (DNAI) για μια συγκεκριμένη συνεδρία PDU. Οι λειτουργίες διαχείρισης MEC μπορούν να χρησιμοποιήσουν αυτές τις ειδοποιήσεις για να ενεργοποιήσουν διαμόρφωση δρομολόγησης κίνησης ή διαδικασίες μετεγκατάστασης εφαρμογής.

Σε όλες τις παραπάνω περιπτώσεις έχει υποθεθεί ότι το σύστημα MEC, και οι σχετικές Λειτουργικές Οντότητες που αυτό υποστηρίζει, έχουν την εμπιστοσύνη του 3GPP δικτύου, και ότι οι πολιτικές επιτρέπουν την απευθείας πρόσβαση των AF στις λειτουργίες δικτύου κορμού 5G. Ωστόσο, υπάρχουν περιπτώσεις όπου ένα MEC FE χρειάζεται να ζητήσει υπηρεσίες από τη λειτουργία Έκθεσης Δικτύου (NEF), για παράδειγμα όταν το MEC δεν θεωρείται αξιόπιστο και η πολιτική δεν επιτρέπει απευθείας αλληλεπίδραση με τα 5G NFs κορμού. Επίσης, κάθε φορά που το αίτημα στοχεύει ή ενδέχεται να στοχεύσει πολλαπλά PCFs, θα πρέπει να περάσει μέσω του NEF.

4.5 Κινητικότητα UE και εφαρμογής

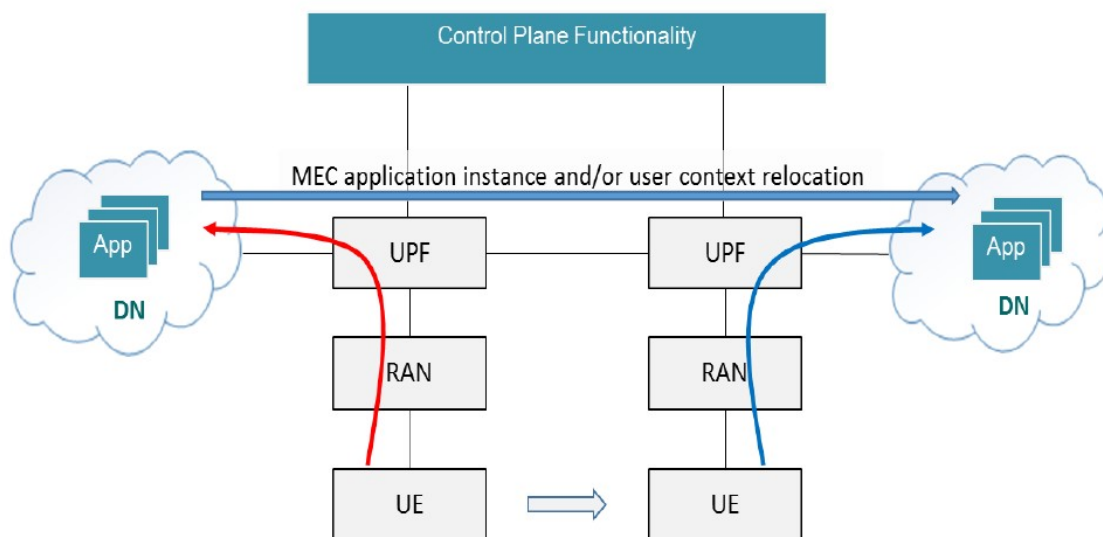
Το σύστημα MEC συνενώνει το περιβάλλον δικτύωσης και computing στην παρυφή του δικτύου ώστε να βελτιστοποιήσει την απόδοση για υπηρεσίες πολύ χαμηλού latency και υψηλού εύρους ζώνης. Άμεση συνέπεια της φιλοξενίας των εφαρμογών στην παρυφή είναι η έκθεση αυτών των εφαρμογών στην κινητικότητα UE. Τα UE, είτε πρόκειται για παραδοσιακές συσκευές χειρός είτε για οχήματα εξοπλισμένα με συστήματα V2X, αναμένεται ότι θα κινούνται. Οι κινήσεις τους ενδέχεται να καταστήσουν τη θέση του τρέχοντος host της MEC εφαρμογής μη βέλτιστη μακροπρόθεσμα, παρόλο που το υποκείμενο δίκτυο διατηρεί την συνέχεια της υπηρεσίας μεταξύ των τελικών σημείων.

Προκειμένου το σύστημα MEC να μπορεί να εκπληρώνει τις απαιτήσεις εφαρμογής σε ένα κινητό περιβάλλον, η κινητικότητα εφαρμογών είναι απαιτούμενη. Πρακτικά αυτό σημαίνει ότι το στιγμιότυπο εφαρμογής που εξυπηρετεί τον χρήστη αλλάζει σε μια νέα θέση. Κατά συνέπεια, για εφαρμογές εξαρτημένης κατάστασης η σχετική πληροφορία

χρήστη πρέπει επίσης να μεταφερθεί. Στην περίπτωση ανάπτυξης MEC σε μια ευρεία περιοχή αναμένεται ότι οι MEC host είναι προετοιμασμένοι και διαμορφωμένοι για τις εφαρμογές MEC που υποστηρίζει το σύστημα, οπότε η πιθανότητα ανάγκης μετεγκατάστασης μιας εφαρμογής MEC από έναν MEC host σε έναν άλλο είναι μειωμένη. Ωστόσο αυτό δεν καταργεί την ανάγκη μετεγκατάστασης της σχετικής πληροφορίας χρήστη από τον MEC host προέλευσης στον MEC host προορισμού για υπηρεσίες εφαρμογής εξαρτημένης κατάστασης.

Μια υπηρεσία εφαρμογής μπορεί να κατηγοριοποιηθεί είτε ως εξαρτημένης κατάστασης είτε ως μη εξαρτημένης κατάστασης. Η κινητικότητα εφαρμογών για μια υπηρεσία εξαρτημένης κατάστασης απαιτεί τη μεταφορά και τον συγχρονισμό της κατάστασης της υπηρεσίας μεταξύ του αρχικού και του μετεγκατεστημένου στιγμιότυπου εφαρμογής, προκειμένου να εξασφαλιστεί η συνέχεια της υπηρεσίας. Ο συγχρονισμός κατάστασης υπηρεσίας εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από την υλοποίηση της ίδιας της εφαρμογής. Δηλαδή η εφαρμογή πρέπει να έχει σχεδιαστεί έτσι ώστε να μπορούν να εκτελούνται ταυτόχρονα πολλαπλά στιγμιότυπα της εφαρμογής και η κατάσταση του στιγμιότυπου της εφαρμογής να μπορεί να καταγραφεί στο στιγμιότυπο προέλευσης και να αντιγραφεί σε άλλο στιγμιότυπο ανεξάρτητα από τη λειτουργία του στιγμιότυπου. Τότε, η υπηρεσία που προσφέρεται από το μετεγκατεστημένο στιγμιότυπο εφαρμογής στον MEC host προορισμού, μπορεί να συνεχιστεί χωρίς διακοπή σε σχέση με την κατάσταση του στιγμιότυπου εφαρμογής στον MEC host προέλευσης τη στιγμή αποσύνδεσης του UE από αυτόν.

Στο Σχήμα 4.7 απεικονίζεται το βασικό σενάριο κινητικότητας εφαρμογών σε μια ανάπτυξη MEC ολοκληρωμένη σε ένα δίκτυο 5G.



Σχήμα 4.7, Βασικό σενάριο κινητικότητας εφαρμογής για MEC ολοκληρωμένο με 5G δίκτυο

Η ανίχνευση μετακίνησης του UE σε μια νέα κυψέλη εξυπηρέτησης είναι μια από τις δικλίδες που ενεργοποιούν την κινητικότητα εφαρμογής. Μπορεί να βασιστεί στη λειτουργία Έκθεσης Δικτύου (NEF) και στην δυνατότητα των λειτουργικών οντοτήτων MEC να έχουν συνδρομή σε ειδοποιήσεις σχετιζόμενων συμβάντων που είναι διαθέσιμες εκεί. Η πλατφόρμα MEC μπορεί επίσης να έχει συνδρομή στις πληροφορίες RAN που παράγονται από το RNIS. Μέσω της πληροφορίας ραδιοδιαύλου, η πλατφόρμα μπορεί να εντοπίσει UE που είναι σε διαδικασία αλλαγής κυψέλης και να διαπιστώσει αν πρόκειται να μετακινηθεί εκτός περιοχής εξυπηρέτησης του τρέχοντος MEC host.

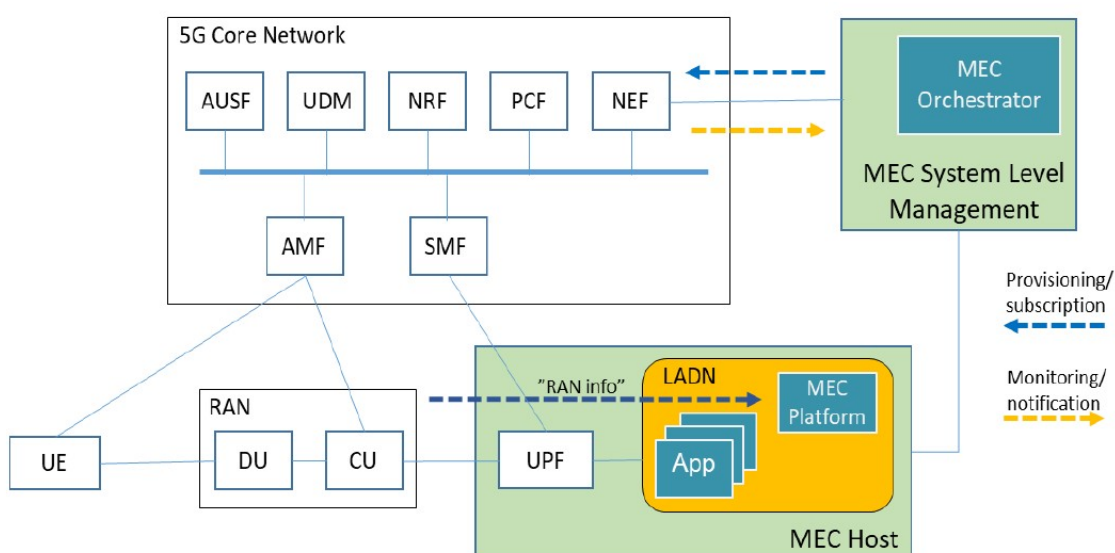
4.6 Έκθεση δυνατότητων

Όπως προαναφέρθηκε υπάρχει μια λειτουργία, η λειτουργία Έκθεσης Δικτύου (NEF), ειδικά για να εκθέτει σε εξωτερικές οντότητες τις υπηρεσίες και πληροφορίες για τις δυνατότητες των λειτουργιών δικτύου του 5G δικτύου κορμού. Παρόλο αρχιτεκτονική βασιζόμενη σε υπηρεσίες (SBA) του 5G επιτρέπει την άμεση πρόσβαση σε μια λειτουργία δικτύου για μια εξουσιοδοτημένη λειτουργία AF, υπάρχουν αρκετές περιπτώσεις κατά τις οποίες οι υπηρεσίες και οι δυνατότητες εκτίθενται μέσω NEF. Ορισμένες είναι

- Παρακολούθηση: Επιτρέπει σε μια εξωτερική οντότητα να αποκτήσει συνδρομή (ή απλά να ζητήσει ενημέρωση) για συμβάντα ενδιαφέροντος που σχετίζονται με UE. Τέτοια συμβάντα περιλαμβάνουν την κατάσταση περιαγωγής UE, την απώλεια σύνδεσης UE, την προσβασιμότητα στο UE και τα γεγονότα που σχετίζονται με τη θέση (π.χ. θέση συγκεκριμένου UE ή ταυτοποίηση UEs εντός γεωγραφικής περιοχής).
- Πολιτικές και Τιμολόγηση: Χειρίζεται το QoS και την πολιτική χρέωσης για αιτήματα από εξωτερικό μέρος που καταφθάνουν μέσω UE, διευκολύνοντας σημαντικά τις επιχορηγούμενες υπηρεσίες δεδομένων. Η PCF είναι η βασική οντότητα όσον αφορά τον έλεγχο πολιτικής και χρέωσης (PCC), αν και τα περισσότερα εθνικά ταμεία εμπλέκονται σε κάποιο βαθμό στην υποστήριξη του πλαισίου PCC.

Στο Σχήμα 4.8 απεικονίζεται ένα παράδειγμα έκθεσης ικανότητας 5G σε σύστημα MEC. Στη περίπτωση αυτή ο ενορχηστρωτής MEC εμφανίζεται ως AF παρέχοντας κεντρικά λειτουργίες για τη διαχείριση των υπολογιστικών πόρων και το χειρισμό των MEC host. Ο ενορχηστρωτής MEC, ως μια 5G AF, αλληλεπιδρά με τη NEF και με άλλες συναφείς NF για ότι αφορά τις συνολικές δραστηριότητες παρακολούθησης, πολιτικών και τιμολόγησης. Ο MEC host, σε αντιδιαστολή, μπορεί να είναι εγκατεστημένος στη παρυφή του 5G RAN ώστε να εκμεταλλευτεί τα πλεονεκτήματα του MEC για να βελτιστοποιήσει επιδόσεις και QoE. Επομένως είναι πιθανό η πλατφόρμα MEC να χρειάζεται απευθείας έκθεση τόσο στις κεντρικές (CU) όσο και στις κατανεμημένες (DU) μονάδες του 5G RAN.

Για παράδειγμα, υπηρεσίες που προσφέρονται από MEC host, όπως η RNIS, βασίζονται στην έκθεση των δυνατοτήτων RAN. Ειδικά για πληροφορίες ραδιοδιαύλου που σχετίζονται με το UE σε πραγματικό χρόνο. Τέτοιες πληροφορίες θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν από τις εφαρμογές MEC, που εκτελούνται στον MEC host, για να βελτιστοποιήσουν τις προσφερόμενες υπηρεσίες προς τα UEs. Με την απευθείας έκθεση των πληροφοριών ραδιοδιαύλου (π.χ. λαμβανόμενη ισχύς, ποιότητα λαμβανόμενου σήματος), στην πλατφόρμα MEC αποφεύγεται το περιττό latency μετάδοσης μέσω του δικτύου κορμού. Παράλληλα, εξοικονομείται εύρος ζώνης παρακάμπτοντας την ανάγκη ανταλλαγής μηνυμάτων δρομολόγησης προς τους καταναλωτές (δηλ. τις εφαρμογές MEC) μέσω του δικτύου κορμού. Η έκθεση των πληροφοριών τοπικού δικτύου είναι καθήκον ενός τοπικού στιγμιότυπου NEF που έχει αναπτυχθεί στη παρυφή.



Σχήμα 4.8, Έκθεση δυνατοτήτων, περίπτωση ανάπτυξης MEC σε τοπικό δίκτυο δεδομένων

Επίσης το σύστημα MEC μπορεί να αξιοποιήσει τις πληροφορίες δυνατοτήτων δικτύου που εκτίθενται από το 5G RAN για να παρέχει πρόσθετες υπηρεσίες στις εφαρμογές MEC. Η πρόσβαση σε μετρήσεις ραδιοδιαύλου σε πραγματικό χρόνο μπορεί να χρησιμοποιηθεί από τη πλατφόρμα για να υπολογίσει την ακριβή θέση ενός UE και να την εκθέσει ως υπηρεσία MEC σε μια εφαρμογή που καταναλώνει υπηρεσία MEC. Τέτοιες πληροφορίες τοποθεσίας θα μπορούσαν να προσφερθούν πίσω στο δίκτυο 5G για να βελτιστοποιήσουν την υπηρεσία προς τον τελικό χρήστη ή να χρησιμοποιηθούν ως μέρος μιας συνολικής υπηρεσίας βάσει τοποθεσίας (Location Based Service, LBS) που προσφέρει, π.χ. μάρκετινγκ βασισμένο σε τοποθεσίες UE. Το τελευταίο παράδειγμα αναδεικνύει την ευελιξία του SBA, όπου και οι λειτουργίες / εφαρμογές του MEC μπορούν να παράγουν υπηρεσίες προς το σύστημα 5G.

4.7 Τιμολόγηση

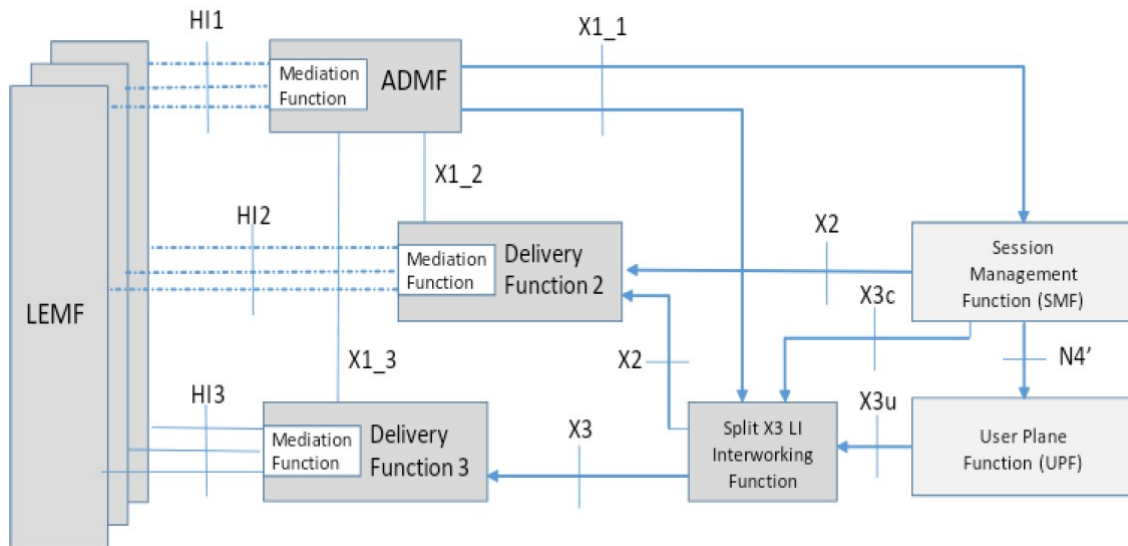
Ο μετασχηματισμός των τηλεπικοινωνιακών δικτύων σε περιβάλλον φιλοξενίας υπηρεσιών τρίτων μερών, όπου το υπολογιστικό νέφος γίνεται συστατικό τμήμα του τηλεπικοινωνιακού δικτύου χρειάζεται νέες προσεγγίσεις στις αρχές και τις δυνατότητες τιμολόγησης. Η αλληλοσυμπλήρωση των 5G NFs, όπως UPF και SMF, αναμένεται να απλοποιήσει διαδικασίες επιτυγχάνοντας κοινή υποστήριξη, όπως πχ μεταξύ on-line και off-line τιμολόγησης.

Η ανάπτυξη MEC με ολοκλήρωση εντός δικτύου 5G βασίζεται στη UPF ως πρόσδεση συνεδρίας PDU και πύλη προς τα δίκτυα δεδομένων. Επομένως ισχύουν οι ίδιοι μηχανισμοί και δυνατότητες τιμολόγησης που ισχύουν για τις κοινές εφαρμογές.

4.8 Κανονιστικές απαιτήσεις

Η νόμιμη συνακρόαση (LI) και τα διακρατούμενα δεδομένα (RD) διαδραματίζουν κρίσιμο ρόλο, βοηθώντας τις υπηρεσίες επιβολής του νόμου στην καταπολέμηση της τρομοκρατίας και της σοβαρής εγκληματικής δραστηριότητας. Για να διευκολυνθεί η νόμιμη διαδικασία, οι Αρχές απαιτούν τα δημόσια τηλεπικοινωνιακά δίκτυα να υποστηρίζουν ρητά την εξουσιοδοτημένη ηλεκτρονική παρακολούθηση. Οι ενέργειες των παρόχων που θεωρούνται κανονιστική υποχρέωση περιλαμβάνουν, την παροχή της δικτυακής ταυτότητας του στόχου ώστε να μπορεί να απομονωθεί από τις επικοινωνίες των άλλων χρηστών και την αντιγραφή της επικοινωνίας στόχου ώστε να δοθεί το αντίγραφο στις νόμιμες Αρχές.

Με βάση το MEC, η νόμιμη συνακρόαση μπορεί να χρησιμοποιήσει τις SMF και UPF κατά το CUPS LI μοντέλο (Control and User Plane Separation of EPC nodes) όπως ορίζεται στην 3GPP Rel-14 [3.6]. Η υποψήφια πρόταση στο 3GPP παρουσιάζεται στο Σχήμα 4.9. Η UPF είναι ουσιαστικά το επίπεδο δεδομένων των MEC host, επομένως αποτελεί δομικό μέρος της εγκατάστασης του MEC σε ένα δίκτυο 5G. Κατά συνέπεια, η νόμιμη συνακρόαση στο 3GPP υποστηρίζεται εγγενώς για την κίνηση εφαρμογών MEC, όπως συμβαίνει για οποιαδήποτε κίνηση εφαρμογών που περνάει το UPF.



Σχήμα 4.9, Αρχιτεκτονική νόμιμης συνακρόασης (πρόταση, 3GPP)

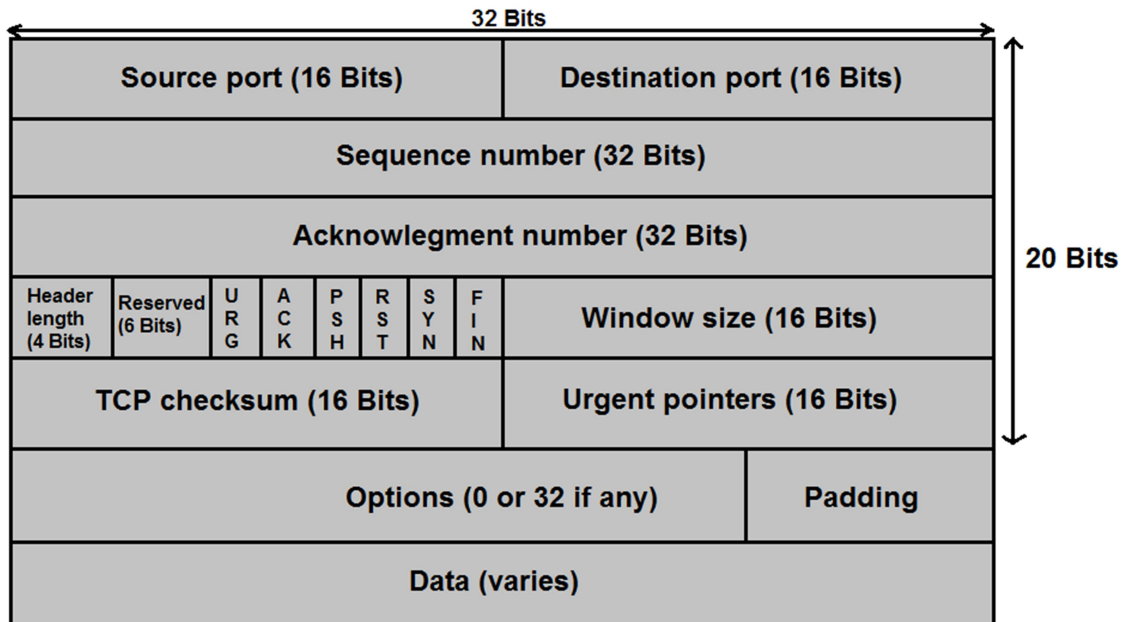
Κεφάλαιο 5: TCP σε ασύρματα δίκτυα και έλεγχος συμφόρησης

5.1 Γενικά για TCP

Το TCP είναι πρωτόκολλο του στρώματος μεταφοράς (τέταρτο επίπεδο στο OSI βασικό μοντέλο αρχιτεκτονικής δικτύου). Προδιαγράφει μια μέθοδο σύνδεσης μεταξύ αποστολέα και παραλήπτη, είναι δηλαδή ένα “από άκρη-ως-άκρη” (end-to-end) πρωτόκολλο, το οποίο προσθέτει ένα αφηρημένο στρώμα πάνω από το υποκείμενο δίκτυο που εξυπηρετεί τα σημεία τερματισμού της σύνδεσης. Το TCP εγκαθιστά ένα νοητό κύκλωμα μεταξύ αποστολέα και παραλήπτη και μεταφέρει την πληροφορία ως ρεύμα από οκτάδες (octet stream). Με τον τρόπο αυτό εξασφαλίζει αξιόπιστη μεταφορά δεδομένων τα οποία παραδίδονται στο προορισμό αποσφαλματωμένα και με την ίδια ακολουθία που απεστάλησαν.

5.1.1 Επικεφαλίδα TCP

Το TCP δέχεται μια ροή δεδομένων από τα πρωτόκολλα ανώτερων επιπέδων. Διαιρεί τη ροή σε κομμάτια και προσθέτει μια επικεφαλίδα φτιάχνοντας τη μονάδα πληροφορίας του TCP, το Τεμάχιο TCP (TCP Segment). Στο Σχήμα 5.1 παρουσιάζεται η δομή της επικεφαλίδας TCP.



Σχήμα 5.1, Επικεφαλίδα TCP πρωτοκόλλου

5.1.2 Ορισμοί βασικών εννοιών TCP

Παρατίθενται οι ορισμοί βασικών εννοιών του μηχανισμού TCP ώστε να απλοποιηθεί η περιγραφή λειτουργιών του πρωτοκόλλου στη συνέχεια.

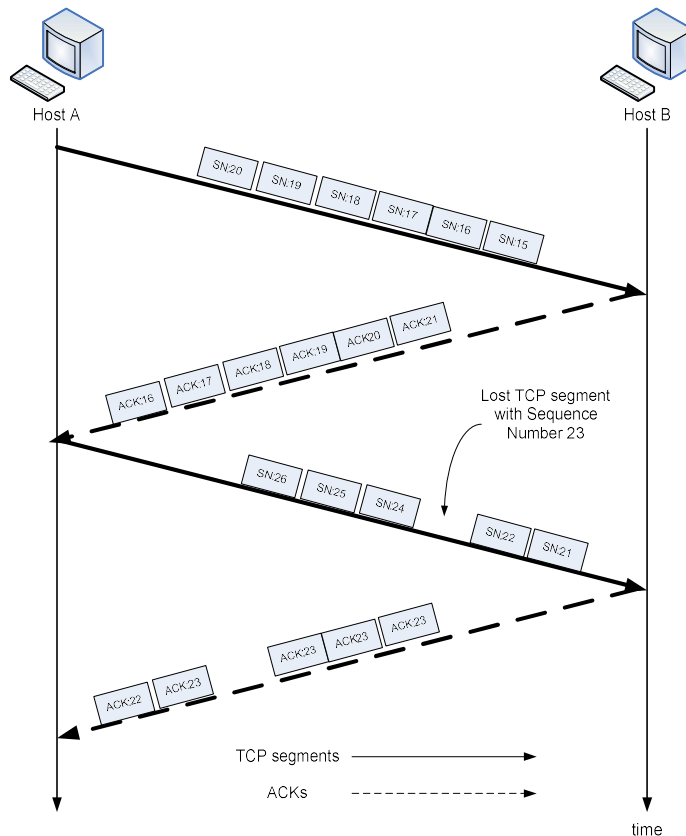
- *Segment*: Τεμάχιο TCP είναι η μονάδα πληροφορίας του TCP και μεταφέρεται στο πεδίο δεδομένων του IP δεδομενογραφήματος (IP datagram).
- *Sender Maximum Segment Size (SMSS)*: είναι το μέγιστο μήκος ενός πακέτου σε bytes που μπορεί να μεταδώσει ο αποστολέας και συνήθως καθορίζεται από το MTU του υποκείμενου δικτύου.
- *Receiver Maximum Segment Size (RMSS)*: είναι το αντίστοιχο μέγεθος πακέτου, το οποίο μπορεί να δεχτεί ο παραλήπτης και αποτελεί το άνω φράγμα της τιμής του SMSS.
- *Maximum Segment Size (MSS)*: είναι το τελικό μέγιστο μέγεθος πακέτου της TCP σύνδεσης.
- *Full-sized Segment*: είναι ένα πακέτο μήκους MSS bytes.
- *Receiver Window (rwnd)*: είναι το πρόσφατο μήκος παραθύρου που ανακοίνωσε ο παραλήπτης στον αποστολέα, σχετικά με το μέγεθος καταχωρητή προσωρινής αποθήκευσης (buffer) που είναι διαθέσιμο.
- *Congestion Window (cwnd)*: είναι το μήκος παραθύρου που χρησιμοποιεί ο αποστολέας για τη μετάδοση δεδομένων. Αυτό δεν μπορεί να είναι μεγαλύτερο του rwnd.
- *Initial Window (IW)*: είναι η αρχική τιμή του cwnd αμέσως μετά την εγκατάσταση της σύνδεσης.
- *Loss Window (LW)*: είναι η τιμή που λαμβάνει το cwnd όταν ο αποστολέας αντιληφθεί απώλεια πακέτου με τη λήξη του χρόνου αναμονής (timeout).
- *Restart Window (RW)*: είναι η τιμή του cwnd όταν ο αποστολέας επανεκκινεί τη μετάδοση μετά από περίοδο σιωπής.

5.1.3 Βασική λειτουργία TCP

Όπως αναφέρθηκε, το TCP προσφέρει αξιόπιστη μεταφορά δεδομένων. Για να επιτύχει την εξακριβωμένη παραλαβή των απεσταλμένων πακέτων δεδομένων χρησιμοποιεί επιβεβαιώσεις (ACKnowledgment), με τις οποίες ο παραλήπτης ενημερώνει τον αποστολέα για την επιτυχή παραλαβή. Σε κάθε πακέτο δεδομένων εκχωρείται μοναδικός αριθμός (Sequence Number) και βάσει του αριθμού αυτού ο παραλήπτης στέλνει ACK για το επόμενο από το τελευταίο πακέτο που παρέλαβε. Εάν κάποιο πακέτο δεν έχει επιβεβαιωθεί μετά από κάποιο συγκεκριμένο χρονικό διάστημα (Retransmission TimeOut, RTO) τότε ο αποστολέας ξαναστέλνει το πακέτο που αντιστοιχεί στο ανεπιβεβαίωτο sequence nr. Εάν

κάποιο πακέτο παραληφθεί εις διπλούν από το δέκτη τότε το πακέτο αυτό αναγνωρίζεται ως διπλό, μέσω του sequence nr., και απορρίπτεται η δεύτερη παραλαβή.

Στο Σχήμα 5.2 απεικονίζεται η επικοινωνία μεταξύ δύο τερματικών με TCP σύνδεση. Παρουσιάζονται δύο περιπτώσεις, στη πρώτη περίπτωση η αποστολή και η λήψη όλων των TCP τεμαχίων είναι επιτυχής, οπότε επιστρέφονται οι ACKs που αντιστοιχούν στα τεμάχια αυτά. Στη δεύτερη περίπτωση υπάρχει απώλεια του τεμαχίου με sequence nr. 23, ενώ τα επόμενα φθάνουν κανονικά στον παραλήπτη. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα για κάθε ένα από τα TCP τεμάχια που φθάνουν στον παραλήπτη μετά το απωλεσθέν πακέτο, να αποστέλλεται ACK στην οποία ανακοινώνεται πως το τεμάχιο που αναμένει ο παραλήπτης είναι το τεμάχιο με Sequence Number 23. Η συμπεριφορά αυτή οφείλεται στο γεγονός ότι το πρωτόκολλο επιδιώκει την λήψη των δεδομένων με τη σωστή σειρά.



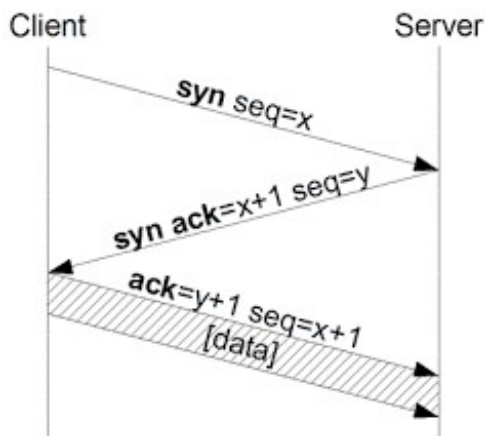
Σχήμα 5.2, Παράδειγμα αποστολών σε TCP σύνδεση χωρίς και με απώλεια τεμαχίου

Σφάλμα μπορεί να προκύψει και στη πλευρά των ACKs. Τα δύο βασικά είδη σφάλματος είναι να ληφθεί ένα τεμάχιο αλλά να υπάρξει απώλεια της ACK που αντιστοιχεί σε αυτό, ή η ACK ενός τεμαχίου να φθάσει στο παραλήπτη μετά το RTO.

5.1.4 3-μερής Χειραψία

Η εγκαθίδρυση μια TCP σύνδεσης ξεκινά με μια διαδικασία γνωστή ως 3-μερή χειραψία. Είναι μια διαδικασία τριών βημάτων κατά την οποία πελάτης και εξυπηρετητής διαπραγματεύονται και αλληλοενημερώνονται για τις παραμέτρους της TCP σύνδεσης που σκοπεύουν να συνάψουν. Η διαδικασία ξεκινά με πρωτοβουλία του πελάτη και αποτελείται από τα εξής τρία βήματα

1. **SYN** : Ο πελάτης στέλνει ένα αίτημα εκκίνησης SYN που περιλαμβάνει και το, τυχαίο, sequence nr.=x που προτείνει.
2. **SYN-ACK** : Ο εξυπηρετητής απαντά με ένα SYN-ACK στο οποίο το πεδίο “acknowledgment nr.” έχει αυξηθεί κατά ένα (x+1), και με ένα τυχαίο, sequence nr.=y που προτείνει ο εξυπηρετητής
3. **ACK** : Ο πελάτης στέλνει το τελικό ACK στον εξυπηρετητή με sequence nr.=x+1 και acknowledgment nr =y+1.



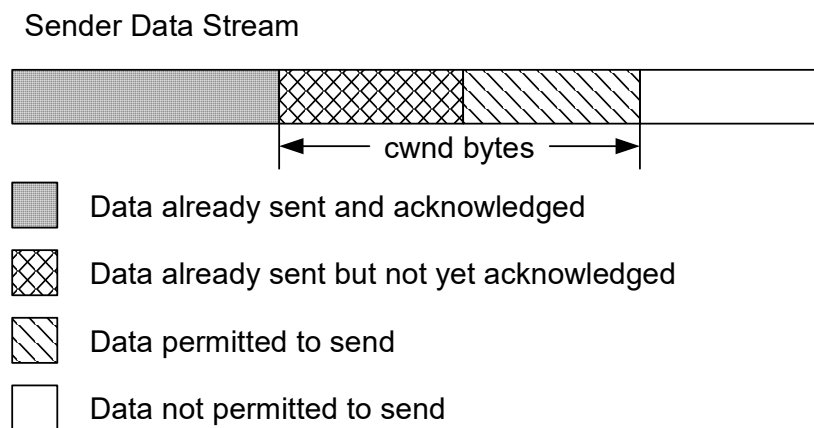
Σχήμα 5.3, 3-μερής χειραψία TCP

Μετά το τρίτο βήμα, τόσο ο πελάτης όσο και ο εξυπηρετητής έχουν λάβει μια επιβεβαίωση της σύνδεσης. Τα βήματα 1, 2 καθορίζουν την παράμετρο σύνδεσης (sequence nr.) προς τη μια κατεύθυνση και είναι επιβεβαιωμένα. Τα βήματα 2, 3 καθορίζουν την παράμετρο σύνδεσης (sequence nr.) προς την άλλη κατεύθυνση και είναι επιβεβαιωμένα.. Έτσι δημιουργείται μια σύνδεση με πλήρως αμφίδρομη επικοινωνία.

Οι παράμετροι της σύνδεσης που συμφωνήθηκαν κατά την 3-μερή χειραψία δεν μπορούν να αλλάξουν χωρίς διακοπή της σύνδεσης.

5.2 Μηχανισμοί TCP

Η υλοποίηση των ACK εξασφαλίζει την επιβεβαιωμένη λήψη και την άφιξη με την ορθή σειρά των τεμαχίων. Ωστόσο, προκειμένου το TCP να προσφέρει αξιόπιστη υπηρεσία θα πρέπει να εξασφαλίζει ότι τα απεσταλμένα τεμάχια δεν οδηγούν το δίκτυο εκτός ορίων κανονικής λειτουργίας. Αυτό το πετυχαίνει ελέγχοντας τη ροή με το μηχανισμό που ονομάζεται μηχανισμός συρόμενου παραθύρου. Ο αποστολέας δεν επιτρέπεται να ξεπεράσει το μέγεθος ενός παραθύρου που ορίζεται ως η διαφορά μεταξύ sequence nr. και acknowledgment nr. Στο Σχήμα 5.4 παρουσιάζεται ο μηχανισμός του συρόμενου παραθύρου στο TCP, όπου ο αποστολέας μεταδίδει πακέτα περιμένοντας επιβεβαιώσεις για τα πακέτα που έχει ήδη στείλει.



Σχήμα 5.4 Μηχανισμός συρόμενου παραθύρου στο TCP

5.2.1 Έλεγχος ροής

Στο TCP ο έλεγχος ροής επιτυγχάνεται ρυθμίζοντας κατάλληλα το ρυθμό μετάδοσης τεμαχίων του αποστολέα από τον παραλήπτη, μέσω των ACK και του μηχανισμού συρόμενου παραθύρου. Ο μηχανισμός ελέγχου ροής διασφαλίζει ότι ο ρυθμός άφιξης των δεδομένων δεν θα ξεπερνά τις επεξεργαστικές δυνατότητες ή το μέγεθος της προσωρινής μνήμης στον παραλήπτη. Κατά την επικοινωνία, ο παραλήπτης ενημερώνει τακτικά τον αποστολέα για το μέγεθος της πληροφορίας που μπορεί να απορροφήσει, μέσω του rwnd. Επειδή το συρόμενο παράθυρο δεν μπορεί να τεθεί μεγαλύτερο από το rwnd, ο παραλήπτης μπορεί να οριοθετήσει προς τα πάνω τη ροή.

5.2.2 Έλεγχος Συμφόρησης

Ένα δίκτυο μπορεί να ξεπεράσει τα όρια κανονικής λειτουργίας χωρίς να ξεπεραστούν τα επιμέρους όρια αποστολέα και παραλήπτη. Τότε επικρατεί κατάσταση συμφόρησης στο δίκτυο. Προκειμένου το TCP να μην συμβάλλει στη δημιουργία καταστάσεων συμφόρησης που υποβαθμίζουν την αξιόπιστη λειτουργία του, εκτελεί λειτουργίες ελέγχου συμφόρησης

μέσω του μηχανισμού του παραθύρου συμφόρησης cwnd. Βάσει ορισμένων αλγορίθμων, το TCP ρυθμίζει το μέγεθος του cwnd, άρα και το ρυθμό εκπομπής δεδομένων, κατά τέτοιο τρόπο που να αποφεύγεται παραγωγή κίνησης μεγαλύτερη από αυτή που μπορεί να εξυπηρετήσει το δίκτυο. Το cwnd ορίζεται από τον αποστολέα, και το μέγεθος του συρόμενου παραθύρου δεν μπορεί να ξεπερνά το cwnd. Αξίζει να σημειωθεί ότι το TCP εκλαμβάνει κάθε απώλεια πακέτου (μετά από RTO) ως ένδειξη συμφόρησης.

5.2.3 Αργή εκκίνηση (Slow Start)

Η αργή εκκίνηση (Slow start, SS) είναι μέρος του ελέγχου συμφόρησης. Κατά την έναρξη μιας TCP σύνδεσης, το cwnd έχει μέγεθος ίσο με IW και τίθεται σε εφαρμογή ο αλγόριθμος SS. Κατά τη φάση αυτή το cwnd αυξάνει κατά 1 MSS για κάθε ACK που φθάνει στον αποστολέα.. Αυτό σημαίνει ότι το cwnd ακολουθεί εκθετική αύξηση καθώς διπλασιάζεται για κάθε παράθυρο δεδομένων που επιβεβαιώνεται, γεγονός το οποίο συμβαίνει ανά Round Trip Time (RTT). Η φάση SS τερματίζεται μόλις το cwnd γίνει ίσο με ένα κατώφλι γνωστό ως Slow Start Threshold (sssthresh). Το sssthresh μπορεί να έχει οποιαδήποτε τιμή αλλά το cwnd θα φτάνει την sssthresh μόνο εφόσον $sssthresh < rwnd$ και δεν συμβαίνουν απώλειες στη φάση της SS και τα δεδομένα προς μετάδοση είναι τόσα ώστε να μην έχουν εξαντληθεί κατά την αύξηση του cwnd από IW σε sssthresh. Το μέγεθος του IW τίθεται ίσο με 3 ή 10 MSS ανάλογα με την έκδοση του πρωτοκόλλου που υποστηρίζεται [25], με αποτέλεσμα ο μηχανισμός SS να υποαποδίδει για βραχύβιες συνδέσεις.

Αυτό είναι το βασικό σενάριο λειτουργίας του μηχανισμού SS, με μικρές διαφορές μεταξύ των διαφόρων υλοποιήσεων του TCP (TCP Tahoe, TCP Reno, TCP New Reno, TCP Vegas κ.α) στη περίπτωση απώλειας πακέτου. Ωστόσο στα πλαίσια της παρούσας εργασίας δεν θα ασχοληθούμε περαιτέρω καθώς μας ενδιαφέρει η συμπεριφορά στο διάστημα μέχρι το sssthresh εφόσον δεν έχει σημειωθεί απώλεια πακέτου.

5.3 Γινόμενο Εύρους ζώνης – Καθυστέρησης (BDP)

Το γινόμενο εύρους ζώνης – καθυστέρησης (Bandwidth-Delay Product, BDP) είναι η ποσότητα που δίνεται από τη σχέση

$$bandwidth \left(\frac{bit}{s} \right) * RTT(s) = BDP(bit)$$

και εκφράζει το μέγιστο όγκο δεδομένων που μπορεί να βρίσκεται εντός της σύνδεσης με χαρακτηριστικά, τα bandwidth και RTT που χρησιμοποιήσαμε.

Το BDP είναι ένα μέτρο του όγκου δεδομένων που είναι καθ'οδόν στο δίκτυο. Έχει ιδιαίτερη σημασία για δίκτυα που στηρίζονται σε πρωτόκολλα με παράθυρο, όπως το TCP, διότι συσχετίζει τη μέγιστη χωρητικότητα μιας σύνδεσης του δικτύου με το παράθυρο που ελέγχει τη ροή σε αυτή.

Εάν για παράδειγμα έχουμε μια σύνδεση με μεγάλο εύρος ζώνης και μεγάλο RTT (αυτά τα δίκτυα ονομάζονται Long Fat Networks, LFN) τότε ακόμα πιο μεγάλο θα είναι το BDP, δηλαδή ο όγκος δεδομένων που χωράει στο δίκτυο ανά πάσα στιγμή. Εάν όμως το παράθυρο που ελέγχει τη ροή στη σύνδεση είναι τόσο μικρό ώστε να εμποδίζει τον αποστολέα να στείλει περισσότερα δεδομένα ενώ περιμένει για επιβεβαίωση μετά από ένα μεγάλο RTT, τότε εξαναγκάζει την σύνδεση σε υποαπόδοση. Άρα το BDP μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να υπολογίσουμε τον βαθμό αποδοτικότητας μιας σύνδεσης ως συνάρτηση του RTT και του επιλεγμένου παραθύρου.

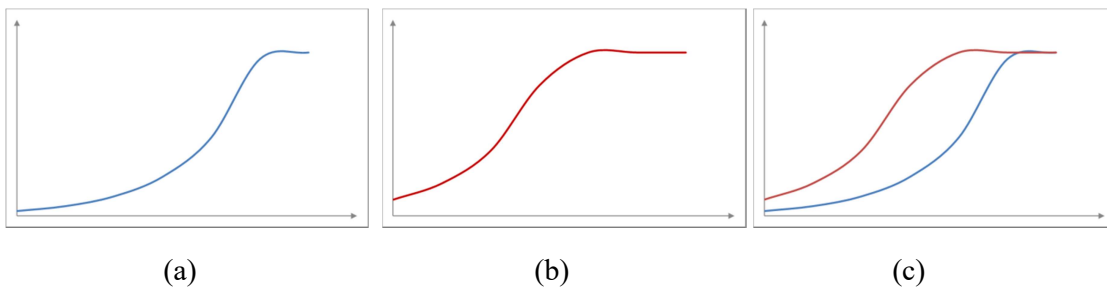
Επειδή ο μηχανισμός ρύθμισης του παραθύρου είναι μια δυναμική διαδικασία, το BDP δείχνει επίσης πόσο γρήγορα το πρωτόκολλο αντιλαμβάνεται και προσαρμόζεται στα χαρακτηριστικά μιας σύνδεσης. Ειδικά για τις συνδέσεις που γίνονται στο ραδιοδιάλυο της παρυφής του δικτύου, όπου οι συνθήκες είναι τάχιστα και έντονα μεταβαλλόμενες, το BDP μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως κριτήριο για το ποιος μηχανισμός του TCP επιτυγχάνει καλύτερη προσαρμοστικότητα και κατά συνέπεια μεγαλύτερη αποδοτικότητα.

Προφανώς όταν μια σύνδεση δεν χωράει άλλα δεδομένα τότε έχει φτάσει σε κατάσταση συμφόρησης. Άρα το $cwnd$ δεν μπορεί να πάρει μεγαλύτερη πραγματική τιμή από $\frac{BDP}{MSS}$.

Κεφάλαιο 6: Αλγόριθμος Βελτιστοποίησης περιήγησης διαδικτύου με χρήση MEC

6.1 Κίνηση υπηρεσίας περιήγησης διαδικτύου

Η περιήγηση στο διαδίκτυο έχει μια ουσιαστική διαφορά σε σχέση με το video streaming. Εξυπηρετείται με βραχύβιες, στη συντριπτική πλειονότητα τους, συνδέσεις λόγω του περιορισμένου, κατά μέσο όρο, όγκου δεδομένων που περιλαμβάνει κάθε ιστοσελίδα. Οι συνδέσεις είναι τόσο βραχύβιες ώστε στις περισσότερες περιπτώσεις η μετάδοση, βάσει TCP πρωτοκόλλου, ολοκληρώνεται όσο ακόμα είναι στο στάδιο της αργής εκκίνησης SS. Όπως περιγράφηκε στη παράγραφο 5.2.2, στο στάδιο της αργής εκκίνησης το παράθυρο συμφόρησης cwnd αυξάνεται ισόποσα με τον αριθμό TCP τεμαχίων που έχει επιβεβαιωθεί η λήψη τους. Αποτέλεσμα είναι η εκθετική αύξηση του cwnd μέχρι την έξοδο από το στάδιο αργής εκκίνησης. Γίνεται σαφές από τα παραπάνω ότι η εκθετική καμπύλη που παριστάνει το cwnd, Σχήμα 6.1, σπάνια κατορθώνει να φτάσει τη μέγιστη τιμή εντός του χρόνου λειτουργίας μιας βραχύβιας σύνδεσης web browsing. Οπότε, για να μεγιστοποιηθεί η χρήση του διαθέσιμης χωρητικότητας του δικτύου και το cwnd να φτάνει στη μέγιστη τιμή εντός του χρόνου μιας βραχύβιας σύνδεσης web browsing, το αρχικό σημείο της καμπύλης μπορεί να μετακινηθεί προς τα πάνω. Το αρχικό σημείο της καμπύλης αντιστοιχεί στο αρχικό παράθυρο (Initial Window, IW), άρα η απόπειρα μετακίνησης της καμπύλης προς τα πάνω ισοδυναμεί με αύξηση του αρχικού παραθύρου (IW).



Σχήμα 6.1 Καμπύλες TCP παραθύρου συμφόρησης (α) $IW_{default}$, (β) IW_{new} , (γ) Υπέρθεση

Η δυνατότητα επιλογής μεγαλύτερου αρχικού παραθύρου (IW) επιφέρει θετικά αποτελέσματα στο latency της σύνδεσης. Για μια μετάδοση που ολοκληρώνεται στο στάδιο αργής εκκίνησης, χωρίς ενδιάμεσες απώλειες, το latency δίνεται από τη σχέση (6.1)[23].

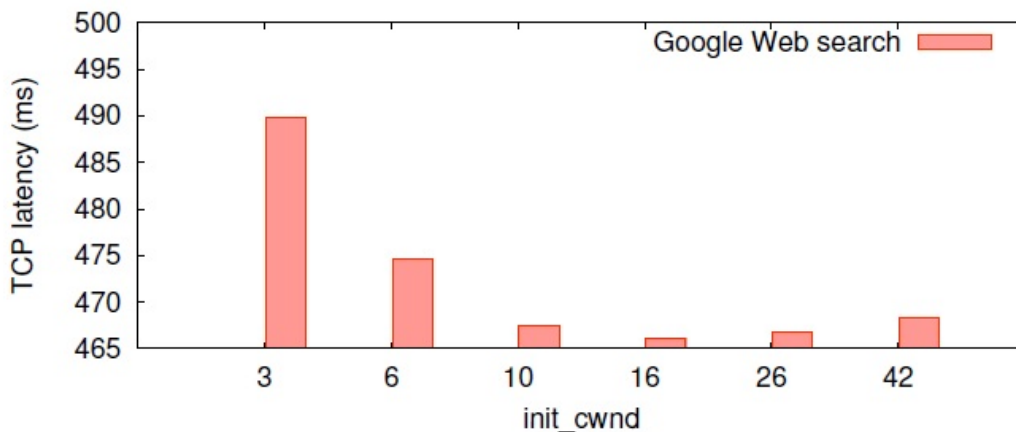
$$latency = \left[\log_{\gamma} \left(\frac{s}{Initial\ Window * MSS} \right) \right] * RTT \quad (6.1)$$

Όπου S είναι το μέγεθος της μετάδοσης, MSS (Maximum Segment Size). το μέγιστο μέγεθος TCP τεμαχίου της σύνδεσης, και γ ($1.5 \leq \gamma \leq 2$) σταθερά ανάλογα αν οι ACKs είναι με καθυστέρηση ή όχι. Φυσικά υποθέτουμε $\frac{S}{Initial\ Window * MSS} \geq 1$, ώστε η μετάδοση να συνεχιστεί μετά την πρώτη αποστολή τεμαχίων TCP.

Το RTT είναι ο κυρίαρχος παράγοντας στο καθορισμό του latency, όπως φαίνεται από τη σχέση, και ο βασικός τρόπος συγκράτησης είναι αυξάνοντας το IW που είναι στον παρονομαστή. Το κέρδος σε latency από ένα μεγαλύτερο IW, $IW_{new} > IW_{default}$, υπολογίζεται μέσω της σχέσης (7.1) ίσο με

$$\text{κέρδος latency} = \log_{\gamma} \left(\frac{IW_{new}}{IW_{default}} \right) * RTT \quad (6.2)$$

Στο Σχήμα 6.2 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα δοκιμών επίσκεψης σε ιστοσελίδα (www.google.com) για διάφορα μεγέθη αρχικού παραθύρου.[24]



Σχήμα 6.2 TCP latency για διαφορετικές τιμές αρχικού παραθύρου (IW)

Το κόστος σε χωρητικότητα που επιβάλλει η προσέγγιση μεγαλύτερου IW, δηλαδή το επιπλέον εύρος ζώνης που καταναλώνεται στο στάδιο αργής εκκίνησης σε σχέση με το δίνεται από τη σχέση (6.3), όπου κ δίνεται από τη σχέση $2^k * IW_{new} = ssthreshold$.

$$\Delta Cost = \sum_{i=0}^k \left[2^i * (IW_{new} - IW_{default}) * \frac{MSS}{RTT} \right] \quad (6.3)$$

Η βραχύβιες συνδέσεις web browsing πρέπει επίσης να ανταγωνιστούν τις μεταδόσεις μεγάλου όγκου, πχ video, οι οποίες έχουν εγκατασταθεί και φτάσει στο μέγιστο υποστηριζόμενο παράθυρο συμφόρησης cwnd. Ένα αυξημένο αρχικό παράθυρο IW επιτρέπει στις βραχύβιες συνδέσεις να διεκδικήσουν μέρος της χωρητικότητας ώστε να προσφέρουμε συνέπεια το QoE στο οποίο έχει συνηθίσει ο σύγχρονος χρήστης.

Ειδικά για τις TCP συνδέσεις που υποστηρίζουν Fast Retransmit, ένα αυξημένο αρχικό παράθυρο IW, αυξάνει τις πιθανότητες ενός χαμένου τεμαχίου να ανακτηθεί μέσω fast retransmit διαδικασίας και όχι μέσω της αργότερης διαδικασίας timeout της αρχικής

αποστολής. Ο αλγόριθμος του Fast Retransmit χρειάζεται τρία διπλά ACKs ως ένδειξη ότι κάποιο τεμάχιο έχει χαθεί τελείως και όχι απλά έχει μπει σε λάθος θέση στη σειρά. Το μεγαλύτερο αρχικό παράθυρο IW επιτρέπει στον αποστολέα να αναγνωρίσει καλύτερα και συντομότερα τι συμβαίνει στη σύνδεση λόγω των περισσότερων ACKs που λαμβάνει εν τω μεταξύ.

Εναλλακτική προσέγγιση στην επιτάχυνση της μεταφόρτωσης ιστοσελίδων είναι το άνοιγμα πολλαπλών παράλληλων συνδέσεων TCP από τον πρόγραμμα περιηγητή. Ωστόσο η προσέγγιση αυτή δεν επιτυγχάνει αποδοτικότερη χρήση της χωρητικότητας του δικτύου σε σχέση με το αυξημένο αρχικό παράθυρο IW. Παράλληλα όμως επιβαρύνει το δίκτυο με ανώφελο overhead λόγω των πολλαπλών διαδικασιών χειραγίας που πρέπει να πραγματοποιηθούν για την εγκαθίδρυση των πολλαπλών παράλληλων συνδέσεων. Η QoE επίσης δεν είναι συγκριτικά καλύτερη καθώς οι περισσότερες ιστοσελίδες έχουν αλληλοεξαρτούμενα αντικείμενα και άρα δεν μπορούν να εμφανιστούν πριν τη πλήρη μεταφόρτωση, ενώ δεσμεύει μνήμη και δαπανά επιπλέον ενέργεια και υπολογιστικούς πόρους που δεν πλεονάζουν στα κινητά τερματικά.

Σε κάθε περίπτωση η προσπάθεια βελτιστοποίησης της κίνησης περιήγησης διαδικτύου στο στρώμα μεταφοράς και όχι σε κάποιο ανώτερο στρώμα, του OSI, έχει το πλεονέκτημα ότι οποιοδήποτε βελτίωση μπορεί να προσφερθεί χωρίς περιορισμούς. Δεν επηρεάζεται από την κρυπτογράφηση που επιβάλλεται σε ανώτερα στρώματα ή άλλες πολιτικές υπηρεσίας προς τον χρήστη.

6.2 Ασύρματο δίκτυο και TCP

Η προηγηθείσα ανάλυση της λειτουργίας και των επιδόσεων του TCP βασίστηκε στην υπόθεση ότι αναφερόμαστε σε σταθερά ενσύρματα δίκτυα. Στα ενσύρματα δίκτυα το εύρος ζώνης είναι σταθερό και η διαθέσιμη χωρητικότητα προκύπτει με αφαίρεση της κίνησης από ολόκληρη τη χωρητικότητα, που είναι σταθερή.

Αυτό δεν ισχύει στα ασύρματα δίκτυα όπου ο ραδιοδιάυλος έχει έντονα μεταβαλλόμενες συνθήκες. Οι μεταβολές αυτές οφείλονται τόσο στην κινητικότητα των χρηστών όσο και στην αυξομείωση του αριθμού των χρηστών που εξυπηρετούνται σε συγκεκριμένη περιοχή εξυπηρέτησης. Η μεταβλητότητα των συνθηκών που επικρατούν στον κινητό ραδιοδιάυλο προκαλεί απότομες αυξομειώσεις του διαθέσιμου εύρους ζώνης και κατά συνέπεια της διαθέσιμης χωρητικότητας του δικτύου (συχνά κατά μία τάξη μεγέθους εντός ολίγων δευτερολέπτων). Λόγω των έντονων αυξομειώσεων της διαθέσιμης χωρητικότητας, οι TCP μεταδόσεις που προσεγγίζουν τα δίκτυα κινητών επικοινωνιών ως σταθερά, εμφανίζουν προβληματική συμπεριφορά η οποία μεταφράζεται σε:

- Μείωση της ποιότητας εμπειρίας QoE που αντιλαμβάνονται οι χρήστες των υπηρεσιών που βασίζονται στο TCP.
- Μειωμένη αποτελεσματικότητα στη χρήση των πόρων του δικτύου.

6.2.1 Γινόμενο Ευρους Ζώνης – Καθυστέρησης (BDP) σε πραγματικό χρόνο

Το γινόμενο εύρους ζώνης επί την καθυστέρηση (BDP), η σημασία του οποίου αναλύθηκε στη παράγραφο 5.3, στην περίπτωση των ασύρματων δικτύων μεταβάλλεται με σημαντικά μεγαλύτερη συχνότητα σε σχέση με τα ενσύρματα. Άρα, οποιαδήποτε απόφαση στηρίζεται στη τιμή του BDP θα είναι άστοχη αν δεν εξασφαλίζει ότι η τιμή αυτή είναι επικαιροποιημένη με βάση τις τρέχουσες συνθήκες της σύνδεσης.

Οι RAN κόμβοι του κινητού δικτύου διαθέτουν δεδομένα πραγματικού χρόνου περί της τρέχουσας κατάστασης και χωρητικότητας του δικτύου (κατάσταση ραδιοδιαύλου, στατιστικά του δικτύου, θέση συνδρομητών, τηλεπικοινωνιακό φορτίο κυψέλης) για το σύνολο της περιοχής κάλυψής τους (κυψέλης). Η πληροφορία αυτή είναι μεγάλης σημασίας και μπορεί να αξιοποιηθεί για τη βελτιστοποίηση, με διαβάθμιση επιπέδου κυψέλης, των μηχανισμών που ρυθμίζουν τη λειτουργία του πρωτοκόλλου TCP.

Γίνεται αντιληπτό ότι οι δυνατότητες των κόμβων RAN μπορούν να ικανοποιήσουν τις ανάγκες υπολογισμού του BDP ανά σύνδεση σε πραγματικό χρόνο. Χρειάζεται ωστόσο μια ενδιάμεση οντότητα η οποία να δέχεται τις λειτουργικές παραμέτρους του RAN και να υπολογίζει το BDP και RTT. Στη συνέχεια να μεταβιβάζει τα αποτελέσματα του υπολογισμού σε μια άλλη ξεχωριστή οντότητα που θα είναι επιφορτισμένη με την ενσωμάτωση των τιμών αυτών στη διαδικασία καθορισμού των υπόλοιπων παραμέτρων της TCP σύνδεσης, του αρχικού παραθύρου IW εν προκειμένω.

Εκτός από τη μεταβλητότητα των μετρήσιμων παραμέτρων του ραδιοδιαύλου, στοχαστικά φαινόμενα όπως διαλείψεις και παρεμβολές μπορούν να οδηγήσουν σε απώλειες πακέτων. Στην περίπτωση αυτή ένα πολύ μεγάλο μέγεθος αρχικού παραθύρου IW θα έχει σαν αποτέλεσμα την αναγκαστική επαναποστολή εξίσου πολλών πακέτων, εξουδετερώνοντας έτσι το κέρδος επίδοσης στο οποίο στοχεύαμε. Στο Σχήμα 6.2 φαίνεται ότι το latency έχει ελάχιστο συναρτήσει του μεγέθους IW, πέρα από το οποίο αυξάνεται και πάλι.

6.3 Αλγόριθμος καθορισμού μεγέθους αρχικού παραθύρου IW

6.3.1 Κριτήρια μεγέθους αρχικού παραθύρου IW

Ιδανικά θα θέλαμε το μέγεθος αρχικού παραθύρου να είναι τέτοιο που η αποστολή να έχει ολοκληρωθεί σε μια μετάδοση. Τότε θα ήταν

$$IW_{max} = \frac{S}{MSS} \quad (6.4)$$

Θα πρέπει όμως να μπορεί να εξυπηρετηθεί από τη σύνδεση χωρίς να προκαλέσει συμφόρηση, δηλαδή θα πρέπει

$$IW_{max} \leq \frac{BDP}{MSS} \quad (6.5)$$

Επίσης, εφόσον η αποστολή δεν χωράει σε μια μετάδοση, δηλαδή όταν $\frac{S}{MSS} \geq \frac{BDP}{MSS}$, θέλουμε να διατηρηθεί η φύση του slow start και να έχουμε τουλάχιστον τρεις πλήρεις μεταδόσεις πριν το ssthresh, δηλαδή $IW_{new} = \frac{1}{8} * IW_{max}$

Προφανώς πάντα ελέγχουμε αν το τελικό IW_{new} είναι τουλάχιστον μεγαλύτερο ή ίσο με το $IW_{default}$ πριν το δεχτούμε. Το $IW_{default}$ είναι $3 * MSS$ ή $10 * MSS$ για τις υλοποιήσεις που υποστηρίζουν την RFC 6928 [25]

6.3.2 Επιλογή BDP

Ο κόμβος RAN, ή μια οντότητα που συστεγάζεται με αυτόν, έχουν γνώση της χωρητικότητας και για τις δύο πλευρές του δικτύου, το δίκτυο πρόσβασης και το δίκτυο κορμού. Ενώ για τον υπολογισμό του συνολικού BDP, ισχύει

$$BDP = \min(B_c, B_{RAN}) * (RTT_c + RTT_{RAN}) \quad (6.6)$$

Απο τις τρεις BDP ποσότητες το BDP_{RAN} αντικατοπτρίζει με το καλύτερο τρόπο το μέγεθος των μεταβολών στο RAN και δίνει τη δυνατότητα βελτιστοποίησης QoE και αποδοτικότερης χρήσης του ακριβού ασύρματου φάσματος. Άρα στους υπολογισμούς του IW για συνδέσεις που τερματίζουν σε ασύρματο δίκτυο πρόσβασης το BDP θα χρησιμοποιηθεί το BDP_{RAN} .

Μόνο εφόσον το BDP_{RAN} είναι αρκετά μεγαλύτερο από το BDP_c θα θεωρήσουμε το BDP_c ως βασικό κριτήριο επιλογής του IW, καθώς τότε το δίκτυο του κορμού θα υπαγορεύει εξίσου μικρότερο ssthresh κατεβάζοντας το άνω όριο του σημείου εξόδου από το στάδιο αργής εκκίνησης.

6.3.3 Αλγόριθμος

Για την υλοποίηση του αλγορίθμου καθορισμού του μεγέθους αρχικού παραθύρου IW ανά σύνδεση θα εισάγουμε τη βοηθητική μεταβλητή $IW_{proposed}$. Η $IW_{proposed}$ χρησιμοποιείται για την προσωρινή αποθήκευση του υπολογιζόμενου IW και εν συνεχεία σύγκριση με το αρχικά προτεινόμενο μέγεθος IW. Η αρχική τιμή IW προτείνεται στατικά απο το πρωτόκολλο TCP σε αντίθεση με το $IW_{proposed}$ που υπολογίζεται από τα χαρακτηριστικά της σύνδεσης.

Υποθέτουμε ότι η οντότητα που υλοποιεί τον αλγόριθμο έχει πρόσβαση στις τιμές B_c και B_{RAN} , οι οποίες διατηρούνται ενήμερες με μεγάλη συχνότητα ώστε να είναι επίκαιρο το προτεινόμενο IW. Επίσης έχει πρόσβαση ή μπορεί να υπολογίσει τα RTT_c και RTT_{RAN} ώστε με τον συνδυασμό των δύο να μπορεί να υπολογίσει τα BDP, B_c , B_{RAN} .

Ο αλγόριθμος ξεκινά ελέγχοντας αν το BDP_{RAN} είναι μεγαλύτερο από το BDP_c . Αν είναι τότε μπορούμε να θέσουμε

$$\alpha = \frac{BDP_{RAN}}{BDP_c} \quad (6.7)$$

Θέλουμε να θέσουμε $IW_{proposed}$ όσο το δυνατόν πιο κοντά στο $IW_{new} = \frac{1}{8} * IW_{max}$, χωρίς όμως να ξεπεράσουμε το όριο του $\frac{1}{4} * IW_{max,c}$ για το δίκτυο κορμού. Οπότε το άνω όριο για το α προκύπτει

$$\frac{1}{8} \left(\frac{BDP_{RAN}}{MSS} \right) = \frac{1}{8} \left(\frac{\alpha * BDP_c}{MSS} \right) \leq \frac{1}{4} \left(\frac{BDP_c}{MSS} \right) \Rightarrow \alpha \leq 2 \quad (6.8)$$

Που υιοθετεί τόσο πιο επιθετική προσέγγιση στη διεκδίκηση χωρητικότητας στο δίκτυο κορμού ώστε να μην μεταβαίνει απευθείας εκτός σταδίου αργής εκκίνησης, ενώ ταυτόχρονα επιχειρεί να προσφέρει στο ασύρματο σκέλος αρχική κίνηση όσο το δυνατόν πλησιέστερα στο επιθυμητό $1/8$.

Στη περίπτωση που αντιστοιχεί σε $BDP_{RAN} > 2 * BDP_c$ τότε το $IW_{proposed}$ τίθεται ρητά $\frac{1}{4} \left(\frac{BDP_c}{MSS} \right)$ ώστε να διαφυλάξει το άνω όριο που τίθεται από το δίκτυο κορμού.

Ενώ στη περίπτωση που αντιστοιχεί σε $BDP_{RAN} < BDP_c$ τότε το $IW_{proposed}$ τίθεται $\frac{1}{8} \left(\frac{BDP_{RAN}}{MSS} \right)$, ώστε να πετύχουμε την επιθυμητή ταχύτερη εκκίνηση που μπορεί να υποστηρίξει ο ραδιοδιάυλος τη δεδομένη στιγμή.

```

BDPc = Bc * RTTc;
BDPRAN = BRAN * RTTRAN;
BDP = min(Bc, BRAN) * (RTTc + RTTRAN);

```

```

if BDPRAN > BDPc
  then
    a = BDPRAN / BDPc;
    if a ≥ 2
      then
        IWproposed = a * (BDPc / MSS);
      else
        IWproposed = (1/4) * (BDPc / MSS);
    else
      IWproposed = (1/8) * (BDPRAN / MSS);

```

```

if IWproposed > IWdefault
  then
    IWnew = IWproposed;
  else
    IWnew = IWdefault;

```

Αλγόριθμος υπολογισμού μεγέθους IW

6.4 Υλοποίηση αλγορίθμου με χρήση MEC

Ο βασικός στόχος του προτεινόμενου αλγορίθμου είναι η αποδοτικότερη χρήση του ραδιοδιαύλου και η βελτίωση της εμπειρίας χρήσης μέσω της ταχύτερης σύγκλισης του ρυθμού αποστολής προς τη μέγιστη τιμή της διαθέσιμης χωρητικότητας της σύνδεσης. Ωστόσο ο τρόπος υλοποίησης του αλγορίθμου θα πρέπει να ικανοποιεί κάποια επιπλέον χαρακτηριστικά ώστε να είναι θελκτική προς χρήστες και παρόχους.

1. Θα πρέπει να είναι διάφανη, επιτρέποντας την ενεργοποίηση της λειτουργίας χωρίς αλλαγές από τη πλευρά του τερματικού .
2. Δεν θα πρέπει να αναδρομολογεί τη κίνηση ή να μεταβάλλει άλλες λεπτομέρειες της σύνδεσης όπως τα ports στη πηγή ή τον προορισμό.
3. Δεν θα πρέπει να μεταβάλλει το περιεχόμενο του TCP segment.
4. Δεν θα πρέπει να φανερώνει λεπτομέρειες της σύνδεσης σε τρίτα μέρη.

Η υλοποίηση του αλγορίθμου με βάση τιμές πραγματικού χρόνου για τις λειτουργικές επιδόσεις του δικτύου καθίσταται εφικτή μόνο εξαιτίας της RNIS λειτουργικότητας που εισφέρει το MEC. Αυτό διαχωρίζει την συγκεκριμένη υλοποίηση από ανάλογες προτάσεις αύξησης του μεγέθους IW [26].

6.4.1 Διαδικασία ενημέρωσης εξυπηρετητή για το προτεινόμενο μέγεθος IW

Γίνεται αντιληπτό ότι καθώς το αρχικό παράθυρο IW καθορίζεται με ευθύνη του αποστολέα, του εξυπηρετητή ιστοσελίδων εν προκειμένω, θα πρέπει με κάποιο τρόπο να ενημερωθεί για το προτεινόμενο μέγεθος IW. Η ενημέρωση θα πρέπει να προηγείται της πρώτης αποστολής TCP segment με δεδομένα, άρα θα πρέπει να είναι μέρος της 3-μερούς χειραψίας. Προτείνεται η ενσωμάτωση του στο πεδίο options της TCP επικεφαλίδας του τρίτου κατά σειρά μηνύματος, δηλαδή του ACK από το UE προς τον εξυπηρετητή.

Ο εξυπηρετητής τότε θα έχει την ευχέρεια να επιλέξει αν θα υιοθετήσει το μέγεθος IW των προδιαγραφών ή το προτεινόμενο μεγαλύτερο μέγεθος. Εάν επιλέξει το μεγαλύτερο τότε θα δικαιούται να απορρίψει τυχόν παράλληλες συνδέσεις, που εκκινεί ο browser του UE, χωρίς να υστερήσει σε προσφερόμενη QoE.

Με τη διαδικασία αυτή επιτυγχάνεται η πληροφόρηση του εξυπηρετητή χωρίς την ανάγκη ξεχωριστής διεπαφής ή μηχανισμού συσχέτισης μεταξύ ροής και προτεινόμενου παραθύρου. Οι λεπτομέρειες της υλοποίησης, ως μέρος μιας λειτουργίας MEC, θα περιγραφούν αναλυτικότερα στην επόμενη παράγραφο.

6.4.2 Χρησιμοποιούμενες εφαρμογές MEC

Ο μηχανισμός βελτιστοποίησης υλοποιείται στον MEC host με τρεις MEC εφαρμογές που συνεργάζονται ώστε να συγκεντρώσουν τα αναγκαία δεδομένα και να εκτελέσουν τον αλγόριθμο επιστρέφοντας την προτεινόμενη τιμή IW , IW_{new} . Οι εφαρμογές αυτές είναι οι εξής:

- MEC Εφαρμογή Ανίχνευσης Μεταφόρτωσης Ιστοσελίδας
- MEC Εφαρμογή Δικτυακών Συνθηκών
- MEC Εφαρμογή Εκτέλεσης Αλγορίθμου IW

6.4.2.1 MEC Εφαρμογή Ανίχνευσης Μεταφόρτωσης Ιστοσελίδας (app MEC- AMI)

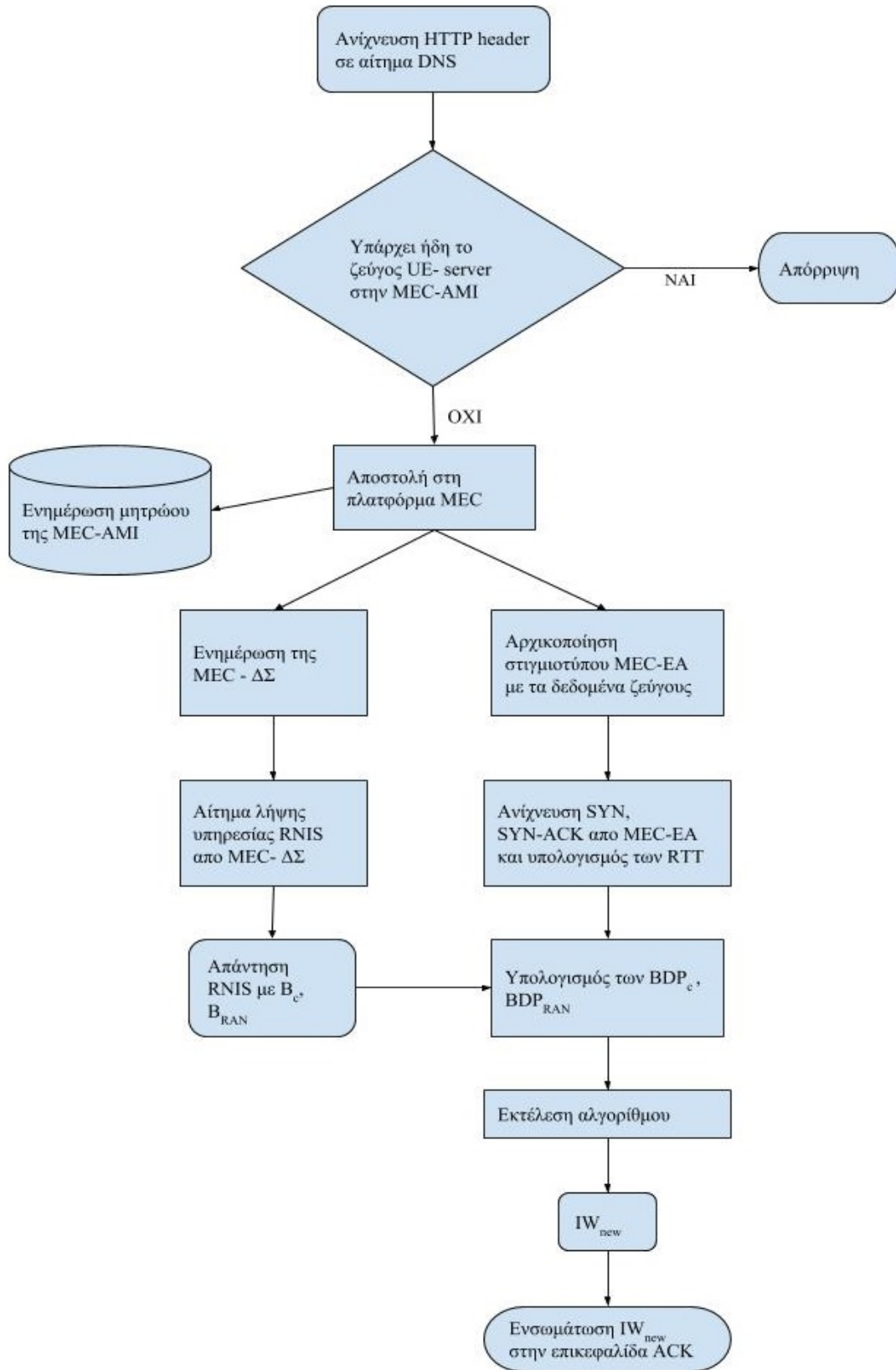
Η εφαρμογή αυτή είναι ενεργή συνεχώς και ανιχνεύει τις μεταφορτώσεις ιστοσελίδας που ετοιμάζονται να ξεκινήσουν, παρακολουθώντας τα αιτήματα DNS και διαβάζοντας τις HTTP επικεφαλίδες τους εφόσον υπάρχουν. Για να το επιτύχει αυτό είναι σε διάταξη “εν σειρά” (§3.1) ως προς την κίνηση που διέρχεται από το MEC. Από τις επικεφαλίδες δημιουργεί ζεύγη αφετηρίας (web server IP)- προορισμού (UE) τα οποία προωθεί με τη μορφή υπηρεσίας MEC προς τη MEC πλατφόρμα μέσω του σημείου αναφοράς Mp1. Τα ζεύγη αυτά παραμένουν στην προσωρινή μνήμη της εφαρμογής για κάποιο, ρυθμίσιμο, διάστημα της τάξης των μερικών sec ώστε να απορρίπτονται όμοια ζεύγη που θα μπορούσαν να προκύψουν από παράλληλες συνδέσεις του browser του UE.

6.4.2.2 MEC Εφαρμογή Δικτυακών Συνθηκών (app MEC - ΔΣ)

Κάθε νέο ζεύγος από την MEC – AMI, διοχετεύεται μέσω της πλατφόρμας MEC προς την εφαρμογή Δικτυακών Συνθηκών που έχει ως ευθύνη να συγκεντρώσει τις τρέχουσες συνθήκες του δικτύου, με έμφαση στη διαθέσιμη χωρητικότητα, που αντιστοιχούν στο κάθε ζεύγος UE - Web server. Για να το επιτύχει αυτό κάνει χρήση της RNIS λειτουργικότητας που προσφέρεται μέσω του σημείου αναφοράς Mp1 και πρέπει απαραίτητα να υποστηρίζει κάθε MEC host. Επιστρέφει τις τιμές χωρητικότητας για το ζητούμενο ζεύγος στη MEC πλατφόρμα μέσω του σημείου αναφοράς Mp1 υπό μορφή υπηρεσίας MEC. Επειδή η πρόσβαση στην κίνηση του επιπέδου δεδομένων δεν είναι απαραίτητη για την εκτέλεση των εργασιών της MEC – ΔΣ, αυτή είναι σε διάταξη “ανεξάρτητα” (§3.1) ως προς την κίνηση που διέρχεται από το MEC

6.4.2.3 MEC Εφαρμογή Εκτέλεσης Αλγορίθμου IW (app MEC- EA)

Η πλατφόρμα MEC μέσω του MEPM και του OSS προκαλεί την αρχικοποίηση ενός νέου στιγμιότυπου της MEC εφαρμογής εκτέλεσης αλγορίθμου IW με τις διευθύνσεις UE - Web server, για κάθε νέο ζεύγος που λαμβάνει από την MEC – AMI. Με βάση αυτές τις παραμέτρους ανιχνεύει τα δύο πρώτα segments της 3-μερούς χειραψίας, SYN και SYN-ACK, από τα οποία υπολογίζει το RTT , RTT_c , RTT_{RAN} . Στη συνέχεια ζητά και λαμβάνει από την MEC- ΔΣ, μέσω της πλατφόρμας MEC, τις τιμές των B_c , B_{RAN} . Μέσω αυτών υπολογίζει τα BDP , BDP_c , BDP_{RAN} . Στη συνέχεια εκτελεί το βασικό κομμάτι του αλγορίθμου και υπολογίζει το βασικό ζητούμενο ολόκληρης της διαδικασίας, το IW_{new} . Τέλος, επεμβαίνει μέσω του σημείου αναφοράς Mp2 στο τρίτο segment της 3-μερούς χειραψίας, το ACK από το UE προς τον Web – server , και εισάγει τη τιμή του IW_{new} στο πεδίο option της TCP επικεφαλίδας του.



Σχήμα 6.3, Διάγραμμα ροής για τον υπολογισμό μεγέθους του IW

6.5 Υλοποίηση σε εγκαταστάσεις MEC σε 4G

Στο Κεφάλαιο 3 έγινε αναφορά στους εναλλακτικούς τρόπους εγκατάστασης MEC στη προϋπάρχουσα υποδομή των δικτύων τέταρτης γενιάς, 4G. Ακολούθως θα εξεταστεί ποιοι από τους τρόπους αυτούς πληρούν τα κριτήρια για εκτέλεση των εφαρμογών MEC που υλοποιούν το αλγόριθμο και ποιες μεταβολές επιφέρουν στην υλοποίηση, όπως αυτή περιγράφηκε για το πρότυπο αρχιτεκτονικής MEC.

6.5.1 Υλοποίηση σε εγκατάσταση “Προεξοχής στη γραμμή”

Από τις δύο εναλλακτικές μεθόδους εγκατάστασης που υποστηρίζουν αυτήν την υλοποίηση θα ασχοληθούμε αποκλειστικά με την περίπτωση που ο MEC host έχει υλοποιηθεί ως μέρος του eNB. Για τις υπόλοιπες περιπτώσεις το latency, που εισάγει η ανάγκη επεξεργασίας των GTP-U προκειμένου το MEC να αποκτήσει πρόσβαση στα δεδομένα χρήστη, ακυρώνει το κέρδος ταχύτερης εκκίνησης από την υλοποίηση του αλγορίθμου.

Όταν ο MEC host έχει υλοποιηθεί ως μέρος του eNB η πρόσβαση στο επίπεδο δεδομένων χρήστη είναι άμεση, επομένως η λειτουργία του MEC είναι ίδια με αυτή που περιγράφηκε για το πρότυπο αρχιτεκτονικής MEC. Επίσης η λειτουργικότητα RNIS υλοποιείται εύκολα με τοπική δρομολόγηση, εισάγοντα επίσης το ελάχιστο δυνατό latency.

6.5.2 Υλοποίηση σε εγκατάσταση καταναμημένου EPC

Στη περίπτωση αυτή η εγκατάσταση επιτρέπει τόσο την παρακολούθηση των DNS αιτημάτων τοπικά από το MEC, ώστε να ανιχνεύεται άμεσα οποιαδήποτε συνεδρία ιστοσελίδας προετοιμάζεται να εκκινήσει, όσο και τη πρόσβαση στα δεδομένα χρήστη μέσω της τοπικής υλοποίησης της SGW και PDW.

Ειδική μέριμνα μπορεί να ληφθεί για τον υπολογισμό RTT, αναθέτοντας στην MEC – ΔΣ να υπολογίζει το μέσο RTT από τη τοποθεσία του MEC μέχρι κάθε εξυπηρετούμενο eNB και αναφέρει την τιμή που αντιστοιχεί στην πλατφόρμα μαζί με την απάντηση για κάθε ζεύγος. Στη συνέχεια η τιμή αυτή απλά προστίθεται στο RTT_c και αφαιρείται από το RTT_{RAN} κατά τον υπολογισμό των BDP στην MEC- EA. Ωστόσο και χωρίς αυτήν την ρύθμιση το σφάλμα υπολογισμού που εισάγεται στο προτεινόμενο μέγεθος παραθύρου IW είναι ανεκτό.

6.5.3 Υλοποίηση σε εγκατάσταση κατανεμημένης SGW + PGW

Η περίπτωση αυτή, για τις ανάγκες υλοποίησης του αλγορίθμου με βάση τις εφαρμογές MEC που περιγράφηκαν, είναι απολύτως όμοια με την υλοποίηση σε εγκατάσταση κατανεμημένου EPC. SGW και PGW βρίσκονται στην ίδια τοποθεσία με το MEC, επομένως όλες οι περιγραφείσες λειτουργίες μπορούν να εκτελεστούν χωρίς περιορισμούς ή εξειδικευμένες αλλαγές.

6.5.4 Υλοποίηση σε εγκατάσταση κατανεμημένης SGW με τοπική διαφυγή (LBO)

Η ύπαρξη τοπικής διαφυγής δεν προσθέτει κανένα πλεονέκτημα στην υλοποίηση, για τη χρήση που μας ενδιαφέρει. Αντιθέτως αποτυγχάνει να ικανοποιήσει ορισμένες από τις απαιτήσεις που περιγράφηκαν στην αρχή της παραγράφου 6.4. Οπότε θα εξετάσουμε τη συγκεκριμένη περίπτωση μόνο ως εγκατάσταση κατανεμημένης SGW. Επειδή η εφαρμογή δεν θα έχει πρόσβαση στο ACK από το UE στον Web – server, καθώς αυτό θα κινηθεί απευθείας προς τη PGW του δικτύου κορμού, δεν θα μπορέσει να ενσωματώσει την υπολογισθείσα IW_{new} στην επικεφαλίδα του ACK TCP segment. Επομένως η εκτέλεση του αλγορίθμου δεν θα επηρεάσει το αρχικό παράθυρο καθιστώντας πρακτικά αυτήν την υλοποίηση ανεπιτυχή.

6.6 Υλοποίηση σε εγκαταστάσεις MEC σε 5G

Στη περίπτωση που ο MEC host είναι εγκατεστημένος σε ένα σύστημα 5G, η υλοποίηση απλοποιείται σημαντικά. Το γεγονός ότι αναπτύσσεται πάνω στο N6 σημείο αναφοράς του 5G συστήματος επιτρέπει στον MEC host να χρησιμοποιήσει την UPF για πρόσβαση στα δεδομένα επιπέδου χρήστη ανεξάρτητα από την τοπολογία εγκατάστασης. Επομένως είτε πρόκειται για συνεγκατάσταση του MEC στο σταθμό βάσης με μια τοπική UPF, είτε συνεγκατάσταση με ένα κόμβο εκπομπής και τοπική UPF, είτε συνεγκατάσταση με λειτουργίες του δικτύου κορμού οι εφαρμογές του MEC έχουν ακριβώς τα ίδια δικαιώματα πρόσβασης και καθοδήγησης της κίνησης επιπέδου χρήστη του επιλεγμένου UE. Άρα τόσο η MEC- AMI όσο και η MEC- EA εκτελούν τις εργασίες τους με τον τρόπο που περιγράφηκε και τελείως διάφανα ως προς τη τοπολογία εγκατάστασης.

Αντίστοιχα για την MEC – ΔΣ, η πρόσβαση στην πληροφορία που προσφέρει ο MEC host μέσω της υπηρεσίας RNIS εξασφαλίζεται από την NEF. Η μόνη διαφορά μεταξύ των διαφορετικών τοπολογιών εγκατάστασης έγκειται στον αν την έκθεση στην RNIS θα την προσφέρει μια τοπική NEF ή η NEF δικτύου κορμού, χωρίς όμως αυτό να απαιτεί αλλαγές στην υλοποίηση της MEC- ΔΣ.

Γίνεται εύκολα αντιληπτό, από τη σύγκριση μεταξύ πιθανών υλοποιήσεων σε 4G και 5G, πως η ευελιξία της SBA στην υποστήριξη πληθώρας τοπολογιών αποτελεί ουσιαστικότατο συγκριτικό πλεονέκτημα και λόγο μετάβασης σε αυτή την αρχιτεκτονική.

Βιβλιογραφία

- [1] Ericsson, Towards 50 billion connected (2010).
http://www.ericsson.com/au/res/region_RASO/docs/2010/ericsson_50_billion_paper.pdf.
- [2] Cisco Global Cloud Index: Forecast and Methodology, 2014-2019 WhitePaper, white paper, Cisco Systems, 2014.
- [3] <http://www.etsi.org/technologies-clusters/technologies/multi-access-edge-computing>
- [4] Mobile-Edge Computing – Introductory Technical White Paper.
https://portal.etsi.org/portals/0/tbpages/mec/docs/mobile-edge_computing_-_introductory_technical_white_paper_v1%2018-09-14.pdf
- [5] <http://www.etsi.org/images/files/ETSInewsletter/etsinewsletter-issue2-2017.pdf>
- [6] <http://www.zigbee.org/>
- [7] <https://www.loriot.io/>
- [8] Mobile-Edge Computing (MEC); Proof of Concept Framework (ETSI GS MEC-IEG 005 V1.1.1 (2015-08))
- [9] Mobile-Edge Computing (MEC); Service Scenarios (ETSI GS MEC-IEG 004 V1.1.1 (2015-11))
- [10] Mobile Edge Computing (MEC); Framework and Reference Architecture (ETSI GS MEC 003 V1.1.1 (2016-03))
- [11] Mobile Edge Computing (MEC); Mobile Edge Management; Part 2: Application lifecycle, rules and requirements management (ETSI GS MEC 010-2 V1.1.1 (2017-07))
- [12] Mobile Edge Computing (MEC); Mobile Edge Management; Part 1: System, host and platform management (ETSI GS MEC 010-1 V1.1.1 (2017-10))
- [13] Mobile Edge Computing (MEC); Mobile Edge Platform Application Enablement (ETSI GS MEC 011 V1.1.1 (2017-07))
- [14] Mobile Edge Computing (MEC); Deployment of Mobile Edge Computing in an NFV environment (ETSI GR MEC 017 V1.1.1 (2018-02))
- [15] Network Functions Virtualisation (NFV); Management and Orchestration (ETSI GS NFV-MAN 001 V1.1.1 (2014-12))
- [16] Mobile Edge Computing (MEC); Technical Requirements (ETSI GS MEC 002 V1.1.1 (2016-03))
- [17] ETSI White Paper “MEC deployments in 4G and evolution towards 5G”, February 2018 (http://www.etsi.org/images/files/ETSIWhitePapers/etsi_wp24_MEC_deployment_in_4G_5G_FINAL.pdf)

- [18] ETSI TS 123 401 LTE; General Packet Radio Service (GPRS) enhancements for Evolved Universal Terrestrial Radio Access Network (E-UTRAN) access (3GPP TS 23.401 version 14.8.0 Release 14)
- [19] ETSI TS 123 002 Digital cellular telecommunications system (Phase 2+) (GSM); Universal Mobile Telecommunications System (UMTS); LTE; Network architecture (3GPP TS 23.002 version 14.1.0 Release 14)
- [20] ETSI TS 129 061 Digital cellular telecommunications system (Phase 2+) (GSM); Universal Mobile Telecommunications System (UMTS); LTE; Interworking between the Public Land Mobile Network (PLMN) supporting packet based services and Packet Data Networks (PDN) (3GPP TS 29.061 version 15.3.0 Release 15)
- [21] ETSI TS 123 501 5G; System Architecture for the 5G System (3GPP TS 23.501 version 15.2.0 Release 15)
- [22] <http://www.3gpp.org/cups>
- [23] N. Cardwell, S. Savage, and T. Anderson. Modeling TCP Latency. In Proceedings of IEEE Infocom, 2000.
- [24] N. Dukkipati, T. Refice, Y. Cheng, J. Chu, T. Herbert, A. Agarwal, A. Jain, and N. Sutin, "An argument for increasing TCP's initial congestion window." SIGCOMM Comput. Commun. Rev., vol. 40, no. 3, pp. 26–33, 2010.
- [25] RFC6928 Increasing TCP's Initial Window. J. Chu, N. Dukkipati, Y. Cheng, M. Mathis. April 2013. (Format: TXT=56523 bytes) (Status: EXPERIMENTAL) (DOI: 10.17487/RFC6928)
- [26] Michael Scharf, Comparison of end-to-end and network-supported fast startup congestion control schemes, in Computer Networks, Volume 55, Issue 8, 2011, Pages 1921-1940, ISSN 1389-1286