



**ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ &
ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ**

**ΤΟΜΕΑΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΜΕΤΑΔΟΣΗΣ
ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΑΣ ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΥΛΙΚΩΝ**

**Τεχνικά και οικονομικά ζητήματα σε περιβάλλον Mobile Edge
Computing με Internet of Things**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Αλέξανδρος Λεκατσάς

**Επιβλέπων καθηγητής: Παναγιώτης Κωπτής
Καθηγητής Ε.Μ.Π**

Αθήνα, Φεβρουάριος 2021



**ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ &
ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ**

**ΤΟΜΕΑΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΜΕΤΑΔΟΣΗΣ
ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΑΣ ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΥΛΙΚΩΝ**

**Τεχνικά και οικονομικά ζητήματα σε περιβάλλον Mobile Edge
Computing με Internet of Things**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Αλέξανδρος Λεκατσάς

Επιβλέπων καθηγητής: Παναγιώτης Κωττής
Καθηγητής Ε.Μ.Π

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή την 22^η Φεβρουαρίου 2021

.....

Παναγιώτης Κωττής

Καθηγητής Ε.Μ.Π

.....

Χρήστος Καψάλης

Καθηγητής Ε.Μ.Π

.....

Γεώργιος Φικιώρης

Καθηγητής Ε.Μ.Π

Αθήνα, Φεβρουάριος 2021

.....

Αλέξανδρος Λεκατσάς

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

Copyright © Αλέξανδρος Λεκατσάς, 2021

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

Η παρούσα διπλωματική εργασία μελετά τα τεχνικά ζητήματα που αντιμετωπίζουν οι τεχνολογίες του Διαδικτύου των Πραγμάτων και του κινητού υπολογιστικού νέφους στα άκρα του δικτύου. Επιπλέον, παρουσιάζονται λύσεις που προτείνει η υπάρχουσα βιβλιογραφία για κάθε ένα από τα προβλήματα αυτά. Ακόμα, γίνεται μία προσπάθεια απόδοσης τεχνικών μοντέλων σε περιβάλλον κινητού υπολογιστικού νέφους στα άκρα του δικτύου με συσκευές Διαδικτύου των Πραγμάτων, καθώς και αναφορά για την ανάλυση του κόστους σε αυτό.

Στο Κεφάλαιο 1 γίνεται μία εισαγωγή στο Διαδίκτυο των Πραγμάτων, όπου συζητούνται τα στοιχεία του συστήματος και τα χαρακτηριστικά των συσκευών IoT, καθώς και θέματα αρχιτεκτονικής του συστήματος. Επίσης, πραγματοποιείται μία συνοπτική περιγραφή των εφαρμογών των υπηρεσιών IoT. Το Κεφάλαιο 2 πραγματεύεται το πρόβλημα της συνδεσιμότητας στις συσκευές IoT, όπου παρουσιάζονται οι τεχνολογίες ασύρματης συνδεσιμότητας τόσο για μικρές όσο και για μεγάλες αποστάσεις. Ακόμα, γίνεται αναφορά στα μοντέλα επικοινωνίας των συσκευών και στις παραμέτρους που πρέπει να ληφθούν υπόψη για την επιλογή της κατάλληλης τεχνολογίας συνδεσιμότητας. Στο Κεφάλαιο 3 εξετάζονται τα υπολογιστικά νέφη και έμφαση δίνεται στο κινητό υπολογιστικό νέφος στα άκρα του δικτύου. Θίγονται θέματα του MEC που σχετίζονται με την αρχιτεκτονική του, τις περιπτώσεις εφαρμογής του και το ρόλο του στο Διαδίκτυο των Πραγμάτων. Το Κεφάλαιο 4 επικεντρώνεται στα σημαντικότερα τεχνικά ζητήματα που καλείται να αντιμετωπίσει το MEC, ενώ ταυτόχρονα προτείνονται διάφορες λύσεις. Το Κεφάλαιο 5 περιλαμβάνει απλά τεχνικά μοντέλα για το MEC, τις συσκευές IoT και την ανάλυση του κόστους σε περιβάλλον Edge Computing. Τέλος, στο Κεφάλαιο 6 γίνεται παρουσίαση των συμπερασμάτων της διπλωματικής εργασίας μαζί με μελλοντικές επεκτάσεις για μελέτη.

Λέξεις Κλειδιά : Διαδίκτυο των Πράγματων, ασύρματες τεχνολογίες συνδεσιμότητας, Mobile Edge Computing, τεχνικά ζητήματα στο Mobile Edge Computing, τεχνικά μοντέλα σε περιβάλλον Mobile Edge Computing με συσκευές Διαδικτύου των Πραγμάτων, ανάλυση κόστους

Abstract

Present diploma thesis examines the technical issues of the Internet of Things and Mobile Edge Computing. In addition, solutions to these technical problems proposed by existing literature are presented. Also, efforts are made in order to develop technical models in a MEC and IoT environment as well as cost analysis of MEC systems.

Chapter 1 provides an introduction to the Internet of Things where system elements and device characteristics are discussed, as well as IoT system architecture. A brief description of IoT application services is also carried out. Chapter 2 deals with IoT connectivity issues, where wireless connectivity technologies are presented concerning both short and long range distances. Communication models of IoT devices are also mentioned and a reference is made to the parameters that need to be taken into account as far as connectivity technology selection is concerned. Chapter 3 examines cloud computing technologies and the emphasis is made on Mobile Edge Computing. Moreover, MEC architecture is displayed as well as the role of MEC in IoT is discussed. Chapter 4 focuses on the important technical issues that need to be faced as far as MEC is concerned, whereas possible solutions are presented. Technical models and cost analysis are the main subjects in Chapter 5. In the end, Chapter 6 presents the conclusions of this diploma thesis along with future study directions.

Key Words: Internet of Things, wireless connectivity technologies, Mobile Edge Computing, technical issues in Mobile Edge Computing, technical models in a Mobile Edge Computing environment with IoT devices, cost analysis

Ευχαριστίες

Θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον επιβλέποντα καθηγητή της διπλωματικής μου κ. Κωττή Παναγιώτη για τη συνεχή καθοδήγηση, τις συμβουλές και την υποστήριξη του κατά τη διάρκεια εκπόνησης της παρούσας εργασίας αλλά και κατά τη διάρκεια των σπουδών μου. Επιπλέον, οφείλω να ευχαριστήσω τον υποψήφιο διδάκτορα Μακρή Αναστάσιο για την παροχή πληροφοριών για την υλοποίηση της εργασίας, καθώς επίσης και για το γεγονός ότι μου επέτρεψε να χρησιμοποιήσω υλικό από την μεταπτυχιακή του εργασία. Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένεια και τους φίλους μου για τη συμπαράσταση τους κατά τη διάρκεια των σπουδών μου.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΠΕΡΙΛΗΨΗ.....	9
ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΣΧΗΜΑΤΩΝ	19
ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ	21
ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΣΥΝΤΜΗΣΕΩΝ	23
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: ΤΟ ΔΙΑΔΙΚΤΥΟ ΤΩΝ ΑΝΤΙΚΕΙΜΕΝΩΝ.....	27
1.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ	27
1.2 ΟΡΙΣΜΟΣ	28
1.3 ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΕΝΟΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΙΟΤ	28
1.3.1 Ταυτοποίηση.....	29
1.3.2 Συλλογή δεδομένων	29
1.3.3 Επικοινωνία	29
1.3.4 Υπολογιστική ικανότητα	30
1.3.5 Υπηρεσίες εφαρμογών ΙοΤ.....	30
1.3.6 Ανάλυση δεδομένων με χρήση γνώσης.....	30
1.4 ΑΡΧΙΤΕΚΤΟΝΙΚΗ ΙΟΤ	31
1.4.1 Αρχιτεκτονική τριών επιπέδων	31
1.4.1.1 Επίπεδο συλλογής δεδομένων.....	32
1.4.1.2 Επίπεδο Δικτύου	32
1.4.1.3 Επίπεδο Εφαρμογής	32
1.4.2 Αρχιτεκτονική πέντε επιπέδων.....	32
1.4.2.1 Επίπεδο επεξεργασίας.....	33
1.4.2.2 Επίπεδο διαχείρισης του συστήματος.....	33
1.5 ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΙΟΤ	34
1.6 ΚΑΤΗΓΟΡΙΕΣ ΕΦΑΡΜΟΓΗΣ ΤΩΝ ΥΠΗΡΕΣΙΩΝ ΙΟΤ	35
1.6.1 Έξυπνο σπίτι.....	36
1.6.2 Έξυπνη πόλη	36
1.6.3 Έξυπνη ενέργεια.....	37
1.6.4 Έξυπνη βιομηχανία.....	37
1.6.5 Έξυπνη υγεία.....	38
1.6.6 Έξυπνη κινητικότητα και μεταφορά	38
1.6.7 Έξυπνη εφοδιαστική αλυσίδα και εμπόριο.....	38
1.6.8 Έξυπνη κτηνοτροφία και γεωργία	38
1.6.9 Έξυπνο περιβάλλον	39
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 : ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΕΣ ΣΥΝΔΕΣΙΜΟΤΗΤΑΣ ΣΤΟ ΙΟΤ	41
2.1 ΜΟΝΤΕΛΑ ΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΑΣ	41

2.1.1 Μοντέλο Επικοινωνίας Συσκευής με Συσκευή.....	41
2.1.2 Μοντέλο Επικοινωνίας συσκευής με υπολογιστικό νέφος.....	42
2.1.3 Μοντέλο επικοινωνίας συσκευής με ενδιάμεσο κόμβο Gateway.....	43
2.2 ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ ΕΠΙΛΟΓΗΣ ΑΣΥΡΜΑΤΩΝ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΩΝ	44
2.2.1 Φάσμα.....	45
2.2.2 Εμβέλεια και χωρητικότητα.....	45
2.2.3 Τοπολογία δικτύου.....	46
2.2.4 Ποιότητα υπηρεσίας.....	47
2.2.5 Διαχείριση δικτύου.....	47
2.2.6 Ασφάλεια.....	47
2.3 ΛΥΣΕΙΣ ΣΥΝΔΕΣΙΜΟΤΗΤΑΣ ΓΙΑ ΜΙΚΡΕΣ ΑΠΟΣΤΑΣΕΙΣ.....	48
2.3.1 RFID.....	48
2.3.2 NFC.....	48
2.3.3 Bluetooth.....	49
2.3.4 Bluetooth low energy.....	50
2.3.5 6LoWPAN.....	50
2.3.6 Zigbee.....	51
2.3.7 Z-Wave.....	52
2.3.8 ANT & ANT+.....	52
2.3.9 Thread.....	53
2.3.10 EnOcean.....	53
2.3.11 WirelessHART.....	53
2.3.12 Wi-Fi.....	54
2.4 ΛΥΣΕΙΣ ΣΥΝΔΕΣΙΜΟΤΗΤΑΣ ΓΙΑ ΜΕΓΑΛΕΣ ΑΠΟΣΤΑΣΕΙΣ	55
2.4.1 Wi-Fi HaLow.....	55
2.4.2 Κυψελωτά δίκτυα.....	56
2.4.2.1 GSM, 3G, 4G.....	56
2.4.2.2 5G.....	56
2.4.2.3 NB-IoT.....	57
2.4.2.4 LTE-M.....	57
2.4.2.5 EC-GSM.....	58
2.4.3 Low Power Wide Area Network.....	59
2.4.3.1 LoRa.....	60
2.4.3.2 Sigfox.....	60
2.4.3.3 Weightless.....	61
2.4.3.4 Ingenu.....	61
2.4.3.5 Neul.....	61
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 : MOBILE EDGE COMPUTING.....	63
3.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	63
3.2 ΑΠΟ ΤΟ CLOUD COMPUTING ΣΤΟ EDGE COMPUTING.....	64

3.3 ΠΛΑΤΦΟΡΜΕΣ EDGE COMPUTING	66
3.3.1 Mobile Cloud Computing	67
3.3.2 Mobile Edge Computing	68
3.3.3 Fog Computing	69
3.3.4 Cloudlet	70
3.4 ΒΑΣΙΚΕΣ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΕΣ ΓΙΑ ΤΟ MOBILE EDGE COMPUTING	71
3.5 ΠΛΕΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ ΤΟΥ MOBILE EDGE COMPUTING	73
3.6 ΤΟ MOBILE EDGE COMPUTING FRAMEWORK ΚΑΙ Η ΑΡΧΙΤΕΚΤΟΝΙΚΗ ΑΝΑΦΟΡΑΣ	75
3.6.1 Το MEC Framework	76
3.6.2 Αρχιτεκτονική αναφοράς για το Mobile Edge Computing.....	77
3.7 ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΚΑΙ ΠΕΡΙΠΤΩΣΕΙΣ ΧΡΗΣΗΣ ΤΟΥ MOBILE EDGE COMPUTING	82
3.8 Ο ΡΟΛΟΣ ΤΟΥ MOBILE EDGE COMPUTING ΣΤΟ ΔΙΑΔΙΚΤΥΟ ΤΩΝ ΠΡΑΓΜΑΤΩΝ	87

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: ΤΕΧΝΙΚΑ ΖΗΤΗΜΑΤΑ ΚΑΙ ΠΡΟΚΛΗΣΕΙΣ ΣΤΟ MOBILE EDGE COMPUTING..... 91

4.1 ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ MOBILE EDGE COMPUTING	91
4.1.1 Επιλογή τοποθεσίας για διακομιστές MEC.....	91
4.1.2 Αρχιτεκτονική δικτύου MEC.....	93
4.1.3 Σχεδιασμός πυκνότητας διακομιστή MEC	95
4.2 MEC ΜΕ ΔΥΝΑΤΟΤΗΤΑ ΠΡΟΣΩΡΙΝΗΣ ΜΝΗΜΗΣ.....	96
4.2.1 Προσωρινή αποθήκευση υπηρεσιών για κατανομή πόρων στο MEC	98
4.2.2 Προσωρινή αποθήκευση δεδομένων για ανάλυση δεδομένων στο MEC	100
4.3 ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗ ΚΙΝΗΤΙΚΟΤΗΤΑΣ ΣΤΟ MEC	102
4.3.1 Προφόρτωση δεδομένων με επίγνωση κινητικότητας	104
4.3.2 Μείωση υπολογιστικού φόρτου με επίγνωση κινητικότητας και χρήση επικοινωνιών D2D.....	105
4.3.3 Ανεκτικότητα σε σφάλματα και επίγνωση κινητικότητας.....	106
4.3.4 Προγραμματισμός διακομιστή MEC με επίγνωση κινητικότητας	107
4.4 ΕΝΕΡΓΕΙΑ ΣΤΟ MEC.....	108
4.4.1 Δυναμική και αναλογική ενέργεια στα συστήματα MEC.....	108
4.4.2 Γεωγραφική εξισορρόπηση φόρτου διεργασιών	109
4.4.3 Συστήματα MEC με ανανεώσιμες πηγές ενέργειας.....	110
4.5 ΘΕΜΑΤΑ ΑΣΦΑΛΕΙΑΣ ΚΑΙ ΑΠΟΡΡΗΤΟΥ.....	114
4.5.1 Μηχανισμοί αξιοπιστίας και ελέγχου ταυτότητας	114
4.5.2 Ασφάλεια δικτύου.....	115
4.5.3 Ασφαλείς και απόρρητες υπολογιστικές διαδικασίες	116

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: ΤΕΧΝΙΚΑ ΜΟΝΤΕΛΑ ΚΑΙ ΟΙΚΟΝΟΜΙΚΑ ΚΟΣΤΗ ΣΕ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ MEC ΜΕ ΙΟΤ ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ..... 119

5.1 ΜΟΝΤΕΛΑ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΩΝ ΔΙΕΡΓΑΣΙΩΝ	119
5.1.1 Μοντέλο δυαδικής εκφόρτωσης διεργασιών	119
5.1.2 Μοντέλο μερικής εκφόρτωσης διεργασιών.....	120

5.2 ΜΟΝΤΕΛΟ ΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΑΣ ΣΕ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ ΜΕC ΜΕ ΙΟΤ.....	123
5.3 ΜΟΝΤΕΛΑ ΠΡΟΘΕΣΜΙΑΣ ΕΚΤΕΛΕΣΗΣ ΔΙΕΡΓΑΣΙΩΝ ΚΑΙ ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΗΣ ΚΑΤΑΝΑΛΩΣΗΣ ΣΤΙΣ ΚΙΝΗΤΕΣ ΣΥΣΚΕΥΕΣ	127
5.4 ΜΟΝΤΕΛΑ ΠΡΟΘΕΣΜΙΑΣ ΕΚΤΕΛΕΣΗΣ ΔΙΕΡΓΑΣΙΩΝ ΚΑΙ ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΗΣ ΚΑΤΑΝΑΛΩΣΗΣ ΣΤΟ ΔΙΑΚΟΜΙΣΤΗ ΜΕC.....	128
5.5 ΑΝΑΛΥΣΗ ΚΟΣΤΟΥΣ ΣΕ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ ΕDGE CΟΜΡΥΤΙΝG	130
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6: ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΕΠΕΚΤΑΣΕΙΣ	137
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ ΚΑΙ ΑΝΑΦΟΡΕΣ	139

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΣΧΗΜΑΤΩΝ

ΣΧΗΜΑ 1.1 ΤΟ ΔΙΑΔΙΚΤΥΟ ΤΩΝ ΑΝΤΙΚΕΙΜΕΝΩΝ	27
ΣΧΗΜΑ 1.2 ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΙΟΤ	28
ΣΧΗΜΑ 1.3 ΑΡΧΙΤΕΚΤΟΝΙΚΗ ΤΡΙΩΝ ΕΠΙΠΕΔΩΝ.....	31
ΣΧΗΜΑ 1.4 ΑΡΧΙΤΕΚΤΟΝΙΚΗ ΠΕΝΤΕ ΕΠΙΠΕΔΩΝ	33
ΣΧΗΜΑ 1.5 ΠΕΔΙΑ ΕΦΑΡΜΟΓΩΝ ΙΟΤ	36
ΣΧΗΜΑ 2.1 ΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΑ ΣΥΣΚΕΥΗΣ ΜΕ ΣΥΣΚΕΥΗ	41
ΣΧΗΜΑ 2.2 ΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΑ ΣΥΣΚΕΥΗΣ ΜΕ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΟ ΝΕΦΟΣ.....	42
ΣΧΗΜΑ 2.3 ΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΑ ΣΥΣΚΕΥΗΣ ΜΕ GATEWAY.....	43
ΣΧΗΜΑ 2.4 ΤΟΠΟΛΟΓΙΕΣ ΔΙΚΤΥΟΥ	46
ΣΧΗΜΑ 2.5 ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΤΟΥ NFC ΣΤΟ ΙΟΤ.....	49
ΣΧΗΜΑ 2.6 Η ΑΡΧΙΤΕΚΤΟΝΙΚΗ MASTER/SLAVE	50
ΣΧΗΜΑ 2.7 ZIGBEE ΙΟΤ	51
ΣΧΗΜΑ 2.8 Z-WAVE ΙΟΤ.....	52
ΣΧΗΜΑ 2.9 ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΤΟΥ NB-ΙΟΤ.....	57
ΣΧΗΜΑ 2.10 ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΤΗΣ LTE-M ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ	58
ΣΧΗΜΑ 2.11 ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΠΟΥ ΥΠΟΣΤΗΡΙΖΟΥΝ ΤΑ LPWAN.....	59
ΣΧΗΜΑ 2.12 ΣΥΣΚΕΥΕΣ ΙΟΤ ΠΟΥ ΥΠΟΣΤΗΡΙΖΕΙ ΤΟ LORA	60
ΣΧΗΜΑ 3.1 ΚΕΝΤΡΙΚΟΠΟΙΗΜΕΝΟ ΣΥΣΤΗΜΑ CLOUD COMPUTING.....	65
ΣΧΗΜΑ 3.2 ΑΠΟΚΕΝΤΙΚΟΠΟΙΗΜΕΝΟ ΣΥΣΤΗΜΑ CLOUD COMPUTING.....	65
ΣΧΗΜΑ 3.3 ΑΡΧΙΤΕΚΤΟΝΙΚΗ ΕΝΟΣ MOBILE EDGE ΔΙΚΤΥΟΥ	66
ΣΧΗΜΑ 3.4 ΑΡΧΙΤΕΚΤΟΝΙΚΗ MOBILE CLOUD COMPUTING ΔΙΚΤΥΟΥ.....	67
ΣΧΗΜΑ 3.5 ΑΡΧΙΤΕΚΤΟΝΙΚΗ MOBILE EDGE COMPUTING ΔΙΚΤΥΟΥ.....	68
ΣΧΗΜΑ 3.6 ΑΡΧΙΤΕΚΤΟΝΙΚΗ FOG COMPUTING ΔΙΚΤΥΟΥ	70
ΣΧΗΜΑ 3.7 ΑΡΧΙΤΕΚΤΟΝΙΚΗ CLOUDLET ΔΙΚΤΥΟΥ	71
ΣΧΗΜΑ 3.8 ΑΡΧΙΤΕΚΤΟΝΙΚΗ MEC FRAMEWORK	76
ΣΧΗΜΑ 3.9 ΑΡΧΙΤΕΚΤΟΝΙΚΗ ΑΝΑΦΟΡΑΣ MEC	78
ΣΧΗΜΑ 3.10 ΤΟ MEC ΓΙΑ ΥΠΗΡΕΣΙΕΣ AR.....	84
ΣΧΗΜΑ 3.11 ΤΟ MEC ΣΕ ΥΠΗΡΕΣΙΑ VIDEO STREAMING ΚΑΙ ΑΝΑΛΥΣΗ VIDEO	85
ΣΧΗΜΑ 3.12 ΤΟ MEC ΓΙΑ ΣΥΝΔΕΔΕΜΕΝΑ ΟΧΗΜΑΤΑ.....	87
ΣΧΗΜΑ 4.1 ΑΡΧΙΤΕΚΤΟΝΙΚΗ ΔΙΚΤΥΟΥ MEC ΤΡΙΩΝ ΣΤΡΩΜΑΤΩΝ	94
ΣΧΗΜΑ 4.2 ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ ΤΑΞΙΝΟΜΗΣΗΣ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΩΝ ΑΙΤΗΜΑΤΩΝ.....	96
ΣΧΗΜΑ 4.3 ΣΥΣΤΗΜΑ MEC ΜΕ ΔΥΝΑΤΟΤΗΤΑ ΠΡΟΣΩΡΙΝΗΣ ΑΠΟΘΗΚΕΥΣΗΣ	97
ΣΧΗΜΑ 4.4 ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗ ΤΗΣ ΚΙΝΗΤΙΚΟΤΗΤΑΣ ΣΤΟ MEC.....	102

ΣΧΗΜΑ 4.5 ΣΥΣΤΗΜΑ ΜΕΣ ΜΕ ΑΝΑΝΕΩΣΙΜΕΣ ΠΗΓΕΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ	111
ΣΧΗΜΑ 5.1 ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΕΣ ΜΙΑΣ ΕΦΑΡΜΟΓΗΣ ΑΡ.....	120
ΣΧΗΜΑ 5.2 ΑΚΟΛΟΥΘΙΑΚΗ ΕΞΑΡΤΗΣΗ	122
ΣΧΗΜΑ 5.3 ΠΑΡΑΛΛΗΛΗ ΕΞΑΡΤΗΣΗ.....	122
ΣΧΗΜΑ 5.4 ΓΕΝΙΚΗ ΕΞΑΡΤΗΣΗ	122

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ

ΠΙΝΑΚΑΣ 2.1. ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΤΩΝ RFID ΚΑΙ NFC.....	49
ΠΙΝΑΚΑΣ 2.2. ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΩΝ ΓΙΑ ΜΙΚΡΕΣ ΑΠΟΣΤΑΣΕΙΣ.....	55
ΠΙΝΑΚΑΣ 2.3. ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ WI-FI HALOW.....	56
ΠΙΝΑΚΑΣ 2.4. ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΤΩΝ ΑΔΕΙΟΔΟΤΗΜΕΝΩΝ ΚΥΨΕΛΩΤΩΝ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΩΝ	58
ΠΙΝΑΚΑΣ 2.5. ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΤΩΝ ΜΗ ΑΔΕΙΟΔΟΤΗΜΕΝΩΝ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΩΝ LPWAN.....	62
ΠΙΝΑΚΑΣ 3.1 ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΤΩΝ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΩΝ EDGE COMPUTING	71
ΠΙΝΑΚΑΣ 3.2 ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΚΑΙ ΠΕΡΙΠΤΩΣΕΙΣ ΧΡΗΣΗΣ ΤΟΥ MEC	83
ΠΙΝΑΚΑΣ 5.1 ΟΙ ΑΠΑΙΤΗΣΕΙΣ ΤΩΝ ΕΦΑΡΜΟΓΩΝ ΙΟΤ ΣΕ ΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΑΚΟΥΣ ΠΟΡΟΥΣ.....	126

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΣΥΝΤΜΗΣΕΩΝ

2G/3G/4G/5G – 2nd/3rd/4th/5th Generation

3GPP – 3rd Generation Partnership Project

6LoWPAN – IPv6 over Low Power Wireless Personal Area Networks

ACK – Acknowledgement

API – Application Programming Interface

BLE – Bluetooth Low Energy

bps – bits per second

BS – Base Station

CDN – Content Delivery Network

CFS – Customer Facing Service

CoAP – Constrained Application Protocol

CPU – Central Process Unit

CSI – Chanel State Information

CSMA/CA – Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance

D2D – Device to Device

DAG – Directed Acyclic Graph

DC – Data Center

DCN – Data Center Networks

DNS – Domain Name System

DPP – Determinantal Point Process

DTLS – Datagram Transport Layer Security

DVFS – Dynamic Voltage and Frequency Scaling

EC-GSM – Extended Coverage Global Positioning System

eGPRS – enhanced General Packet Radio Service

EH – Energy Harvest

EPC – Electron Products Codes

ESI – Energy Side Information

ETSI – European Telecommunications Standards Institute

GLB – Geographic Load Balancing

GPS – Global Positioning System

GSM – Global System for Mobile Communications

GSMA – Global System for Mobile Communications Association

HetNets – Heterogeneous Networks

HPPP – Homogeneous Poisson Point Process

HTTP/HTTPS – Hypertext Transfer Protocol/ Hypertext Transfer Protocol Secure

IEEE – Institute of Electrical and Electronics Engineers

IoT – Internet of Things

IP – Internet Protocol

IPv4 – Internet Protocol version 4

IPv6 – Internet Protocol version 6

ISG – Industry Specification Group

ISI – Intersymbol Interference

ISM – Industrial, Scientific and Medical

LCM – Lifecycle Management

LPWAN – Low Power Wide Area Networks

LR-WPAN – Low Rate Wireless Personal Area Network

LTE – Long Term Evolution

LTE-M – Long Term Evolution for Machines

M2M – Machine to Machine

MCC – Mobile Cloud Computing

MDP – Markov Decision Process

ME – Mobile Edge

MEC – Mobile Edge Computing

MEO – Mobile Edge Orchestrator

MEPM – Mobile Edge Platform Manager

MIMO – Multiple Input Multiple Output

MIT – Massachusetts Institute of Technology

NB-IoT – Narrow Band Internet of Things

NFC – Near Field Communication

NFV – Network Functions Virtualization

NR – New Radio

OSS – Operation Support System

P2P – Peer to Peer

PMR – Peak to Mean Ratio

Pr – Probability

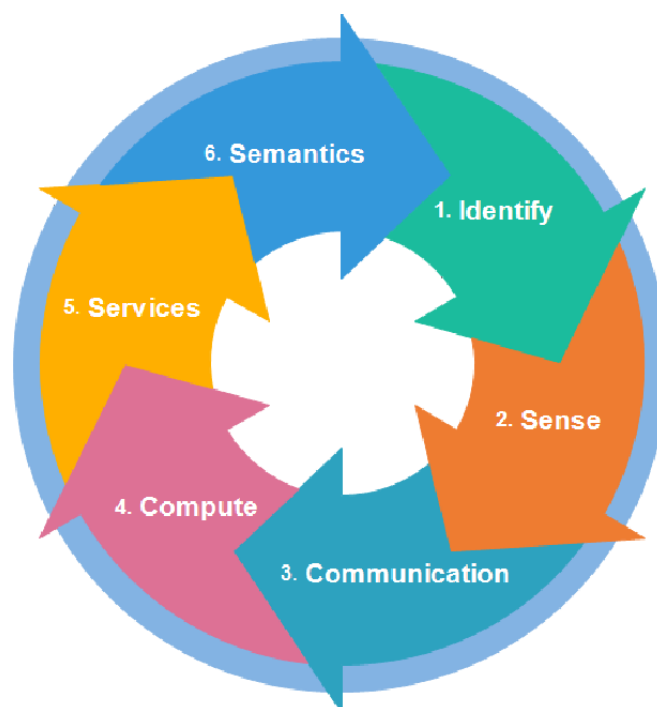
QoE – Quality of Experience
QoS – Quality of Service
RAN – Radio Access Network
RAT – Radio Access Technology
RFC – Request for Comments
RFID – Radio Frequency Identification
RNC – Radio Network Controller
RPMA – Random Phase Multiple Access
SDN – Software Defined Network
SINR – Signal to Interference plus Noise Ratio
SNMP – Simple Network Management Protocol
TCO – Total Cost of Ownership
TCP – Transmission Control Protocol
TLS – Transport Layer Security
Ucode – Ubiquitous Codes
UID – Unique Identifiers
UPD – User Datagram Protocol
UPS – Uninterruptible Power Supply
V2X – Vehicle to Everything
VIM – Virtual Infrastructure Manager
VIP – Very Important Person
VM – Virtual Machine
VoLTE – Voice over Long Term Evolution
VR/AR – Virtual Reality/Augmented Reality
Wi-Fi – Wireless Fidelity
WPS – Wireless Power Transfer
WSN – Wireless Sensor Networks

1.2 Ορισμός

Το διαδίκτυο των πραγμάτων, ή IoT, είναι ένα σύστημα αλληλοσυνδεόμενων υπολογιστικών συσκευών, μηχανικών και ψηφιακών μηχανημάτων, αντικειμένων, ζώων ή ανθρώπων που διαθέτουν μοναδικά αναγνωριστικά στοιχεία (Unique Identifiers-UID) και τη δυνατότητα μεταφοράς δεδομένων μέσω ενός δικτύου χωρίς να απαιτείται αλληλεπίδραση από άνθρωπο σε άνθρωπο ή από άνθρωπο σε υπολογιστή. Ένα αντικείμενο στο διαδίκτυο των πραγμάτων μπορεί να είναι ένα άτομο με ένα εμφύτευμα καρδιακής παρακολούθησης, ένα ζώο σε αγρόκτημα με ένα αναμεταδότη βιοσιτίπ, ένα αυτοκίνητο που έχει ενσωματωμένους αισθητήρες για να προειδοποιήσει τον οδηγό όταν η πίεση των ελαστικών είναι χαμηλή ή οποιοδήποτε άλλο φυσικό ή τεχνητό αντικείμενο στο οποίο μπορεί να εκχωρηθεί διεύθυνση πρωτοκόλλου διαδικτύου (IP) και να είναι σε θέση να μεταφέρει δεδομένα μέσω ενός δικτύου.

1.3 Στοιχεία ενός συστήματος IoT

Το IoT είναι ένα περίπλοκο και σύνθετο οικοσύστημα. Στο Σχ.1.2 παρουσιάζονται τα στοιχεία που απαιτούνται για να καταστήσουν ένα σύστημα IoT λειτουργικό.



Σχήμα 1.2 Στοιχεία IoT

1.3.1 Ταυτοποίηση

Η ταυτοποίηση (identification) προσφέρει μοναδική ταυτότητα σε κάθε αντικείμενο εντός του δικτύου. Υπάρχουν δυο διεργασίες στην λειτουργία της ταυτοποίησης η ονοματοδοσία (naming) και η διευθυνσιοδότηση (addressing). Η ονοματοδοσία αναφέρεται στο όνομα ενός αντικειμένου, ενώ η διευθυνσιοδότηση στην μοναδική διεύθυνση ενός συγκεκριμένου αντικειμένου. Αυτοί οι δύο όροι διαφέρουν, επειδή δύο ή περισσότερα αντικείμενα μπορεί να έχουν το ίδιο όνομα, αλλά πάντα διαφορετική και μοναδική διεύθυνση. Υπάρχουν πολλές διαθέσιμες μέθοδοι ονοματοδοσίας στα αντικείμενα ενός δικτύου, όπως είναι το Electron Products Codes (EPC) και το Ubiquitous Codes (UCode). Το πρωτόκολλο διαδικτύου IPv6 χρησιμοποιείται για να αντιστοιχίζει τα αντικείμενα με τις διευθύνσεις. Αρχικά, χρησιμοποιήθηκε το πρωτόκολλο IPv4 για την εκχώρηση διευθύνσεων, αλλά δεν μπορούσε να καλύψει τις ανάγκες διευθυνσιοδότησης λόγω του μεγάλου πλήθους συσκευών IoT.

1.3.2 Συλλογή δεδομένων

Οι συσκευές ανίχνευσης συλλέγουν δεδομένα (sensing) που αποστέλλονται σε αποθηκευτικά μέσα, όπως είναι το υπολογιστικό νέφος (cloud). Υπάρχουν πολλές συσκευές ανίχνευσης για τη συλλογή πληροφοριών από αντικείμενα όπως είναι οι ενεργοποιητές, οι ετικέτες RFID και οι έξυπνοι αισθητήρες.

1.3.3 Επικοινωνία

Το στοιχείο της επικοινωνίας (communication) είναι ένας από τους κύριους στόχους του Διαδικτύου των Αντικειμένων. Διαφορετικές συσκευές είναι συνδεδεμένες μεταξύ τους και επικοινωνούν, με σκοπό την αποστολή και λήψη μηνυμάτων, αρχείων και άλλων πληροφοριών. Υπάρχουν αρκετές τεχνολογίες που παρέχουν τη δυνατότητα επικοινωνίας μεταξύ των συσκευών και αναλύονται στο δεύτερο κεφάλαιο.

1.3.4 Υπολογιστική ικανότητα

Οι υπολογιστικές διαδικασίες (computing) στο Cloud γίνονται με βάση τις πληροφορίες που συλλέγουν οι συσκευές IoT από το περιβάλλον τους. Η υπολογιστική ικανότητα χρησιμοποιείται για την αφαίρεση της περιττής πληροφορίας. Πολλές πλατφόρμες υλικού και λογισμικού αναπτύσσονται για την εκτέλεση της επεξεργασίας σε εφαρμογές του IoT οικοσυστήματος. Για τις πλατφόρμες υλικού χρησιμοποιείται το Arduino, το Raspberry Pi και το Intel Galileo, ενώ για πλατφόρμες λογισμικού το λειτουργικό σύστημα έχει σημαντικό ρόλο για την εκτέλεση της επεξεργασίας. Υπάρχουν πολλοί τύποι λειτουργικών συστημάτων που χρησιμοποιούνται, όπως το Tiny OS, το Lite OS και το Android.

1.3.5 Υπηρεσίες εφαρμογών IoT

Υπάρχουν τέσσερις τύποι υπηρεσιών (IoT services) που παρέχονται από τις εφαρμογές IoT.

1. Οι υπηρεσίες που σχετίζονται με την ταυτότητα και χρησιμοποιούνται για να ταυτοποιήσουν τα αντικείμενα που στέλνουν κάποιο αίτημα.
2. Οι υπηρεσίες συνάθροισης πληροφοριών είναι ένας άλλος τύπος υπηρεσιών που αποσκοπεί στην συλλογή όλων των πληροφοριών από τα αντικείμενα. Η επεξεργασία πληροφορίας πραγματοποιείται επίσης από την υπηρεσία συνάθροισης.
3. Οι συνεργατικές υπηρεσίες που λαμβάνουν αποφάσεις σύμφωνα με τις συλλεγόμενες πληροφορίες και αποστέλλουν τις κατάλληλες απαντήσεις στις συσκευές.
4. Οι πανταχού παρούσες υπηρεσίες που χρησιμοποιούνται για να ανταποκρίνονται άμεσα στις συσκευές.

1.3.6 Ανάλυση δεδομένων με χρήση γνώσης

Οι υπηρεσίες IoT στοχεύουν στη διευκόλυνση των χρηστών με την εκτέλεση καθηκόντων όπως είναι παραγγελίες προϊόντων που πραγματοποιούνται από τα έξυπνα ψυγεία. Η ανάλυση δεδομένων (semantics) αποτελεί το σημαντικότερο στοιχείο του συστήματος IoT για να εκπληρώσει το σκοπό του. Η ανάλυση δεδομένων με χρήση γνώσης λειτουργεί ως ο εγκέφαλος στο IoT, αφού συλλέγει

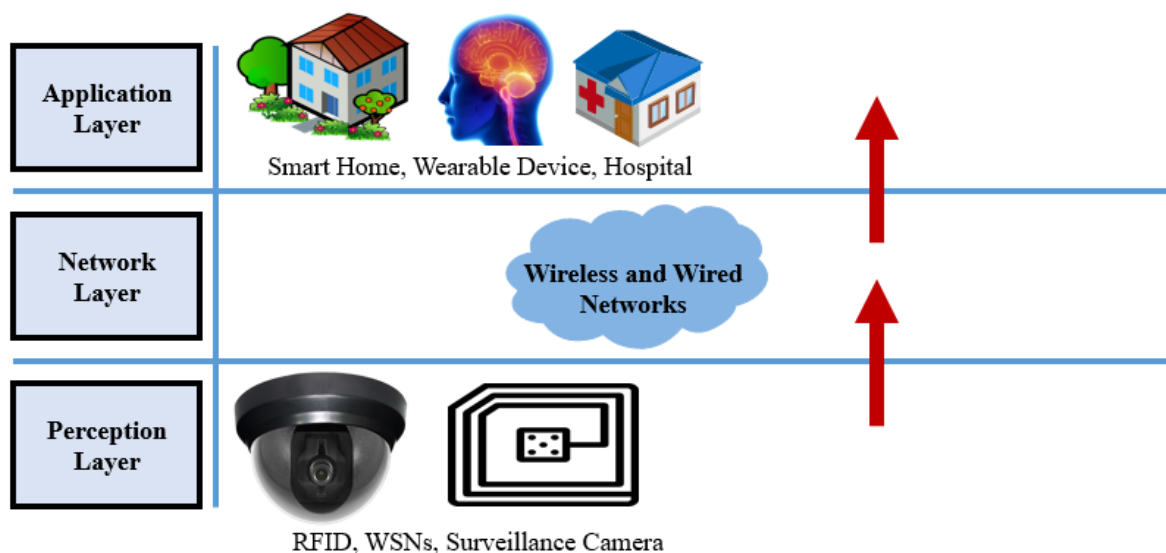
όλες τις πληροφορίες και λαμβάνει τις κατάλληλες αποφάσεις για την αποστολή απαντήσεων στις συσκευές.

1.4 Αρχιτεκτονική IoT

Δεν υπάρχει ενιαία και γενική συμφωνία σχετικά με την αρχιτεκτονική του IoT που να είναι αποδεκτή από ολόκληρο τον κόσμο και τους ερευνητές. Οι ερευνητές έχουν προτείνει πολλές και διαφορετικές αρχιτεκτονικές. Σύμφωνα με κάποιους ερευνητές η αρχιτεκτονική του IoT αποτελείται από τρία επίπεδα. Άλλοι υποστηρίζουν ότι ένα μοντέλο αρχιτεκτονικής πέντε επιπέδων είναι κατάλληλο για να καλύψει τις απαιτήσεις του συστήματος IoT.

1.4.1 Αρχιτεκτονική τριών επιπέδων

Είναι μία βασική αρχιτεκτονική και εκπληρώνει την ιδέα του διαδικτύου των πραγμάτων. Η αρχιτεκτονική τριών επιπέδων έχει προταθεί σε πρώιμο στάδιο ανάπτυξης του IoT. Η αρχιτεκτονική τριών επιπέδων αποτελείται από το επίπεδο συλλογής δεδομένων, το επίπεδο δικτύου και το επίπεδο εφαρμογής, όπως φαίνονται στο Σχ. 1.3.



Σχήμα 1.3 Αρχιτεκτονική τριών επιπέδων

1.4.1.1 Επίπεδο συλλογής δεδομένων

Το επίπεδο συλλογής δεδομένων είναι γνωστό και ως επίπεδο αισθητήρων. Το συγκεκριμένο επίπεδο έχει την ευθύνη να εντοπίζει και να οργανώνει τα αντικείμενα στο IoT περιβάλλον, καθώς επίσης να συλλέγει πληροφορίες από αυτά. Υπάρχουν πολλοί τύποι αισθητήρων που συνδέονται με τις συσκευές IoT για τη συλλογή πληροφοριών, όπως είναι οι RFID και barcode αισθητήρες. Οι πληροφορίες που συλλέγονται από το επίπεδο συλλογής δεδομένων μπορεί να σχετίζονται με την τοποθεσία, τις αλλαγές στον αέρα, το περιβάλλον, την κίνηση και τις δονήσεις.

1.4.1.2 Επίπεδο Δικτύου

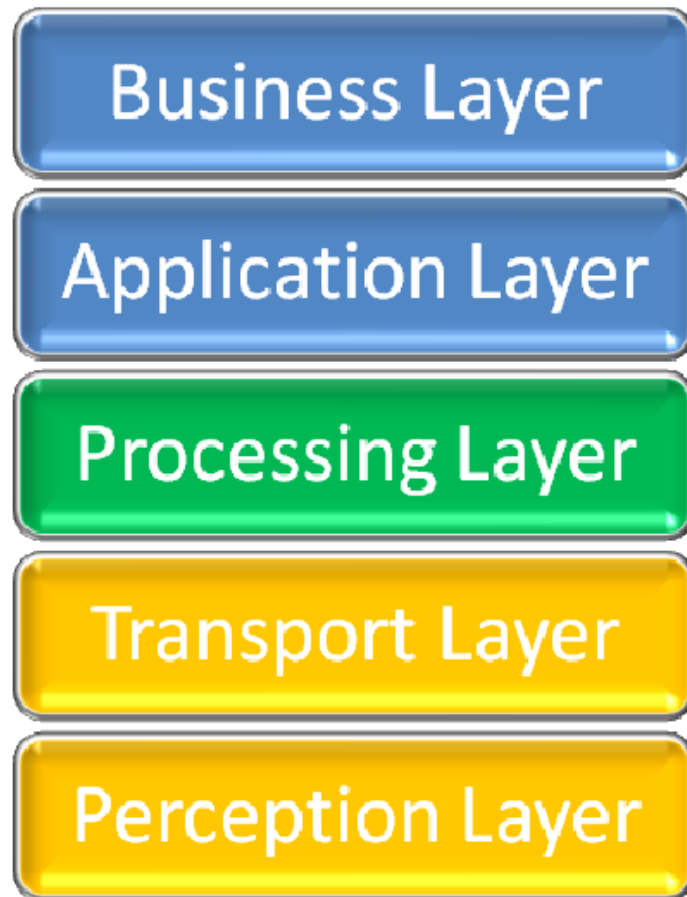
Το επίπεδο δικτύου ή αλλιώς επίπεδο μεταφοράς δεδομένων λειτουργεί ως γέφυρα μεταξύ των επιπέδων αντίληψης και εφαρμογής. Μεταφέρει και μεταδίδει τις πληροφορίες που συλλέγονται από τα φυσικά αντικείμενα μέσω αισθητήρων στο επίπεδο εφαρμογής των IoT υπηρεσιών. Το μέσο μετάδοσης μπορεί να είναι ασύρματο, ενσύρματο ή συνδυασμός των δυο. Επιπρόσθετα, το επίπεδο δικτύου αναλαμβάνει την ευθύνη για τη σύνδεση των έξυπνων αντικειμένων, των συσκευών δικτύου και των δικτύων μεταξύ τους.

1.4.1.3 Επίπεδο Εφαρμογής

Σε αυτό το επίπεδο καταλήγουν τα επεξεργασμένα δεδομένα από τα κατωτέρα επίπεδα. Το επίπεδο εφαρμογής είναι υπεύθυνο για την παροχή υπηρεσιών στον τελικό χρήστη. Η εφαρμογή ενδέχεται να ανήκει σε οποιαδήποτε από τις κατηγορίες του IoT.

1.4.2 Αρχιτεκτονική πέντε επιπέδων

Οι ερευνητές έχουν προτείνει μία εξελιγμένη αρχιτεκτονική ικανή να καλύψει ακόμα καλύτερα τις απαιτήσεις του συστήματος IoT. Αποτελείται από τα τρία επίπεδα αρχιτεκτονικής που έχουν αναπτυχθεί στην παράγραφο 1.4.1 μαζί με δυο ακόμα επίπεδα. Τα επίπεδα που έχουν προστεθεί καλούνται επίπεδο επεξεργασίας και επίπεδο διαχείρισης του συστήματος. Στο Σχ. 1.4 φαίνεται που ακριβώς τοποθετούνται οι προσθήκες αυτές.



Σχήμα 1.4 Αρχιτεκτονική πέντε επιπέδων

1.4.2.1 Επίπεδο επεξεργασίας

Το επίπεδο επεξεργασίας χειρίζεται τις πληροφορίες που συγκεντρώνονται από το επίπεδο συλλογής δεδομένων. Η διαδικασία χειρισμού της πληροφορίας περιλαμβάνει την αποθήκευση και την ανάλυση των δεδομένων. Ο στόχος αυτού του επιπέδου είναι η εξαγωγή της χρήσιμης και η απόρριψη της πλεονάζουσας πληροφορίας. Προκειμένου να επιτευχθεί ο σκοπός αυτού του επιπέδου χρησιμοποιούνται προηγμένες τεχνικές επεξεργασίας και αποθήκευσης της πληροφορίας, όπως είναι το υπολογιστικό νέφος, η τεχνητή νοημοσύνη και λογισμικά βάσεων δεδομένων.

1.4.2.2 Επίπεδο διαχείρισης του συστήματος

Το επίπεδο διαχείρισης του συστήματος οργανώνει τις υπηρεσίες και τις δραστηριότητες σε ένα περιβάλλον IoT. Ειδικότερα, είναι υπεύθυνο για τη διαχείριση και τον έλεγχο των εφαρμογών, την εξασφάλιση του ιδιωτικού απορρήτου των

χρηστών, καθώς επίσης έχει την ικανότητα να καθορίζει τον τρόπο που μπορούν να δημιουργηθούν, να αποθηκευτούν και να αλλάξουν οι πληροφορίες.

1.5 Χαρακτηριστικά IoT

Με βάση τη βιβλιογραφία και εμπορικές παρουσιάσεις του επιχειρηματικού κόσμου έχει αναγνωριστεί πλήθος διαφορετικών χαρακτηριστικών που πρέπει να ληφθούν υπόψη στο σχεδιασμό των νέων υπηρεσιών και συσκευών IoT. Γενικά, ένα πολύπλοκο σύστημα όπως είναι το IoT πρέπει να διαθέτει χαρακτηριστικά που να το καθιστούν αποδοτικό και λειτουργικό.

Τα θεμελιώδη χαρακτηριστικά του IoT είναι τα ακόλουθα:

1. Διασυνδεσιμότητα

Όσον αφορά το IoT, όλες οι συσκευές πρέπει να έχουν τη δυνατότητα να διασυνδεθούν με το δίκτυο ανταλλαγής πληροφοριών, που αποτελεί το IoT.

2. Παροχή υπηρεσιών σε αντικείμενα

Η παροχή υπηρεσιών σε αντικείμενα, τόσο φυσικά όσο και ψηφιακά, απαιτεί αλλαγές και εκσυγχρονισμό στις τεχνολογίες που χρησιμοποιούνται. Αυτό πρέπει να γίνεται με γνώμονα τους περιορισμούς που τίθενται, όπως για παράδειγμα η ασφάλεια των δεδομένων.

3. Ανομοιογένεια των συνδεδεμένων συσκευών

Οι συσκευές στο IoT, όχι μόνο είναι κατασκευασμένες με χρήση διαφορετικών υλικών (hardware), αλλά συνδέονται με τις υπόλοιπες συσκευές ή τις πλατφόρμες της υπηρεσίας τους μέσω διαφορετικών δικτύων. Απαιτείται, λοιπόν, στις υπηρεσίες IoT οι συσκευές να μπορούν να διασυνδεθούν με την υπηρεσία ανεξάρτητα από τον τύπο δικτύου που υποστηρίζουν.

4. Δυναμικές αλλαγές στην κατάσταση των συσκευών

Μία συσκευή που αποτελεί μέρος μίας IoT υπηρεσίας μπορεί να αλλάζει κατάσταση δυναμικά, δηλαδή από μία κατάσταση αδράνειας να μεταφέρετε σε κατάσταση λειτουργίας και μετά σε κατάσταση αποσύνδεσης. Επιπρόσθετα, ο αριθμός των συνδεδεμένων συσκευών εντός της υπηρεσίας δύναται να μεταβάλλεται δραστικά.

5. Πλήθος διασυνδεδεμένων συσκευών

Ο αριθμός των διασυνδεδεμένων συσκευών υπολογίζεται να είναι τουλάχιστον μία τάξη μεγέθους μεγαλύτερος από τον αριθμό των συσκευών σε τηλεπικοινωνιακά δίκτυα προηγούμενων γενιών (3G, 4G). Απαιτείται, λοιπόν, οι υπηρεσίες και γενικά υλοποιήσεις να μπορούν να υποστηρίξουν το μεγάλο πλήθος των διασυνδεδεμένων συσκευών.

6. Ασφάλεια

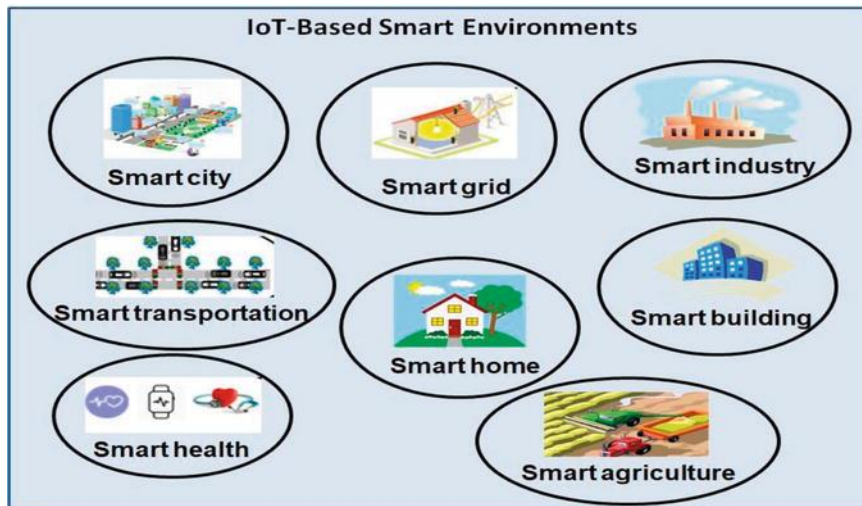
Οι συσκευές πρέπει να διαθέτουν αμυντικούς και προστατευτικούς μηχανισμούς για να εξασφαλίζουν την ασφάλεια των προσωπικών δεδομένων. Είναι επιτακτική ανάγκη να διασφαλίζονται τα άκρα επικοινωνίας, το δίκτυο και τα δεδομένα που μεταφέρονται.

1.6 Κατηγορίες εφαρμογής των υπηρεσιών IoT

Ο διαχωρισμός των υπηρεσιών IoT σε κατηγορίες είναι ιδιαίτερα δύσκολος, αφού πρέπει να ληφθούν υπόψη η ανάπτυξη της τεχνολογίας και οι ποικίλες πιθανές ανάγκες των χρηστών.

Αξίζει να σημειωθεί ότι οι εφαρμογές των υπηρεσιών IoT δεν βρίσκονται στο ίδιο επίπεδο ωριμότητας. Ένα μέρος αυτών αποτελεί κομμάτι της καθημερινότητας, ενώ άλλες είναι σε πειραματικό στάδιο και κάποιες πρόκειται να πραγματοποιηθούν στο μέλλον.

Στη παρούσα ενότητα αναφέρονται ενδεικτικά μερικές από τις πολλές εφαρμογές υπηρεσιών IoT ανά κατηγορία, έτσι ώστε ο αναγνώστης να αποκτήσει μία γενική εικόνα για τις δυνατότητες του IoT. Επιπλέον, μία εφαρμογή υπηρεσιών IoT ενδέχεται να ανήκει σε περισσότερες από μία κατηγορίες, όπως για παράδειγμα είναι ο έξυπνος φωτισμός ενός έξυπνου σπιτιού, ο οποίος επεκτείνεται και στον έξυπνο φωτισμό μίας έξυπνης πόλης.



Σχήμα 1.5 Πεδία Εφαρμογών IoT

Μία ενδεικτική ομαδοποίηση περιλαμβάνει τις κατηγορίες:

1.6.1 Έξυπνο σπίτι

Το IoT παρέχει τη δυνατότητα της διαχείρισης των οικιακών συσκευών από απόσταση. Συστήματα αερισμού, θέρμανσης και κλιματισμού προσαρμόζονται αυτομάτως στις συνθήκες που επικρατούν στο περιβάλλον του σπιτιού. Η παρακολούθηση του σπιτιού σε πραγματικό χρόνο δημιουργεί ένα κλίμα ασφάλειας καθώς εντοπίζονται άμεσα πιθανές παραβιάσεις. Συστήματα έξυπνου φωτισμού συμβάλουν τόσο στην ευημερία εντός του σπιτιού όσο και στην εξοικονόμηση ενέργειας καθώς φωταγωγούν όταν είναι απαραίτητο. Η εξοικονόμηση ενέργειας επεκτείνεται και σε άλλες ηλεκτρικές συσκευές, οι οποίες απενεργοποιούνται αυτόματα όταν τελειώσει η λειτουργία τους, όπως για παράδειγμα ένα έξυπνο πλυντήριο, ή όταν δεν χρησιμοποιούνται και μεταβαίνουν από την κατάσταση αναμονής σε κατάσταση εκτός λειτουργίας, όπως για παράδειγμα μία έξυπνη τηλεόραση. Ακόμα, είναι εφικτή η παρακολούθηση της κατανάλωσης και της ποιότητας του νερού.

1.6.2 Έξυπνη πόλη

Η τεχνολογία του IoT μπορεί να δώσει λύσεις σε πολλά προβλήματα που υπάρχουν μέσα σε μία πόλη. Ο σχεδιασμός εναλλακτικών διάδρομων προς αποφυγή της κυκλοφοριακής συμφόρησης είναι εφικτός μέσω του IoT. Επιπλέον,

είναι δυνατό να αντιμετωπιστεί το πρόβλημα εύρεσης θέσης στάθμευσης παρακολουθώντας σε πραγματικό χρόνο τις διαθέσιμες θέσεις. Εξασφαλίζεται η δομική υγεία κτιρίων, γεφυρών και ιστορικών μνημείων παρακολουθώντας τις σεισμικές δονήσεις και την κατάσταση των υλικών. Η φωταγωγή της πόλης γίνεται με έξυπνο τρόπο που προσαρμόζεται στην εκάστοτε ανάγκη. Δίνεται η δυνατότητα της παρακολούθησης του επιπέδου των σκουπιδιών στους κάδους με αποτέλεσμα τη βελτιστοποίηση της διαδικασίας συλλογής απορριμμάτων. Ακόμα, μέσω των έξυπνων μετρητών μπορεί να παρακολουθείται η κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας μίας πόλης, όπως επίσης και το επίπεδο ή η ποιότητα του νερού, του πετρελαίου και φυσικού αερίου σε μεγάλες δεξαμενές αποθήκευσης.

1.6.3 Έξυπνη ενέργεια

Η δημιουργία ενός έξυπνου δικτύου διαχείρισης ηλεκτρικής ενέργειας είναι μία σημαντική υπηρεσία εφαρμογής του IoT. Επιτρέπει την παρακολούθηση και την διαχείριση της ηλεκτρικής ενέργειας με αισθητήρες σε όλο το μήκος του δικτύου. Έτσι, το ηλεκτρικό σύστημα προσαρμόζει την παραγωγή στις πραγματικές ενεργειακές απαιτήσεις του δικτύου, ενώ ταυτόχρονα είναι σε θέση να αποφύγει φορτία αιχμής, να εξαλείψει πιθανές διακοπές ηλεκτρικού ρεύματος και να ενεργεί άμεσα σε περιπτώσεις αποτυχιών ή διαρροών.

1.6.4 Έξυπνη βιομηχανία

Η συνεχής καταγραφή των επιπέδων των αέριων και η ανίχνευση πιθανών διαρροών σε βιομηχανικό περιβάλλον μπορεί να πραγματοποιείται από αισθητήρες του συστήματος IoT. Κατά τον τρόπο αυτό εξασφαλίζεται η ασφάλεια σε χημικές εργοστασιακές εγκαταστάσεις. Το IoT βοηθάει στην συντήρηση και την επισκευή του εξοπλισμού. Οι πρόωρες προβλέψεις για δυσλειτουργίες του εξοπλισμού και συντήρηση των υπηρεσιών μπορούν να προγραμματιστούν αυτόματα πριν από την πραγματική αποτυχία, εγκαθιστώντας αισθητήρες μέσα στον εξοπλισμό για την παρακολούθηση και την αποστολή αναφορών. Η τεχνολογία του IoT επεκτείνει τις υπηρεσίες της για τον βιομηχανικό τομέα παρέχοντας M2M εφαρμογές, που επιτρέπουν την αυτόματη διάγνωση του μηχανήματος και τον έλεγχο των περιουσιακών στοιχείων. Είναι ιδιαίτερα σημαντική βοήθεια σε περιπτώσεις ευπαθών προϊόντων, όπου απαιτείται ο έλεγχος της θερμοκρασίας.

1.6.5 Έξυπνη υγεία

Η επίβλεψη των ασθενών γίνεται σε πραγματικό χρόνο είτε εντός του νοσοκομείου είτε από το σπίτι των ασθενών, χρησιμοποιώντας ένα δίκτυο αισθητήρων που καταγράφει τις ζωτικές λειτουργίες. Συστήματα ανίχνευσης πτώσης βοηθούν ηλικιωμένους και άτομα με ειδικές ικανότητες να έχουν μία ανεξάρτητη διαβίωση. Ακόμα, ένα σύστημα ασυρμάτων αισθητήρων είναι ικανό να καταγράφει τη φυσική δραστηριότητα παρέχοντας στο έξυπνο τηλέφωνο του χρήστη πληροφορίες σχετικά με την αναπνοή και τον καρδιακό ρυθμό κατά τη διάρκεια του ύπνου.

1.6.6 Έξυπνη κινητικότητα και μεταφορά

Η ιδέα των αυτόνομων οχημάτων μπορεί να πραγματοποιηθεί από το IoT. Η διαδικασία των ανέπαφων συναλλαγών θα βασίζεται στην τοποθεσία ή στη διάρκεια δραστηριοτήτων σε περιπτώσεις μαζικών μέσων μεταφοράς, θεματικών πάρκων και γυμναστήριων, καθώς επίσης και στην τιμολόγηση των ναύλων για τα διόδια. Τα δεδομένα που συλλέγουν οι αισθητήρες συμβάλλουν στο σχεδιασμό των μέσων μαζικής μεταφοράς με στόχο την καλύτερη εξυπηρέτηση των επιβατών.

1.6.7 Έξυπνη εφοδιαστική αλυσίδα και εμπόριο

Η τεχνολογία IoT διευκολύνει τον έλεγχο της εφοδιαστικής αλυσίδας, καθώς επιτρέπει την παρακολούθηση των συνθηκών αποθήκευσης κατά μήκος της και την παρακολούθηση των προϊόντων για σκοπούς εντοπισμού. Επίσης, συμβάλλει στην παρακολούθηση των αποθεμάτων παρέχοντας ακριβή γνώση του τρέχοντος προϊόντος, ενώ ταυτόχρονα μειώνει τις ανακρίβειες των απογραφών. Είναι σε θέση να υποδεικνύει προϊόντα στους καταναλωτές καταγράφοντας τις αγοραστικές συνήθειες τους.

1.6.8 Έξυπνη κτηνοτροφία και γεωργία

Ελέγχοντας τις μικροκλιματικές αλλαγές στις συνθήκες του περιβάλλοντος μεγιστοποιείται η παραγωγή φρούτων και λαχανικών, ενώ ταυτόχρονα εξασφαλίζεται η υψηλή ποιότητα. Οι αισθητήρες παρέχουν πληροφορίες για τη θερμοκρασία και την υγρασία του εδάφους για βελτίωση και αύξηση της σοδειάς. Ακόμα, μπορούν να διαβεβαιώσουν τις ιδανικές συνθήκες για την ανάπτυξη και την υγεία των ζώων, ενώ

υπηρεσίες εντοπισμού και ταυτοποίησης των ζώων διευκολύνουν τους κτηνοτρόφους.

1.6.9 Έξυπνο περιβάλλον

Καταγράφοντας τα αέρια σε δασικές περιοχές η ανίχνευση των πυρκαγιών γίνεται άμεσα και με ακριβή γνώση της τοποθεσίας. Η παρακολούθηση των διακυμάνσεων της στάθμης του νερού σε ποταμούς, φράγματα και δεξαμενές κατά τη διάρκεια βροχοπτώσεων ενισχύει την έγκαιρη ενημέρωση σε περίπτωση πλημύρας. Επιπλέον, κολάρα εντοπισμού που χρησιμοποιούν τις τεχνολογίες GPS/GSM είναι ένας τρόπος προστασίας της πανίδας.

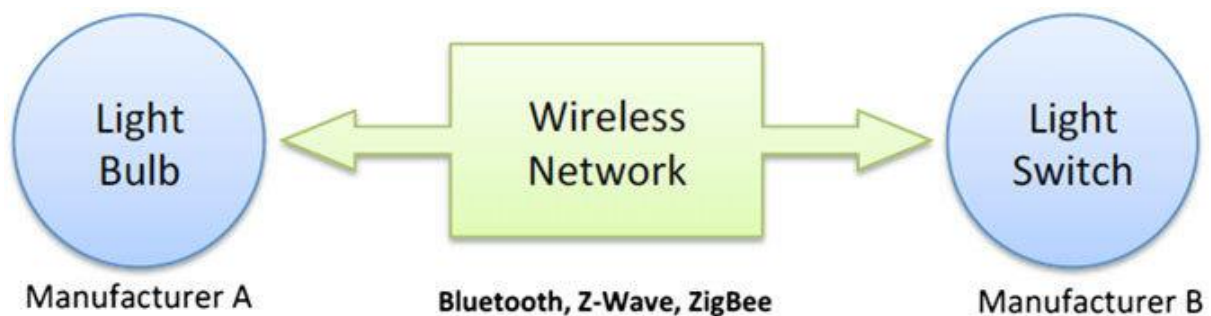
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 : Τεχνολογίες συνδεσιμότητας στο IoT

2.1 Μοντέλα Επικοινωνίας

Σημαντικό ζήτημα στο IoT αποτελεί ο τρόπος διασύνδεσης και επικοινωνίας των συσκευών IoT, είτε μεταξύ τους είτε με τα πληροφοριακά συστήματα που λειτουργούν οι υπηρεσίες και εφαρμογές IoT. Σύμφωνα με τη δημοσίευση του Internet Architecture Board (RFC 7452) υπάρχουν τρία μοντέλα επικοινωνίας στον περιβάλλον του IoT.

2.1.1 Μοντέλο Επικοινωνίας Συσκευής με Συσκευή

Το μοντέλο επικοινωνίας συσκευής με συσκευή αντιπροσωπεύει δύο ή περισσότερες συσκευές που συνδέονται απευθείας και επικοινωνούν μεταξύ τους, χωρίς την παρουσία ενδιάμεσου διαμεσολαβητή. Αυτές οι συσκευές συνδέονται με πλήθος διαφορετικών τρόπων δικτύωσης και συνήθως χρησιμοποιούν πρωτόκολλα, όπως είναι το Bluetooth, το Z-Wave ή το ZigBee για τη δημιουργία άμεσης επικοινωνίας συσκευής με συσκευή. Παράδειγμα της επικοινωνίας συσκευής με συσκευή απεικονίζεται στο Σχ. 2.1.



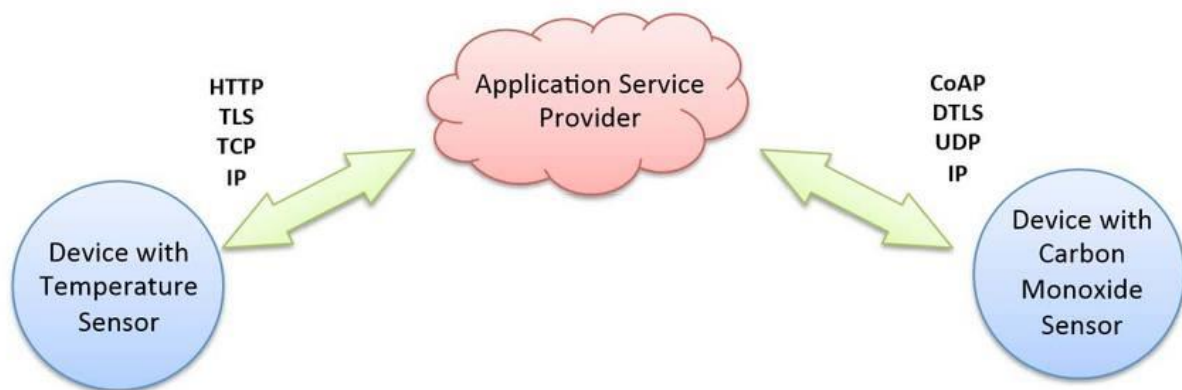
Σχήμα 2.1 Επικοινωνία συσκευής με συσκευή

Τα δίκτυα που ακολουθούν το μοντέλο απευθείας επικοινωνίας μεταξύ των συσκευών παρέχουν τη δυνατότητα σε συσκευές να επικοινωνούν και να ανταλλάσσουν μηνύματα για να επιτύχουν τις λειτουργίες κάποιας υπηρεσίας. Η συχνότερη εφαρμογή του μοντέλου συναντάται στα οικιακά συστήματα αυτοματισμού, όπου η πληροφορία οργανώνεται σε μικρά πακέτα δεδομένων και δεν υπάρχουν υψηλές απαιτήσεις σε ρυθμούς μετάδοσης δεδομένων. Τέτοιες οικιακές συσκευές IoT είναι οι έξυπνες λάμπες και οι έξυπνες κλειδαριές.

Στο μοντέλο επικοινωνίας συσκευής με συσκευή εμφανίζεται το πρόβλημα ανομοιογένειας των συσκευών. Πιο συγκεκριμένα, συσκευές διαφορετικών κατασκευαστών υποστηρίζουν διαφορετικά πρωτόκολλα επικοινωνίας με αποτέλεσμα να μην υπάρχει συμβατότητα μεταξύ των συσκευών. Το γεγονός αυτό ωθεί τους καταναλωτές στην επιλογή προϊόντων του ίδιου κατασκευαστή.

2.1.2 Μοντέλο Επικοινωνίας συσκευής με υπολογιστικό νέφος.

Στο μοντέλο επικοινωνίας συσκευής με υπολογιστικό νέφος, η συσκευή συνδέεται απευθείας με μία υπηρεσία Cloud, όπως παρουσιάζεται στο Σχ. 2.2.



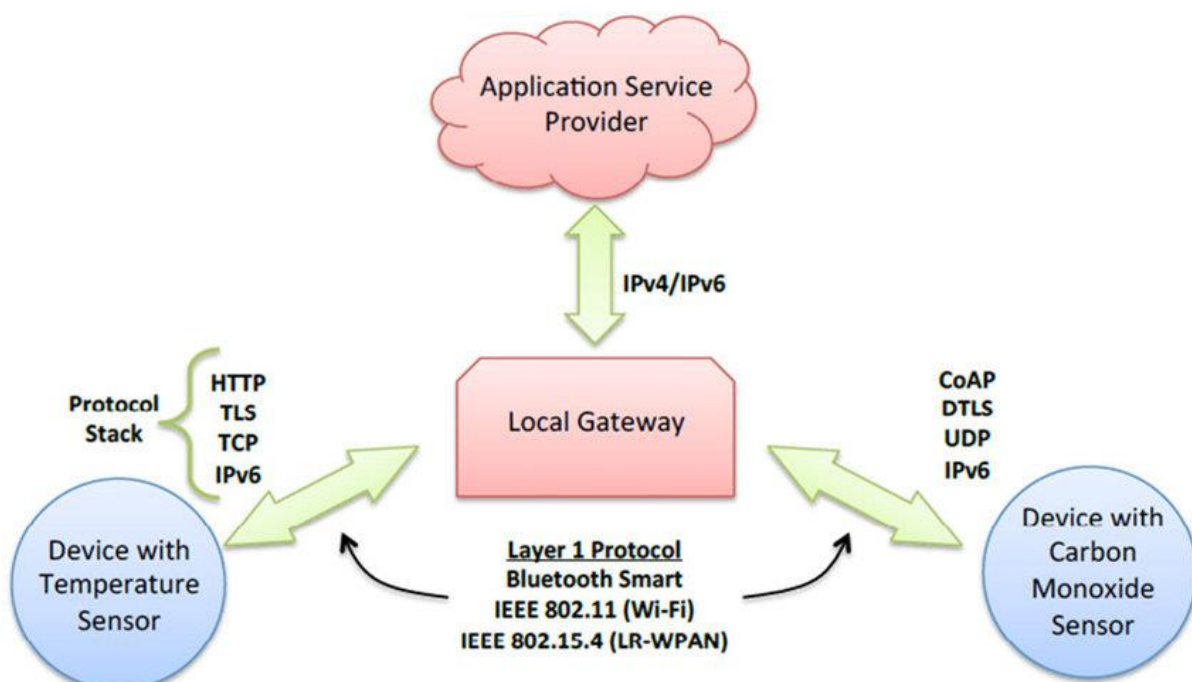
Σχήμα 2.2 Επικοινωνία συσκευής με υπολογιστικό νέφος

Παραδείγματα εφαρμογής του μοντέλου επικοινωνίας μεταξύ της IoT συσκευής και του υπολογιστικού νέφους είναι ο έξυπνος θερμοστάτης και η έξυπνη τηλεόραση. Στην περίπτωση του έξυπνου θερμοστάτη, η συσκευή μεταδίδει δεδομένα σε μία βάση δεδομένων cloud. Στη συνέχεια, γίνεται η ανάλυση της οικιακής κατανάλωσης ενέργειας στο περιβάλλον υπολογιστικού νέφους cloud, ενώ ταυτόχρονα ο χρήστης μπορεί να έχει απομακρυσμένη πρόσβαση στην έξυπνη συσκευή από το smartphone του οποιαδήποτε στιγμή. Όσον αφορά την έξυπνη τηλεόραση, μεταδίδονται για ανάλυση στο cloud πληροφορίες σχετιζόμενες με το περιεχόμενο που παρακολουθεί ο χρήστης και συγχρόνως ενεργοποιούνται οι διαδραστικές δυνατότητες αναγνώρισης φωνής της τηλεόρασης. Κατά συνέπεια, βελτιώνεται η ποιότητα εμπειρίας του τελικού χρήστη της υπηρεσίας, αφού επεκτείνονται οι δυνατότητες των συσκευών που διαθέτει, ακολουθώντας αυτό το μοντέλο επικοινωνίας.

Το μοντέλο της επικοινωνίας μεταξύ των τερματικών συσκευών και του περιβάλλοντος νέφους Cloud, επιλύει τα προβλήματα συμβατότητας του μοντέλου συσκευής προς συσκευή, που αναλύθηκαν στην προηγούμενη παράγραφο, αλλά εισάγει περιορισμούς ως προς τους δικτυακούς πόρους που μπορούν να χρησιμοποιηθούν από την εκάστοτε υπηρεσία.

2.1.3 Μοντέλο επικοινωνίας συσκευής με ενδιάμεσο κόμβο Gateway

Στο μοντέλο επικοινωνίας συσκευής με τον ενδιάμεσο κόμβο Gateway η IoT συσκευή συνδέεται στο Cloud μέσω μίας υπηρεσίας Gateway του στρώματος εφαρμογής (Application Layer Gateway). Αυτό συνεπάγεται την ύπαρξη λογισμικού στο επίπεδο εφαρμογής που λειτουργεί σε μία τοπική συσκευή Gateway, η οποία έχει τον ρόλο του μεσολαβητή ανάμεσα στις συσκευές IoT και τις υπηρεσίες Cloud παρέχοντας ασφάλεια και μετάφραση τόσο πρωτοκόλλων όσο και δεδομένων. Στο Σχ. 2.3 παρουσιάζεται η αρχιτεκτονική του μοντέλου επικοινωνίας μεταξύ της συσκευής και της ενδιάμεσης θύρας Gateway.



Σχήμα 2.3 Επικοινωνία συσκευής με Gateway

Το μοντέλο επικοινωνίας μεταξύ της συσκευής και του ενδιάμεσου κόμβου εντοπίζεται σε υπηρεσίες με πολλές παραλλαγές. Στις περισσότερες των περιπτώσεων, η τοπική συσκευή Gateway είναι ένα έξυπνο κινητό τηλέφωνο

smartphone, που εκτελεί μία εφαρμογή για να επικοινωνεί με μία τερματική IoT συσκευή και αναμεταδίδει δεδομένα σε μία υπηρεσία υπολογιστικού νέφους. Ένα τέτοιο παράδειγμα είναι τα έξυπνα ρολόγια, όπου δεδομένα σχετικά με αθλητικές δραστηριότητες αποστέλλονται στο Cloud μέσω των smartphones, καθώς τα ρολόγια αυτά δεν έχουν την απευθείας δυνατότητα σύνδεσης με το υπολογιστικό νέφος.

Μία άλλη μορφή του μοντέλου είναι οι συσκευές τύπου hub, όπου συναντώνται σε εφαρμογές οικιακού αυτοματισμού. Οι συσκευές τύπου hub είναι συσκευές δικτύωσης φυσικού επιπέδου που χρησιμοποιούνται για τη σύνδεση πολλών συσκευών σε ένα δίκτυο. Αύτη η μορφή του μοντέλου αντιμετωπίζει και το πρόβλημα διαλειτουργικότητας και συμβατότητας μεταξύ των συσκευών. Για παράδειγμα, το SmartThings hub της Samsung είναι μία αυτόνομη συσκευή Gateway που διαθέτει πομποδέκτες Z-Wave και Zigbee για να επικοινωνεί με τις δύο οικογένειες συσκευών.

Γενικά, το μοντέλο επικοινωνίας μεταξύ συσκευής και ενδιάμεσου κόμβου χρησιμοποιείται συχνά για την ενσωμάτωση νέων έξυπνων συσκευών σε ένα σύστημα παλαιού τύπου με συσκευές που δεν είναι εγγενώς διαλειτουργικές και συμβατές μεταξύ τους. Ένα μειονέκτημα αυτής της προσέγγισης είναι ότι η απαραίτητη ανάπτυξη του λογισμικού και του συστήματος Gateway σε επίπεδο εφαρμογής προσθέτει πολυπλοκότητα και κόστος στο συνολικό σύστημα.

2.2 Παράμετροι επιλογής ασύρματων τεχνολογιών

Το δίκτυο και η συνδεσιμότητα είναι επίσης ζητήματα υψίστης σημασίας για το IoT. Τα IoT συστήματα πρέπει να επιτρέπουν συνδέσεις σε μικρής, μεσαίας και μεγάλης αποστάσεις εμβέλειας. Οι τεχνολογίες συνδεσιμότητας στο IoT πρέπει συχνά να ικανοποιούν ένα ευρύ φάσμα απαιτήσεων ποιότητας μετάδοσης, που μπορεί επίσης να χρειαστούν βελτιστοποιήσεις για χαμηλή καθυστέρηση, αποθήκευση και προώθηση της πληροφορίας, κινητικότητα και ροή πληροφορίας. Αυτά τα συστήματα πρέπει να εξετάζουν και περιβαλλοντικές διαταραχές, όπως είναι οι ραδιοπαρεμβολές ή οι εκπομπές από άλλο ηλεκτρονικό εξοπλισμό, οι συνθήκες χαμηλής ισχύος και η συμφόρηση του δικτύου.

Το IoT χρειάζεται αρκετές ασύρματες τεχνολογίες για να ανταποκριθεί πλήρως στις δυνατότητες του. Σήμερα υπάρχουν πολλές τεχνολογίες ασύρματης δικτύωσης

στο IoT, όπου η καθεμιά έχει διαφορετικό σύνολο δυνατοτήτων. Προκύπτουν, όμως, ορισμένα βασικά ζητήματα κατά την επιλογή αυτών των διαφορετικών λύσεων συνδεσιμότητας όπως είναι το φάσμα, η εμβέλεια κάλυψης και η χωρητικότητα του δικτύου, η τοπολογία, η ποιότητα της υπηρεσίας, η διαχείριση του δικτύου και η ασφάλεια.

2.2.1 Φάσμα

Το ασύρματο φάσμα χαρακτηρίζεται είτε ως αδειοδοτημένο είτε χωρίς άδεια. Η πρόσβαση στο αδειοδοτημένο ραδιοφάσμα συνήθως αγοράζεται από την τοπική αυτοδιοίκηση για να παρέχει σε ένα οργανισμό αποκλειστική πρόσβαση σε ένα συγκεκριμένο κανάλι σε μία συγκεκριμένη τοποθεσία. Το κανάλι είναι σε μεγάλο βαθμό απαλλαγμένο από παρεμβολές. Μειονεκτήματα αποτελούν το περιορισμένο φάσμα, η εξαιρετικά ακριβή μίσθωση του καθώς επίσης και το γεγονός ότι οι ασύρματες ζώνες συνδεσιμότητας που επιτρέπονται σε μία χώρα ενδέχεται να μην είναι διαθέσιμες σε μία άλλη γεωγραφική τοποθεσία για την ίδια χρήση. Το μη αδειοδοτημένο ραδιοφάσμα είναι γενικά ανοικτό και διαθέσιμο σε οποιονδήποτε, χωρίς να απαιτούνται αποκλειστικά δικαιώματα. Το βασικό του μειονέκτημα είναι ότι τα ανταγωνιστικά συστήματα μπορεί να καταλαμβάνουν το ίδιο κανάλι σε διαφορετικά επίπεδα ισχύος, που οδηγούν σε παρεμβολές. Οι παρεμβολές αυτές αντιμετωπίζονται με τεχνικές, όπως είναι η προσαρμοστική διαμόρφωση και ο αυτόματος έλεγχος ισχύος μετάδοσης.

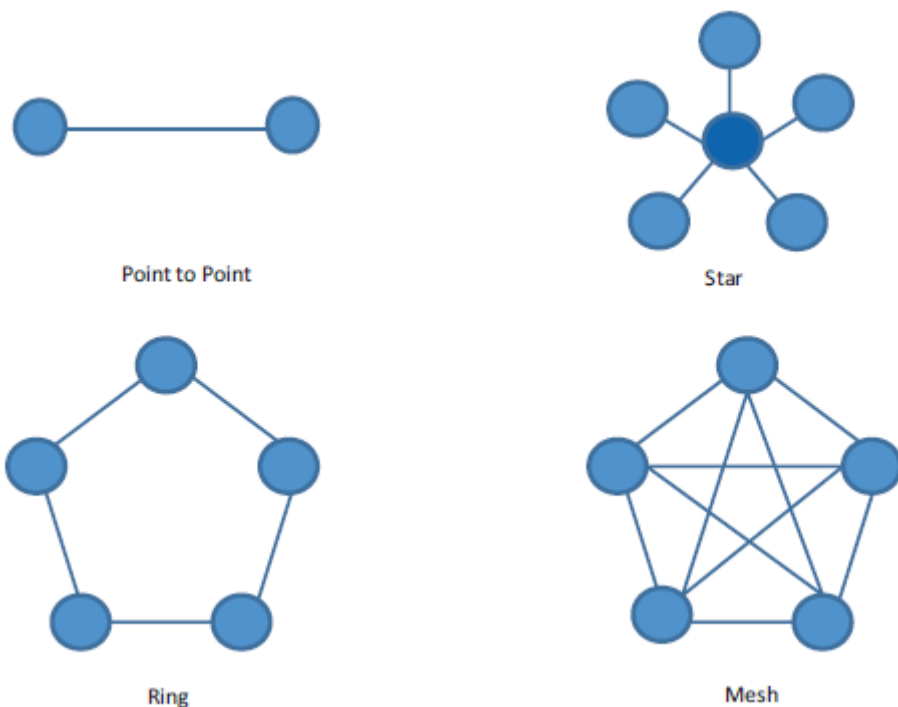
2.2.2 Εμβέλεια και χωρητικότητα

Αρκετοί παράγοντες επηρεάζουν το μέγεθος της χωρητικότητας δεδομένων που μπορούν να παραδοθούν σε μία συγκεκριμένη απόσταση. Αυτοί οι παράγοντες περιλαμβάνουν το φάσμα, το εύρος ζώνης του καναλιού, την ισχύ του πομπού, τον θόρυβο και το μέγεθος της κεραίας. Σε γενικές γραμμές, όσο μεγαλύτερη είναι η απόσταση που πρέπει να καλυφθεί τόσο χαμηλότερη είναι η χωρητικότητα των δεδομένων. Η μετάδοση σε μεγάλες αποστάσεις επιτυγχάνεται με τη χρήση καναλιού στενής ζώνης, χαμηλής συχνότητας και κεραίας με μεγάλο κέρδος, ενώ υψηλά επίπεδα χωρητικότητας μπορούν να επιτευχθούν με την επιλογή ευζωνικών καναλιών σε περιπτώσεις περιορισμένης εμβέλειας. Για τη βέλτιστη απόδοση κάθε εφαρμογής πρέπει να επιλέγεται ο καλύτερος συνδυασμός μεγέθους καναλιού,

κεραίας, ραδιοσυχνότητας, ισχύος εκπομπής και σχήματος διαμόρφωσης για την επίτευξη της επιθυμητής χωρητικότητας.

2.2.3 Τοπολογία δικτύου

Η τοπολογία δικτύου είναι η διάταξη των στοιχείων σε ένα δίκτυο, συμπεριλαμβανομένων των κόμβων και των συνδέσεων μεταξύ τους. Οι κοινές τοπολογίες δικτύου που χρησιμοποιούνται για την ασύρματη συνδεσιμότητα απεικονίζονται στο Σχ. 2.4.



Σχήμα 2.4 Τοπολογίες δικτύου

1. Σημείου προς σημείο

Οι τοπολογίες σημείου προς σημείο είναι καταλληλότερες για την παροχή πολλών δυνατοτήτων σε μεγάλες αποστάσεις, ιδιαίτερα όταν οι αποστάσεις είναι ευαίσθητες στις παρεμβολές. Επίσης, χρησιμοποιούνται και για συνδέσεις μικρής εμβέλειας.

2. Δακτύλιος

Οι τοπολογίες δακτυλίου είναι κατάλληλες για ανθεκτικές λειτουργίες που χρησιμοποιούν υψηλής χωρητικότητας συνδέσεις για να καλύψουν μία μεγάλη περιοχή.

3. Πλέγμα

Τα δίκτυα που ακολουθούν την τοπολογία πλέγματος δημιουργούνται χρησιμοποιώντας πολλαπλές συνδέσεις σημείου προς σημείο ή με εξειδικευμένα πρωτόκολλα, που επιτρέπουν πολλαπλές διαδρομές από ένα σημείο σε ένα άλλο σημείο. Τα δίκτυα πλέγματος έχουν το μειονέκτημα ότι κάθε πακέτο πραγματοποιεί πολλά άλματα οδηγώντας σε καθυστερήσεις στην υποδομή του δικτύου.

4. Αστέρας

Η τοπολογία αστέρα ή σημείου προς πολλαπλά σημεία διαφοροποιείται από την τοπολογία σημείου προς σημείο, καθώς ο αριθμός των κόμβων κλιμακώνεται και οι κόμβοι τοποθετούνται ο ένας δίπλα στον άλλο χωρίς να υπάρχουν παρεμβολές.

2.2.4 Ποιότητα υπηρεσίας

Οι κατασκευαστές και οι χειριστές συστημάτων πρέπει να κάνουν την αποδοτικότερη χρήση του διαθέσιμου φάσματος με την ανάπτυξη πολλών υπηρεσιών στο ίδιο δίκτυο και ταυτόχρονα να εξασφαλίζεται ότι οι πληροφορίες που είναι κρίσιμες για αποστολή μεταδίδονται με την υψηλότερη προτεραιότητα. Ένα δίκτυο πρέπει να υποστηρίζει πολλαπλά επίπεδα ποιότητας υπηρεσίας και να έχει την ικανότητα ταξινόμησης της κίνησης της πληροφορίας. Με αυτόν τον τρόπο, ο αποστολέας του πακέτου δεδομένων μπορεί να σηματοδοτήσει την προτεραιότητα και το δίκτυο να διαβεβαιώσει την παράδοση του πακέτου.

2.2.5 Διαχείριση δικτύου

Η δυνατότητα διαχείρισης ενός δικτύου έχει άμεσο αντίκτυπο στο συνολικό κόστος ιδιοκτησίας ενός συστήματος IoT. Τα συστήματα δικτύωσης, που επιτρέπουν την κεντρική διαχείριση της ρύθμισης παραμέτρων, την ανίχνευση βλαβών, τη ρύθμιση επιδόσεων και τη συνεχή παρακολούθηση και την επικύρωση ασφαλείας ελαχιστοποιούν το κόστος και την προσπάθεια. Μειώνουν, επίσης, τις μη προγραμματισμένες διακοπές λειτουργίας και αυξάνουν τη διαθεσιμότητα και την αξιοπιστία του συστήματος.

2.2.6 Ασφάλεια

Η ασφάλεια των ασύρματων επικοινωνιών αυξάνεται σημαντικά. Η κρυπτογραφία αποτελεί μία τεχνική που προστατεύει τις συνδέσεις. Εκτός αυτού, απαιτούνται

ασφαλείς διεπαφές διαχείρισης μέσω των πρωτοκόλλων HTTPS και SNMP. Τα συστήματα πρέπει να παρέχουν τη δυνατότητα δημιουργίας πολλαπλών λογαριασμών χρηστών με κανόνες πολυπλοκότητας στους κωδικούς πρόσβασης.

2.3 Λύσεις συνδεσιμότητας για μικρές αποστάσεις

2.3.1 RFID

Το RFID είναι μία τεχνολογία ταυτοποίησης στην οποία μία ετικέτα RFID μεταφέρει δεδομένα σε πραγματικό χρόνο, τα οποία διαβάζονται από έναν αναγνώστη RFID. Με τον όρο ετικέτα εννοείται ένα μικρό υπολογιστικό σύστημα με ενσωματωμένη κεραία. Η ετικέτα μεταδίδει τα αποθηκευμένα δεδομένα μέσω ραδιοκυμάτων. Οι ετικέτες RFID διακρίνονται σε ενεργητικές και παθητικές. Οι πρώτες τροφοδοτούνται από κάποια πηγή ενέργειας, ενώ οι δεύτερες αντλούν ενέργεια από τα ηλεκτρομαγνητικά κύματα που εκπέμπονται από τον αναγνώστη. Η τεχνολογία RFID χρησιμοποιείται σε διάφορες εφαρμογές, όπως είναι η διαχείριση της εφοδιαστικής αλυσίδας, ο έλεγχος πρόσβασης, ο έλεγχος της ταυτότητας, η παρακολούθηση και ο εντοπισμός αντικειμένων.

2.3.2 NFC

Το NFC είναι μία τεχνολογία ασύρματης επικοινωνίας πολύ μικρής εμβέλειας και ο σχεδιασμός της βασίζεται σε υπάρχουσες υψηλές συχνότητες, ανέπαφες τεχνολογίες και τεχνολογίες RFID. Το NFC δημιουργεί μία ασύρματη σύνδεση μικρής εμβέλειας και υποστηρίζει τρεις τρόπους λειτουργίας, οι οποίοι είναι η εξομοίωση καρτών, η ανάγνωση ή η εγγραφή και η P2P. Η τεχνολογία NFC επιτρέπει ένα ευρύ φάσμα περιπτώσεων χρήσης, όπως είναι η πρόσβαση χωρίς κλειδί, το ηλεκτρονικό πορτοφόλι σε smartphone και οι έξυπνες ετικέτες για ιατρικές εφαρμογές. Αυτό οφείλεται στην ευκολία εφαρμογής και τη δυνατότητα ενσωμάτωσης ετικετών σε πιστωτικές κάρτες, smartphones και άλλες φορητές συσκευές.

	Εμβέλεια Κάλυψης	Συχνότητα	Ρυθμός Μετάδοσης
RFID	3-5 m	125 kHz 13.56 MHz 902-928 MHz	4 Mbps
NFC	0-10 cm	125 kHz 13.56 MHz 860 MHz	106-424 Kbps

Πίνακας 2.1. Χαρακτηριστικά των RFID και NFC



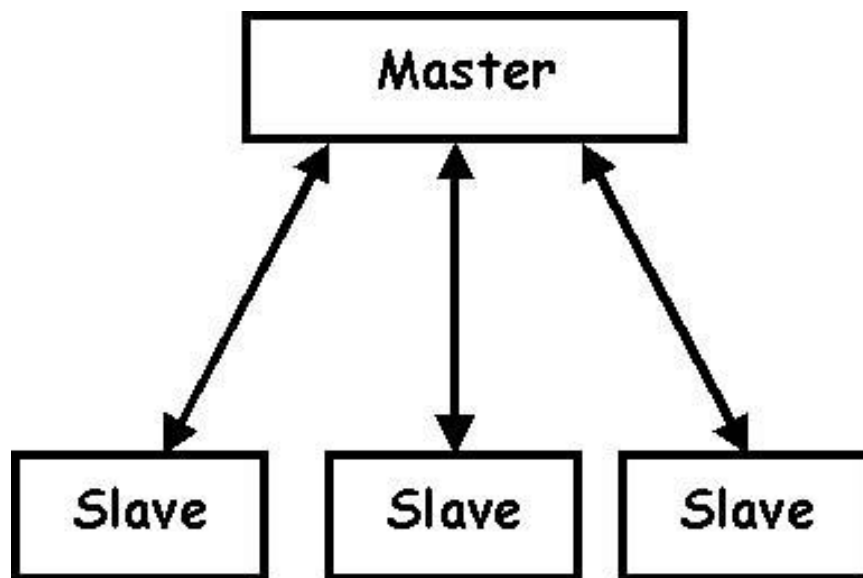
Σχήμα 2.5 Εφαρμογές του NFC στο IoT

2.3.3 Bluetooth

Το Bluetooth είναι μία τεχνολογία ασύρματης επικοινωνίας μικρής εμβέλειας όπου υπάρχει συνεχής μετάδοση δεδομένων. Ακολουθεί την αρχιτεκτονική master/slave, στην οποία οι τερματικές συσκευές τύπου slave επικοινωνούν με μία συσκευή τύπου master που έχει ρόλο διαχειριστή. Έχει σχεδιαστεί για να συνδέει ασύρματα περιφερειακές συσκευές ενός υπολογιστή, μεταφορά δεδομένων μεταξύ κινητών τηλεφώνων και άλλων ασυρμάτων φορητών συσκευών συμπεριλαμβανομένων των ακουστικών, των έξυπνων ρολογιών και άλλων wearable συσκευών.

2.3.4 Bluetooth low energy

Το Bluetooth Low Energy είναι μία βελτιωμένη έκδοση του Bluetooth. Έχει σχεδιαστεί για μικρής εμβέλειας, μικρού εύρους ζώνης και μικρής καθυστέρησης εφαρμογές των υπηρεσιών IoT. Πλεονεκτεί της κλασσικής έκδοσης επειδή περιλαμβάνει χαμηλότερη κατανάλωση ενέργειας και μικρότερο χρόνο εγκατάστασης σύνδεσης. Ακολουθεί και αυτό την αρχιτεκτονική master/slave και προσφέρει δυο ειδών πλαίσια, ένα διαφημιστικό πλαίσιο και ένα πλαίσιο δεδομένων. Το πλαίσιο διαφήμισης χρησιμοποιείται από τις συσκευές τύπου slave προκειμένου να ανακαλύψουν ένα κανάλι επικοινωνίας και να στείλουν τα πλαίσια δεδομένων. Η συσκευή τύπου master ανιχνεύει τα παραπάνω διαφημιστικά πλαίσια και συντονίζει τις συνδέσεις μεταξύ των κατάλληλων συσκευών τύπου slave. Μετά τη σύνδεση, η συσκευή τύπου master ενημερώνει τις συσκευές τύπου slave για τον κύκλο αφύπνισης. Οι συσκευές τύπου slave είναι σε λειτουργία μόνο όταν επικοινωνούν και αδρανοποιούνται όταν δεν επικοινωνούν, εξασφαλίζοντας με αυτόν το τρόπο χαμηλά επίπεδα κατανάλωσης ενέργειας.



Σχήμα 2.6 Η αρχιτεκτονική Master/Slave

2.3.5 6LoWPAN

Το 6LoWPAN είναι το πρώτο και πλέον συνηθισμένο πρότυπο από τα IoT πρωτόκολλα επικοινωνίας, δεδομένου ότι είναι ένα πρότυπο που βασίζεται σε IP

πρωτόκολλο διασύνδεσης. Μπορεί να συνδεθεί απευθείας με άλλο δίκτυο IP χωρίς ενδιάμεσες οντότητες, όπως μεταφραστικές πύλες ή διακομιστές μεσολάβησης. Πρόκειται για ένα στρώμα προσαρμογής μεταξύ του φυσικού στρώματος και του στρώματος δικτύου, που διαχειρίζεται τη διαλειτουργικότητα ανάμεσα στο πρότυπο IEEE 802.15.4 και το πρωτόκολλο IPv6. Αυτό επιτυγχάνεται ενθυλακώνοντας τις μεγάλες επικεφαλίδες του IPv6 στα μικρά πακέτα του προτύπου IEEE 802.15.4. Το 6LoWPAN επιτρέπει σε αρκετά μικρές συσκευές χαμηλής ισχύος να επικοινωνούν απευθείας με οποιονδήποτε άλλο διακομιστή ή συσκευή που βασίζεται στο IP. Το πρότυπο αυτό είναι κατάλληλο για κτηριακό και οικιακό αυτοματισμό.

2.3.6 Zigbee

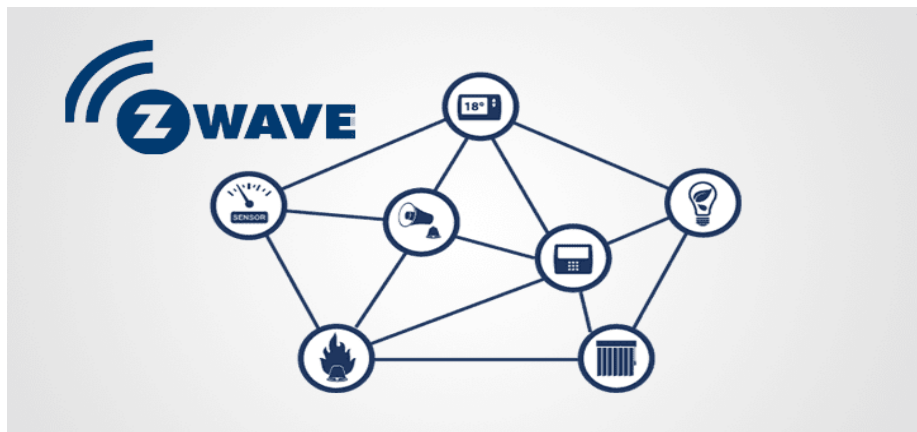
Το ZigBee έχει σχεδιαστεί σύμφωνα με το πρότυπο IEEE 802.15.4, το οποίο σχετίζεται με το σχεδιασμό ασύρματων προσωπικών δικτύων χαμηλής ενεργειακής κατανάλωσης. Μπορεί να υποστηρίξει πολλές τοπολογίες και συσκευές διαφορετικών κατασκευαστών, παρέχοντας ικανοποιητικούς ρυθμούς μετάδοσης, ασφάλεια στην επικοινωνία, χαμηλή κατανάλωση ενέργειας και ανταλλαγή δεδομένων σε αραιά χρονικά διαστήματα. Ένα δίκτυο με βάση την τεχνολογία Zigbee αποτελείται από συσκευές που έχουν ρολό συντονιστή, συσκευές υπεύθυνες για τη δρομολόγηση στο δίκτυο και τερματικές συσκευές. Οι εφαρμογές με βάση το Zigbee απευθύνονται κυρίως στο έξυπνο σπίτι και κτήριο, με εστίαση στον φωτισμό, στην ασφάλεια του σπιτιού ή του κτηρίου και στον έλεγχο συσκευών εξαιρισμού, θέρμανσης και κλιματισμού.



Σχήμα 2.7 ZigBee IoT

2.3.7 Z-Wave

Το Z-Wave είναι ένα ακόμα πρωτόκολλο επικοινωνίας που ακολουθεί το πρότυπο IEEE 802.15.4, σχεδιασμένο για οικιακό αυτοματισμό. Είναι κατάλληλο για εφαρμογές IoT που απαιτούνται μικρά πακέτα πληροφορίας, όπως είναι ο έλεγχος του φωτισμού, της ενέργειας και φορητών συσκευών υγειονομικής περιθάλψης. Χρησιμοποιεί το CSMA/CA για ανίχνευση συγκρούσεων και μηνύματα ACK για αξιόπιστη μετάδοση. Ακολουθεί την αρχιτεκτονική master/slave, στην οποία η συσκευή τύπου master είναι υπεύθυνη για τον έλεγχο των συσκευών τύπου slave, την αποστολή εντολών, την διαχείριση και την οργάνωση του δικτύου.



Σχήμα 2.8 Z-Wave IoT

2.3.8 ANT & ANT+

Το ANT είναι μία ιδιόκτητη ασύρματη τεχνολογία χαμηλής ισχύος σχεδιασμένη και ανεπτυγμένη για ένα ευρύ φάσμα εφαρμογών σε δίκτυα ασύρματων αισθητήρων. Είναι κατάλληλο για αισθητήρες με χαμηλές απαιτήσεις σε ρυθμούς μετάδοσης, που τροφοδοτούνται με μπαταρίες και ικανό να υποστηρίξει αρκετές τοπολογίες καλύπτοντας αποστάσεις έως και τα 30 μέτρα. Το ANT αποτελεί μία λύση για ασύρματη συνδεσιμότητα σε περιπτώσεις που απαιτείται εξαιρετικά χαμηλή κατανάλωση ενέργειας, όπως είναι η παρακολούθηση της υγείας και της αθλητικής δραστηριότητας.

Το ANT+ διευκολύνει την ασύρματη επικοινωνία συσκευών από διαφορετικές εταιρείες παρέχοντας προκαθορισμένες παραμέτρους δικτύου και δομές ωφέλιμου φορτίου δεδομένων, συμπεριλαμβανομένου του προφίλ των συσκευών. Τα υπάρχοντα προφίλ συσκευών ANT+ αποτελούνται από την παρακολούθηση των

καρδιακών παλμών, της ταχύτητας με βάση το διασκελισμό και την απόσταση, την ταχύτητα και τη δύναμη κατά την ποδηλασία. Αρκετά επερχόμενα προφίλ συσκευών περιλαμβάνουν μετρήσεις βάρους, υπολογισμούς της ταχύτητας και της απόστασης για επιπλέον αθλήματα και αισθητήρα περιβάλλοντος.

2.3.9 Thread

Το Thread βασίζεται στα πρωτόκολλα IPv6, 6LoWPAN και IEEE 802.15.4 και προορίζεται για οικιακό αυτοματισμό. Λειτουργεί ως συμπλήρωμα του Wi-Fi, καθώς υποστηρίζει τη σύνδεση αρκετών τερματικών συσκευών. Προσφέρει χαμηλούς ρυθμούς μετάδοσης και χαμηλές καθυστερήσεις στην επικοινωνία μεταξύ των συσκευών. Το Thread επιτυγχάνει υψηλή αξιοπιστία αφού διαθέτει αυτοδιορθωτικούς μηχανισμούς επιτρέποντας στο δίκτυο να αναμορφωθεί δυναμικά σε οποιαδήποτε αποτυχία. Οι μηχανισμοί εμπεριέχουν πολλαπλές συσκευές Gateway για τη σύνδεση του τοπικού δικτύου με το διαδίκτυο, την ύπαρξη εφεδρικών συσκευών τύπου master για την ομαλή λειτουργία του τοπικού δικτύου και την ανταλλαγή μηνυμάτων σχετικά με διευθύνσεις γειτονικών συσκευών, πληροφορίες δρομολόγησης, ενημέρωση των δεδομένων του δικτύου, πληροφορίες ασφαλείας και πληροφορίες συσκευών, όπως είναι ο κύκλος αφύπνισης.

2.3.10 EnOcean

Το EnOcean είναι μία ασύρματη τεχνολογία εξοικονόμησης ενέργειας που χρησιμοποιείται κυρίως για αυτοματοποίηση κτηρίων, αλλά μπορεί να χρησιμοποιηθεί και για άλλες εφαρμογές του IoT. Η βασική ιδέα είναι η μετατροπή της κινητικής, της ηλιακής ή της ενέργειας που προέρχεται από διαφορά θερμοκρασίας σε χρήσιμη ενέργεια που τροφοδοτεί τις συσκευές IoT. Αυτό το πρωτόκολλο έχει ένα σχετικά μικρό μέγεθος πακέτου και χρησιμοποιείται ως επί το πλείστον στις εφαρμογές θέρμανσης, εξαερισμού, κλιματισμού και τον έλεγχο του φωτισμού.

2.3.11 WirelessHART

Το WirelessHART απευθύνεται σε βιομηχανικές εφαρμογές και είναι σχεδιασμένο για να λειτουργεί σε περιβάλλον με υψηλά επίπεδα ηλεκτρομαγνητικών παρεμβολών. Χρησιμοποιεί προχωρημένους αλγόριθμους κρυπτογράφησης για την

κρυπτογράφηση μηνυμάτων και τον έλεγχο της ακεραιότητάς τους. Πρόκειται για μία τεχνολογία που μπορεί να παρέχει διαγνωστικές πληροφορίες των συσκευών σε πραγματικό χρόνο και να επεξεργάζεται δεδομένα για τα συστήματα διαχείρισης περιουσιακών στοιχείων. Βασίζεται στο πρότυπο 802.15.4, ενώ απαιτείται και σύνδεση μέσω καλωδίου Ethernet.

2.3.12 Wi-Fi

Το Wi-Fi ή αλλιώς πρότυπο 802.11 αποτελεί την πλέον διαδεδομένη ασύρματη τεχνολογία. Πρόκειται για έναν ασφαλή και αξιόπιστο τρόπο διασύνδεσης συσκευών με εμβέλεια κάλυψης που αγγίζει τα 100 μέτρα, η οποία αυξάνεται με την προσθήκη αναμεταδότη. Προσφέρει υψηλούς ρυθμούς μετάδοσης και η πλειοψηφία των συσκευών υποστηρίζουν την συγκεκριμένη τεχνολογία. Είναι κατάλληλη για οικιακό αυτοματισμό, αλλά αυτή η τεχνολογία έχει υψηλή κατανάλωση ενέργειας. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα η σύνδεση Wi-Fi να μην μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε περιπτώσεις όπου οι συσκευές τροφοδοτούνται από μη επαναφορτιζόμενες μπαταρίες.

	Εμβέλεια Κάλυψης	Συχνότητα	Ρυθμός Μετάδοσης	Πλήθος Συσκευών Ανά Σημείο Πρόσβασης
Bluetooth	10–100 m	2.4 GHz	3 Mbps	8
Bluetooth Low Energy	< 30 m	2.4 GHz	1 Mbps	8
Zigbee	10–100 m	868 MHz 915 MHz 2.4 GHz	250 Kbps	250
Z-Wave	< 30 m	868–908 MHz	40 Kbps	232

ANT & ANT+	< 30 m	2.4 GHz	1 Mbps	8
Thread	< 30 m	2.4 GHz	250 Kbps	250
EnOcean	< 30 m	868–928 MHz	125 Kbps	100
WirelessHART	< 225 m	2.4 GHz	250 Kbps	250
Wi-Fi	30 – 100 m	2.4 GHz 5GHz	150–200 Mbps	250

Πίνακας 2.2. Χαρακτηριστικά τεχνολογιών για μικρές αποστάσεις

2.4 Λύσεις συνδεσιμότητας για μεγάλες αποστάσεις

2.4.1 Wi-Fi HaLow

Το Wi-Fi HaLow ή αλλιώς πρότυπο 802.11ah είναι μία έκδοση του Wi-Fi που απευθύνεται σε IoT συσκευές με χαμηλές απαιτήσεις σε ρυθμούς μετάδοσης και ενέργεια. Επιπλέον, επιτρέπει την μετάδοση δεδομένων σε μεγαλύτερες αποστάσεις σε σχέση με το κλασσικό Wi-Fi. Ακολουθεί παρόμοια λογική με αυτή του Bluetooth Low Energy όσον αφορά το χρόνο που είναι ενεργή μία συσκευή για να επιτευχθεί η χαμηλή κατανάλωση ενέργειας. Είναι κατάλληλο για περιπτώσεις όπου η μετάδοση δεδομένων γίνεται σε σύντομες, χωριστές και εκρηκτικές κινήσεις πληροφορίας, οι ενεργειακές απαιτήσεις είναι χαμηλές και οι αποστάσεις μεγάλες. Τέτοιες περιπτώσεις είναι τα συστήματα ασφάλειας και οι έξυπνοι μετρητές, ενώ μπορεί να αξιοποιηθεί και στον τομέα της έξυπνης πόλης, όπως είναι για παράδειγμα η εύρεση θέσης στάθμευσης.

	Εμβέλεια Κάλυψης	Συχνότητα	Ρυθμός Μετάδοσης	Πλήθος Συσκευών Ανά Σημείο Πρόσβασης
Wi-Fi HaLow	< 1 km	900 MHz	150 Kbps-347 Mbps	8191

Πίνακας 2.3. Χαρακτηριστικά Wi-Fi HaLow

2.4.2 Κυβελωτά δίκτυα

2.4.2.1 GSM, 3G, 4G

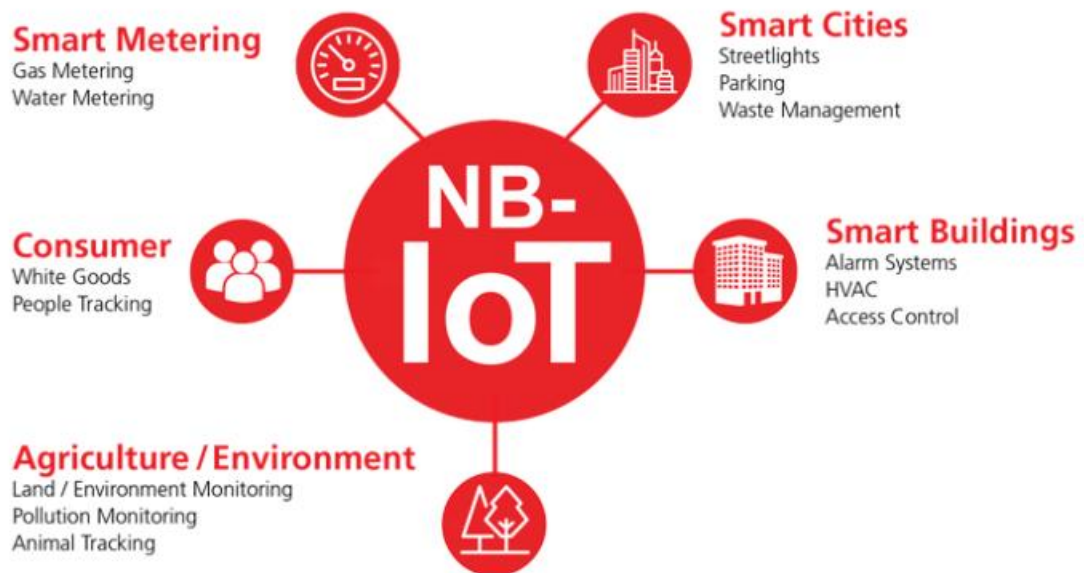
Κάθε εφαρμογή IoT που απαιτεί λειτουργία σε μεγάλες αποστάσεις μπορεί να επωφεληθεί από τις δυνατότητες των κυβελωτών δικτύων επικοινωνίας GSM, 3G και 4G. Ενώ τα κυβελωτά δίκτυα είναι σαφώς ικανά να αποστείλουν μεγάλες ποσότητες δεδομένων, ειδικά το 4G, η δαπάνη και επίσης η κατανάλωση ενέργειας είναι υπερβολικά υψηλή για πολλές εφαρμογές. Μπορεί να είναι, όμως, ιδανική επιλογή για δίκτυα που βασίζονται σε αισθητήρες χαμηλού εύρους ζώνης, τα οποία θα στείλουν χαμηλά ποσά δεδομένων μέσω του Διαδικτύου.

2.4.2.2 5G

Το 5G προσφέρει τον μοναδικό συνδυασμό συνδεσιμότητας υψηλής ταχύτητας, πολύ μικρής καθυστέρησης και καθολικής κάλυψης, καθιστώντας το κατάλληλο για την υποστήριξη περιπτώσεων χρήσης του IoT. Το 5G επιτρέπει τον έλεγχο συσκευών από απόσταση σε εφαρμογές όπου η απόδοση του δικτύου σε πραγματικό χρόνο είναι κρίσιμη σχετικά με τις ανεκτές καθυστερήσεις στη μετάδοση δεδομένων. Έτσι, μπορεί να βελτιώσει την πρόσβαση στην υγειονομική περίθαλψη επιτρέποντας την απομακρυσμένη χειρουργική επέμβαση, ενώ μπορεί να στηρίξει έξυπνα οχήματα και υποδομές μεταφορών, όπως τα συνδεδεμένα αυτοκίνητα, όπου η διακύμανση της καθυστέρησης ενδέχεται να σημαίνει τη διαφορά μεταξύ της ομαλής ροής της κυκλοφορίας και του ατυχήματος.

2.4.2.3 NB-IoT

Το NB-IoT, επίσης γνωστό ως LTE Cat NB1, είναι μία τεχνολογία LPWA που λειτουργεί σχεδόν οπουδήποτε. Παρέχει αρκετά χαμηλά επίπεδα κατανάλωσης ενέργειας, εξαιρετικά εκτεταμένη εμβέλεια κάλυψης σε κτήρια και υπόγεια και εύκολη ενσωμάτωση στο υπάρχον κυψελωτό δίκτυο κινητής τηλεφωνίας. Δεδομένου ότι λειτουργεί σε αδειοδοτημένο φάσμα είναι ασφαλές και αξιόπιστο, παρέχοντας εγγυημένη ποιότητα υπηρεσιών. Είναι βελτιστοποιημένο για εφαρμογές που χρειάζονται να μεταδίδουν μικρές ποσότητες δεδομένων για μεγάλες χρονικές περιόδους. Το NB-IoT αποτελεί μία υποψήφια τεχνολογία διασύνδεσης IoT για τις εφαρμογές που παρουσιάζονται στο Σχ. 2.9.

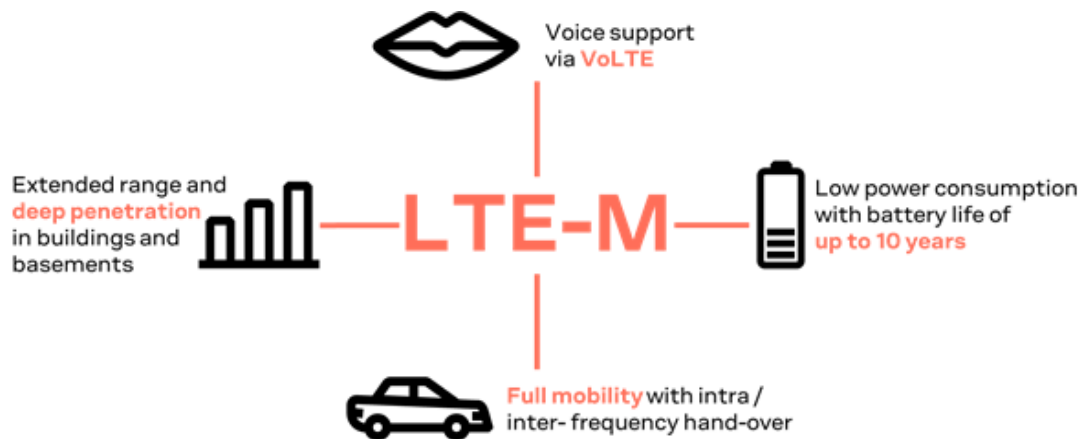


Σχήμα 2.9 Εφαρμογές του NB-IoT

2.4.2.4 LTE-M

Το LTE-M είναι μία κυψελωτή τεχνολογία ειδικά σχεδιασμένη για τις ανάγκες των εφαρμογών του IoT και των M2M επικοινωνιών. Πρόκειται για μία ακόμα τεχνολογία δικτύωσης LPWA που προσφέρει ικανοποιητικούς ρυθμούς μετάδοσης δεδομένων. Στα βασικά χαρακτηριστικά του LTE-M περιλαμβάνονται τα χαμηλά επίπεδα ενεργειακής κατανάλωσης, η καλύτερη κάλυψη εντός των κτηρίων σε σύγκριση με τις τυπικές κυψελωτές τεχνολογίες, όπως είναι τα 2G, 3G και 4G, καθώς επίσης και η πλήρης κινητικότητα. Το γεγονός ότι χειρίζεται τις διακυβελικές και ενδοκυβελικές μεταπομπές με αποτελεσματικό τρόπο καθιστά το LTE-M κατάλληλο για αρκετές

εφαρμογές, όπως είναι η παρακολούθηση οχημάτων, η παρακολούθηση περιουσιακών στοιχείων, η τηλεματική, η διαχείριση στόλου και η ασφάλιση βάσει χρήσης.



Σχήμα 2.10 Ιδιότητες της LTE-M τεχνολογίας

2.4.2.5 EC-GSM

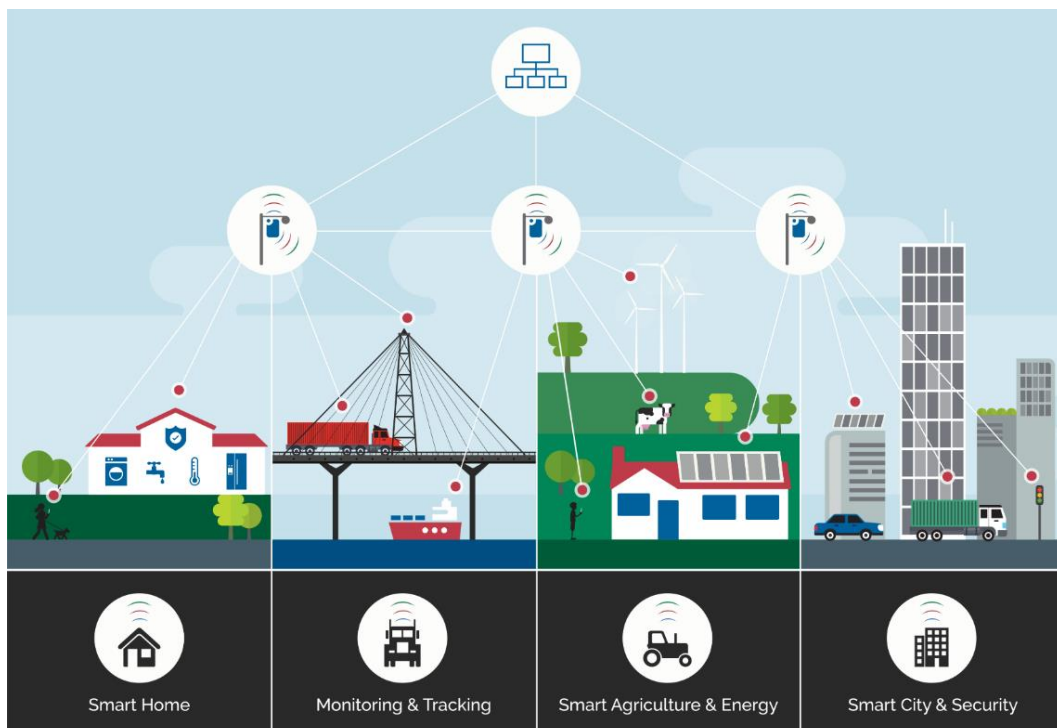
Το EC-GSM είναι μία επιπλέον κυψελωτή τεχνολογία LPWA. Βασίζεται στο eGPRS και έχει σχεδιαστεί ως ένα κυψελωτό σύστημα υψηλής χωρητικότητας, μεγάλης εμβέλειας, χαμηλής κατανάλωσης ενέργειας και χαμηλής πολυπλοκότητας για επικοινωνίες στο περιβάλλον του IoT. Βασικό πλεονέκτημα του EC-GSM είναι ότι μπορεί να συνυπάρχει με τα 2G, 3G και 4G δίκτυα κινητής τεχνολογίας. Αυτό είναι εφικτό με μία αναβάθμιση λογισμικού στους σταθμούς βάσης. Έτσι, το EC-GSM επωφελείται από όλες τις δυνατότητες τις κινητής τηλεφωνίας, όπως είναι η ασφάλεια, η ιδιωτικότητα, η υποστήριξη της εμπιστευτικότητας των χρηστών, ο έλεγχος ταυτότητας των οντοτήτων, η ακεραιότητα των δεδομένων και η αναγνώριση του κινητού εξοπλισμού. Το EC-GSM είναι ικανό να υποστηρίξει ένα ευρύ φάσμα περιπτώσεων χρήσης του IoT παρόμοιες με αυτές των NB-IoT και LTE-M.

	Εμβέλεια Κάλυψης	Συχνότητα	Ρυθμός Μετάδοσης	Πλήθος Συσκευών
NB-IoT	< 15 km	LTE Bands	< 250 Kbps	100000/κυψέλη
LTE-M	< 11 km	LTE Bands	1 Mbps	1000000/km ²
EC-GSM	< 15 km	GSM Bands	20 Kbps	50000/κυψέλη

Πίνακας 2.4. Χαρακτηριστικά των αδειοδοτημένων κυψελωτών τεχνολογιών

2.4.3 Low Power Wide Area Network

Οι τεχνολογίες δικτύου ευρείας περιοχής και χαμηλής ισχύος έχουν δυνατότητα να παρέχουν κάλυψη σε μεγάλες γεωγραφικές περιοχές. Παρέχουν συνδεσιμότητα για συσκευές και εφαρμογές που απαιτούν χαμηλή κινητικότητα, χαμηλές ταχύτητες και σπάνια μεταφορά δεδομένων, όπως είναι οι αισθητήρες. Οι τεχνολογίες LPWAN συμπληρώνουν το χάσμα μεταξύ της κινητής τηλεφωνίας και των ασύρματων δικτύων μικρής εμβέλειας και έχουν σχεδιαστεί για M2M επικοινωνίες. Οι συσκευές LPWAN έχουν μεγάλη διάρκεια ζωής μπαταρίας, επειδή μεταδίδουν μόνο μικρά πακέτα δεδομένων σε σπάνια χρονικά διαστήματα. Οι λύσεις LPWAN παρέχουν μία ευρεία περιοχή κάλυψης, που δεν περιορίζεται από την απόσταση μεταξύ των σημείων πρόσβασης με τη χρήση νέων τεχνικών διαμόρφωσης και επιλογής συχνότητας. Απαιτούν λιγότερα σημεία πρόσβασης ανά περιοχή από τις παραδοσιακές ασύρματες τεχνολογίες κινητής τηλεφωνίας. Όμως, δεν υπάρχει ένα ενιαίο πρότυπο για τα LPWAN και υπάρχουν διάφορες ανταγωνιστικές τεχνολογίες, που παρέχουν διαφορετικά επίπεδα κάλυψης και χωρητικότητας.



Σχήμα 2.11 Εφαρμογές που υποστηρίζουν τα LPWAN

εφαρμογές που το δίκτυο χειρίζεται μικρές ποσότητες δεδομένων με σπάνιες και εκρηκτικές κινήσεις πληροφορίας. Είναι κατάλληλη για διάφορες εφαρμογές M2M που αναμένεται να περιλαμβάνουν έξυπνους μετρητές, παρακολούθηση ασθενών, συσκευές ασφαλείας, φωτισμό οδών και περιβαλλοντικούς αισθητήρες.

2.4.3.3 Weightless

Το Weightless είναι μία ακόμα τεχνολογία δικτύου ευρείας κάλυψης και χαμηλής ισχύος για εφαρμογές IoT. Έχει δυο σύνολα προτύπων το Weightless-N και Weightless-W. Το Weightless-N αναπτύχθηκε αρχικά για να υποστηρίξει χαμηλού κόστους, χαμηλής ισχύος επικοινωνία M2M χρησιμοποιώντας πολλαπλή πρόσβαση διαίρεσης χρόνου με αναπήδηση συχνότητας για ελαχιστοποίηση της παρεμβολής. Χρησιμοποιεί εξαιρετικά στενές ζώνες στη ζώνη συχνοτήτων ISM. Από την άλλη πλευρά, το Weightless-W παρέχει τα ίδια χαρακτηριστικά, αλλά χρησιμοποιεί συχνότητες τηλεοπτικών ζωνών. Ορισμένες εφαρμογές περιλαμβάνουν έξυπνους μετρητές, παρακολούθηση οχημάτων, παρακολούθηση της υγείας και βιομηχανικών μηχανών.

2.4.3.4 Ingenu

Το Ingenu είναι μία επιπλέον τεχνολογία δικτύου ευρείας κάλυψης και χαμηλής ισχύος. Αρχικά επικεντρώθηκε σε έξυπνους μετρητές πετρελαίου και φυσικού αερίου. Σήμερα έχει επεκταθεί και σε άλλες εφαρμογές του IoT, συμπεριλαμβανομένων των αστικών και αγροτικών περιβαλλόντων. Χρησιμοποιεί την τεχνολογία RPMA που επιτρέπει ρυθμούς μετάδοσης δεδομένων σε εκατοντάδες χιλιάδες bits ανά δευτερόλεπτο. Η τεχνολογία Ingenu είναι ικανή για αποτελεσματική αμφίδρομη μετάδοση, εξασφαλίζοντας υψηλά επίπεδα ασφαλείας και παρέχοντας υψηλή ποιότητα υπηρεσίας.

2.4.3.5 Neul

Το Neul χρησιμοποιεί ένα μικρό μέρος του φάσματος των συχνοτήτων της τηλεόρασης για να προσφέρει υψηλής κλιμάκωσης, υψηλής κάλυψης, χαμηλής κατανάλωσης ενέργειας και χαμηλού κόστους ασύρματα δίκτυα. Πρόκειται για μία τεχνολογία δικτύου ευρείας κάλυψης και χαμηλής ισχύος ικανή να προσφέρει υψηλούς ρυθμούς μετάδοσης σε σχέση με άλλες τεχνολογίες συνδεσιμότητας

LPWAN. Το Neul αποτελεί μία εναλλακτική λύση συνδεσιμότητας για τις εφαρμογές που αναφέρονται στις παραπάνω παραγράφους.

	Εμβέλεια Κάλυψης	Συχνότητα	Ρυθμός Μετάδοσης	Πλήθος Συσκευών Ανά Σημείο Πρόσβασης
LoRa	< 15 km	433 MHz 868 MHz 780 MHz 915 MHz	300 bps-50 Kbps	< 1000000
Sigfox	< 40 km	868 MHz 902 MHz	100 bps	< 1000000
Weightless	< 2 km	Sub GHz ISM	200 bps- 100 Kbps	< 1000000
Ingenu	< 15 km	2.4 GHz	100 Kbps	<500000
Neul	< 10 km	458 MHz 470-790 MHz 900 MHz	10-100 Kbps	< 1000000

Πίνακας 2.5. Χαρακτηριστικά των μη αδειοδοτημένων τεχνολογιών LPWAN

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 : Mobile Edge Computing

3.1 Εισαγωγή

Η εξέλιξη της πληροφορικής έχει επιταχυνθεί με την ανάπτυξη και την επέκταση των κινητών συσκευών. Τα smartphones έχουν αποκτήσει σημαντικό ρόλο στην κοινωνία και εξελίσσονται με μεγάλο ρυθμό. Αυτή η εξέλιξη είναι ιδιαίτερα σημαντική στους τομείς του υπολογιστικού νέφους και των ασύρματων επικοινωνιών. Οι κινητές συσκευές είναι εξοπλισμένες με διάφορες διεπαφές δικτύου, όπως το LTE και το Wi-Fi και μπορούν να συνδεθούν στο Cloud οποτεδήποτε και οπουδήποτε. Ταυτόχρονα, το Cloud Computing έχει γίνει ένα πολύ σημαντικό αντικείμενο της πληροφορικής παρέχοντας ελαστική υπολογιστική ισχύ και αποθήκευση σε συσκευές τελικού χρήστη που είναι περιορισμένες σε πόρους.

Ως αποτέλεσμα όλων αυτών των τεχνολογικών ανακαλύψεων, οι προγραμματιστές σε όλο τον κόσμο δημιουργούν πολύπλοκες εφαρμογές, όπως είναι η αναγνώριση προσώπου, τα διαδραστικά παιχνίδια, η επεξεργασία φυσικής γλώσσας και η εικονική πραγματικότητα για να αυξήσουν ακόμη περισσότερο τις δυνατότητες των smartphones. Ωστόσο, όλες αυτές οι αναδυόμενες εφαρμογές απαιτούν υψηλές ποσότητες υπολογιστικής ισχύος και ενέργειας, που είναι μία τεράστια πρόκληση για τα κινητά τηλέφωνα με περιορισμένους πόρους. Ταυτόχρονα, το 5G έχει φέρει την έννοια της εξαιρετικά χαμηλής καθυστέρησης (ultra-low latency) και είναι ευρέως αποδεκτό ότι η εξάρτηση από το υπολογιστικό νέφος είναι ανεπαρκής για την πραγματοποίηση της φιλόδοξης χρονικής καθυστέρησης σε κλίμακα χιλιοστού του δευτερολέπτου για την πληροφορική και τις επικοινωνίες.

Για όλα αυτά, μία νέα έννοια γνωστή ως Mobile Edge Computing αναδύεται. Το κύριο χαρακτηριστικό του MEC είναι να ωθήσει το υπολογιστικό νέφος, τον έλεγχο δικτύου, και την αποθήκευση δεδομένων στην άκρη του δικτύου, μειώνοντας τον χρόνο καθυστέρησης που συνήθως περιλαμβάνει τη χρήση ενός κεντρικού νέφους. Με την εκφόρτωση των υπολογιστικών διαδικασιών εν μέρει ή εξ ολοκλήρου στην υποδομή του υπολογιστικού νέφους, το MEC προβλέπεται ως η πλέον ελπιδοφόρα λύση για την τεχνολογία, ώστε να ξεπεραστούν αυτές οι προκλήσεις.

3.2 Από το Cloud Computing στο Edge Computing

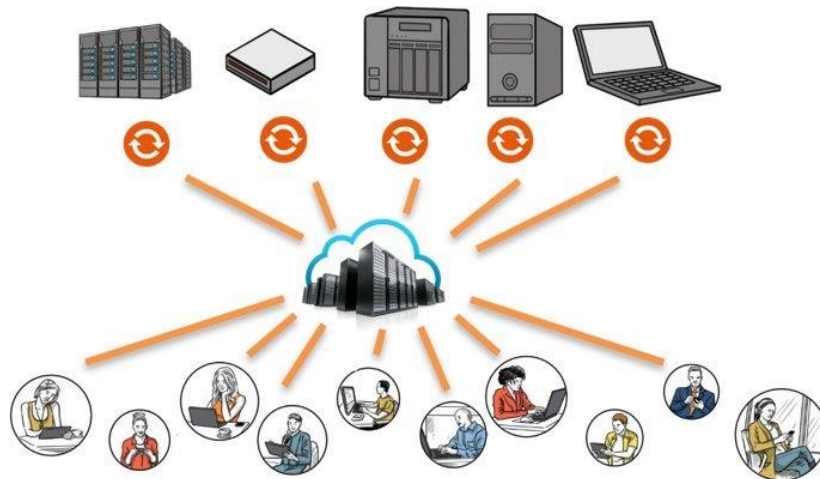
Το υπολογιστικό νέφος είναι σήμερα ένας από τους ταχύτερα αναπτυσσόμενους τομείς της βιομηχανίας πληροφορικής. Είναι ένας γενικός όρος που αναφέρεται σε οτιδήποτε περιλαμβάνει την παροχή φιλοξενούμενων υπηρεσιών μέσω του διαδικτύου ή με άλλα λόγια είναι η πρακτική της αποθήκευσης και επεξεργασίας πληροφοριών σε απομακρυσμένους διακομιστές στο διαδίκτυο αντί τοπικά.

Οι υπηρεσίες υπολογιστικού νέφους διαφέρουν από τους παραδοσιακούς τοπικούς διακομιστές σε δύο κύριες πτυχές, τη δυνατότητα κλιμάκωσης και την ευκολία στην ανάπτυξη της υπηρεσίας για τον καταναλωτή. Η δυνατότητα κλιμάκωσης της υπολογιστικής ικανότητας προς τα πάνω ή προς τα κάτω κατά παραγγελία δίνει την ευκαιρία να μοιραστούν οι πόροι σύμφωνα με την πραγματική ζήτηση. Από την άλλη, το γεγονός ότι ο πάροχος διαχειρίζεται πλήρως την υπηρεσία, δίνει τη δυνατότητα σε κάθε είδους επιχείρηση, μεγάλη ή μικρή, να αναπτύξει τις υπηρεσίες αυτές ανάλογα με τις ανάγκες τους, χωρίς την αρχική επένδυση που απαιτεί η αγορά της υποδομής. Οι εταιρείες συνειδητοποιούν όλο και περισσότερο την επιχειρηματική αξία που προσφέρει το υπολογιστικό νέφος και έχουν ήδη λάβει μέτρα για τη μετάβαση στο Cloud.

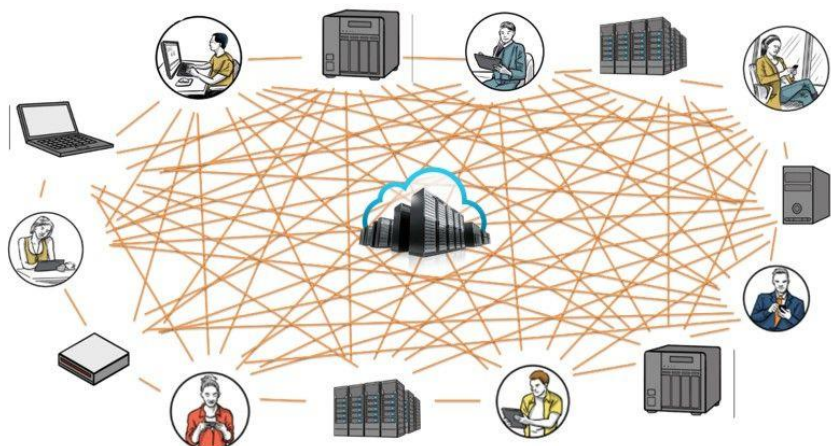
Αν και έχουν σημειωθεί τεράστιες βελτιώσεις και εξελίξεις γύρω από το υπολογιστικό νέφος, η τεχνολογία αυτή εξακολουθεί να αντιμετωπίζει την πρόκληση της παροχής αξιόπιστων και διαθέσιμων υπηρεσιών. Μία προφανής αδυναμία είναι η μακρά καθυστέρηση ανταλλαγής δεδομένων που βιώνουν οι χρήστες κινητών συσκευών, που καθιστά το υπολογιστικό νέφος ανεπαρκές για ένα ευρύ φάσμα αναδυόμενων εφαρμογών, για τις οποίες η καθυστέρηση είναι σημαντικός παράγοντας. Παρόλο που αυτός ο μεγάλος χρόνος καθυστέρησης μπορεί να φαίνεται άνευ σημασίας για εφαρμογές όπως το email ή περιήγηση στο διαδίκτυο, είναι κρίσιμος για άλλες εφαρμογές, όπως το video streaming ή το gaming, όπου οι μεγάλες καθυστερήσεις βλάπτουν τη διαδραστική απόκριση λόγω της ευαισθησίας του ανθρώπου στην καθυστέρηση και στις μεταβολές της.

Για να ξεπεραστούν αυτοί οι περιορισμοί, το Cloud Computing πρόκειται να κάνει μία θεμελιώδη αλλαγή, στην οποία το παραδοσιακό συγκεντρωτικό μοντέλο θα αντικατασταθεί από ένα κατανεμημένο αποκεντρωμένο, με τη λειτουργία του Cloud να μετακινείται προς τις άκρες του δικτύου. Αυτή η νέα έννοια είναι γνωστή ως Edge Computing και έχει ως στόχο να φέρει κοντύτερα στο χρήστη, δυνατότητες του cloud,

όπως η πληροφορική, η δικτύωση και η αποθήκευση, μειώνοντας σημαντικά την καθυστέρηση μετ' επιστροφής στο cloud. Η έννοια του MEC καθορίστηκε για πρώτη φορά από το Ευρωπαϊκό Ινστιτούτο Τηλεπικοινωνιακών Προτύπων (ETSI) και ορίστηκε ως μία νέα πλατφόρμα που παρέχει δυνατότητες πληροφορικής και υπολογιστικού νέφους εντός του δικτύου ασύρματης πρόσβασης (RAN) σε κοντινή απόσταση από τους συνδρομητές κινητής τηλεφωνίας.



Σχήμα 3.1 Κεντριοποιημένο σύστημα Cloud Computing



Σχήμα 3.2 Αποκεντριοποιημένο σύστημα Cloud Computing

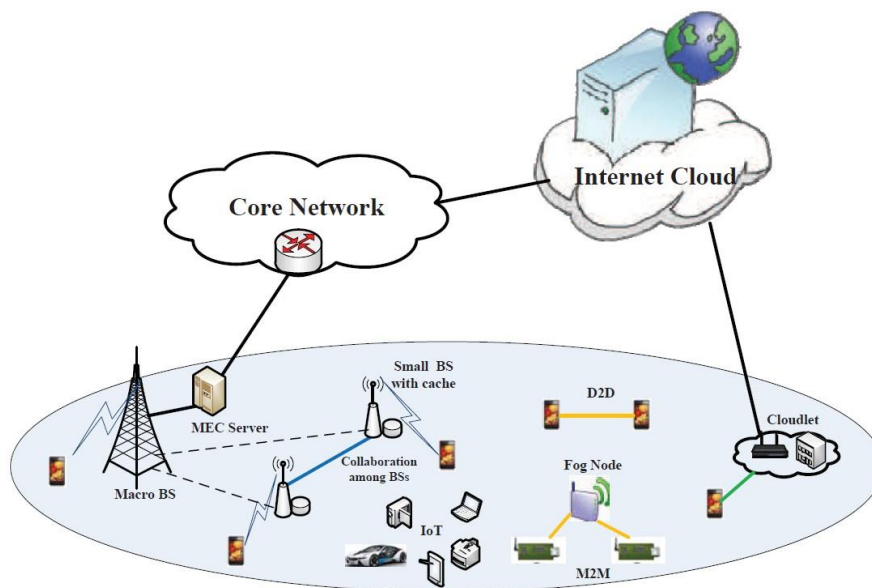
Δεδομένου ότι το Edge Computing εξακολουθεί να είναι μία αναδυόμενη τεχνολογία, ορισμένα από τα χαρακτηριστικά του πρέπει να οριστούν, αλλά για απλότητα υποδιαιρείται σε δύο τύπους. Ο ένας τύπος είναι το Fog Computing, που ωθεί την τεχνολογία στο τοπικό δίκτυο και ο άλλος είναι το Edge Computing, όπως

υποδηλώνει το όνομα , ωθεί την τεχνολογία σε μία Edge Gateway ή σε ένα σημείο πρόσβασης (access point).

Όσον αφορά τις εφαρμογές, ένα ευρύ φάσμα νέων εφαρμογών και υπηρεσιών αναδύονται με το Διαδίκτυο των Πραγμάτων και το 5G. Το Edge Computing έχει ήδη αποδειχθεί ότι είναι επωφελές για πολλές εφαρμογές με έντονες απαιτήσεις σε υπολογιστικούς πόρους, όπως το gaming, η υγειονομική περίθαλψη, το Διαδίκτυο των πραγμάτων και το video streaming. Οι διακομιστές στα άκρα του δικτύου επιτρέπουν την εκτέλεση εφαρμογών που είναι ευαίσθητες στην καθυστέρηση, αλλά εγγύτερα στους τελικούς χρήστες. Αυτό το παράδειγμα είναι ζωτικής σημασίας για την επίτευξη χαμηλής καθυστέρησης, υψηλού εύρους ζώνης και ευέλικτων υπηρεσιών κινητής τηλεφωνίας. Αυτή η τεχνολογία είναι ένας σημαντικός στόχος για τις επιχειρήσεις, δεδομένου ότι θα δώσει στα κινητά τηλέφωνα υψηλότερη υπολογιστική ισχύ, με μείωση στην κατανάλωση μπαταρίας και χωρίς την ανάγκη για οποιοδήποτε πρόσθετο υλικό μέσα στις συσκευές.

3.3 Πλατφόρμες Edge Computing

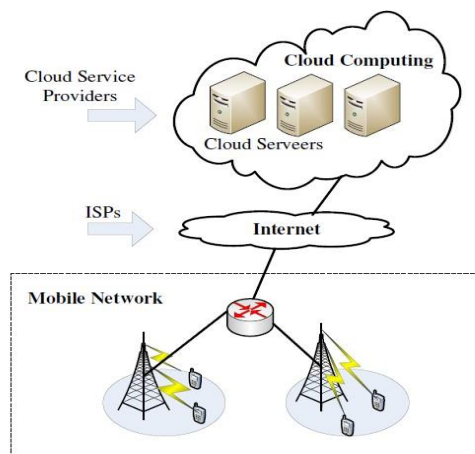
Η κεντρική ιδέα ενός Mobile Edge δικτύου είναι να μεταφέρει όλες τις λειτουργίες, το περιεχόμενο και τους πόρους αρκετά κοντά στον τελικό χρήστη. Οι πόροι του δικτύου περιλαμβάνουν κυρίως την υπολογιστική ισχύ, την αποθήκευση ή την προσωρινή αποθήκευση και τους πόρους επικοινωνίας.



Σχήμα 3.3 Αρχιτεκτονική ενός Mobile Edge δικτύου

3.3.1 Mobile Cloud Computing

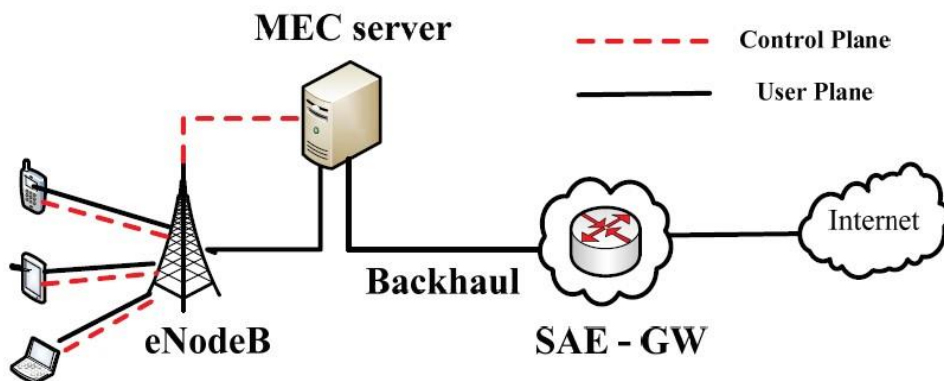
Το Edge Computing στα δίκτυα κινητής τηλεφωνίας αποτελεί εξέλιξη του Mobile Cloud Computing (MCC), το οποίο είναι μία αρχιτεκτονική που μετακινεί την υπολογιστική ισχύ και την αποθήκευση δεδομένων μακριά από κινητές συσκευές στο υπολογιστικό νέφος για να αξιοποιήσει την ισχυρή υπολογιστική και αποθηκευτική ικανότητα της πλατφόρμας Cloud. Ωστόσο, το MCC αντιμετωπίζει αρκετές προκλήσεις, όπως η μεγάλη χρονική καθυστέρηση και η υψηλή κατανάλωση εύρους ζώνης backhaul, ως εκ τούτου, δεν είναι κατάλληλο για εφαρμογές σε πραγματικό χρόνο. Από την πλευρά της κινητής επικοινωνίας, οι προκλήσεις περιλαμβάνουν χαμηλό εύρος ζώνης, διαθεσιμότητα υπηρεσιών και ετερογένεια λόγω των χαρακτηριστικών των ασύρματων δικτύων, όπως είναι το περιορισμένο ραδιοφάσμα, η κυκλοφοριακή συμφόρηση και οι πολλαπλές τεχνολογίες ασύρματης πρόσβασης (multi- RAT). Από την πλευρά της πληροφορικής, η αποτελεσματική και δυναμική αποφόρτιση των υπολογιστικών διαδικασιών στο πλαίσιο των αλλαγών του περιβάλλοντος αποτελεί πρόκληση. Προκύπτουν ζητήματα ασφαλείας σχετικά με την αποτελεσματική πρόσβαση στα δεδομένα και με το context awareness. Ο όρος context awareness είναι ουσιαστικά ένας τύπος λειτουργίας υπολογιστή που προβλέπει περιπτώσεις χρήσης ή με άλλα λόγια, λειτουργεί με προσαρμοσμένους τρόπους με βάση το πλαίσιο των δραστηριοτήτων των χρηστών. Αυτό μπορεί να εφαρμοστεί είτε στις δραστηριότητες ενός χρήστη στη συσκευή είτε στο φυσικό περιβάλλον στο οποίο χρησιμοποιείται η συσκευή. Συγκρίνοντας το MCC με το Edge Computing, το δεύτερο επιτρέπει στα άκρα του δικτύου να έχουν δυνατότητες υπολογιστικού νέφους.



Σχήμα 3.4 Αρχιτεκτονική mobile cloud computing δικτύου

3.3.2 Mobile Edge Computing

Το MEC βασίζεται σε μία εικονική πλατφόρμα που επιτρέπει να εκτελούνται εφαρμογές στην άκρη του δικτύου. Αξίζει να σημειωθεί ότι η τεχνολογία NFV μπορεί να επαναχρησιμοποιηθεί από εφαρμογές, γεγονός που ωφελεί τους φορείς εκμετάλλευσης δικτύων. Οι MEC διακομιστές μπορούν να αναπτυχθούν σε διάφορες θέσεις στην άκρη του δικτύου, όπως ο σταθμός βάσης LTE (eNodeB), στον 3G Radio Network Controller (RNC) και σε ένα σημείο συνάθροισης. Η θέση εγκατάστασης μπορεί να επηρεαστεί από τη δυνατότητα κλιμάκωσης, τους φυσικούς περιορισμούς και τα κριτήρια επιδόσεων. Οι εφαρμογές MEC μπορούν να αναπτυχθούν απρόσκοπτα σε διαφορετική πλατφόρμα MEC έξυπνα και ευέλικτα με βάση τις τεχνικές παραμέτρους, όπως η χρονική καθυστέρηση, οι απαιτούμενοι πόροι, η διαθεσιμότητα, η επεκτασιμότητα και το κόστος. Ο στόχος του ETSI MEC είναι να προσφέρει μία τυποποιημένη αρχιτεκτονική και τυποποιημένα API (Application Programming Interface) για εφαρμογές τρίτων. Το Σχ. 3.5 δείχνει την αρχιτεκτονική ενός δικτύου MEC, όπου οι MEC διακομιστές βρίσκονται σε σταθμό βάσης. Μπορούν είτε να χειριστούν μία αίτηση χρήστη και να ανταποκριθούν απευθείας στο εξοπλισμό του τελικού χρήστη, είτε να προωθήσουν την αίτηση σε απομακρυσμένα κέντρα δεδομένων και δίκτυα διανομής περιεχομένου (CDN).

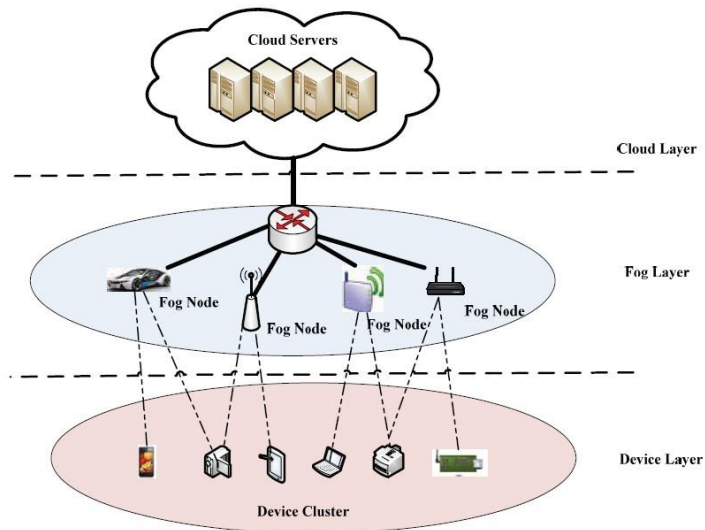


Σχήμα 3.5 Αρχιτεκτονική mobile edge computing δικτύου

3.3.3 Fog Computing

Το Fog Computing είναι μία άλλη αρχιτεκτονική Edge Computing με στόχο την κάλυψη των εφαρμογών IoT, που έχει προταθεί από τη Cisco. Το Fog Computing είναι μία επέκταση του προτύπου Cloud Computing στα άκρα του ασυρμάτου δικτύου. Το όνομα Fog Computing προέρχεται από την αναλογία ότι η ομίχλη βρίσκεται κοντά στους ανθρώπους σε σχέση με τα σύννεφα. Ομοίως, η απόσταση μίας συσκευής IoT είναι κοντύτερα σε μία πλατφόρμα Fog Computing παρά σε κέντρα δεδομένων μεγάλης κλίμακας. Η ανάγκη του Fog Computing που διατηρεί η Cisco είναι ότι η αρχιτεκτονική δυο επιπέδων για εφαρμογές IoT δεν επαρκεί για τις απαιτήσεις χαμηλής χρονικής καθυστέρησης, κινητικότητας και επίγνωσης τοποθεσίας. Η λύση είναι μία αρχιτεκτονική πολλαπλών επιπέδων που αναπτύσσει μία ενδιάμεση Fog πλατφόρμα μεταξύ της συσκευής και του Cloud. Το κύριο χαρακτηριστικό του Fog Computing είναι ότι είναι μία πλήρως καταναμημένη, πολυστρωματική αρχιτεκτονική υπολογιστικού νέφους, όπου οι Fog κόμβοι αναπτύσσονται σε διαφορετικές βαθμίδες δικτύου.

Σε σύγκριση με το Cloud Computing, το Fog Computing έχει πλεονεκτήματα σε τρεις διαστάσεις, την εκμετάλλευση λειτουργιών αποθήκευσης, τις υπολογιστικές λειτουργίες και τις λειτουργίες ελέγχου, όπως και την επικοινωνία και τη δικτύωση στον τελικό χρήστη ή κοντά στον τελικό χρήστη. Από την πλευρά του Fog Computing η άκρη του δικτύου είναι μέρος του δικτύου κορμού και του κέντρου δεδομένων. Το Fog Computing και το Cloud Computing αλληλοσυμπληρώνονται για να καταστήσουν δυνατή την υπολογιστική ισχύ, την αποθήκευση και την επικοινωνία οπουδήποτε μεταξύ του cloud και των τελικών σημείων. Η αρχιτεκτονική του Fog Computing εμφανίζεται στο Σχ.3.6. Περιέχει το στρώμα Cloud, το στρώμα Fog και το στρώμα συσκευής. Το στρώμα Fog ενδέχεται να περιέχει πολλαπλές βαθμίδες σύμφωνα με την εκάστοτε απαίτηση. Ο Fog κόμβος μπορεί να είναι μικροί σταθμοί βάσης (BS), οχήματα, σημείο πρόσβασης Wi-Fi ακόμη και τερματικές συσκευές χρήστη. Οι συσκευές επιλέγουν τον καταλληλότερο κόμβο Fog με τον οποίο πρόκειται να συσχετιστούν.

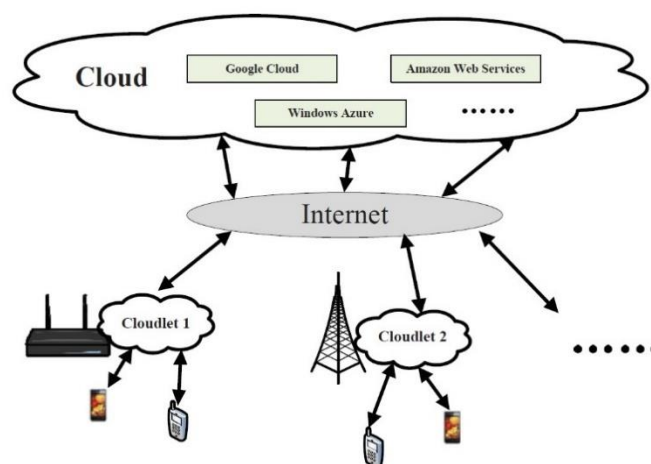


Σχήμα 3.6 Αρχιτεκτονική fog computing δικτύου

3.3.4 Cloudlet

Η ιδέα του Cloudlet αναπτύχθηκε από μία ακαδημαϊκή ομάδα στο Πανεπιστήμιο Carnegie Mellon. Μπορεί να αναπτυχθεί τόσο σε δίκτυα Wi-Fi όσο και σε δίκτυα κινητής τηλεφωνίας. Τα βασικά χαρακτηριστικά του Cloudlet είναι η παροχή εφαρμογών σε σχεδόν πραγματικό χρόνο στους κόμβους των άκρων και η μεταβίβαση των αντιγράφων εικονικών μηχανημάτων (virtual machine images) μεταξύ των κόμβων των ακρών όταν μία συσκευή κινείται.

Το Cloudlet είναι μία αρχιτεκτονική τριών επιπέδων που αποτελείται από τις συσκευές, το Cloudlet και το Cloud. Τα Cloudlets μπορούν να αναπτυχθούν σε σημεία πρόσβασης WiFi ή σταθμούς βάσης LTE. Πολλές νέες εφαρμογές απαιτούν καθυστέρηση από άκρο σε άκρο 1 ms. Σε θεωρητικό επίπεδο, η απόσταση μεταξύ των Cloudlets πρέπει να είναι 300 χλμ. για να επιτευχθεί 1 ms καθυστέρησης. Στην πραγματικότητα, τα Cloudlets πρέπει να αναπτυχθούν πυκνότερα για να εξασφαλιστεί η συγκεκριμένη απαίτηση καθυστέρησης. Ο συνδυασμός των δικτύων κινητής τηλεφωνίας 5G και των Cloudlets ενδέχεται να καταστήσει αυτό δυνατό. Το Σχ. 3.7 απεικονίζει τη γενική αρχιτεκτονική των συστημάτων Cloudlet. Για να ξεπεραστούν οι περιορισμένες δυνατότητες του ενός Cloudlet, η συνεργασία μεταξύ των διαφόρων Cloudlets είναι απαραίτητη προκειμένου να ικανοποιηθούν οι απαιτήσεις των χρηστών. Μία σύγκριση των διαφορετικών κινητών αρχιτεκτονικών υπολογιστών συνοψίζεται στον πίνακα 3.1.



Σχήμα 3.7 Αρχιτεκτονική cloudlet δικτύου

	MCC	MEC	Fog Computing	Cloudlet
Αρχικά προτάθηκε από	Δεν είναι συγκεκριμένο	ETSI	Cisco	Καθηγητής Satyanarayanan
Ιεραρχία	2 βαθμίδες	3 βαθμίδες	3 βαθμίδες ή περισσότερες	3 βαθμίδες
Χρονική καθυστέρηση Ιδιοκτησία	Υψηλή Κεντρικά από τους προμηθευτές υπολογιστικών σύννεφων: Amazon, Microsoft, κ.λπ.	Χαμηλή Φορείς εκμετάλλευσης κινητής τηλεφωνίας	Χαμηλή Ιδιοκτήτες Αποκεντρωμένοι κάτοχοι κόμβων ομίχλης	Χαμηλή Τοπικές Επιχειρήσεις
Κοινή χρήση πληθυσμού	Μεγάλη	Μεσαία	Μικρή	Μικρή
Τοποθεσία	Μεγάλα data center	RAN	Ανάμεσα στις συσκευές και τα dc	Μεταξύ συσκευών και dc, ή απευθείας σε μία συσκευή
Επίγνωση πληροφοριών περιβάλλοντος χρήστη	Όχι	Ναι	Ναι	Θα μπορούσε
Συνεργασία μεταξύ κόμβων	Όχι	Όχι	Ναι	Όχι

Πίνακας 3.1 Σύγκριση των τεχνολογιών edge computing

3.4 Βασικές τεχνολογίες για το Mobile Edge Computing

Σε αυτή την παράγραφο παρουσιάζονται οι βασικές τεχνολογίες που επιτρέπουν την ιδέα του Mobile Edge Computing να γίνει πραγματικότητα. Αυτές οι τεχνολογίες παρέχουν ευελιξία, επεκτασιμότητα και λειτουργική απόδοση στα ME δίκτυα.

1. Software Defined Network

Το SDN ορίζει μία αρχιτεκτονική δικτύου που διαχωρίζει ένα δίκτυο σε επίπεδα ελέγχου και δεδομένων για την παροχή ευέλικτων δικτύων, γεγονός που βοηθά στην απλοποίηση της διαχείρισης του δικτύου και στην ανάπτυξη νέων υπηρεσιών. Σε γενικές γραμμές, το επίπεδο ελέγχου χειρίζεται την πολιτική στο υπολογιστικό νέφος, ενώ το επίπεδο δεδομένων προωθεί την κυκλοφορία σύμφωνα με τις αποφάσεις που λαμβάνονται από το επίπεδο ελέγχου. Οι λειτουργίες δικτύου, όπως για παράδειγμα η δρομολόγηση, που απαιτούν απόκριση σε πραγματικό χρόνο μπορούν να αντιμετωπιστούν από διακομιστές στα άκρα του δικτύου.

2. Network Function Virtualization

Το NFV εκτελεί λειτουργίες δικτύου, γνωστές και ως εικονικές λειτουργίες, σε εικονικές μηχανές σε διακομιστές, οι οποίες μπορούν να χειριστούν ένα τεράστιο όγκο δεδομένων για την παροχή ευέλικτων, αυτοματοποιημένων και επεκτάσιμων δικτύων. Οι απαιτήσεις δικτύου μπορούν να υποβληθούν σε επεξεργασία είτε στο Cloud είτε στην άκρη του δικτύου, γεγονός που εμποδίζει την αποστολή όλων των δεδομένων και πληροφοριών στο Cloud.

3. Massive MIMO

Η τεχνολογία Massive MIMO αναπτύσσει πολλές στοιχειοκεραίες που επιτρέπουν στον πομπό και στο δέκτη να στέλνουν και να λαμβάνουν παραπάνω από ένα σήμα ταυτόχρονα στο ίδιο κανάλι επικοινωνίας. Έτσι, ο λόγος σήματος προς θόρυβο αυξάνεται χωρίς την ανάγκη αύξησης της ισχύος εκπομπής, οδηγώντας σε αυξημένη χωρητικότητα δικτύου και ενεργειακή απόδοση. Χρησιμοποιώντας τη τεχνολογία Massive MIMO, πολλαπλές συσκευές χρηστών μπορούν να εκφορτώσουν τις εργασίες σε ένα διακομιστή άκρη ταυτόχρονα για να μειώσουν την χρονική καθυστέρηση και την κατανάλωση ενέργειας.

4. Δυναμική πρόσβαση σε τεχνολογίες ασύρματης πρόσβασης

Η δυναμική πρόσβαση σε τεχνολογίες ασύρματης πρόσβασης παρέχει πρόσβαση σε συμβατικές τεχνολογίες πρόσβασης, όπως είναι το Wi-Fi και το NR στο 5G. Το 5G NR είναι ένα νέο πρότυπο που παρέχει σύνδεση με ένα ευρύ φάσμα συσκευών για την επίτευξη χαμηλού επιπέδου καθυστέρησης χρόνου και επεκτάσιμων δικτύων, τα οποία επιτρέπουν μελλοντική επέκταση σε υπάρχοντα δίκτυα.

5. Επικοινωνία D2D

Η επικοινωνία D2D επιτρέπει την άμεση επικοινωνία μεταξύ γειτονικών συσκευών τελικού χρήστη χρησιμοποιώντας ad-hoc συνδέσμους χωρίς να διέρχεται από σταθμό βάσης, γεγονός που βελτιώνει την απόδοση του συστήματος, την ενεργειακή απόδοση και τη χρήση του ραδιοφάσματος. Οι συσκευές τελικού χρήστη μπορούν να εκφορτώνουν εργασίες σε διακομιστές στα άκρα του δικτύου, προκειμένου να αποκτήσουν υπολογιστικές δυνατότητες. Αυτή η δυνατότητα του Edge Computing εξασφαλίζει την επιτυχή επικοινωνία D2D.

3.5 Πλεονεκτήματα του Mobile Edge Computing

Σε σύγκριση με το παραδοσιακό Cloud, οι ερευνητές διαπίστωσαν ότι το MEC έχει πλεονεκτήματα σε διάφορες πτυχές. Στη συνέχεια παρουσιάζονται λεπτομερώς τα σημαντικότερα πλεονεκτήματα του MEC:

1. Χαμηλή καθυστέρηση και κοντινή απόσταση

Η χαμηλή καθυστέρηση και η κοντινή απόσταση επιτρέπουν στο MEC να μειώσει την καθυστέρηση απόκρισης, ή αλλιώς το χρόνο μετ' επιστροφής, που υφίστανται οι τερματικές συσκευές χρήστη κατά την πρόσβαση στο παραδοσιακό Cloud. Υπάρχουν τρία κύρια στοιχεία σε μία καθυστέρηση απόκρισης που είναι η καθυστέρηση επικοινωνίας, που εξαρτάται από την ταχύτητα δεδομένων, η υπολογιστική καθυστέρηση, που εξαρτάται από τον υπολογιστικό χρόνο και η καθυστέρηση διάδοσης, που εξαρτάται από την απόσταση διάδοσης. Γενικά, στο υπολογιστικό νέφος, η καθυστέρηση από άκρο σε άκρο είναι μεγαλύτερη από 80ms. Αυτό δεν είναι κατάλληλο για εφαρμογές ευαίσθητες στις καθυστερήσεις, όπως η απομακρυσμένη χειρουργική επέμβαση και το VR, που απαιτούν υψηλή ταχύτητα με καθυστέρηση απόκρισης το πολύ 1ms. Στο MEC, οι συσκευές αντιμετωπίζουν μειωμένη συνολική καθυστέρηση από άκρο σε άκρο και καθυστέρηση απόκρισης λόγω της εγγύτητάς τους σε διακομιστές στα άκρα του δικτύου. Η στρατηγική θέση του MEC μειώνει τις καθυστερήσεις επικοινωνίας και μετάδοσης. Για παράδειγμα, η απόσταση διάδοσης μειώνεται σε δεκάδες μέτρα μέσω της επικοινωνίας D2D και σε μικρές κυψέλες, αφού η απόσταση μεταξύ MEC και των τερματικών συσκευών είναι γενικά περιορισμένη σε ένα χιλιόμετρο.

2. Επίγνωση τοποθεσίας

Η επίγνωση τοποθεσίας επιτρέπει στους MEC servers να συλλέγουν και να επεξεργάζονται δεδομένα που δημιουργούνται από τις τερματικές συσκευές του χρήστη με βάση τη γεωγραφική θέση αυτών. Αυτό επιτρέπει την παροχή υπηρεσιών με βάση την τοποθεσία στις τερματικές συσκευές, όπου οι διακομιστές MEC μπορούν να συλλέγουν δεδομένα που δημιουργούνται από πηγές κοντά σε αυτούς, χωρίς την αποστολή τους στο υπολογιστικό νέφος.

3. Context awareness δικτύου

Το context awareness δικτύου επιτρέπει στους διακομιστές MEC να αποκτούν πληροφορίες για το περιβάλλον του δικτύου. Αυτό συμβαίνει επειδή οι διακομιστές MEC τείνουν να διαθέτουν πληροφορίες για το δίκτυο, ιδίως τις συνθήκες δικτύου σε πραγματικό χρόνο, όπως για παράδειγμα το φορτίο κίνησης σε μία κυψέλη του δικτύου και πληροφορίες δικτύου ασύρματης πρόσβασης. Επίσης, είναι σε θέση να γνωρίζουν τις πληροφορίες των τερματικών συσκευών χρήστη, όπως είναι για παράδειγμα το καταναεμημένο εύρος ζώνης και η θέση χρήστη. Οι πληροφορίες επιτρέπουν στους διακομιστές MEC να προσαρμόζονται και να ανταποκρίνονται στις διαφορετικές συνθήκες δικτύου και των τερματικών συσκευών και στη συνέχεια, να βελτιστοποιούν τη χρήση των πόρων δικτύου. Αυτό βοηθά τους διακομιστές MEC να χειρίζονται ένα τεράστιο ποσό της κυκλοφορίας δεδομένων, προκειμένου να βελτιωθεί η απόδοση του δικτύου. Οι λεπτομερείς πληροφορίες, όπως είναι οι ακριβείς μεμονωμένες πληροφορίες δέσμησης πόρων, μπορούν επίσης να χρησιμοποιηθούν για την παροχή συγκεκριμένων υπηρεσιών στις ροές κίνησης, προκειμένου να καλυφθούν οι απαιτήσεις των μεμονωμένων χρηστών.

4. Εύρος ζώνης δικτύου μετάδοσης

Οι υπηρεσίες IoT αναμένεται να υλοποιούνται με τη χρήση αξιοσημείωτου αριθμού τερματικών συσκευών, όπως για παράδειγμα αισθητήρων, και κατά συνέπεια να παράγουν μεγάλο όγκο δεδομένων στο δίκτυο. Κρίνεται λοιπόν αναγκαία η συμπίεση των δεδομένων, καθώς και η μεταφορά των αυτών χωρίς καμία επεξεργασία από τις τερματικές IoT συσκευές προς τα συστήματα σε περιβάλλον νέφους. Κάτι τέτοιο καταναλώνει μεγάλο ποσοστό από τους διαθέσιμους πόρους του δικτύου και οδηγεί σε πλήθος προβλημάτων από τη μεριά του δικτύου, μεταξύ των οποίων μεγάλη καθυστέρηση στη μετάδοση δεδομένων και απώλεια πακέτων. Για το λόγο αυτό, είναι αναγκαίο οι ενδιάμεσοι κόμβοι, ή άλλως θύρες IoT Gateways, να επεξεργάζονται τα δεδομένα προτού τα μεταδώσουν στα συστήματα

σε περιβάλλον υπολογιστικού νέφους. Η επεξεργασία από τους ενδιάμεσους κόμβους, μπορεί να περιλαμβάνει ακόμα και την ενοποίηση πλήθους διαφορετικών πακέτων δεδομένων, πριν αυτά μεταδοθούν από τους ενδιάμεσους κόμβους στα συστήματα cloud. Η πρόκληση που ανακύπτει στη συγκεκριμένη περίπτωση είναι ο έλεγχος της ροής των δεδομένων με βέλτιστο τρόπο συντονίζοντας τις διεργασίες επεξεργασίας δεδομένων και συνένωσης πακέτων, με σκοπό τη μείωση των απαιτήσεων των τερματικών συσκευών σε πόρους εύρους ζώνης, χωρίς ταυτόχρονα να επηρεάζεται η ποιότητα των δεδομένων.

5. Ενεργειακή κατανάλωση τερματικών συσκευών

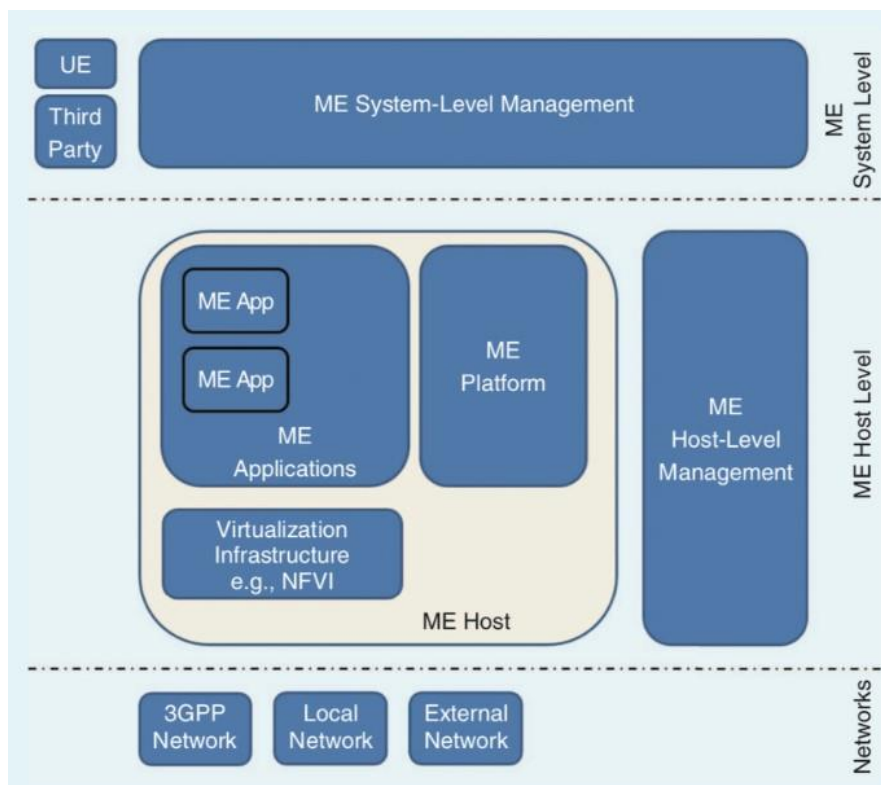
Οι τερματικές συσκευές στα δίκτυα που υποστηρίζουν υπηρεσίες IoT, διαφέρουν όχι μόνο ως προς τις ανάγκες για δικτυακούς πόρους, αλλά και στην ανάγκη για κατανάλωση ενέργειας και στην απαιτούμενη χωρητικότητα μπαταρίας που διαθέτουν. Κατά συνέπεια, όταν μία τερματική συσκευή χρειάζεται να εκτελέσει διαδικασίες ανάλυσης και επεξεργασίας δεδομένων ή μετάδοσης δεδομένων σε υψηλότερο ιεραρχικά φυσικό επίπεδο, πρέπει να γίνεται προσεκτική ανάλυση από την ίδια τη συσκευή και γενικότερα την υπηρεσία, ως προς την κατανάλωση ενεργειακών πόρων. Η μεγιστοποίηση της διάρκειας ζωής των τερματικών συσκευών IoT είναι ιδιαίτερα σημαντική, ειδικά όταν πρόκειται για συσκευές με περιορισμένη χωρητικότητα μπαταρίας. Προς επίτευξη του συγκεκριμένου, η υλοποίηση υπηρεσιών με κόμβους MEC δύναται να συνενώνει ευέλικτες διεργασίες σχημάτων αποφόρτισης των τερματικών συσκευών ως προς τους υπολογιστικούς πόρους, λαμβάνοντας υπόψη τους ενεργειακούς πόρους της κάθε συσκευής.

3.6 Το Mobile Edge Computing Framework και η αρχιτεκτονική αναφοράς

Το ETSI MEC ISG ξεκίνησε τον Δεκέμβριο του 2014 και ανέλαβε να παράγει ένα σύνολο προδιαγραφών που επιτρέπουν τη φιλοξενία εφαρμογών, οι οποίες παρέχονται σε τρίτους σε περιβάλλον πολλαπλών προμηθευτών. Από τότε, το ISG εργάζεται για τις προδιαγραφές ξεκινώντας από τις περιπτώσεις χρήσης για τον καθορισμό των απαιτήσεων και στη συνέχεια από τους ορισμούς για την αρχιτεκτονική. Το ISG MEC έχει ήδη δημοσιεύσει τις βασικές προδιαγραφές για τις τεχνικές απαιτήσεις και την αρχιτεκτονική αναφοράς. Το ISG έχει προχωρήσει στο επόμενο στάδιο για να καθορίσει την πλατφόρμα ενεργοποίησης εφαρμογών, τις υπηρεσίες κινητών άκρων και τα απαραίτητα API που μπορούν να χρησιμοποιήσουν

οι εφαρμογές Mobile Edge για να παρέχουν μία εντελώς νέα σειρά υπηρεσιών με βελτιωμένη εμπειρία τελικού χρήστη. Έτσι, οι εργασίες για την αρχιτεκτονική έχουν ολοκληρωθεί και το ISG έχει καθορίσει το framework και την αρχιτεκτονική αναφοράς για το MEC.

3.6.1 Το MEC Framework



Σχήμα 3.8 Αρχιτεκτονική MEC Framework

Το MEC Framework, όπως έχει δημοσιευτεί από τον οργανισμό ETSI, απεικονίζεται στο Σχ.3.8 και παρουσιάζει σε βασικό επίπεδο τις οντότητες που συμβάλλουν στη λειτουργία του MEC. Οι οντότητες αυτές, ομαδοποιούνται περαιτέρω στις ακόλουθες τρεις κατηγορίες:

1. Επίπεδο συστημάτων System level

Αποτελεί το υψηλότερο επίπεδο με βάση το MEC Framework και έχει τη συνολική εποπτεία όλου του συστήματος MEC. Το σύστημα Mobile Edge ME, αποτελείται από όλους τους απαραίτητους ME hosts και συστήματα διαχείρισης του ME, ώστε να

μπορεί να λειτουργήσει τις απαραίτητες ME εφαρμογές που χρησιμοποιεί ένας τηλεπικοινωνιακός πάροχος.

2. Επίπεδο host level

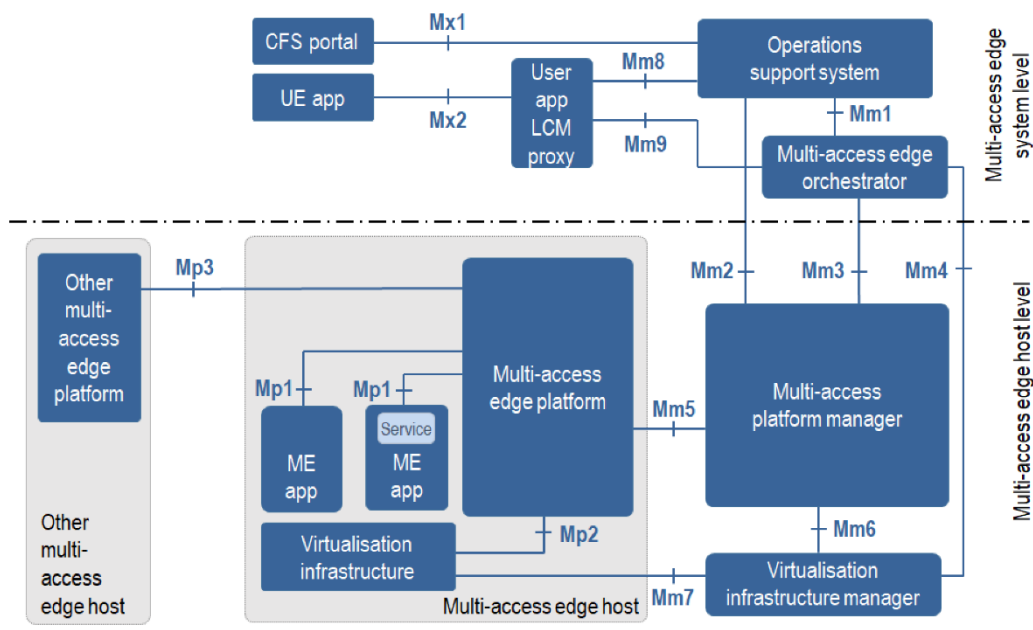
Το επίπεδο οικοδεσπότη ME host level, περιλαμβάνει το ME host, καθώς και το αντίστοιχο ME διαχείρισης του επιπέδου host level. Η μονάδα του ME host, περαιτέρω μπορεί να διαιρεθεί στην πλατφόρμα ME platform, τις εφαρμογές ME applications καθώς και το εικονικό περιβάλλον (virtualized infrastructure) πάνω στο οποίο λειτουργούν όλα τα υπόλοιπα στοιχεία του περιβάλλοντος Mobile Edge Computing.

3. Επίπεδο Δικτύου Network level

Το επίπεδο δικτύου αποτελείται από εξωτερικές οντότητες, όπως τα δίκτυα κινητών τηλεπικοινωνιών 3rd Generation Partnership Project (3GPP), τοπικά δίκτυα καθώς και άλλα εξωτερικά δίκτυα. Μέσα από αυτό το επίπεδο πραγματοποιείται η διασύνδεση σε τοπικά εσωτερικά δίκτυα, εξωτερικά δίκτυα όπως το Διαδίκτυο και το δίκτυο κινητών τηλεπικοινωνιών.

3.6.2 Αρχιτεκτονική αναφοράς για το Mobile Edge Computing

Περισσότερη κατανόηση του MEC μπορεί να επιτευχθεί από την αρχιτεκτονική αναφοράς, όπως απεικονίζεται στο Σχ.3.9, η οποία καθορίζει τις λειτουργικές οντότητες με λεπτομέρεια, όπως και τις σχέσεις τους μεταξύ τους. Η αρχιτεκτονική αναφοράς έχει την ίδια δομή σε επίπεδο συστήματος και επίπεδο κεντρικού υπολογιστή με το MEC Framework. Το επίπεδο δικτύου δεν είναι ορατό στην αρχιτεκτονική αναφοράς, καθώς δεν απαιτούνται συγκεκριμένα σημεία αναφοράς στο MEC για την πρόσβαση σε αυτές τις οντότητες.



Σχήμα 3.9 Αρχιτεκτονική αναφοράς MEC

Ο Mobile Edge host (ME host) είναι μία οντότητα που αποτελείται από την πλατφόρμα Mobile Edge και το εικονικό περιβάλλον, που παρέχει πόρους υπολογιστικής ισχύος, αποθήκευσης και δικτύου για τις εφαρμογές Mobile Edge. Επιπλέον, ο ME host μπορεί να παρέχει μόνιμες πληροφορίες αποθήκευσης και ημερήσιας χρονικής στιγμής για τις εφαρμογές. Το εικονικό περιβάλλον περιλαμβάνει ένα επίπεδο δεδομένων που εκτελεί τους κανόνες προώθησης, οι οποίοι λαμβάνονται από την πλατφόρμα Mobile Edge και δρομολογεί την κυκλοφορία μεταξύ των εφαρμογών, των υπηρεσιών και των δικτύων.

Η πλατφόρμα Mobile Edge (ME platform) αντιπροσωπεύει μία βασική συλλογή λειτουργιών που απαιτούνται για την εκτέλεση εφαρμογών σε έναν συγκεκριμένο ME host και για να επιτρέπουν στις εφαρμογές Mobile Edge να ανακαλύπτουν, να διαφημίζουν, να προσφέρουν και να καταναλώνουν τις υπηρεσίες ME. Οι υπηρεσίες Mobile Edge μπορούν να παρέχονται από την πλατφόρμα και από τις εφαρμογές, αλλά τόσο η πλατφόρμα όσο και οι εφαρμογές μπορούν να καταναλώνουν υπηρεσίες ME. Οι βασικές λειτουργίες της πλατφόρμας ME είναι απαραίτητες για να κατευθύνουν την κίνηση μεταξύ των εφαρμογών, των υπηρεσιών και των δικτύων. Η πλατφόρμα ME λαμβάνει τους κανόνες προώθησης της κίνησης από τον διαχειριστή της πλατφόρμας, τις εφαρμογές Mobile Edge και τις υπηρεσίες ME και βάσει αυτών καθώς και των πολιτικών, παρέχει τις οδηγίες στο επίπεδο προώθησης. Επιπλέον, η πλατφόρμα ME υποστηρίζει τη ρύθμιση παραμέτρων του τοπικού διακομιστή μεσολάβησης DNS, ο οποίος μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να κατευθύνει την

κίνηση του χρήστη στις επιθυμητές εφαρμογές Mobile Edge. Η πλατφόρμα ME μπορεί να επικοινωνήσει με άλλες πλατφόρμες ME μέσω της διεπαφής M_{p3}, η οποία προορίζεται για διαδικασίες επιπέδου ελέγχου. Χρησιμοποιώντας αυτήν τη διεπαφή, πολλές πλατφόρμες μπορούν να ομαδοποιηθούν και να σχηματίσουν ένα πλέγμα επικοινωνιών.

Οι εφαρμογές Mobile Edge (ME applications) εκτελούνται ως εικονικές μηχανές στο εικονικό περιβάλλον που παρέχεται από τον ME host. Οι εφαρμογές αλληλοεπιδρούν με την πλατφόρμα ME μέσω της διεπαφής M_{p1} για να καταναλώσουν τις υπηρεσίες που προσφέρει η πλατφόρμα. Ακόμα, οι εφαρμογές μπορούν να προσφέρουν την παροχή υπηρεσιών στην πλατφόρμα, η οποία μπορεί να τις παρέχει περαιτέρω και σε άλλες εφαρμογές. Η διεπαφή M_{p1} χρησιμοποιείται, επίσης, για πρόσθετες διαδικασίες υποστήριξης, όπως είναι η ένδειξη της διαθεσιμότητας της εφαρμογής ή η προετοιμασία μετεγκατάστασης της κατάστασης εφαρμογής για το χρήστη σε περίπτωση συμβάντων μεταβίβασης περιεχομένου (handover) σε άλλο διακομιστή. Οι εφαρμογές ME ενδέχεται να υποδεικνύουν απαιτήσεις σχετικά με τους επιθυμητούς πόρους ή τις υπηρεσίες και επιπλέον να υποδεικνύουν τους περιορισμούς τους όσον αφορά τις μέγιστες επιτρεπόμενες καθυστερήσεις. Οι απαιτήσεις αυτές επικυρώνονται σε επίπεδο συστήματος και η επιλογή του ή των ME host πραγματοποιείται με βάση τις απαιτήσεις.

Ο Mobile Edge platform manager (MEPM) είναι μία οντότητα επιπέδου host που χωρίζεται περαιτέρω σε ME πλατφόρμα διαχείρισης στοιχείων, πλατφόρμα διαχείρισης κύκλου ζωής ME εφαρμογών, πλατφόρμα κανόνων εφαρμογής ME και πλατφόρμα για τις απαιτήσεις των λειτουργιών διαχείρισης. Η διαχείριση κύκλου ζωής της εφαρμογής αποτελείται από διαδικασίες ενεργοποίησης και τερματισμού εφαρμογών, καθώς και από την παροχή ένδειξης στον ME ενορχηστρωτή για συμβάντα που σχετίζονται με την εφαρμογή. Η διαχείριση κανόνων και απαιτήσεων περιλαμβάνει εξουσιοδοτήσεις, κανόνες κυκλοφορίας, ρυθμίσεις παραμέτρων DNS και επίλυση ζητημάτων όταν το σύνολο των κανόνων βρίσκεται σε διένεξη. Η διεπαφή M_{m5} μεταξύ της πλατφόρμας ME και του MEPM χρησιμοποιείται για τη διαμόρφωση της πλατφόρμας και των κανόνων, την παροχή των κανόνων φιλτραρίσματος της κυκλοφορίας, τη διαχείριση της μετεγκατάστασης της εφαρμογής και την υποστήριξη των διαδικασιών κύκλου ζωής των εφαρμογών. Η διεπαφή M_{m6} προς το OSS χρησιμοποιείται για τη διαχείριση βλαβών, τη διαμόρφωση και την απόδοση της πλατφόρμας ME. Η διεπαφή M_{m3} μεταξύ του ME ενορχηστρωτή και

του MEPM παρέχει υποστήριξη για τη διαχείριση του κύκλου ζωής εφαρμογών, τις πολιτικές που σχετίζονται με την εφαρμογή και για τη διατήρηση ενημερωμένων πληροφοριών σχετικά με τις διαθέσιμες ME υπηρεσίες στο σύστημα ME.

Ο Mobile Edge orchestrator (MEO) είναι η κεντρική λειτουργία του συστήματος ME, καθώς έχει ορατότητα πάνω στους πόρους και τις δυνατότητες ολόκληρου του ME δικτύου. Ο MEO διατηρεί πληροφορίες για ολόκληρο το σύστημα ME, καθώς γνωρίζει όλους τους ανεπτυγμένους ME host, τις υπηρεσίες και τους πόρους που είναι διαθέσιμοι σε κάθε host, τις εγκατεστημένες εφαρμογές και την τοπολογία του δικτύου. Επιπλέον, ο ενορχηστρωτής είναι υπεύθυνος για τη διαχείριση των εφαρμογών ME και των σχετικών διαδικασιών, υποστηρίζοντας το ανέβασμα της εφαρμογής, ελέγχοντας την ακεραιότητα και την αυθεντικότητα της εφαρμογής, επικυρώνοντας τις πολιτικές για τις εφαρμογές και διατηρώντας έναν κατάλογο των διαθέσιμων εφαρμογών. Ο MEO προετοιμάζει, επίσης, τις διαδικασίες δημιουργίας εφαρμογής παρέχοντας οδηγίες στους διαχειριστές του εικονικού περιβάλλοντος για τον τρόπο αντιμετώπισης των εφαρμογών. Οι ME εφαρμογές μπορούν να αναφέρουν τις απαιτήσεις τους σχετικά με τους πόρους, τις υπηρεσίες, τη θέση και τις επιδόσεις, όπως είναι ο μέγιστος επιτρεπόμενος χρόνος καθυστέρησης και είναι ευθύνη του MEO να διασφαλίζει ότι πληρούνται οι απαιτήσεις. Ο ενορχηστρωτής χρησιμοποιεί τις απαιτήσεις που λαμβάνονται από τις εφαρμογές στη διαδικασία επιλογής για τον ME host προορισμού. Σε περίπτωση που η εφαρμογή πρέπει να μετεγκατασταθεί, ο MEO είναι η οντότητα που ενεργοποιεί τη διαδικασία. Ο ενορχηστρωτής έχει τη διεπαφή Mm2 με το Operation Support System (OSS) που προορίζεται για την ενεργοποίηση της δημιουργίας και τερματισμού των εφαρμογών ME στα συστήματα ME. Η διεπαφή Mm6 προς το VIM χρησιμοποιείται για τη διαχείριση των εικονικά διαθέσιμων πόρων του ME Host και για τη διαχείριση των εικόνων (virtual images) της εφαρμογής που παρέχονται για τη δημιουργία της. Χρησιμοποιείται επίσης για τη διατήρηση πληροφοριών κατάστασης σχετικά με τους διαθέσιμους πόρους.

Το Operations Support System (OSS) είναι μία λειτουργία που χρησιμοποιείται ευρέως για τη διαχείριση διάφορων υπηρεσιών και υποσυστημάτων στο δίκτυο των φορέων εκμετάλλευσης. Από την πλευρά του συστήματος ME, το OSS είναι το σύστημα διαχείρισης υψηλότερου επιπέδου για να βοηθήσει στο να παραδώσει τις ME εφαρμογές που εκτελούνται στην επιθυμητή θέση του δικτύου. Το OSS λαμβάνει αιτήματα για δημιουργία και τερματισμό των ME εφαρμογών από την πύλη του

Customer Facing Service και από τις τερματικές συσκευές των χρηστών. Δεδομένου ότι βρίσκεται στα όρια μεταξύ του εξωτερικού κόσμου και του δικτύου φορέων εκμετάλλευσης, το OSS ελέγχει την ακεραιότητα και την αυθεντικότητα του πακέτου εφαρμογών και εγκρίνει τα αιτήματα. Οι αιτήσεις που χορηγούνται από το OSS διαβιβάζονται στο MEO για περαιτέρω επεξεργασία. Το OSS μπορεί επίσης να έχει τις δυνατότητες να μεταφέρει τις εφαρμογές μεταξύ διαφορετικών συστημάτων Cloud.

Η πύλη Customer Facing Service (CFS) λειτουργεί ως σημείο εισόδου για τρίτους. Αυτή η πύλη μπορεί να χρησιμοποιηθεί για λειτουργίες σχετικές με τη διαχείριση της προμήθειας, της επιλογής και της παραγγελίας των εφαρμογών ME. Οι προγραμματιστές μπορούν να χρησιμοποιήσουν την πύλη για να κάνουν τις δημιουργημένες εφαρμογές ME διαθέσιμες στο σύστημα ME των διαχειριστών. Άλλοι πελάτες, όπως οι εταιρείες, μπορούν να χρησιμοποιήσουν την πύλη για να επιλέξουν τις εφαρμογές που τους ενδιαφέρουν και να τους δοθούν οδηγίες σχετικές με το πότε και που επιθυμούν να χρησιμοποιήσουν την εφαρμογή της επιλογής τους. Η πύλη CFS μπορεί επίσης να παρέχει στους πελάτες πληροφορίες σχετικές με την επιχείρηση, όπως για παράδειγμα πληροφορίες που σχετίζονται με το SLA ή τη χρέωση. Το CFS συνδέεται με το OSS μέσω της διεπαφής Mx1 μεταξύ των δυο οντοτήτων.

Το User application lifecycle management proxy (User app LCM proxy) είναι μία λειτουργία που χρησιμοποιούν οι υπολογιστές ή οι συσκευές τύπου client και οι εφαρμογές που σχετίζονται με το Mobile Edge για να ζητήσουν υπηρεσίες που σχετίζονται με το ανέβασμα, τη δημιουργία και τον τερματισμό των εφαρμογών. Επιπλέον, αυτός ο διακομιστής μεσολάβησης μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να ζητήσει τη μετεγκατάσταση της εφαρμογής από το σύστημα ME στο εξωτερικό Cloud και αντίστροφα. Η πύλη πρόσβασης επιτρέπει όλες τις αιτήσεις που έχουν προχωρήσει εκ των προτέρων με ενέργειες προώθησης προς το OSS ή το MEO. Ο User app LCM proxy είναι προσβάσιμος μόνο από το δίκτυο κινητής τηλεφωνίας. Διαθέτει τη διεπαφή Mx2 προς τις εφαρμογές και τις συσκευές τύπου client στον εξοπλισμό του χρήστη.

Ο Virtualization Infrastructure Manager (VIM) είναι υπεύθυνος για τη διαχείριση των τροποποιημένων πόρων για τις ME εφαρμογές σε εικονικό περιβάλλον. Οι εργασίες διαχείρισης συνίστανται στην εκχώρηση και την αποδέσμευση εικονικών υπολογιστικών πόρων, πόρων αποθήκευσης και δικτύου που παρέχονται από το

εικονικό περιβάλλον. Ακόμα, ο VIM προετοιμάζει το εικονικό περιβάλλον για να τρέξει τα εικονικά αντίγραφα λογισμικού και αυτά μπορούν επίσης να αποθηκευτούν από τον VIM για ταχύτερη διαδικασία δημιουργίας εφαρμογών. Καθώς οι εικονικοί πόροι ενδέχεται να εξαντληθούν ή να αποτύχουν στη λειτουργία τους, είναι σημαντικό να παρακολουθούνται. Ο VIM παρέχει υποστήριξη για παρακολούθηση βλαβών και επιδόσεων συλλέγοντας και αναφέροντας πληροφορίες σχετικά με εικονικούς πόρους και παρέχοντας τις πληροφορίες περαιτέρω σε οντότητες διαχείρισης σε επίπεδο διακομιστή και συστήματος. Ο VIM έχει τη διεπαφή Mm7 προς το εικονικό περιβάλλον για τη διαχείριση των εικονικών πόρων. Η διεπαφή Mm4 μεταξύ του MEO και του VIM χρησιμοποιείται για τη διαχείριση των αντιγράφων των εικόνων εφαρμογής και των εικονικών πόρων, καθώς και για την παρακολούθηση της διαθεσιμότητας των πόρων. Η διεπαφή Mm6 μεταξύ MERM και VIM χρησιμοποιείται για τη διαχείριση των εικονικών πόρων για τις ME εφαρμογές κατά τη διάρκεια του κύκλου ζωής τους.

3.7 Εφαρμογές και περιπτώσεις χρήσης του Mobile Edge Computing

Οι νέες εφαρμογές είναι η κύρια κινητήρια δύναμη για την εξέλιξη της αρχιτεκτονικής του δικτύου. Οι απαιτήσεις των αναδυόμενων εφαρμογών γίνονται όλο και αυστηρότερες όσον αφορά τον ρυθμό μετάδοσης ή τον χρόνο καθυστέρησης. Σε αυτήν την ενότητα, συνοψίζονται οι εφαρμογές και οι περιπτώσεις χρήσης του MEC, όπως φαίνεται στον πίνακα 3.2.

Εφαρμογές και Περιπτώσεις Χρήσης	Βασικά σημεία
Δυναμική παράδοση περιεχομένου	Τοποθέτηση περιεχομένου κοντά στους χρήστες Αξιοποίηση των πληροφοριών περιβάλλοντος του χρήστη
AR/VR	Γρήγορη επεξεργασία σε πραγματικό χρόνο Επίγνωση περιεχομένου
Βοήθεια σε υπολογιστικά έντονες διεργασίες	Χαμηλή καθυστέρηση, συσκευές χαμηλού κόστους Συλλογή πληροφοριών από πολλαπλές πηγές
Video streaming και ανάλυση video	Αποφυγή της μετάδοσης περιττών ροών βίντεο Πιο ικανή για ανάλυση
Internet of Things	Υγειονομική περίθαλψη Ασύρματα συστήματα αισθητήρων Έξυπνο δίκτυο διαχείρισης ενέργειας Έξυπνο σπίτι Έξυπνη πόλη
Συνδεδεμένα οχήματα	Επικοινωνίες V2X Υπηρεσίες ασφάλειας αυτοκινήτων Έλεγχος κυκλοφορίας και έξυπνος χώρος στάθμευσης

Πίνακας 3.2 Εφαρμογές και περιπτώσεις χρήσης του MEC

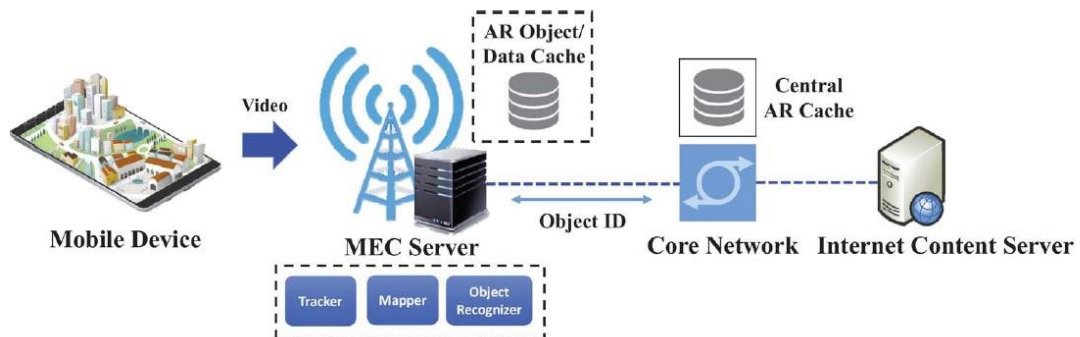
1. Δυναμική παράδοση περιεχομένου

Με την αυξανόμενη ζήτηση περιεχομένου πολυμέσων, οι συνδέσεις backhaul αντιμετωπίζουν προβλήματα συμφόρησης στη συμβατική κεντρική αρχιτεκτονική δικτύου. Η προσωρινή αποθήκευση στα άκρα του δικτύου μπορεί να παρέχει δυναμική παράδοση περιεχομένου με βάση τις πληροφορίες της κατάστασης του δικτύου και των πληροφοριών σχετικά με το περιβάλλον του χρήστη (context aware). Δεδομένου ότι το περιεχόμενο τοποθετείται κοντά σε χρήστες φορητών συσκευών, το QoE των χρηστών κινητών συσκευών βελτιώνεται σημαντικά.

2. Επαυξημένη Πραγματικότητα / Εικονική Πραγματικότητα (Augmented Reality/Virtual Reality)

Η τεχνολογία της επαυξημένης πραγματικότητας (AR) και της εικονικής πραγματικότητας (VR) θεωρείται ως η πλέον πολλά υποσχόμενη εφαρμογή που ενδέχεται να αλλάξει τον τρόπο ζωής των ανθρώπων. Αυτή η εφαρμογή χρειάζεται πληροφορίες σε πραγματικό χρόνο για την κατάσταση του χρήστη, όπως είναι η

θέση και η κατεύθυνση του. Ο διακομιστής MEC είναι σε θέση να εκμεταλλεύεται τις πληροφορίες του περιβάλλοντος χρήστη και έχει ισχυρή ικανότητα επεξεργασίας, η οποία είναι κατάλληλη για τις εφαρμογές AR/VR.



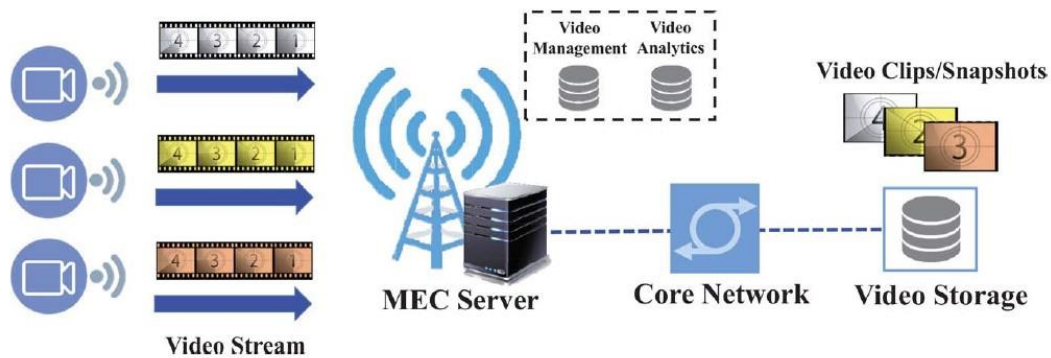
Σχήμα 3.10 Το MEC για υπηρεσίες AR

3. Βοήθεια σε υπολογιστικά έντονες διεργασίες

Η υπολογιστική ικανότητα συχνά θυσιάζεται για να μειωθεί το κόστος των συσκευών. Επομένως, η μείωση φόρτου των υπολογιστικών διαδικασιών απαιτεί αρκετά χαμηλό χρόνο επεξεργασίας με χαμηλή καθυστέρηση και είναι απαραίτητη για εφαρμογές με έντονες υπολογιστικές διεργασίες. Οι διακομιστές MEC είναι εξοπλισμένοι με υψηλές υπολογιστικές δυνατότητες και μπορούν να επεξεργαστούν τις εκφορτωμένες υπολογιστικές διεργασίες σε σύντομα χρονικά διαστήματα. Επιπλέον, ο διακομιστής MEC μπορεί να συλλέγει πληροφορίες από πολλαπλές πηγές, γεγονός που βοηθά τις συσκευές να εκτελούν εργασίες που απαιτούν πληροφορίες από πολλές πηγές.

4. Video streaming και ανάλυση video.

Παρατηρείται ότι η κίνηση βίντεο αντιπροσωπεύει περισσότερο από το ήμισυ της συνολικής κίνησης δεδομένων κινητής τηλεφωνίας στα τρέχοντα δίκτυα και το ποσοστό εξακολουθεί να αυξάνεται. Η υιοθέτηση της προσωρινής αποθήκευσης στα άκρα του δικτύου αποτρέπει πολλές περιπτεές μεταφορές ροών βίντεο μέσω του κεντρικού δικτύου σε CDN (Content Delivery Network). Η χρήση του διακομιστή MEC επιτρέπει την ανάλυση βίντεο στις ικανότερες πλατφόρμες Cloud στην άκρη του δικτύου, εκτός από την πηγή παραγωγής βίντεο.



Σχήμα 3.11 Το MEC σε υπηρεσία video streaming και ανάλυση video

5. Internet of Things

Η ιδέα του Διαδικτύου των Πραγμάτων γίνεται πραγματικότητα με τις τεχνολογικές εξελίξεις στους έξυπνους αισθητήρες, τις επικοινωνίες, και τα πρωτόκολλα Διαδικτύου. Το MEC παρέχει δυνατότητες για την ανάπτυξη νέων εφαρμογών IoT. Οι συγκεκριμένες εφαρμογές και περιπτώσεις χρήσης του στο Διαδίκτυο των Πραγμάτων παρουσιάζονται παρακάτω:

I. Υγειονομική περίθαλψη

Η επεξεργασία σε πραγματικό χρόνο και η ανταπόκριση σε συμβάντα είναι σημαντικά για τις υπηρεσίες εφαρμογών υγειονομικής περίθαλψης. Πειράματα αποδεικνύουν ότι το σύστημα υγειονομικής περίθαλψης που χρησιμοποιεί το MEC ανταποκρίνονται ταχύτερα και είναι ενεργειακά αποδοτικότερα από τις προσεγγίσεις που χρησιμοποιούν αποκλειστικά το Cloud. Για παράδειγμα, το MEC μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την ανίχνευση πτώσεων ασθενών με εγκεφαλικό επεισόδιο.

II. Ασύρματα συστήματα αισθητήρων (Wireless Sensor Networks)

Διάφορα σενάρια που χρησιμοποιούν ασύρματα συστήματα αισθητήρων μπορούν να είναι περιπτώσεις χρήσης κινητών πλατφορμών υπολογιστικού νέφους στα άκρα του δικτύου, όπως στη βιομηχανία πετρελαίου και φυσικού αερίου, στη βιομηχανία κτιρίων και στην περιβαλλοντική παρακολούθηση.

III. Έξυπνο δίκτυο διαχείρισης ενέργειας (Smart Grid)

Η ανάλυση των δεδομένων που παράγονται στο smart grid περιβάλλον είναι ένα αρκετά δύσκολο έργο λόγω των πολύπλοκων παραμέτρων. Η χρήση του MEC μπορεί να βελτιώσει την απόδοση στην διέλευση, το χρόνο απόκρισης και την καθυστέρηση μετάδοσης. Το Smart Grid είναι μία τυπική περίπτωση χρήσης που

απαιτεί την αλληλεπίδραση μεταξύ MEC και του υπολογιστικού νέφους. Το MEC συλλέγει και επεξεργάζεται τα τοπικά δεδομένα που παράγονται από αισθητήρες δικτύου και συσκευές. Το Cloud παρέχει καθολική κάλυψη και αποκαθιστά δεδομένα που έχουν κύκλο ζωής μηνών και χρόνων.

IV. Έξυπνο σπίτι (Smart Home)

Τα έξυπνα οικιακά συστήματα έχουν γίνει νέα τάση για τα μελλοντικά σπίτια. Το smart home είναι ένα είδος μικρής κλίμακας σύστημα IoT με περιορισμένη χωρική πληρότητα και τοπικές επικοινωνίες. Η ανάπτυξη διακομιστών MEC ως πυλών IoT κοντά στα έξυπνα αντικείμενα επιτρέπει άμεσες αλληλεπιδράσεις M2M σε μελλοντικά δίκτυα. Ο κόμβος MEC, ο οποίος μπορεί να αναπτυχθεί σε femtocells, οικιακούς δρομολογητές, αποκωδικοποιητές και smartphones, είναι ευεργετικός για υπηρεσίες με χαμηλή χρονική καθυστέρηση, που είναι τοπικές και χαρακτηρίζονται ως άμεσης σύνδεσης και άμεσης εφαρμογής υπηρεσίες (plug and play) για το έξυπνο σπίτι.

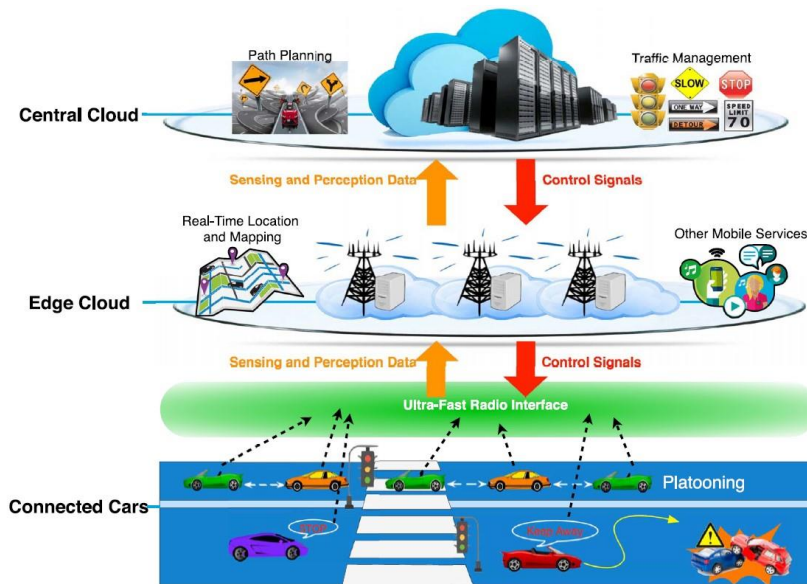
V. Έξυπνη πόλη (Smart City)

Το όραμα της έξυπνης πόλης είναι να βελτιώσει την ποιότητα ζωής αξιοποιώντας τις τεχνολογικές εξελίξεις. Η έννοια του MEC είναι χρήσιμη για περιπτώσεις που η χρονική απόκριση είναι ζωτικής σημασίας, επειδή το περιεχόμενο που δημιουργείται από μεγάλο αριθμό συνδεδεμένων συσκευών μπορεί να αξιοποιηθεί για να ανακαλύψει την εμφάνιση ή την εκδήλωση ανώμαλων συμβάντων σε ένα σύστημα. Ένα άλλο χρήσιμο συστατικό του έξυπνου συστήματος πόλεων είναι τα έξυπνα φανάρια. Για παράδειγμα, τα έξυπνα φανάρια μπορούν να στείλουν προειδοποιητικά σήματα στα οχήματα που πλησιάζουν ή να ανιχνεύσουν τους πεζούς και τους ποδηλάτες που διασχίζουν το δρόμο ή να προειδοποιήσουν τα οχήματα για τους κινδύνους παραβίασης ενός κόκκινου φωτός.

VI. Συνδεδεμένα οχήματα

Οι προσεγγίσεις Edge Computing διαδραματίζουν σημαντικό ρόλο στα συνδεδεμένα οχήματα, τις υπηρεσίες επικοινωνίας V2X και ασφάλειας αυτοκινήτων, όπως η προειδοποίηση σε πραγματικό χρόνο για πάγο στον αυτοκινητόδρομο και οι συντονισμένοι ελιγμοί αλλαγής λωρίδας. Οι εφαρμογές που εκτελούνται σε διακομιστές MEC βρίσκονται σε κοντινή απόσταση από τα οχήματα και μπορούν να παρέχουν λειτουργικότητα καθ' οδόν με χαμηλές χρονικές καθυστερήσεις. Ο έλεγχος της κυκλοφορίας και ο έξυπνος χώρος στάθμευσης μπορούν να επιτευχθούν δεδομένου ότι το δίκτυο στα άκρα είναι σε θέση να συλλέξει και να αναλύσει σε

πραγματικό χρόνο τα δεδομένα από τις συσκευές αισθητήρων που έχουν εγκατασταθεί παντού.



Σχήμα 3.12 Το MEC για συνδεδεμένα οχήματα

3.8 Ο ρόλος του Mobile Edge Computing στο διαδίκτυο των πραγμάτων

Το Edge Computing αναμένεται να λειτουργήσει ως στρατηγικός εγκέφαλος πίσω από IoT. Ο προσδιορισμός του ρόλου του MEC στο IoT είναι κύριο ερευνητικό ζήτημα επί του παρόντος. Το Edge Computing χρησιμοποιείται για να μειώσει την ποσότητα των δεδομένων που αποστέλλονται στο Cloud, να μειώσει την καθυστέρηση πρόσβασης υπηρεσίας καθώς και να αποφορτίζει τις IoT συσκευές από έντονες υπολογιστικές διαδικασίες. Σε αυτήν την ενότητα, διάφοροι σημαντικοί ρόλοι του MEC συζητούνται με τα παραδείγματα σεναρίων IoT.

1. Απόκτηση δεδομένων

Οι συσκευές στα άκρα του δικτύου, συμπεριλαμβανομένων αισθητήρων ή μηχανημάτων, μπορούν να καταγράψουν δεδομένα ροής για ταχεία ανάλυση και να εκτελέσουν άμεσες ενέργειες ή επεξεργασία των δεδομένων. Σύμφωνα με τον Μπέκμαν, μεταφέρεται ο αλγόριθμος στα δεδομένα, όχι τα δεδομένα στον αλγόριθμο. Κατά συνέπεια, αυξάνεται η παραγωγικότητα και αποτρέπονται τα ελαττώματα στα προϊόντα αποτελεσματικά και γρήγορα. Σε ένα σενάριο έξυπνης μεταφοράς, οι κάμερες φωτεινών σηματοδοτών μπορούν όχι μόνο να καταγράψουν

δεδομένα αλλά και να αναλύσουν τα δεδομένα που συλλέγονται, να λαμβάνουν άμεσες αποφάσεις από μόνες τους για να βελτιώσουν τη ροή των οχημάτων.

2. Συμπερασματικός έλεγχος

Ο συμπερασματικός έλεγχος είναι το βασικό στοιχείο οποιασδήποτε συσκευής στα άκρα του δικτύου. Αναφέρεται στην ικανότητα μίας συσκευής να ερμηνεύει τα πράγματα στο περιβάλλον της με ακρίβεια. Αυτοί οι έλεγχοι επικοινωνούν επίσης με το MEC. Ωστόσο, η εισαγωγή της συμπερασματικής ικανότητας στις συσκευές αυτές είναι δύσκολη, επειδή εξαρτάται από πληροφορίες περιβάλλοντος. Σε ένα έξυπνο σενάριο μεταφοράς, αυτή η δυνατότητα συμπεράσματος μπορεί να παρέχει στους οδηγούς εξαιρετικά έξυπνες οδηγίες πλοήγησης χρησιμοποιώντας το GPS και τις εμπρός και πίσω κάμερες.

3. Ανάλυση δεδομένων

Το MEC επιτρέπει την ανάλυση δεδομένων σε πραγματικό χρόνο. Η ανάλυση δεδομένων στη θέση δημιουργίας δεδομένων μπορεί να μειώσει την χρονική καθυστέρηση δημιουργίας πληροφοριών από τα δεδομένα που συλλέγονται. Επομένως, οι MEC διακομιστές μπορούν να συλλέγουν και να αναλύουν δεδομένα από τις γύρω συσκευές, επιτρέποντας έτσι στους υπεύθυνους λήψης αποφάσεων να παρέχουν πληροφορίες με δυνατότητα δράσης ταχύτερα από ότι πριν. Το MEC μπορεί, επίσης, να συμβάλει στη μείωση του εύρους ζώνης και του κόστους του δικτύου, επειδή τα δεδομένα ενδέχεται να αναλυθούν τοπικά. Αυτό μπορεί να είναι χρήσιμο για πολλούς οργανισμούς σε πολλούς επιχειρηματικούς τομείς, συμπεριλαμβανομένης της βιομηχανίας, της υγειονομικής περίθαλψης, των τηλεπικοινωνιών και των οικονομικών, έτσι ώστε να αυξάνεται η ανάγκη για την έννοια του IoT. Επομένως, αντί οι κάμερες φωτεινού σηματοδότη να στέλνουν δεδομένα σε μία κεντρική υποδομή για ανάλυση δεδομένων, το MEC μπορεί να αναλύσει τα δεδομένα ροής, να επικοινωνήσει με άλλες συσκευές και να ληφθούν άμεσες αποφάσεις για την εκτέλεση των απαιτούμενων εργασιών.

4. Λήψη αποφάσεων

Μετά την τοπική ανάλυση των δεδομένων, το επόμενο βήμα για το MEC είναι να λάβει κρίσιμες στρατηγικές αποφάσεις. Σε ένα έξυπνο σύστημα μεταφοράς, κάθε αυτοκίνητο παράγει ένα μεγάλο όγκο δεδομένων ανά δευτερόλεπτο, όπου απαιτείται επεξεργασία σε πραγματικό χρόνο και σωστές αποφάσεις. Για επεξεργασία σε πραγματικό χρόνο, τα δεδομένα δεν μπορούν να αποσταλούν στο Cloud για επεξεργασία και λήψη αποφάσεων, επειδή ο χρόνος απόκρισης είναι αρκετά

μεγάλος σε αυτήν την περίπτωση. Σε μία τέτοια περίπτωση, τα δεδομένα πρέπει να αναλύονται τοπικά στο MEC. Με αυτόν τον τρόπο, το αυτοκίνητο μπορεί να λάβει μία σωστή απόφαση επί τόπου για να αποφευχθούν δυσμενείς καταστάσεις.

5. Βελτιωμένη ασφάλεια δεδομένων

Όταν τα δεδομένα αποστέλλονται στο εξωτερικό για επεξεργασία, αυξάνεται η ανασφάλεια δεδομένων. Η συλλογή και η ανάλυση δεδομένων εκτελούνται τοπικά στο MEC. Εκτεταμένη δρομολόγηση δεν εμπλέκεται, έτσι ώστε ο εντοπισμός οποιασδήποτε ύποπτης δραστηριότητας να είναι εύκολος. Η υλοποίηση των απαραίτητων ενεργειών πριν από οποιαδήποτε παραβίαση ασφαλείας γίνεται επίσης εύκολη.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: Τεχνικά ζητήματα και προκλήσεις στο Mobile Edge Computing

4.1 Ανάπτυξη συστημάτων Mobile Edge Computing

Ο σκοπός του MEC είναι η μετατόπιση των δυνατοτήτων του Cloud Computing στα άκρα του δικτύου, προκειμένου να μειωθεί η χρονική καθυστέρηση που προκαλείται από τις καθυστερήσεις συμφόρησης και διάδοσης στο κεντρικό δίκτυο. Ωστόσο, δεν υπάρχει επίσημο πρότυπο του τι πρέπει να είναι ένας διακομιστής MEC και δεν έχουν καθοριστεί οι θέσεις του διακομιστή στο σύστημα. Αυτά επικαλούνται το πρόβλημα επιλογής τοποθεσίας για διακομιστές MEC, το οποίο διαφέρει σημαντικά από το συμβατικό πρόβλημα επιλογής τοποθεσίας σταθμών βάσης. Η κύρια διαφορά είναι ότι η βέλτιστη τοποθέτηση διακομιστών MEC συνδυάζεται με την παροχή υπολογιστικών πόρων, τα οποία περιορίζονται από τον προϋπολογισμό ανάπτυξης του συστήματος MEC. Εξάλλου, η αποτελεσματικότητα ενός συστήματος MEC βασίζεται σε μεγάλο βαθμό στην αρχιτεκτονική του, η οποία πρέπει να λαμβάνει υπόψη διάφορες πτυχές, όπως είναι ο όγκος των υπολογιστικών διαδικασιών και τα στατιστικά στοιχεία ρυθμού επικοινωνίας. Επιπλέον, είναι ζωτικής σημασίας για τους προμηθευτές συστημάτων MEC να καθορίσουν την απαιτούμενη πυκνότητα διακομιστή για την κάλυψη της ζήτησης υπηρεσιών, η οποία συνδέεται στενά με το κόστος ανάπτυξης της υποδομής και τις στρατηγικές μάρκετινγκ. Ωστόσο, η μεγάλη κλίμακα των συστημάτων MEC καθιστά ανεφάρμοστες τις παραδοσιακές μεθόδους που βασίζονται σε προσομοίωση και ως εκ τούτου προτιμώνται λύσεις που βασίζονται σε ανάλυση κλίμακας δικτύου. Σε αυτήν την ενότητα, αναφέρονται τρία ερευνητικά προβλήματα που σχετίζονται με την ανάπτυξη συστημάτων MEC, συμπεριλαμβανομένης της επιλογής τοποθεσίας για διακομιστές MEC, της αρχιτεκτονικής δικτύου MEC και του σχεδιασμού πυκνότητας διακομιστή.

4.1.1 Επιλογή τοποθεσίας για διακομιστές MEC

Η επιλογή των τοποθεσιών για τις υποδομές MEC, ιδίως τους διακομιστές MEC, είναι το πρώτο βήμα προς τη δημιουργία του συστήματος MEC. Για την επιλογή μίας οικονομικά αποδοτικής τοποθεσίας διακομιστή, οι σχεδιαστές και οι διαχειριστές του συστήματος πρέπει να λάβουν υπόψη δύο σημαντικούς παράγοντες, οι οποίοι είναι

οι ενοικιάσεις τοποθεσιών και οι υπολογιστικές απαιτήσεις. Γενικά, δεδομένου του προϋπολογισμού ανάπτυξης του συστήματος, πρέπει να εγκατασταθούν περισσότεροι διακομιστές MEC σε περιοχές με υψηλότερες υπολογιστικές απαιτήσεις, όπως είναι οι επιχειρηματικές περιοχές, οι εμπορικές περιοχές και οι πυκνοκατοικημένες περιοχές. Αυτό, ωστόσο, έρχεται σε αντίθεση με την απαίτηση χαμηλού κόστους, καθώς οι περιοχές αυτές είναι πιθανό να έχουν υψηλά ενοίκια. Ευτυχώς, χάρη στα καλά ανεπτυγμένα τηλεπικοινωνιακά δίκτυα, μία πολλά υποσχόμενη ιδέα είναι η εγκατάσταση των διακομιστών MEC στις υπάρχουσες υποδομές, όπως είναι οι μακρο σταθμοί βάσης (macro BS) και η συνύπαρξη με αυτούς. Αυτό είναι ακόμη πιο ελκυστικό για τους τηλεπικοινωνιακούς φορείς που επιθυμούν να συμμετάσχουν στην αγορά MEC.

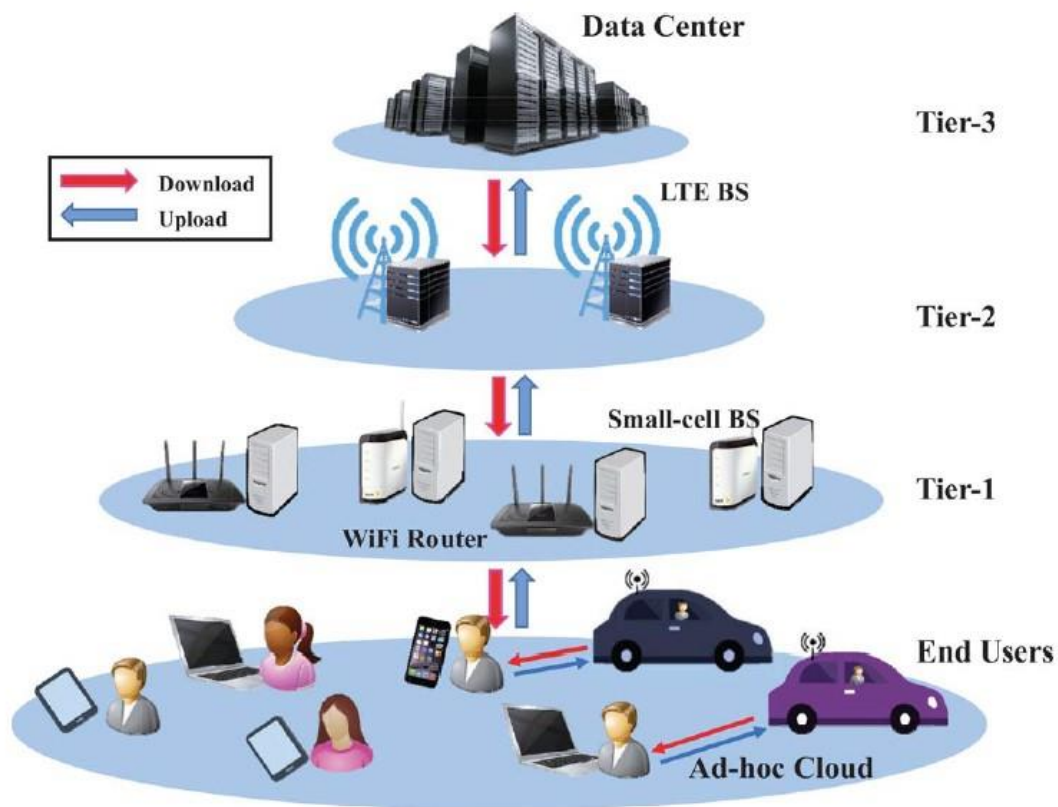
Ωστόσο, αυτό δεν λύνει όλα τα προβλήματα. Από τη μία πλευρά, λόγω της συνεχώς αυξανόμενης απαίτησης υπολογιστικής ποιότητας και των πανταχού παρόντων έξυπνων συσκευών, η ικανοποιητική εμπειρία του χρήστη δεν μπορεί να διασφαλιστεί λόγω της κακής ποιότητας του σήματος και της συμφόρησης στα μακρο κυψελωτά δίκτυα. Για ορισμένες εφαρμογές, όπως είναι το έξυπνο σπίτι, είναι επιθυμητή η μετακίνηση της υπολογιστικής δυνατότητας ακόμη αρκετά κοντά στον τελικό χρήστη. Αυτό μπορεί να επιτευχθεί με την έγχυση ορισμένων υπολογιστικών πόρων σε μικρούς κυψελωτούς σταθμούς βάσης (small cell BS), οι οποίοι είναι χαμηλού κόστους και μικρού μεγέθους. Παρά τα πιθανά οφέλη, εξακολουθούν να υπάρχουν εμπόδια. Πρώτον, λόγω φυσικών περιορισμών, οι υπολογιστικές δυνατότητες αυτού του είδους των διακομιστών MEC είναι μικρότερες από εκείνες στα macro BS, καθιστώντας δύσκολο το χειρισμό έντονων υπολογιστικών διεργασιών. Μία εφικτή λύση είναι η οικοδόμηση μίας ιεραρχικής αρχιτεκτονικής δικτύου για συστήματα MEC που περιλαμβάνουν διακομιστές MEC με ετερογενείς δυνατότητες επικοινωνίας και υπολογισμού, όπως περιγράφεται στην παράγραφο 4.1.2. Δεύτερον, ορισμένα από τα small cell BS μπορούν να αναπτυχθούν από τους οικιακούς χρήστες, αφού πολλοί ιδιοκτήτες femto BS ενδέχεται να μην έχουν το κίνητρο να συνεργαστούν με τους προμηθευτές MEC. Για να ξεπεραστεί αυτό το ζήτημα, οι προμηθευτές MEC πρέπει να σχεδιάσουν κατάλληλα κίνητρα, προκειμένου να τονωθούν οι ιδιοκτήτες των small cell BS για την ενοικίαση των χώρων. Επιπλέον, η ανάπτυξη διακομιστών MEC σε small cell BS ενδέχεται να έχει προβλήματα ασφαλείας, καθώς είναι εύκολα προσβάσιμα και ευάλωτα σε εξωτερικές επιθέσεις, γεγονός που υποβαθμίζει το επίπεδο αξιοπιστίας.

Από την άλλη, τα σημεία πρόσβασης σε υπολογιστικούς πόρους δεν συμπίπτουν πάντα με τα σημεία πρόσβασης σε πόρους επικοινωνίας. Με άλλα λόγια, για ορισμένα από τα σημεία πρόσβασης σε υπολογιστικούς πόρους, δεν υπάρχει διαθέσιμη υποδομή επικοινωνίας είτε macro είτε small cell BS. Για αυτές τις περιπτώσεις, πρέπει να αναπτυχθούν διακομιστές MEC με ασύρματο πομποδέκτη επιλέγοντας σωστά νέες τοποθεσίες.

Εκτός αυτού, η επιλογή τοποθεσίας για διακομιστές MEC εξαρτάται από την στρατηγική κατανομής υπολογιστικών πόρων, η οποία θέτει επιπλέον προκλήσεις σε σύγκριση με τη συμβατική επιλογή τοποθεσιών σταθμών βάσης. Διαισθητικά, η συγκέντρωση των υπολογιστικών πόρων σε μερικούς διακομιστές MEC μπορεί να βοηθήσει στην εξοικονόμηση των ενοικιάσεων της τοποθεσίας. Ωστόσο, αυτό έρχεται με το τίμημα της πιθανής υποβάθμισης της κάλυψης των υπηρεσιών και της ποιότητας της επικοινωνίας. Επιπλέον, η βέλτιστη κατανομή υπολογιστικών πόρων πρέπει να λαμβάνει υπόψη τόσο το κόστος ενοικίασης τοποθεσίας όσο και τις απαιτήσεις σε υπολογιστικές διαδικασίες. Για παράδειγμα, για ένα διακομιστή MEC σε μία τοποθεσία με υψηλό ενοίκιο, προτιμάται η διάθεση τεράστιων υπολογιστικών πόρων ώστε να εξυπηρετηθεί ένας μεγάλος αριθμός χρηστών, για την επίτευξη υψηλών εσόδων. Ως εκ τούτου, το από κοινού πρόβλημα επιλογής τοποθεσίας και παροχής υπολογιστικών πόρων πρέπει να επιλυθεί πριν από την ανάπτυξη συστημάτων MEC.

4.1.2 Αρχιτεκτονική δικτύου MEC

Η μετάβαση στα δίκτυα MEC δεν σημαίνει την εξαφάνιση των δικτύων κέντρων δεδομένων (DCN). Αντίθετα, τα μελλοντικά δίκτυα προβλέπεται να αποτελούνται από τρία στρώματα, όπως φαίνεται στο Σχ. 4.1. Τα τρία αυτά στρώματα είναι το στρώμα υπολογιστικού νέφους, το στρώμα MEC και το στρώμα συνδρομητή υπηρεσίας. Ενώ, το στρώμα υπολογιστικού νέφους είναι ώριμο και έχει αναπτυχθεί, εξακολουθεί να υπάρχει κάποια αβεβαιότητα στο σχεδιασμό του στρώματος MEC.



Σχήμα 4.1 Αρχιτεκτονική δικτύου MEC τριών στρωμάτων

Αναλογίζοντας τα ετερογενή δίκτυα (HetNets) με τα κυψελωτά , είναι απαραίτητος ο σχεδιασμός των ετερογενών συστημάτων MEC (Het-MEC), τα οποία αποτελούνται από πολλαπλές βαθμίδες. Συγκεκριμένα, οι διακομιστές MEC σε διαφορετικά επίπεδα έχουν ξεχωριστές υπολογιστικές και επικοινωνιακές δυνατότητες. Τέτοιου είδους ιεραρχικές δομές συστημάτων MEC μπορούν όχι μόνο να διατηρήσουν το πλεονέκτημα της αποδοτικής μετάδοσης που προσφέρεται από τα HetNets, αλλά και να έχουν την ισχυρή ικανότητα χειρισμού του μέγιστου φόρτου υπολογιστικών διεργασιών με τη διανομή του σε διαφορετικές βαθμίδες. Ωστόσο, σε αυτή την περίπτωση, το πρόβλημα της παροχής των υπολογιστικών πόρων είναι εξαιρετικά δύσκολο και παραμένει άλυτο, καθώς πρέπει να ληφθούν υπόψη πολλοί διαφορετικοί παράγοντες, όπως είναι η ένταση του φόρτου διεργασιών, το κόστος επικοινωνίας μεταξύ διαφορετικών βαθμίδων και οι στρατηγικές κατανομής φόρτου διεργασιών.

Μία άλλη ώθηση των ερευνητικών προσπαθειών επικεντρώνεται στην αξιοποίηση των δυνατοτήτων του επιπέδου συνδρομητή υπηρεσίας, χρησιμοποιώντας

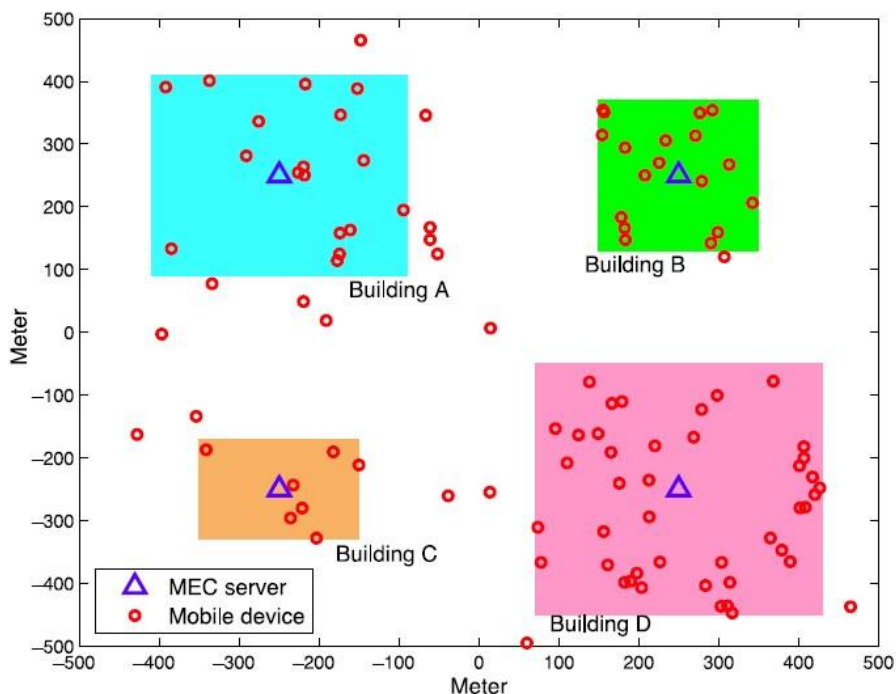
αδιάθετους υπολογιστικούς πόρους, όπως είναι οι φορητοί υπολογιστές, τα έξυπνα τηλέφωνα και οχήματα, επικαλυμμένα με ειδικούς κόμβους. Αυτό το παράδειγμα καλείται ως ad-hoc κινητό υπολογιστικό σύννεφο στη βιβλιογραφία. Το ad-hoc κινητό υπολογιστικό σύννεφο απολαμβάνει τα οφέλη της αποφόρτισης των συστημάτων MEC, την αύξηση της χρήσης των υπολογιστικών πόρων και τη μείωση του κόστους ανάπτυξης του συστήματος. Ωστόσο, δημιουργεί επίσης δυσκολίες στα θέματα διαχείρισης των πόρων και ασφάλειας λόγω της τεχνολογίας ad hoc και του αυτοοργανωτικού χαρακτήρα της.

4.1.3 Σχεδιασμός πυκνότητας διακομιστή MEC

Όπως αναφέρεται στην ενότητα 4.1.2, η υποδομή MEC μπορεί να είναι ένας συνδυασμός διαφορετικών τύπων διακομιστών, ο οποίος παρέχει διάφορα επίπεδα εμπειρίας υπολογιστικών δυνατοτήτων και συμβάλλει σε διαφορετικά κόστη ανάπτυξης ενός συστήματος MEC. Ως εκ τούτου, είναι σημαντικό να προσδιοριστεί ο αριθμός των κόμβων στην άκρη του δικτύου, καθώς και ο βέλτιστος συνδυασμός των διάφορων τύπων διακομιστών MEC με ένα δεδομένο προϋπολογισμό ανάπτυξης και στατιστικά στοιχεία ζήτησης υπολογιστικών διαδικασιών. Συμβατικά, αυτό το πρόβλημα μπορεί να αντιμετωπιστεί μόνο με αριθμητικές προσομοιώσεις, οι οποίες είναι χρονοβόρες και δεν έχουν επεκτασιμότητα. Ευτυχώς, λόγω της πρόσφατης ανάπτυξης της θεωρίας στοχαστικής γεωμετρίας και των επιτυχημένων εφαρμογών της στην ανάλυση απόδοσης ασύρματων δικτύων, καθώς και της ομοιότητας μεταξύ των συστημάτων Het-MEC και HetNets, είναι εφικτό να διεξαχθεί ανάλυση απόδοσης για συστήματα MEC. Αυτή η ανάλυση των συστημάτων MEC πρέπει να αντιμετωπίσει τις ακόλουθες προκλήσεις:

1. Τα χρονοδιαγράμματα του χρόνου επεξεργασίας υπολογιστικών διαδικασιών και συνοχής των ασύρματων καναλιών μπορεί να διαφέρουν, γεγονός που καθιστά τα υπάρχοντα αποτελέσματα για ασύρματα δίκτυα μη άμεσα εφαρμόσιμα για συστήματα MEC. Μία πιθανή λύση είναι να συνδυαστούν οι θεωρίες της αλυσίδας Markov και της στοχαστικής γεωμετρίας για τη καταγραφή της σταθερής συμπεριφοράς των υπολογιστικών διεργασιών.

2. Η πολιτική μείωσης φόρτου υπολογιστικών διεργασιών επηρεάζει την πολιτική διαχείρισης των πόρων ραδιοφάσματος, η οποία πρέπει να ληφθεί υπόψη.
3. Οι απαιτήσεις σε υπολογιστικούς πόρους συνήθως δεν κατανέμονται ομοιόμορφα και συγκεντρώνονται σε ομάδες, όπως φαίνεται στο παράδειγμα του Σχ.4.2. Έτσι, απαγορεύεται η χρήση του ομοιογενούς μοντέλου poisson point process (HPPP) για διακομιστές MEC και συνδρομητές υπηρεσιών. Απαιτείται λοιπόν διερεύνηση πιο προηγμένων μοντέλων, όπως είναι το μοντέλο του Ginibre a-DPP, για να συλλάβει τις συμπεριφορές ομαδοποίησης των κόμβων ακρών.



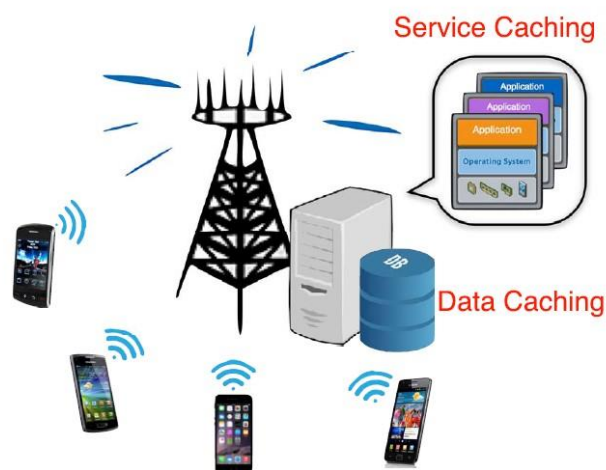
Σχήμα 4.2 Παράδειγμα ταξινόμησης υπολογιστικών αιτημάτων

4.2 MEC με δυνατότητα προσωρινής μνήμης

Η Cisco εκτιμά ότι η ροή βίντεο για κινητά καταλαμβάνει έως και το 72% της συνολικής κίνησης δεδομένων κινητής τηλεφωνίας. Μία μοναδική ιδιότητα αυτών των υπηρεσιών είναι ότι τα αιτήματα περιεχομένου είναι ιδιαίτερα συγκεντρωμένα και τα αιτήματα για ορισμένα δημοφιλή περιεχόμενα πραγματοποιούνται ασύγχρονα και επανειλημμένα. Παρακινούμενη από αυτό το γεγονός, η ασύρματη προσωρινή αποθήκευση περιεχομένου (FemtoCaching) προτείνεται για να αποφευχθεί η συχνή αναπαραγωγή ίδιου περιεχομένου με την προσωρινή αποθήκευση του σε σταθμούς

βάσης. Αυτή η τεχνολογία έχει προσελκύσει την προσοχή τόσο της ακαδημαϊκής κοινότητας όσο και της βιομηχανίας λόγω των εντυπωσιακών πλεονεκτημάτων της στη μείωση της χρονικής καθυστέρησης απόκτησης περιεχομένου, καθώς επίσης και την ανακούφιση των backhaul δικτύων. Ενώ η προσωρινή αποθήκευση αφορά την μετακίνηση δημοφιλούς περιεχομένου κοντά στον τελικό χρήστη, το MEC αποσκοπεί στην ανάπτυξη διακομιστών στα άκρα του δικτύου προκειμένου να χειρίζονται έντονες υπολογιστικές διεργασίες βελτιώνοντας την εμπειρία του χρήστη. Αξίζει να σημειωθεί ότι αυτές οι δύο τεχνικές φαίνεται να στοχεύουν σε διαφορετικές ερευνητικές κατευθύνσεις, δηλαδή η μία για την παράδοση δημοφιλούς περιεχομένου και η άλλη για την εκφόρτωση υπολογιστικών διαδικασιών. Ωστόσο, ενσωματώνονται απρόσκοπτα σε αυτή την ενότητα και προβλέπεται να δημιουργηθεί ένας νέος ερευνητικός τομέας, αυτός του MEC με δυνατότητα προσωρινή αποθήκευσης.

Το νέο σύστημα MEC με δυνατότητα προσωρινής αποθήκευσης εμφανίζεται στο Σχ.4.3. Σε τέτοια συστήματα, ο διακομιστής MEC μπορεί να αποθηκεύσει προσωρινά αρκετές υπηρεσίες εφαρμογών και τη σχετική βάση δεδομένων τους. Αυτό ονομάζεται προσωρινή αποθήκευση δεδομένων. Ταυτόχρονα, ο διακομιστής MEC έχει τη δυνατότητα να χειρίζεται τις εκφορτωμένες σε αυτόν υπολογιστικές διαδικασίες των χρηστών.



Σχήμα 4.3 Σύστημα MEC με δυνατότητα προσωρινής αποθήκευσης

4.2.1 Προσωρινή αποθήκευση υπηρεσιών για κατανομή πόρων στο MEC

Σε αντίθεση με τον κεντρικό διακομιστή υπολογιστικού νέφους που διαθέτει πάντα τεράστιους και ποικίλους πόρους, ο τρέχων διακομιστής MEC έχει λιγότερους, καθιστώντας τον ανίκανο να ικανοποιήσει τα αιτήματα όλων των χρηστών. Από την άλλη, οι διάφορες υπηρεσίες κινητής τηλεφωνίας χρειάζονται διαφορετικούς πόρους, βάσει των οποίων μπορούν να ταξινομηθούν σε εφαρμογές που απαιτούν υπολογιστικούς πόρους, πόρους μνήμης και αποθηκευτικούς πόρους. Παραδείγματα για τις παραπάνω κατηγορίες εφαρμογών είναι το σκάκι που έχει ανάγκη για υπολογιστικούς πόρους, το πρόγραμμα MATLAB online που χρειάζεται πόρους μνήμης και οι εφαρμογές εικονικής πραγματικότητας με απαιτήσεις τόσο σε υπολογιστικούς όσο και σε αποθηκευτικούς χώρους. Μία τέτοια αναντιστοιχία μεταξύ πόρων και ζήτησης εισάγει μία βασική πρόκληση για τον τρόπο εκχώρησης ετερογενών πόρων για την προσωρινή αποθήκευση υπηρεσιών.

Αξίζει να σημειωθεί ότι παρόμοια προβλήματα έχουν διερευνηθεί σε συμβατικά συστήματα υπολογιστικού νέφους, καθώς και σε συστήματα MCC, που ορίζονται ως τοποθέτηση εικονικών μηχανημάτων VM. Συγκεκριμένα, η επιστημονική ομάδα του Johan Tordsson προτείνει μία νέα αρχιτεκτονική για τη διαχείριση VM και βελτιώνει την τοποθέτηση VM σε πολλαπλά υπολογιστικά σύννεφα. Οι ενέργειες αυτές έχουν ως αποτέλεσμα τη μείωση του κόστους ανάπτυξης του συστήματος και τη βελτίωση της εμπειρίας του χρήστη, δεδομένων των περιορισμών στη διαμόρφωση του υλικού, τον αριθμό των VM, καθώς και την εξισορρόπηση του υπολογιστικού φόρτου. Μία άλλη επιστημονική ομάδα, αυτή με επικεφαλής τον Lei Yang, επεκτείνει την ιδέα τοποθέτησης VM στα συστήματα MCC και μελετά την κοινή βελτιστοποίηση της προσωρινής αποθήκευσης και τοποθέτησης υπηρεσιών πέρα από τα πολλαπλά υπολογιστικά σύννεφα. Ακόμα, εξετάζει την αποστολή υπολογιστικού φορτίου για τα αιτήματα των τελικών χρηστών. Ως αποτέλεσμα, προτείνεται ένας αποτελεσματικός αλγόριθμος για την ελαχιστοποίηση τόσο του χρόνου καθυστέρησης υπολογιστικών διεργασιών όσο και του κόστους μετάβασης τοποθέτησης υπηρεσίας. Αυτά τα έργα δεν μπορούν να εφαρμοστούν άμεσα για το σχεδιασμό αποτελεσματικών πολιτικών προσωρινής αποθήκευσης υπηρεσιών για συστήματα MEC, δεδομένου ότι πρέπει να λαμβάνουν υπόψη πιο εκλεπτυσμένες πληροφορίες. Οι πληροφορίες αυτές συμπεριλαμβάνουν τη θέση των χρηστών, την προτίμηση, την εμπειρία, καθώς και τις ικανότητες των διακομιστών στην άκρη του δικτύου όσον αφορά τη μνήμη, την

αποθήκευση και την υποστήριξη ενός αριθμού vm. Για το σκοπό αυτό περιγράφονται δύο πιθανές προσεγγίσεις.

Η μία προσέγγιση είναι η προσωρινή χωρική αποθήκευση υπηρεσίας με γνώμονα τη δημοτικότητα (*spatial popularity driven service caching*). Αυτή αναφέρεται στην προσωρινή αποθήκευση διαφορετικών συνδυασμών και ποσοτήτων υπηρεσιών σε διαφορετικούς διακομιστές MEC σύμφωνα με τις συγκεκριμένες θέσεις τους και τα κοινά ενδιαφέροντα των γύρω χρηστών. Η ιδέα αυτή υποκινείται από το γεγονός ότι οι χρήστες σε μία μικρή περιοχή είναι πιθανό να ζητήσουν παρόμοιες υπηρεσίες. Για παράδειγμα, οι επισκέπτες σε ένα μουσείο τείνουν να χρησιμοποιούν την τεχνολογία AR για καλύτερη εμπειρία χρήστη. Έτσι, είναι επιθυμητή η προσωρινή αποθήκευση πολλαπλών υπηρεσιών AR στο διακομιστή MEC αυτής της περιοχής για την παροχή υπηρεσιών σε πραγματικό χρόνο. Για να επιτευχθεί η βέλτιστη προσωρινή αποθήκευση υπηρεσίας, είναι απαραίτητο να κατασκευαστεί ένα μοντέλο διανομής δημοτικότητας χωρικής εφαρμογής για τον χαρακτηρισμό της δημοτικότητας κάθε εφαρμογής σε διαφορετικές τοποθεσίες. Με βάση αυτό, μπορούν να σχεδιαστούν πολιτικές κατανομής πόρων χρησιμοποιώντας διάφορους αλγόριθμους βελτιστοποίησης, όπως είναι η θεωρία των παιγνίων και οι τεχνικές κυρτής βελτιστοποίησης.

Μία εναλλακτική προσέγγιση είναι η προσωρινή αποθήκευση υπηρεσιών που βασίζεται στην χρονική δημοτικότητα (*temporal popularity driven service caching*). Η κύρια ιδέα είναι παρόμοια με εκείνη του χωρικού ομολόγου, αλλά εκμεταλλεύεται τις πληροφορίες δημοτικότητας στον χρονικό τομέα, δεδομένου ότι τα αιτήματα για υπολογιστικές διαδικασίες εξαρτώνται επίσης από τη χρονική περίοδο. Ένα παράδειγμα είναι ότι οι χρήστες προτιμούν να παίξουν παιχνίδια στο κινητό τους μετά το δείπνο, τα οποία συνεργάζονται με υπολογιστικό νέφος. Αυτό το είδος των πληροφοριών προτείνει στους φορείς εκμετάλλευσης MEC την προσωρινή αποθήκευση αρκετών υπηρεσιών gaming κατά τη διάρκεια αυτής της τυπικής περιόδου για το χειρισμό των τεράστιων υπολογιστικών φορτίων. Ένα μειονέκτημα αυτής της χρονικής προσέγγισης είναι το πρόσθετο κόστος διακομιστή που προκύπτει από τις συχνές λειτουργίες προσωρινής αποθήκευσης και διαγραφής (*cache-and tear*), δεδομένου ότι οι πληροφορίες δημοτικότητας ποικίλουν χρονικά και οι διακομιστές MEC διαθέτουν πεπερασμένους πόρους.

4.2.2 Προσωρινή αποθήκευση δεδομένων για ανάλυση δεδομένων στο MEC

Πολλές σύγχρονες εφαρμογές για κινητές συσκευές περιλαμβάνουν έντονες υπολογιστικές διαδικασίες που απαιτούνται για την ανάλυση δεδομένων, όπως είναι η κατάταξη και η ταξινόμηση. Ένα παράδειγμα είναι η τεχνολογία VR, που δημιουργεί ένα φανταστικό περιβάλλον παρόμοιο με τον πραγματικό κόσμο παράγοντας ρεαλιστικές εικόνες, ήχους και άλλες αισθήσεις για την βελτίωση της εμπειρίας των χρηστών. Η επίτευξη αυτού είναι σημαντική, καθώς απαιτεί από το διακομιστή MEC να ολοκληρώσει πολλαπλές και περίπλοκες διαδικασίες σε εξαιρετικά σύντομο χρονικό διάστημα της τάξης του 1ms. Τέτοιες διαδικασίες είναι η αναγνώριση των ενεργειών των χρηστών μέσω της αναγνώρισης προτύπων, η κατανόηση των αιτημάτων των χρηστών μέσω της εξόρυξης δεδομένων, καθώς και η απόδοση εικονικών ρυθμίσεων μέσω ροής βίντεο ή άλλων τεχνικών αίσθησης. Όλες οι παραπάνω τεχνικές βασίζονται στην ανάλυση δεδομένων και πρέπει να υποστηρίζονται από ολοκληρωμένη βάση δεδομένων, η οποία επιβαρύνει υπολογιστικά και αποθηκευτικά το διακομιστή MEC. Το σύστημα μπορεί να ανακουφιστεί από την έξυπνη προσωρινή αποθήκευση δεδομένων που διατηρεί μόνο τη βάση δεδομένων που χρησιμοποιείται συχνά. Από μία άλλη οπτική γωνία, η προσωρινή αποθήκευση τμημάτων δεδομένων, που είναι αποτέλεσμα υπολογιστικών διαδικασιών και είναι πιθανό να επαναχρησιμοποιηθούν από άλλους χρήστες, μπορεί να ενισχύσει περαιτέρω την απόδοση ολόκληρου του συστήματος MEC. Ένα τυπικό παράδειγμα είναι το Mobile Cloud gaming, το οποίο επιτρέπει γρήγορη και ενεργειακά αποδοτική εμπειρία παιχνιδιού μετατοπίζοντας τις μηχανές υπολογιστικών διεργασιών για παιχνίδια από τις κινητές συσκευές σε διακομιστές στα άκρα του δικτύου, ενώ παράλληλα υποστηρίζει παιχνίδια σε πραγματικό χρόνο μέσω της ροής βίντεο. Έτσι, εμφανίζεται ως μία κορυφαία τεχνική για τις υποδομές κινητού υπολογιστικού νέφους επόμενης γενιάς. Δεδομένου ότι ορισμένα βίντεο που αποδίδονται σε παιχνίδι, όπως είναι κάποιες σκηνές παιχνιδιού, μπορούν να επαναχρησιμοποιηθούν από άλλους παίκτες, η προσωρινή αποθήκευση αυτών των αποτελεσμάτων όχι μόνο μειώνει σημαντικά τον χρόνο καθυστέρησης υπολογιστικών διεργασιών των παικτών με το ίδιο αίτημα, αλλά διευκολύνει του διακομιστές MEC σχετικά με τις υπολογιστικές διαδικασίες.

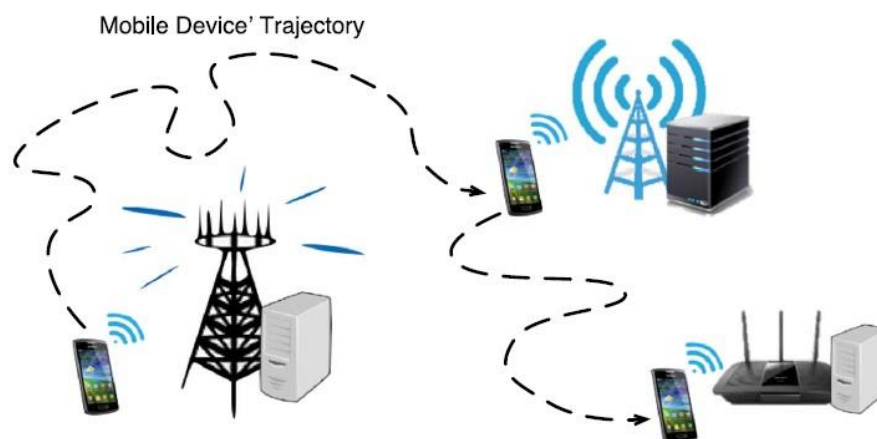
Για την προσωρινή αποθήκευση δεδομένων MEC σε ένα διακομιστή στην άκρη του δικτύου, προκύπτει ένα πρόβλημα που σχετίζεται με την εξισορρόπηση αναμεσά

στον μεγάλο αριθμό βάσεων δεδομένων που πρέπει να αποθηκευτούν και στην περιορισμένη αποθηκευτική χωρητικότητα. Σε αντίθεση με τα δίκτυα FemtoCaching, η προσωρινή αποθήκευση δεδομένων σε συστήματα MEC επιφέρει πολλές επιπτώσεις στην ακρίβεια των υπολογιστικών διαδικασιών, στον χρόνο καθυστέρησης και στην κατανάλωση ενέργειας του διακομιστή MEC, οι οποίες ωστόσο δεν έχουν χαρακτηριστεί στην υπάρχουσα βιβλιογραφία. Αυτό απαιτεί την ανάπτυξη μοντέλων για τον ακριβή ποσοτικό προσδιορισμό των αναφερόμενων επιπτώσεων για διάφορες εφαρμογές MEC. Είναι, επίσης, σημαντικό να καθοριστεί ένα πρακτικό μοντέλο διανομής βάσεων δεδομένων με γνώμονα τη δημοτικότητα τους που είναι σε θέση να χαρακτηρίσει στατιστικά τη χρήση κάθε βάσης δεδομένων που έχει οριστεί για διαφορετικές εφαρμογές MEC. Με βάση τα παραπάνω, η εν λόγω αντιστάθμιση μπορεί να επιτευχθεί με την επίλυση ενός προβλήματος βελτιστοποίησης που μεγιστοποιεί το εφικτό QoS και ελαχιστοποιεί το κόστος αποθήκευσης σε συστήματα MEC.

Το παραπάνω πλαίσιο μπορεί να επεκταθεί περαιτέρω σε συστήματα MEC με πολλαπλούς διακομιστές, όπου κάθε διακομιστής μπορεί να εξυπηρετήσει πολλούς χρήστες και κάθε χρήστης μπορεί να εκφορτώσει τις διεργασίες του σε πολλαπλούς διακομιστές στα άκρα του δικτύου. Το βασικό πρόβλημα είναι παρόμοιο με αυτό των HetNets με δυνατότητα προσωρινής αποθήκευσης, δηλαδή πώς να γίνει η χωρική διανομή μίας βάσης δεδομένων μέσω ετερογενών διακομιστών τόσο κάτω από περιορισμούς αποθήκευσης όσο και με περιορισμούς υπολογιστικού φόρτου σε κάθε έναν από αυτούς, για την αύξηση των εσόδων σε όλο το δίκτυο. Διαισθητικά, κάθε διακομιστής MEC είναι επιθυμητό να διαθέτει περισσότερο χώρο αποθήκευσης για τις βάσεις δεδομένων των πιο δημοφιλών εφαρμογών στον τομέα ευθύνης του. Ταυτόχρονα, πρέπει να αποθηκεύσει μερικώς ένα σύνολο βάσεων δεδομένων για να φιλοξενήσει λιγότερο διαδεδομένες εφαρμογές. Έτσι, η συνεργατική προσωρινή αποθήκευση σε διαφορετικούς διακομιστές MEC βελτιώνει την απόδοση τόσο του συστήματος όσο και των εφαρμογών. Επιπλέον, η απόδοση των μεγάλης κλίμακας δικτύων MEC με δυνατότητα προσωρινής αποθήκευσης μπορεί να αναλυθεί χρησιμοποιώντας στοχαστική γεωμετρία και με μοντελοποίηση των κοντινών χρηστών ως συμπλέγματα.

4.3 Διαχείριση κινητικότητας στο MEC

Η κινητικότητα είναι ένα εγγενές χαρακτηριστικό πολλών εφαρμογών MEC, όπως η υποβοηθούμενη με AR περιήγηση σε ένα μουσείο για να βελτιώσει την εμπειρία των επισκεπτών. Σε αυτές τις εφαρμογές, η κίνηση και η τροχιά των χρηστών παρέχουν πληροφορίες τοποθεσίας και προσωπικής προτίμησης για τους διακομιστές MEC, ώστε να βελτιώσουν την αποτελεσματικότητα του χειρισμού των αιτημάτων των χρηστών. Από την άλλη, η κινητικότητα θέτει επίσης σημαντικές προκλήσεις για την πραγματοποίηση πανταχού παρόντων και αξιόπιστων εφαρμογών υπολογιστικών διαδικασιών, δηλαδή χωρίς διακοπές και σφάλματα. Μία πρόκληση σχετίζεται με το γεγονός ότι το MEC πρόκειται να αφομοιωθεί από την αρχιτεκτονική HetNet που αποτελείται από πολλά macro BS, small cell BS και σημεία πρόσβασης WiFi. Έτσι, η κίνηση των χρηστών απαιτεί συχνές μεταπομπές μεταξύ των διακομιστών στα small cell, όπως φαίνεται στο Σχ.4.4, διαδικασία που είναι εξαιρετικά περίπλοκη λόγω των διαφορετικών ρυθμίσεων παραμέτρων του συστήματος και των πολιτικών συσχέτισης χρήστη με διακομιστή. Στη συνέχεια, οι χρήστες που μετακινούνται μεταξύ διαφορετικών κυψελών υφίστανται σοβαρές παρεμβολές που υποβαθμίζουν σημαντικά τις επιδόσεις της επικοινωνίας. Τέλος, οι συχνές μεταπομπές αυξάνουν την καθυστέρηση και έτσι επιδεινώνεται η εμπειρία των χρηστών.



Σχήμα 4.4 Διαχείριση της κινητικότητας στο MEC

Η διαχείριση της κινητικότητας έχει μελετηθεί εκτενώς για τα παραδοσιακά ετερογενή κυψελωτά δίκτυα. Σε αυτές τις προηγούμενες μελέτες, η κινητικότητα των χρηστών μοντελοποιείται από την πιθανότητα σύνδεσης ή την αξιοπιστία συνδέσεων σύμφωνα με πληροφορίες όπως είναι η ταχύτητα κίνησης των χρηστών. Με βάση αυτά τα μοντέλα, έχει προταθεί δυναμική διαχείριση της κινητικότητας για την επίτευξη υψηλού ρυθμού δεδομένων και χαμηλού ποσοστού εσφαλμένων bit. Ωστόσο, αυτές οι πολιτικές δεν μπορούν να εφαρμοστούν άμεσα για συστήματα MEC με κινούμενους χρήστες, καθώς παραμελούν τις πολιτικές μεταπομπής και μεταβίβασης πόρων σε διακομιστές MEC. Πρόσφατες μελέτες έχουν κάνει αρχικές προσπάθειες για το σχεδιασμό συστημάτων MEC με επίγνωση της κινητικότητας. Μία προσέγγιση ορίζει τον χρόνο επικοινωνίας και το ποσοστό επικοινωνίας για μοντέλο της κινητικότητας των χρηστών. Στη συνέχεια, σχεδιάζει μία ευκαιριακή πολιτική εκφόρτωσης με την επίλυση ενός προβλήματος κυρτής βελτιστοποίησης για τη μεγιστοποίηση της επιτυχημένης πιθανότητας εκφόρτωσης διεργασιών. Μία άλλη προσέγγιση σχετίζεται με τον αριθμό των διακομιστών MEC στους οποίους μπορούν να έχουν πρόσβαση οι χρήστες. Στη συνέχεια, η απόφαση εκφόρτωσης διεργασιών βελτιστοποιείται από την διαδικασία απόφασης Markov (MDP) για την ελαχιστοποίηση του κόστους εκφόρτωσης, συμπεριλαμβανομένης της κατανάλωσης ενέργειας, της χρονικής καθυστέρησης και της ποινής αποτυχίας. Άλλα μοντέλα χαρακτηρίζουν την κινητικότητα ως μία σειρά δικτύων με τα οποία οι χρήστες μπορούν να συνδεθούν και ως μία δισδιάστατη ροή διεργασιών τοποθεσίας και χρονικής στιγμής. Επιπλέον, η διαχείριση της κινητικότητας για το MEC ενσωματώνεται στον έλεγχο της κυκλοφορίας σε άλλες μελέτες για την παροχή καλύτερης εμπειρίας στους χρήστες με διεργασίες ανεκτικές σε καθυστερήσεις μέσω του σχεδιασμού ευφώνων μηχανισμών σύνδεσης κυψελωτών δικτύων. Σε άλλη προσέγγιση, η προσωρινή αποθήκευση σε διακομιστές εμπεριέχει την πρόβλεψη κινητικότητας για τη βελτίωση της μετεγκατάστασης του προσωρινά αποθηκευμένου περιεχομένου που βρίσκεται στα άκρα του δικτύου. Επομένως, η προσωρινή αποθήκευση με επίγνωση της κινητικότητας είναι ικανή να παρέχει πολύτιμες κατευθυντήριες γραμμές για τη διαχείριση της κινητικότητας στα συστήματα MEC.

Είναι σημαντικό να αναφερθεί ότι οι περισσότερες από τις υπάρχουσες μελέτες επικεντρώνονται στη βελτιστοποίηση της επιλογής διακομιστή με επίγνωση της κινητικότητας. Ωστόσο, για να επιτευχθεί καλύτερη εμπειρία χρήστη και υψηλότερο

κέρδος σε όλο το δίκτυο, πρέπει να εξεταστούν από κοινού οι τεχνικές εκφόρτωσης σε κινητές συσκευές και οι πολιτικές προγραμματισμού σε διακομιστές MEC. Αυτό εισάγει ένα σύνολο από ενδιαφέρουσες ερευνητικές ευκαιρίες με ορισμένες από αυτές να περιγράφονται στις ενότητες 4.3.1, 4.3.2, 4.3.3 και 4.3.4.

4.3.1 Προφόρτωση δεδομένων με επίγνωση κινητικότητας

Στην πράξη, οι πλήρεις πληροφορίες της τροχιάς του χρήστη ενδέχεται να μην είναι διαθέσιμες. Η συμβατική σχεδίαση για την αποφόρτιση των κινητών συσκευών από υπολογιστικές διαδικασίες επιφέρει υπολογιστικές διεργασίες σε άλλο διακομιστή μόνο κατά τη διαδικασία μεταπομπής. Αυτός ο μηχανισμός απαιτεί την λήψη υπερβολικά μεγάλου όγκου δεδομένων και συνεπώς φέρνει μεγάλη καθυστέρηση στο σύστημα. Επιπλέον, προκαλεί βαριά φορτία κίνησης δεδομένων στο δίκτυο. Μία πολλά υποσχόμενη λύση για να χειριστεί αυτό το ζήτημα είναι να αξιοποιηθούν οι στατιστικές πληροφορίες της τροχιάς του χρήστη προκειμένου να γίνει προφόρτωση τμημάτων των μελλοντικών δεδομένων σε πιθανούς διακομιστές κατά την χρονική διάρκεια που ο τρέχων διακομιστής, που εξυπηρετεί τον χρήστη, εκτελεί υπολογιστικές διεργασίες. Αυτή η τεχνική μπορεί όχι μόνο να μειώσει σημαντικά τον χρόνο μεταπομπής μέσω της πρόβλεψης κινητικότητας, αλλά και να επιτρέψει την ενεργειακά αποδοτική εκφόρτωση με τη διεύρυνση του χρόνου μετάδοσης. Ωστόσο, αντιμετωπίζει επίσης αρκετές προκλήσεις με τις δύο πιο κρίσιμες να περιγράφονται παρακάτω. Η πρώτη πρόκληση προκύπτει από την πρόβλεψη της τροχιάς. Η ακριβής πρόβλεψη μπορεί να επιτρέψει την απρόσκοπτη μεταβίβαση δεδομένων μεταξύ των διακομιστών MEC και να μειώσει τον πλεονασμό προφόρτωσης. Η επίτευξή του, ωστόσο, απαιτεί ακριβή μοντελοποίηση και τεχνικές μηχανικής μάθησης υψηλής πολυπλοκότητας. Για παράδειγμα, η τροχιά ενός τυπικού επισκέπτη σε ένα μουσείο μπορεί να προβλεφθεί σύμφωνα με τις πληροφορίες για τα δικά του ενδιαφέροντα και στατιστικές πληροφορίες διαδρομής ορισμένων προηγούμενων επισκεπτών με παρόμοια ενδιαφέροντα. Ως εκ τούτου, είναι σημαντικό να εξισορροπηθεί η αντιστάθμιση μεταξύ της ακρίβειας μοντελοποίησης και της υπολογιστικής πολυπλοκότητας. Η δεύτερη πρόκληση έγκειται στην επιλογή των δεδομένων για προφόρτωση σε άλλον διακομιστή. Για να μεγιστοποιηθεί η επιτυχής πιθανότητα εκφόρτωσης τα στοιχεία που απαιτούν

έντονες υπολογιστικές διεργασίες πρέπει να προφορτωθούν νωρίτερα με προσαρμοστικό έλεγχο ισχύος μετάδοσης σε δυναμικά κανάλια με διαλείψεις.

4.3.2 Μείωση υπολογιστικού φόρτου με επίγνωση κινητικότητας και χρήση επικοινωνιών D2D

Οι επικοινωνίες D2D προτείνονται για τη βελτίωση της χωρητικότητας του δικτύου και την ανακούφιση του φόρτου κυκλοφορίας δεδομένων στα συστήματα κινητής τηλεφωνίας. Αυτό το πρότυπο μπορεί επίσης να χρησιμοποιηθεί για τη διαχείριση των προβλημάτων κινητικότητας των χρηστών σε συστήματα MEC, όπου δημιουργούνται πολυάριθμες συνδέσεις επικοινωνίας D2D. Αυτές οι συνδέσεις επιτρέπουν την εκφόρτωση των υπολογιστικών διαδικασιών ενός χρήστη σε κοντινούς του χρήστες που διαθέτουν ισχυρότερες υπολογιστικές ικανότητες. Η επικοινωνία μικρής εμβέλειας που προσφέρεται από τις συνδέσεις D2D μειώνει επίσης την κατανάλωση ενέργειας μετάδοσης δεδομένων. Όμως, η κινητικότητα των χρηστών φέρνει νέα προβλήματα σχεδιασμού. Ένα ζήτημα αφορά την εκμετάλλευση των πλεονεκτημάτων τόσο των D2D και όσο και των κυψελωτών επικοινωνιών. Μία πιθανή προσέγγιση είναι να εκφορτώνονται τα δεδομένα με έντονες υπολογιστικές απαιτήσεις στους διακομιστές σε σταθμούς βάσης με τεράστιες δυνατότητες υπολογισμού, προκειμένου να μειωθεί ο χρόνος υπολογιστικής επεξεργασίας. Ταυτόχρονα, τμήματα των μεγάλων σε μέγεθος δεδομένων και των αυστηρών υπολογιστικών απαιτήσεων πρέπει να λαμβάνονται στους κοντινούς χρήστες μέσω των επικοινωνιών D2D για υψηλότερη ενεργειακή απόδοση. Ένα άλλο πρόβλημα είναι η επιλογή των γύρω χρηστών για εκφόρτωση διεργασιών, η οποία πρέπει να βελτιστοποιηθεί ώστε να λαμβάνονται υπόψη οι πληροφορίες κινητικότητας των χρηστών, τα δυναμικά κανάλια και οι δυνατότητες υπολογισμού των ετερογενών χρηστών. Τέλος, οι μαζικές συνδέσεις D2D εισαγάγουν σοβαρές παρεμβολές για να αποτελούν αξιόπιστες επικοινωνίες. Αυτό το ζήτημα είναι αρκετά περίπλοκο στα συστήματα MEC που βασίζονται στην κινητικότητα, λόγω των ταχέως μεταβαλλόμενων ασύρματων περιβαλλόντων διαλείψεων. Ως εκ τούτου, οι προηγμένες τεχνικές μείωσης παρεμβολών και οι γνωστικές τεχνικές διαχείρισης ραδιοφάσματος μπορούν να εφαρμοστούν στα συστήματα MEC, μαζί με την πρόβλεψη κινητικότητας για να αυξήσουν το ποσοστό εκφόρτωσης δεδομένων και διαδικασιών και να μειώσουν τον χρόνο καθυστέρησης υπηρεσιών.

4.3.3 Ανεκτικότητα σε σφάλματα και επίγνωση κινητικότητας

Η κινητικότητα των χρηστών δημιουργεί σημαντικές προκλήσεις για την παροχή αξιόπιστων υπηρεσιών MEC λόγω του δυναμικού περιβάλλοντος. Η εκφόρτωση υπολογιστικών διεργασιών ενδέχεται να αποτύχει λόγω των διακοπτόμενων συνδέσεων και των ασύρματων καναλιών ταχέων αλλαγών. Η προκληθείσα αποτυχία είναι καταστροφική για τις εφαρμογές που είναι ευαίσθητες στις χρονικές καθυστερήσεις και απαιτητικές σε πόρους. Για παράδειγμα, η ξενάγηση σε ένα μουσείο με βίντεο που βασίζεται στην τεχνολογία AR έχει ως στόχο να παρέχει άπταιστες και φανταχτερές εικονικές αισθήσεις στους επισκέπτες. Έτσι, η διαταραχή ή η αποτυχία της ροής βίντεο λόγω διακοπτόμενων συνδέσεων αναστατώνει τους επισκέπτες. Ένα άλλο παράδειγμα είναι μία στρατιωτική επιχείρηση που απαιτεί πάντα γρήγορες και εξαιρετικά αξιόπιστες υπολογιστικές διαδικασίες, ακόμη και σε περιβάλλοντα υψηλής κινητικότητας. Οποιαδήποτε αποτυχία έχει σοβαρές συνέπειες. Τα γεγονότα αυτά απαιτούν το σχεδιασμό συστημάτων MEC με επίγνωση σφαλμάτων και κινητικότητας. Τρία σημαντικά και ενδιαφέροντα προβλήματα παρουσιάζονται, συμπεριλαμβανομένης της πρόληψης σφαλμάτων, της ανίχνευσης σφαλμάτων και της αποκατάστασης σφαλμάτων. Η πρόληψη σφαλμάτων είναι η αποφυγή ή η αποτροπή σφαλμάτων στο MEC δημιουργώντας αντίγραφα ασφαλείας των πρόσθετων σταθερών συνδέσεων εκφόρτωσης. Οι macro BS ή τα κεντρικά υπολογιστικά σύννεφα μπορούν να επιλεγούν ως σύννεφα προστασίας, δεδομένου ότι έχουν μεγάλη κάλυψη δικτύου που επιτρέπει τη συνεχή υπηρεσία MEC. Οι βασικές προκλήσεις σχεδιασμού έγκειται στον τρόπο εξισορρόπησης της ποιότητας υπηρεσίας (QoS) και της κατανάλωσης ενέργειας λόγω των επιπλέον συνδέσεων εκφόρτωσης για την περίπτωση ενός χρήστη και της διάθεσης των σύννεφων προστασίας για εφαρμογές MEC πολλών χρηστών. Στη συνέχεια, η ανίχνευση σφαλμάτων είναι η συλλογή πληροφοριών σφάλματος, που μπορεί να πραγματοποιηθεί με τον καθορισμό έξυπνων χρονικών ελέγχων ή με τη λήψη σχολίων για υπηρεσίες MEC. Επιπλέον, μπορούν να εφαρμοστούν τεχνικές εκτίμησης καναλιών και κινητικότητας για την εκτίμηση του σφάλματος, ώστε να μειωθεί ο χρόνος ανίχνευσης. Τέλος, για τα σφάλματα που εντοπίστηκαν, πρέπει να εκτελούνται προσεγγίσεις ανάκτησης για τη συνέχιση και την επιτάχυνση της υπηρεσίας MEC. Η ανεσταλμένη υπηρεσία μπορεί να μεταφερθεί στις πλέον αξιόπιστες εφεδρικές ασύρματες συνδέσεις με προσαρμοστικό έλεγχο ισχύος για

ταχύτερη διαδικασία εκφόρτωσης. Εναλλακτικές προσεγγίσεις αποκατάστασης περιλαμβάνουν τη μετεγκατάσταση του φόρτου εργασίας σε γειτονικά συστήματα MEC απευθείας ή μέσω ad hoc κόμβων αναμετάδοσης.

4.3.4 Προγραμματισμός διακομιστή MEC με επίγνωση κινητικότητας

Για συστήματα MEC πολλών χρηστών, ο παραδοσιακός προγραμματισμός διακομιστών MEC εξυπηρετεί τους χρήστες σύμφωνα με τη σειρά προτεραιότητας εκφόρτωσης που εξαρτάται από τις ξεχωριστές τοπικές πληροφορίες των χρηστών, τα κέρδη καναλιών και τις απαιτήσεις χρονικής καθυστέρησης. Ωστόσο, αυτή η στατική σχεδίαση προγραμματισμού δεν μπορεί να εφαρμοστεί άμεσα για τα συστήματα MEC πολλών χρηστών με κινητικότητα λόγω των δυναμικών αλλαγών περιβάλλοντος. Παραδείγματα αυτών των αλλαγών είναι τα χρονομεταβαλλόμενα κανάλια και οι διακοπτόμενες συνδέσεις. Αυτή η δυναμική παρακινεί το σχεδιασμό του προσαρμοστικού προγραμματισμού διακομιστή που αναδημιουργεί τη σειρά προγραμματισμού σε τακτά χρονικά διαστήματα ενσωματώνοντας τις πληροφορίες χρήστη σε πραγματικό χρόνο. Σε τέτοιους προσαρμοστικούς μηχανισμούς προγραμματισμού κατανέμεται υψηλότερη προτεραιότητα εκφόρτωσης στους χρήστες που αντιμετωπίζουν χειρότερες συνθήκες, ώστε να τηρούνται οι προθεσμίες των υπολογιστικών διεργασιών. Μία άλλη πιθανή προσέγγιση είναι ο σχεδιασμός λειτουργίας εκφόρτωσης με προτεραιότητα και επίγνωση της κινητικότητας με τα ακόλουθα δύο βήματα. Το πρώτο βήμα είναι η ακριβής πρόβλεψη των προφίλ κινητικότητας των χρηστών και των καναλιών, όπου η μεγαλύτερη πρόκληση είναι ο τρόπος αντιμετώπισης των αποτελεσμάτων της κινητικότητας και ο επαναπροσδιορισμός της εκφόρτωσης με λειτουργία προτεραιότητας. Το δεύτερο βήμα είναι η δέσμευση πόρων που μπορεί να βελτιώσει τις επιδόσεις διακομιστή. Συγκεκριμένα, για την εγγύηση της QoS των χρηστών που είναι ευαίσθητοι στις χρονικές καθυστερήσεις και χαρακτηρίζονται από υψηλή κινητικότητα, οι διακομιστές MEC μπορούν να δεσμεύουν ορισμένους ειδικούς υπολογιστικούς πόρους και να παρέχουν με αυτόν τον τρόπο αξιόπιστες υπηρεσίες. Ενώ για άλλους χρήστες με ανοχή στην καθυστέρηση, οι διακομιστές MEC μπορούν να παρέχουν υπηρεσίες κατά απαίτηση. Για ένα τέτοιο υβριδικό σύστημα παροχής υπηρεσιών, ο προγραμματισμός διακομιστή μπορεί να βελτιστοποιηθεί για την εξυπηρέτηση του

μέγιστου αριθμού χρηστών με εγγυήσεις για QoS, καθώς και για τη μεγιστοποίηση των εσόδων.

4.4 Ενέργεια στο MEC

Οι διακομιστές MEC είναι κέντρα δεδομένων μικρής κλίμακας, καθένα από τα οποία καταναλώνει σημαντικά λιγότερη ενέργεια από το συμβατικό κέντρο δεδομένων υπολογιστικού νέφους. Ωστόσο, το πυκνό μοτίβο ανάπτυξής τους προκαλεί μεγάλη ανησυχία για την κατανάλωση ενέργειας σε όλο το σύστημα. Ως εκ τούτου, είναι αναμφισβήτητα σημαντικό να αναπτυχθούν καινοτόμες τεχνικές για την επίτευξη χαμηλής ενεργειακής κατανάλωσης στα συστήματα MEC. Δυστυχώς, ένας τέτοιος σχεδιασμός είναι δύσκολος σε σύγκριση με την εξοικονόμηση ενέργειας στα συστήματα επικοινωνίας ή τα δίκτυα κέντρων δεδομένων (Data Center Networks). Σε σύγκριση με τα ενεργειακά αποδοτικά συστήματα επικοινωνίας, η διαχείριση των υπολογιστικών πόρων οφείλει να εγγυάται ικανοποιητική απόδοση, καθιστώντας τις παραδοσιακές τεχνικές εξοικονόμησης ενέργειας στο ραδιοφάσμα όχι άμεσα εφαρμόσιμες. Εκτός αυτού, προηγούμενες ερευνητικές προσπάθειες για οικολογικά DCN δεν έχουν εξετάσει τη διαχείριση ραδιοφάσματος, γεγονός που τις καθιστά ακατάλληλες για οικολογικά συστήματα MEC. Ακόμα, το εξαιρετικά απρόβλεπτο υπολογιστικό φορτίο διεργασιών σε διακομιστές MEC θέτει μία άλλη μεγάλη πρόκληση για τη διαχείριση των πόρων σε συστήματα MEC, ζητώντας προηγμένες τεχνικές εκτίμησης και βελτιστοποίησης. Σε αυτή την ενότητα, εισάγονται διαφορετικές προσεγγίσεις για το σχεδιασμό οικολογικών συστημάτων MEC, που περιλαμβάνουν τη δυναμική και αναλογική ενέργεια στα συστήματα MEC, την γεωγραφική εξισορρόπηση φορτίου διεργασιών (Geographic Load Balancing) για συστήματα MEC και τα συστήματα MEC που τροφοδοτούνται από ανανεώσιμες πηγές ενέργειας.

4.4.1 Δυναμική και αναλογική ενέργεια στα συστήματα MEC

Ακόμα και όταν ο διακομιστής είναι σε κατάσταση αδράνειας, εξακολουθεί να καταναλώνει περίπου το 70% της ενέργειας, καθώς λειτουργεί με πλήρη ταχύτητα. Το γεγονός αυτό παρακινεί το σχεδιασμό ενεργειακά αναλογικών διακομιστών, δηλαδή η κατανάλωση ενέργειας ενός διακομιστή πρέπει να είναι ανάλογη με το υπολογιστικό του φορτίο. Η συγκεκριμένη ιδέα προτείνει την απενεργοποίηση ή την επιβράδυνση των ταχυτήτων επεξεργασίας ορισμένων διακομιστών στα άκρα του

δικτύου που έχουν μικρά υπολογιστικά φορτία. Ωστόσο, μαζί με την πιθανή εξοικονόμηση ενέργειας, η εναλλαγή των διακομιστών ανάμεσα στον ενεργό και στον αδρανή τρόπο λειτουργίας επιφέρει αρνητικές επιπτώσεις. Πρώτα από όλα, προκαλείται μεταβολή στο κόστος της ενέργειας και καθυστέρηση στην μετέγκατασταση δεδομένων εφαρμογής. Επίσης, η εμπειρία του χρήστη μπορεί να υποβαθμιστεί λόγω του μικρότερου ποσού των εκχωρημένων υπολογιστικών πόρων, οι οποίοι μπορούν με τη σειρά τους να μειώσουν τα έσοδα του συστήματος. Επιπλέον, η εναλλαγή στις λειτουργίες του διακομιστή αυξάνει το κόστος φθοράς τους, το οποίο συνεπάγεται την αύξηση του κόστους συντήρησης των φορέων εκμετάλλευσης συστημάτων MEC. Ως αποτέλεσμα, η απενεργοποίηση των διακομιστών στα άκρα του δικτύου με μωπικό τρόπο δεν είναι πάντα επωφελής.

Για να ληφθεί μία αποτελεσματική απόφαση σχετικά με τη δυναμική και αναλογική παροχή ενέργειας, το προφίλ του φόρτου διεργασιών σε κάθε διακομιστή πρέπει να προβλέπεται με ακρίβεια. Στα συμβατικά DCN αυτό μπορεί να επιτευχθεί αρκετά εύκολα, καθώς ο φόρτος διεργασιών σε κάθε κέντρο δεδομένων είναι μία συγκέντρωση των υπολογιστικών αιτημάτων μίας μεγάλης φυσικής περιοχής, όπως είναι αρκετές πολιτείες στις Ηνωμένες Πολιτείες. Όμως, για τα συστήματα MEC η περιοχή εξυπηρέτησης κάθε διακομιστή είναι μικρότερη και το μοτίβο φόρτου διεργασιών επηρεάζεται από πολλούς παράγοντες. Οι παράγοντες αυτοί είναι η θέση του διακομιστή, η χρονική στιγμή, ο καιρός, ο αριθμός των κοντινών διακομιστών MEC και η κινητικότητα των χρηστών. Αυτό οδηγεί σε ένα γρήγορα μεταβαλλόμενο μοτίβο φόρτου εργασιών που απαιτεί πιο προηγμένες τεχνικές πρόβλεψης. Επιπλέον, πρέπει να αναπτυχθούν διαδικτυακοί δυναμικοί αλγόριθμοι για το παραπάνω ζήτημα που απαιτούν λιγότερες μελλοντικές πληροφορίες.

4.4.2 Γεωγραφική εξισορρόπηση φόρτου διεργασιών

Η γεωγραφική εξισορρόπηση φόρτου διεργασιών (Geographical Load Balancing) είναι μία άλλη βασική τεχνική για εξοικονόμηση ενέργειας στα δίκτυα κέντρων δεδομένων. Η GLB αξιοποιεί τις χωρικές διαφορές των προτύπων φόρτου διεργασιών, των θερμοκρασιών και των τιμών ηλεκτρικής ενέργειας, για να λάβει την απόφαση δρομολόγησης φόρτου διεργασιών μεταξύ διαφορετικών κέντρων δεδομένων. Η τεχνική αυτή μπορεί επίσης να εφαρμοστεί σε συστήματα MEC. Για παράδειγμα, ένα σύμπλεγμα διακομιστών MEC μπορεί να συντονιστεί για να

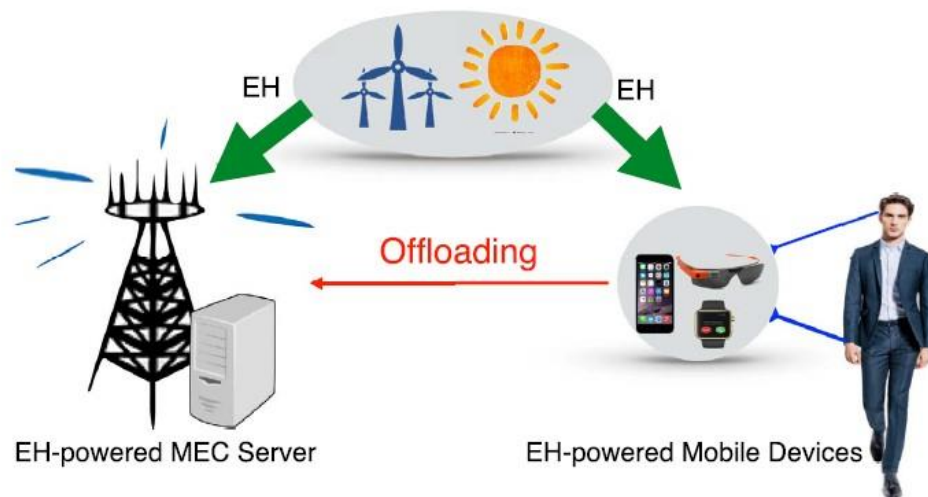
εξυπηρετήσει έναν κινητό χρήστη, δηλαδή οι διεργασίες μπορούν να δρομολογηθούν από έναν διακομιστή MEC σε έναν άλλο κοντινό διακομιστή με ελαφρύ φόρτο διεργασιών. Από τη μία πλευρά, αυτό βοηθά στη βελτίωση της ενεργειακής απόδοσης των διακομιστών MEC με ελαφρύ φόρτο διεργασιών καθώς και την εμπειρία του χρήστη. Από την άλλη, μπορεί να παρατείνει τη διάρκεια ζωής της μπαταρίας των κινητών συσκευών, καθώς η εκφόρτωση των εργασιών μέσω του κοντινού διακομιστή ενδέχεται να εξοικονομήσει ενέργεια μετάδοσης. Αξίζει να σημειωθεί ότι η εφαρμογή της GLB απαιτεί αποτελεσματικές τεχνικές διαχείρισης των πόρων σε διακομιστές MEC, όπως είναι αυτές που αναλύονται στις παραγράφους 4.2.1 και 4.4.1.

Εν τω μεταξύ, υπάρχουν πολλοί παράγοντες που πρέπει να ενσωματωθούν κατά την εφαρμογή GLB σε περιβάλλον MEC. Πρώτον, δεδομένου ότι οι μετεγκατεστημένες διεργασίες περνούν από το κεντρικό δίκτυο κινητής τηλεφωνίας, η κατάσταση συμφόρησης του δικτύου πρέπει να παρακολουθείται και να λαμβάνεται υπόψη κατά τη λήψη των αποφάσεων της GLB. Δεύτερον, για να καταστεί δυνατή η απρόσκοπτη μετεγκατάσταση διεργασιών, μία εικονική μηχανή πρέπει να μετεγκατασταθεί ή να συσταθεί σε άλλο διακομιστή MEC εκ των προτέρων, γεγονός που προκαλεί πρόσθετη κατανάλωση ενέργειας. Τρίτον, τα αμοιβαία συμφέροντα των φορέων εκμετάλλευσης MEC και των συνδρομητών υπηρεσιών MEC πρέπει να εξετάζονται προσεκτικά κατά την εκτέλεση της GLB, λόγω της αντιστάθμισης μεταξύ της εξοικονόμησης ενέργειας και της μείωσης της χρονικής καθυστέρησης. Τέλος, η ύπαρξη συμβατικών υποδομών υπολογιστικού νέφους προσφέρει στους διακομιστές MEC μία επιπλέον επιλογή για εκφόρτωση των διεργασιών με απαιτήσεις για χαμηλούς χρόνους καθυστέρησης και έντονες υπολογιστικές διαδικασίες σε απομακρυσμένα κέντρα δεδομένων, δημιουργώντας μία νέα σχεδιαστική διάσταση και περιπλέκοντας περαιτέρω τη βελτιστοποίηση.

4.4.3 Συστήματα MEC με ανανεώσιμες πηγές ενέργειας

Η ενέργεια του δικτύου παράγεται συνήθως από σταθμούς ηλεκτροπαραγωγής με καύση άνθρακα. Ως εκ τούτου, η ενεργειακή τροφοδοσία κινητών συστημάτων προκαλεί αναπόφευκτα τεράστια ποσότητα εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα. Ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, όπως είναι η ηλιακή και η αιολική ενέργεια αναδύονται ως βιώσιμες και πολλά υποσχόμενες πηγές ενέργειας για διάφορα

συστήματα χάρη στις πρόσφατες προόδους των τεχνικών συλλογής ενέργειας (Energy Harvesting). Το γεγονός αυτό παρακινεί το σχεδιασμό καινοτόμων συστημάτων MEC, που ονομάζονται συστήματα MEC που τροφοδοτούνται με ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, τα οποία εμφανίζονται στο Σχ.4.5, που περιλαμβάνει τόσο διακομιστές MEC όσο και κινητές συσκευές με δυνατότητα συλλογής ενέργειας. Αφενός, δεδομένου ότι οι διακομιστές MEC αναμένεται να αναπτυχθούν πυκνά και να έχουν χαμηλή κατανάλωση ενέργειας παρόμοια με εκείνη των small cell BS, είναι λογικό και εφικτό να τροφοδοτηθούν οι υποδομές MEC με τις τεχνικές EH τελευταίας τεχνολογίας. Από την άλλη, οι κινητές συσκευές μπορούν επίσης επωφεληθούν από τη χρησιμοποίηση της ανανεώσιμης ενέργειας καθώς η EH είναι σε θέση να παρατείνει τη ζωή μπαταρίας τους. Επιπλέον, η χρήση ανανεώσιμων πηγών ενέργειας εξαλείφει την ανάγκη ανθρώπινης παρέμβασης, όπως είναι η αντικατάσταση ή η επαναφόρτιση των μπαταριών. Πολλές φορές η ανθρώπινη παρέμβαση είναι δύσκολη αν όχι αδύνατη για ορισμένα σενάρια εφαρμογών, όπου η πρόσβαση στις κινητές συσκευές είναι επικίνδυνη. Εν τω μεταξύ, αυτά τα πλεονεκτήματα της χρήσης ανανεώσιμης ενέργειας συνοδεύονται από νέες προκλήσεις σχεδιασμού.



Σχήμα 4.5 Σύστημα MEC με ανανεώσιμες πηγές ενέργειας

Ένα βασικό πρόβλημα που πρέπει να αντιμετωπιστεί για τα συστήματα MEC που τροφοδοτούνται με ανανεώσιμες πηγές ενέργειας είναι η κατανομή των πόρων και η εκφόρτωση των διεργασιών με γνώμονα την ενεργειακή κατανάλωση. Αντί να

ελαχιστοποιηθεί η κατανάλωση ενέργειας που υπόκειται σε ικανοποιητική εμπειρία χρήστη, η αρχή σχεδιασμού για τα συστήματα MEC με ανανεώσιμες πηγές ενέργειας πρέπει να στοχεύει στη βέλτιστη εφικτή απόδοση υπό τους περιορισμούς των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας. Επίσης, ο εφοδιασμός του συστήματος MEC με ανανεώσιμες πηγές ενέργειας παρέχει πληροφορίες από την πλευρά της ενέργειας (Energy Side Information), οι οποίες δείχνουν την ποσότητα των διαθέσιμων ανανεώσιμων πηγών ενέργειας και διαδραματίζουν βασικό ρόλο στη λήψη αποφάσεων. Οι αρχικές έρευνες σε συστήματα MEC με ανανεώσιμες πηγές ενέργειας επικεντρώνονται σε διακομιστές MEC και κινητές συσκευές με λειτουργία EH. Όσον αφορά τους διακομιστές MEC που λειτουργούν με EH, ο διαχειριστής του συστήματος πρέπει να αποφασίσει για το μέγεθος του φόρτου διεργασιών που πρόκειται να εκφορτωθεί στο κεντρικό υπολογιστικό σύννεφο, καθώς και για την ταχύτητα επεξεργασίας του διακομιστή MEC. Οι αποφάσεις του διαχειριστή γίνονται σύμφωνα με τις πληροφορίες της κατάστασης συμφόρησης του κεντρικού δικτύου, του φόρτου εργασίας υπολογισμού και των ESI. Για κινητές συσκευές που λειτουργούν με EH, έχει προταθεί μία δυναμική πολιτική μείωσης του υπολογιστικού φόρτου χρησιμοποιώντας τεχνικές βελτιστοποίησης Lyapunov που βασίζονται τόσο στις πληροφορίες κατάστασης καναλιού (Channel State Information) όσο και στις ESI. Ωστόσο, τα παραπάνω μπορούν να εφαρμοστούν μόνο σε συστήματα MEC μικρής κλίμακας που αποτελούνται είτε από ένα διακομιστή είτε από μία κινητή συσκευή. Συνεπώς, δεν μπορούν να αποτελούν ολοκληρωμένη λύση για συστήματα MEC μεγάλης κλίμακας.

Για συστήματα MEC μεγάλης κλίμακας, όπου αναπτύσσονται πολλοί διακομιστές MEC σε μία μεγάλη γεωγραφική περιοχή, η έννοια της GLB μπορεί να τροποποιηθεί σε μία εκδοχή που βασίζεται στην εξοικονόμηση ενέργειας. Η τροποποίηση αυτή αποσκοπεί στη βελτιστοποίηση των συστημάτων MEC με την περαιτέρω αξιοποίηση της χωρικής ποικιλομορφίας των διαθέσιμων ανανεώσιμων πηγών ενέργειας. Αυτή η ιδέα έχει προταθεί αρχικά για τα πράσινα DCN, όπου η πολιτική δρομολόγησης στηρίζεται στις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας και προσφέρει μία τεράστια ευκαιρία για τη μείωση της κατανάλωσης ενέργειας του δικτύου. Επιπλέον, όπως προαναφέρθηκε, υπάρχουν σημαντικές διαφορές μεταξύ των συστημάτων MEC και των συμβατικών DCN όσον αφορά τη διακύμανση των ασύρματων καναλιών και την ελευθερία σχεδιασμού συστημάτων διαχείρισης πόρων από την πλευρά των διαχειριστών των συστημάτων. Οι παράγοντες αυτοί καθιστούν περίπλοκη τη λήψη

αποφάσεων εκφόρτωσης διεργασιών για την τεχνική GLB με γνώμονα την εξοικονόμηση ενέργειας, καθώς πρέπει να εξετάσει τις CSI και τις ESI σε ολόκληρο το σύστημα.

Η τυχαιότητα των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας μπορεί να εισαγάγει την έννοια της αναξιπιστίας κατά την εκφόρτωση διεργασιών και τους κινδύνους αποτυχίας της διαδικασίας αυτής, που προκαλούν σημαντική ανησυχία για τη χρήση ανανεώσιμων πηγών ενέργειας για την τροφοδοσία των συστημάτων MEC. Ευτυχώς, υπάρχουν αρκετές πιθανές λύσεις που παρακάμπτουν αυτό το ζήτημα, όπως περιγράφεται παρακάτω:

1. Χάρη στο χαμηλό κόστος ανάπτυξης, οι διακομιστές MEC που τροφοδοτούνται με ανανεώσιμες πηγές ενέργειας μπορούν να αναπτυχθούν αρκετά πυκνά για να παρέχουν περισσότερες ευκαιρίες εκφόρτωσης διεργασιών στους χρήστες. Οι προκύπτουσες επικαλυπτόμενες περιοχές εξυπηρέτησης προσφέρουν πληθώρα επιλογών στην εκφόρτωση διεργασιών με βάση τη διαθέσιμη ενέργεια για να την αποφυγή υποβάθμισης της απόδοσης του συστήματος.
2. Η πιθανότητα διακοπής παροχής ηλεκτρικής ενέργειας μειώνεται με την ορθή επιλογή των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας. Διαπιστώνεται ότι η ηλιακή ενέργεια είναι καταλληλότερη για φόρτους διεργασιών με υψηλό δείκτη PMR, ενώ η αιολική ενέργεια ταιριάζει καλύτερα για φόρτους με μικρό PMR. Ο δείκτης PMR είναι ο λόγος της μέγιστης κίνησης που παρατηρείται σε ένα δίκτυο προς τη μέση κίνηση σε αυτό. Αυτός ο δείκτης μπορεί να δώσει οδηγίες για την τροφοδοσία διακομιστών MEC με ανανεώσιμες πηγές ενέργειας.
3. Οι διακομιστές MEC μπορούν να τροφοδοτούνται από υβριδικές πηγές ενέργειας για τη βελτίωση της αξιοπιστίας τους, δηλαδή η τροφοδοσία να γίνεται τόσο από το ηλεκτρικό δίκτυο όσο και από τη συγκομισθείσα ενέργεια. Επίσης, εξοπλίζοντας τους διακομιστές MEC μονάδες αδιάλειπτης παροχής ενέργειας (UPS) επιτυγχάνεται μία σύντομη περίοδος σταθερής παροχής ενέργειας όταν η ανανεώσιμη πηγή ενέργειας αδυνατεί να τροφοδοτήσει το σύστημα σε περίπτωση προβλήματος στο ηλεκτρικό δίκτυο. Στη συνέχεια η μονάδα UPS επαναφορτίζεται όταν η περιβάλλουσα ενέργεια του συστήματος επιστρέφει σε καλή κατάσταση.

4. Η ασύρματη μεταφορά ενέργειας (Wireless Power Transfer), η οποία φορτίζει κινητές συσκευές μέσω κυμάτων RF, είναι μία λύση που επιτρέπει την ασύρματη φόρτιση και επεκτείνει τη διάρκεια ζωής της μπαταρίας. Στα συστήματα MEC με ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, οι διακομιστές μπορούν να τροφοδοτούνται από WPT όταν η ανανεώσιμη ενέργεια δεν επαρκεί για την αξιοπιστία του συστήματος. Η τεχνολογία αυτή εφαρμόζεται επίσης για την εκφόρτωση των υπολογιστικών διαδικασιών και δεδομένων από τις κινητές συσκευές στα συστήματα MEC. Ωστόσο, απαιτούνται νέες τεχνικές διαμόρφωσης δέσμης ακτινοβολίας (beamforming) για την αύξηση της απόδοσης φόρτισης.

4.5 Θέματα ασφάλειας και απορρήτου

Υπάρχουν αυξανόμενες απαιτήσεις για ασφαλείς υπηρεσίες κινητής τηλεφωνίας και προστασία της ιδιωτικής ζωής. Ενώ, το MEC επιτρέπει νέους τύπους υπηρεσιών, τα μοναδικά χαρακτηριστικά του φέρνουν νέα ζητήματα ασφάλειας και προστασίας προσωπικών δεδομένων. Καταρχάς, η έμφυτη ετερογένεια των συστημάτων MEC καθιστά ανεφάρμοστους τους συμβατικούς μηχανισμούς αξιοπιστίας και ελέγχου ταυτότητας. Δεύτερον, η ποικιλομορφία των τεχνολογιών επικοινωνίας που υποστηρίζουν το MEC και το λογισμικό των μηχανισμών διαχείρισης δικτύων φέρουν νέες απειλές για την ασφάλεια. Εκτός αυτού, οι ασφαλείς και απόρρητοι υπολογιστικοί μηχανισμοί γίνονται ιδιαίτερα επιθυμητοί δεδομένου ότι οι διακομιστές στα άκρα του δικτύου είναι ευάλωτοι σε επιθέσεις και υποκλοπές. Αυτά παρακινούν την ανάπτυξη αποτελεσματικών μηχανισμών.

4.5.1 Μηχανισμοί αξιοπιστίας και ελέγχου ταυτότητας

Η αξιοπιστία είναι ένας σημαντικός μηχανισμός ασφαλείας σχεδόν σε κάθε κινητό σύστημα, πίσω από τον οποίο η βασική ιδέα είναι η γνώση της ταυτότητας της οντότητας με την οποία αλληλοεπιδρά το σύστημα. Η διαχείριση ελέγχου ταυτότητας παρέχει μία πιθανή λύση για τη διασφάλιση της αξιοπιστίας. Ωστόσο, η ετερογένεια των συστημάτων MEC και τα διαφορετικά είδη κινητών συσκευών καθιστούν αδύνατη την εφαρμογή των συμβατικών μηχανισμών αξιοπιστίας και ελέγχου ταυτότητας που έχουν σχεδιαστεί για συστήματα υπολογιστικού νέφους. Για παράδειγμα, ένας μηχανισμός αξιοπιστίας που βασίζεται στη δημοτικότητα οδηγεί

σε σοβαρές απειλές για την αξιοπιστία στα συστήματα MEC. Το γεγονός αυτό απαιτεί έναν ενοποιημένο μηχανισμό αξιοπιστίας και ελέγχου ταυτότητας που είναι σε θέση να αξιολογήσει την αξιοπιστία των διακομιστών MEC και να προσδιορίσει οποιαδήποτε κακοπροαίρετη δραστηριότητα. Εκτός αυτού, μέσα στο δίκτυο κινητής τηλεφωνίας υπάρχει ένας μεγάλος αριθμός διακομιστών που εξυπηρετούν τεράστιο αριθμό κινητών συσκευών. Αυτό καθιστά το σχεδιασμό του μηχανισμού αξιοπιστίας και ελέγχου ταυτότητας αρκετά περίπλοκο σε σύγκριση με αυτό στα συμβατικά συστήματα Cloud Computing, δεδομένου ότι οι διακομιστές MEC είναι μικρότερων υπολογιστικών δυνατοτήτων και έχουν σχεδιαστεί για να επιτρέπουν εφαρμογές ευαίσθητες στην χρονική καθυστέρηση. Επομένως, είναι ζωτικής σημασίας να ελαχιστοποιηθεί η επιβάρυνση των μηχανισμών ελέγχου ταυτότητας και να σχεδιαστούν κατανεμημένες πολιτικές.

4.5.2 Ασφάλεια δικτύου

Οι τεχνολογίες επικοινωνίας για την υποστήριξη συστημάτων MEC, όπως είναι το WiFi, το LTE και το 5G, έχουν τα δικά τους πρωτόκολλα ασφαλείας για την προστασία του συστήματος από επιθέσεις και εισβολές. Ωστόσο, αυτά τα πρωτόκολλα αναπόφευκτα δημιουργούν διαφορετικούς τομείς αξιοπιστίας. Μία πρόκληση της ασφάλειας δικτύων στα συστήματα MEC προέρχεται από τις δυσκολίες στην κατανομή των διαπιστευτηρίων, τα οποία μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την ανταλλαγή κλειδιών κατά τη διάρκεια μίας συνεδρίας μεταξύ διαφορετικών τομέων αξιοπιστίας. Στις υπάρχουσες λύσεις, η αρχή έκδοσης πιστοποιητικών μπορεί να διανείμει τα διαπιστευτήρια μόνο σε όλα τα στοιχεία που βρίσκονται μέσα στο ίδιο επίπεδο αξιοπιστίας, καθιστώντας δύσκολη τη διασφάλιση της προστασίας προσωπικών δεδομένων και της ακεραιότητας των δεδομένων για επικοινωνίες μεταξύ διαφορετικών τεχνολογιών. Για να αντιμετωπιστεί αυτό το ζήτημα χρησιμοποιείται η κρυπτογράφηση ως διαπιστευτήριο ανταλλαγής κλειδιών κατά τη διάρκεια συνεδριών. Επίσης, μπορεί να χρησιμοποιηθεί η έννοια ομοσπονδιακού περιεχομένου δικτύου, η οποία καθορίζει τον τρόπο με τον οποίο διαφορετικά πρωτόκολλα επικοινωνίας ανταλλάσσουν διαπιστευτήρια μεταξύ τους. Εκτός αυτού, εισάγονται στα συστήματα MEC τεχνολογίες, όπως το SDN και το NFV, για την απλούστευση της διαχείρισης του δικτύου. Ωστόσο, οι τεχνολογίες αυτές είναι λογισμικά από τη φύση τους και συνεπώς ευάλωτες. Επιπλέον, ο

μεγάλος αριθμός συσκευών και οντοτήτων σε συστήματα MEC αυξάνει την πιθανότητα επιτυχών επιθέσεων τόσο σε μεμονωμένες συσκευές όσο και σε ολόκληρο το σύστημα. Επομένως, απαιτούνται πρωτότυποι και ισχυροί μηχανισμοί ασφαλείας, όπως είναι η εσωτερική εποπτεία, η ανάλυση της μνήμης κατά τον χρόνο εκτέλεσης διεργασιών και η κεντρική διαχείριση ασφαλείας, για να εξασφαλιστεί ένα ασφαλές περιβάλλον δικτύωσης στα συστήματα MEC.

4.5.3 Ασφαλείς και απόρρητες υπολογιστικές διαδικασίες

Η μετεγκατάσταση των εφαρμογών με έντονες υπολογιστικές απαιτήσεις στους διακομιστές MEC αποτελεί την σημαντικότερη λειτουργία και κίνητρο για τη δημιουργία συστημάτων MEC. Στην πράξη, τα δεδομένα εισόδου διεργασιών περιέχουν συνήθως ευαίσθητες και απόρρητες πληροφορίες, όπως προσωπικά κλινικά δεδομένα και οικονομικά αρχεία επιχειρήσεων. Επομένως, τα δεδομένα αυτά πρέπει να υποβάλλονται σε κατάλληλη προεπεξεργασία πριν από την εκφόρτωση σε διακομιστές MEC, προκειμένου να αποφευχθεί η διαρροή πληροφοριών. Εκτός από τη διαρροή πληροφοριών, οι διακομιστές MEC ενδέχεται να επιστρέψουν ανακριβή και ακόμη και εσφαλμένα υπολογιστικά αποτελέσματα που οφείλονται είτε σφάλματα λογισμικού είτε σε οικονομικά κίνητρα. Για την επίτευξη ασφαλών και απόρρητων υπολογιστικών διαδικασιών, είναι προτιμότερο οι πλατφόρμες MEC να εκτελούν τις διεργασίες χωρίς την ανάγκη να γνωρίζουν τα αρχικά δεδομένα του χρήστη. Όσον αφορά την ορθότητα των αποτελεσμάτων των υπολογιστικών διεργασιών, αυτή μπορεί να πραγματοποιηθεί με αλγορίθμους κρυπτογράφησης και τεχνικές επαλήθευσης υπολογιστικών διαδικασιών. Ένα παράδειγμα των όσων περιγράφονται παραπάνω αποτελεί ένα πρόβλημα γραμμικού προγραμματισμού κατά το οποίο τα δεδομένα χωρίζονται σε δημόσια και απόρρητα μέσω μετασχηματισμών. Χρησιμοποιώντας ένα μετασχηματισμό που διατηρεί την προστασία της ιδιωτικής ζωής, ο πελάτης της υπηρεσίας εκφορτώνει τα κρυπτογραφημένα ιδιωτικά δεδομένα για εκτέλεση διεργασιών στο υπολογιστικό νέφος και ο διακομιστής MEC επιστρέφει τα αποτελέσματα. Έτσι, αναπτύσσεται ένα σύνολο αναγκαίων και επαρκών προϋποθέσεων για την επαλήθευση της ορθότητας των αποτελεσμάτων με βάση τη θεωρία της δυαδικότητας. Μόλις ληφθεί το σωστό αποτέλεσμα, οι πελάτες μπορούν να χαρτογραφήσουν την επιθυμητή λύση για το αρχικό πρόβλημα χρησιμοποιώντας το μυστικό μετασχηματισμό. Αυτή η μέθοδος

επικύρωσης αποτελεσμάτων επιτυγχάνει μία μεγάλη βελτίωση στην αποδοτικότητα των υπολογιστικών διαδικασιών μέσω του υψηλού επιπέδου υπολογιστικών διεργασιών γραμμικού προγραμματισμού. Η παραπάνω λύση συνεπάγεται σχεδόν μηδενική πρόσθετη επιβάρυνση τόσο στον υπολογιστή-πελάτη όσο και στο διακομιστή υπολογιστικού νέφους, η οποία μπορεί να παρέχει υποδείξεις για την ανάπτυξη ασφαλών και ιδιωτικών μηχανισμών υπολογιστικών διεργασιών για άλλες εφαρμογές Cloud.

Κεφάλαιο 5: Τεχνικά μοντέλα και οικονομικά κόστη σε περιβάλλον MEC με IoT εφαρμογές

5.1 Μοντέλα υπολογιστικών διεργασιών

Υπάρχουν διάφορες παράμετροι που διαδραματίζουν κρίσιμο ρόλο στην μοντελοποίηση των υπολογιστικών διεργασιών, συμπεριλαμβανομένου του χρόνου καθυστέρησης επεξεργασίας, της χρήσης εύρους ζώνης, του context awareness, της γενικότητας και της επεκτασιμότητας. Η ανάπτυξη μοντέλων για τις υπολογιστικές διαδικασίες αποτελεί ένα εξαιρετικά δύσκολο εγχείρημα. Σε αυτήν την ενότητα, εισάγονται δύο απλοποιημένα μοντέλα που χρησιμοποιούνται ευρέως στην υπάρχουσα βιβλιογραφία για συστήματα MCC και MEC, που αντιστοιχούν σε δυαδική και μερική εκφόρτωση υπολογιστικού φόρτου διεργασιών.

5.1.1 Μοντέλο δυαδικής εκφόρτωσης διεργασιών

Μία εξαιρετικά δύσκολη ή σχετικά απλή διεργασία δεν μπορεί να διχοτομηθεί και πρέπει να εκτελεστεί ως σύνολο, είτε τοπικά στην κινητή συσκευή είτε να εκφορτωθεί στο διακομιστή MEC, διαδικασία που ονομάζεται δυαδική εκφόρτωση. Μία τέτοια διεργασία αντιπροσωπεύεται από μία σημειογραφία τριών πεδίων $A(L, \tau_d, X)$. Αυτή η σημειογραφία περιέχει τις πληροφορίες του μεγέθους δεδομένων εισόδου διεργασίας L σε bit, της προθεσμίας ολοκλήρωσης τ_d και του υπολογιστικού φόρτου διεργασίας X σε κύκλους CPU ανά bit. Αυτές οι παράμετροι σχετίζονται με τη φύση των εφαρμογών και μπορούν να εκτιμηθούν μέσω των προφίλ διεργασιών. Η χρήση αυτών των τριών παραμέτρων όχι μόνο αποτυπώνει βασικές ιδιότητες κινητών εφαρμογών, όπως οι απαιτήσεις σε υπολογιστικούς και επικοινωνιακούς πόρους, αλλά διευκολύνει επίσης την απλή αξιολόγηση του χρόνου καθυστέρησης εκτέλεσης διεργασίας και της απόδοσης κατανάλωσης ενέργειας.

Η διεργασία $A(L, \tau_d, X)$ πρέπει να ολοκληρωθεί πριν από μία αυστηρή χρονική προθεσμία. Το μοντέλο αυτό μπορεί επίσης να γενικευθεί για τον χειρισμό διεργασιών με απαιτήσεις ήπιας προθεσμίας που επιτρέπει την ολοκλήρωση ενός μικρού τμήματος των διεργασιών μετά το χρονικό όριο τ_d . Σε αυτήν την περίπτωση, ο αριθμός των κύκλων CPU που απαιτούνται για την εκτέλεση δεδομένων εισόδου

διεργασίας 1 bit μοντελοποιείται ως μία τυχαία μεταβλητή X . Συγκεκριμένα ορίζεται το X_0 ως ένας θετικός ακέραιος έτσι ώστε

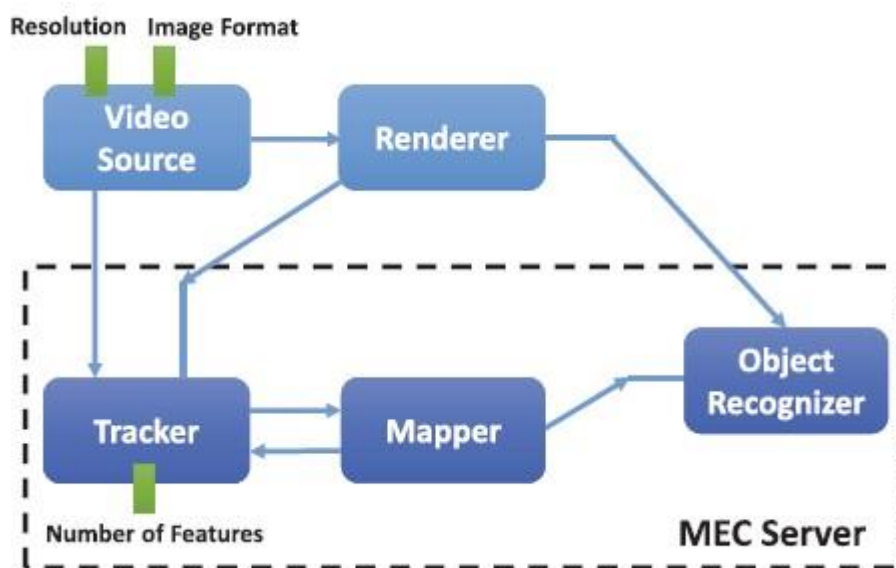
$$\Pr (X > X_0) \leq \rho, \text{ όπου } \rho \text{ είναι πραγματικός αριθμός και } 0 < \rho \ll 1 \quad (5.1)$$

Στη συνέχεια δεδομένου του μεγέθους εισόδου δεδομένων L οροθετείται ένα άνω φράγμα W_ρ που αντιπροσωπεύει τον αριθμό των απαιτούμενων κύκλων CPU έτσι ώστε

$$\Pr (LX > W_\rho) \leq \rho, \text{ με } W_\rho = LX_0 \quad (5.2)$$

5.1.2 Μοντέλο μερικής εκφόρτωσης διεργασιών

Στην πράξη οι κινητές εφαρμογές αποτελούνται από πολλαπλές διαδικασίες με αρκετές από αυτές να αλληλεξαρτώνται, όπως φαίνεται στο Σχ.5.1. Το γεγονός αυτό καθιστά δυνατή την εφαρμογή της μερικής εκφόρτωσης διεργασιών. Συγκεκριμένα, μία διεργασία μπορεί να χωριστεί σε δύο μέρη με το ένα να εκτελείται στην κινητή συσκευή και το άλλο να εκφορτώνεται για εκτέλεση στα άκρα του δικτύου.



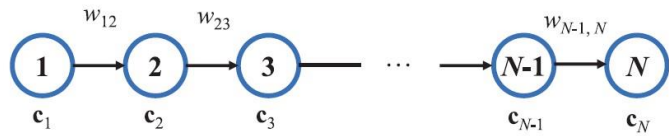
Σχήμα 5.1 Διαδικασίες μίας εφαρμογής AR

Το απλούστερο μοντέλο μερικής εκφόρτωσης διεργασιών είναι το μοντέλο διαμερισμού δεδομένων, όπου τα bit εισόδου διεργασιών είναι ανεξάρτητα, μπορούν να χωριστούν αυθαίρετα σε διαφορετικές ομάδες και να εκτελεστούν από

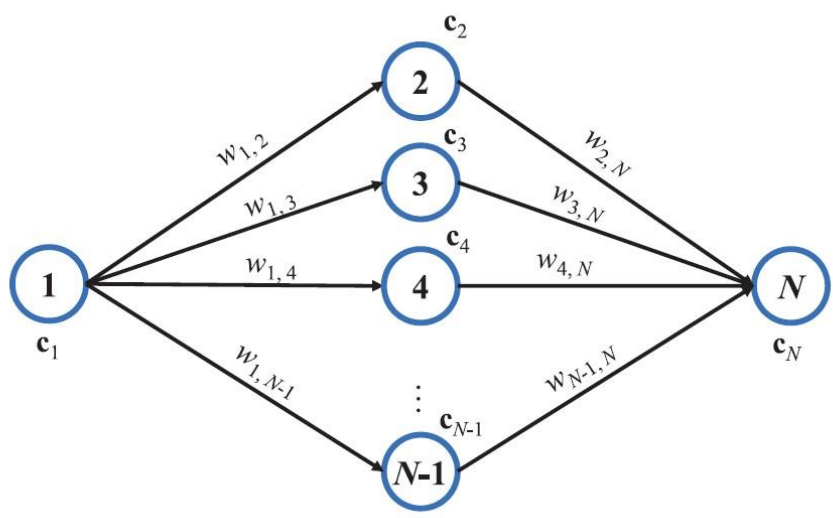
διαφορετικές οντότητες σε συστήματα MEC. Αυτό το μοντέλο ουσιαστικά προτείνει την παράλληλη εκτέλεση διεργασιών στα τερματικά και στο διακομιστή MEC.

Ωστόσο, η εξάρτηση μεταξύ διαφορετικών λειτουργιών σε πολλές εφαρμογές δεν μπορεί να αγνοηθεί, καθώς επηρεάζει σημαντικά τις διαδικασίες εκτέλεσης και εκφόρτωσης υπολογιστικών διεργασιών. Αρχικά, η σειρά εκτέλεσης των συναρτήσεων ή ρουτινών δεν μπορεί να επιλεγεί αυθαίρετα, επειδή οι εκροές ορισμένων στοιχείων είναι οι εισροές των άλλων. Επίσης, λόγω περιορισμών λογισμικού ή υλικού, ορισμένες συναρτήσεις ή ρουτίνες μπορούν να εκφορτωθούν στο διακομιστή MEC για απομακρυσμένη εκτέλεση, ενώ άλλες μπορούν να εκτελεστούν μόνο τοπικά, όπως είναι η λειτουργία εμφάνισης εικόνας.

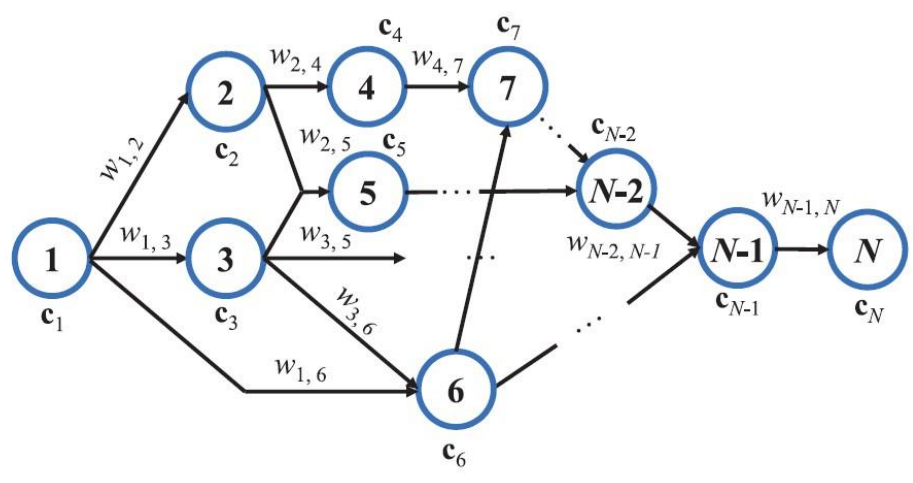
Αυτό απαιτεί πιο εξελιγμένα μοντέλα διεργασιών από το αναφερόμενο μοντέλο διαμερισμού δεδομένων ικανά να συλλάβουν την αλληλεξάρτηση μεταξύ διαφορετικών υπολογιστικών λειτουργιών σε μία εφαρμογή. Ένα τέτοιο μοντέλο ονομάζεται γράφημα κλήσης διεργασίας. Το γράφημα είναι συνήθως ένας κατευθυνόμενος ακυκλικός γράφος (DAG) και ορίζεται ως $G(V, E)$, όπου το σύνολο των κορυφών V αντιπροσωπεύει διαφορετικές διαδικασίες στην εφαρμογή και το σύνολο των άκρων E καθορίζει τις εξαρτήσεις κλήσης τους. Υπάρχουν τρία τυπικά μοντέλα εξάρτησης δευτερευόντων διεργασιών, δηλαδή στοιχεία διεργασιών όπως συναρτήσεις ή ρουτίνες, που είναι η διαδοχική, η παράλληλη και η γενική εξάρτηση, όπως απεικονίζονται στα Σχ.5.2-5.4. Για τις εφαρμογές που ξεκινούν από κινητές συσκευές τα πρώτα και τα τελευταία βήματα, όπως είναι η συλλογή των δεδομένων εισόδου ή εξόδου και η εμφάνιση των αποτελεσμάτων στην οθόνη, κανονικά απαιτείται να εκτελούνται τοπικά. Έτσι, ο κόμβος 1 και ο κόμβος N στα Σχ.5.2-5.4 είναι λειτουργίες που πρέπει να εκτελεστούν τοπικά. Εκτός αυτού, οι απαιτούμενοι φόρτοι διεργασιών και οι υπολογιστικοί πόροι κάθε διαδικασίας, όπως είναι ο αριθμός των απαιτούμενων κύκλων CPU και η ποσότητα της απαιτούμενης μνήμης, μπορούν επίσης να καθοριστούν στις κορυφές του γραφήματος κλήσης διεργασίας, ενώ η ποσότητα των δεδομένων εισόδου ή εξόδου κάθε διαδικασίας μπορεί να χαρακτηρίζεται από την επιβολή βαρών στις άκρες.



Σχήμα 5.2 Ακολουθιακή εξάρτηση



Σχήμα 5.3 Παράλληλη εξάρτηση



Σχήμα 5.4 Γενική εξάρτηση

5.2 Μοντέλο επικοινωνίας σε περιβάλλον MEC με IoT

Στη βιβλιογραφία του MCC, τα κανάλια επικοινωνίας μεταξύ των κινητών συσκευών και των διακομιστών Cloud συνήθως αναπαρίστανται ως ροές bit με σταθερούς ρυθμούς ή τυχαίους ρυθμούς με συγκεκριμένες κατανομές. Αυτό το μοντέλο υιοθετείται για εύκολο χειρισμό και σχεδιασμό των συστημάτων MCC, όπου το επίκεντρο είναι η αντιμετώπιση της χρονικής καθυστέρησης στα δίκτυα κορμού και η διαχείριση του υπολογιστικού νέφους μεγάλης κλίμακας, αλλά όχι ο χρόνος καθυστέρησης της ασύρματης επικοινωνίας. Το σενάριο είναι διαφορετικό για τα συστήματα MEC, γιατί λαμβάνονται υπόψη τα μικρής κλίμακας υπολογιστικά κέντρα στα άκρα του δικτύου, οι εφαρμογές με ευαισθησία στην καθυστέρηση και η μείωση του χρόνου καθυστέρησης επικοινωνίας με το σχεδιασμό μίας ιδιαίτερα αποδοτικής ασύρματης διεπαφής. Κατά συνέπεια, τα προαναφερθέντα μοντέλα είναι ανεπαρκή, καθώς παραβλέπουν ορισμένες θεμελιώδεις ιδιότητες της ασύρματης διάδοσης και είναι απλοποιημένα για να επιτρέψουν την εφαρμογή προηγμένων τεχνικών επικοινωνίας. Συγκεκριμένα, τα ασύρματα κανάλια διαφέρουν από τα ενσύρματα αντίστοιχα στις ακόλουθες βασικές πτυχές:

1. Λόγω της ατμόσφαιρας, της ανάκλασης και της διάθλασης από τη διασπορά αντικειμένων στο περιβάλλον όπως κτήρια, τοίχοι και δέντρα, υπάρχει το φαινόμενο των πολυδιαδρομικών διαλείψεων στα ασύρματα κανάλια. Το γεγονός αυτό καθιστά τα κανάλια εξαιρετικά χρονικά μεταβαλλόμενα και προκαλούνται σοβαρές διασυμβολικές παρεμβολές (ISI). Έτσι, απαιτούνται αποτελεσματικές τεχνικές αντιμετώπισης των ISI για αξιόπιστες ασύρματες μεταδόσεις.
2. Η φύση των ασύρματων μεταδόσεων έχει ως αποτέλεσμα ένα σήμα να παρεμβάλλει σε άλλα σήματα που καταλαμβάνουν το ίδιο φάσμα, γεγονός που μειώνει το SINR και ως εκ τούτου οδηγεί σε πιθανότητα ανίχνευσης σφάλματος. Για την αντιμετώπιση της υποβάθμισης της απόδοσης, η διαχείριση παρεμβολών γίνεται ένα από τα σημαντικότερα ζητήματα σχεδιασμού για ασύρματα συστήματα επικοινωνίας και έχει προσελκύσει εκτεταμένες ερευνητικές προσπάθειες.
3. Το περιορισμένο φάσμα είναι ο κύριος εχθρός για την πρόσβαση σε δίκτυα πολύ υψηλής ταχύτητας. Αυτό το γεγονός δίνει κίνητρα για εκτεταμένη έρευνα σχετικά με την εκμετάλλευση νέων συχνοτήτων λειτουργίας στο ραδιοφάσμα,

το σχεδιασμό νέων αρχιτεκτονικών πομποδοκτών και προτύπων δικτύου για τη βελτίωση της αποτελεσματικότητας του ραδιοφάσματος.

Οι τυχαίες παραλλαγές των ασύρματων καναλιών στο χρόνο, τη συχνότητα και το χώρο καθιστούν σημαντικό το σχεδιασμό αποδοτικών συστημάτων MEC για την απρόσκοπτη ενσωμάτωση του ελέγχου της εκφόρτωσης υπολογιστικών διεργασιών και της διαχείρισης των πόρων του ραδιοφάσματος. Για παράδειγμα, όταν το ασύρματο κανάλι βρίσκεται σε περιβάλλον έντονων διαλείψεων, η μείωση της καθυστέρησης, που οφείλεται στον χρόνο επεξεργασίας, της απομακρυσμένης εκτέλεσης διεργασίας μπορεί να μην επαρκεί για να αντισταθμίσει την αύξηση χρόνου καθυστέρησης μετάδοσης λόγω της απότομης πτώσης των ρυθμών μετάδοσης δεδομένων. Για τέτοιες περιπτώσεις είναι επιθυμητή η αναβολή της εκφόρτωσης έως ότου είναι ευνοϊκό το κέρδος καναλιού ή να πραγματοποιηθεί μετάβαση σε μία εναλλακτική συχνότητα ή χωρικό κανάλι με καλύτερη ποιότητα για την εκφόρτωση διεργασιών. Επιπλέον, η αύξηση της ισχύος μετάδοσης μπορεί να αυξήσει το ρυθμό δεδομένων, αλλά και να οδηγήσει σε μεγαλύτερη κατανάλωση ενέργειας μετάδοσης. Οι ανωτέρω εκτιμήσεις απαιτούν τον κοινό σχεδιασμό της εκφόρτωσης διεργασιών και των ασύρματων μεταδόσεων, οι οποίοι οφείλει να προσαρμόζεται στα χρονομεταβαλλόμενα κανάλια και στις ακριβείς πληροφορίες για την κατάσταση καναλιού (CSI).

Στα συστήματα MEC οι επικοινωνίες είναι συνήθως μεταξύ AP και κινητών συσκευών με τη δυνατότητα απευθείας επικοινωνίας D2D. Οι διακομιστές MEC είναι μικρής κλίμακας κέντρα δεδομένων που αναπτύσσονται από τους φορείς εκμετάλλευσης cloud computing και τηλεπικοινωνιών, οι οποίοι μπορούν να τοποθετηθούν σε δημόσιους δρομολογητές WiFi και BS, ώστε να μειωθούν οι κεφαλαιουχικές δαπάνες. Επίσης, τα ασύρματα AP όχι μόνο παρέχουν την ασύρματη διεπαφή για τους διακομιστές MEC, αλλά επιτρέπουν επίσης την πρόσβαση στο απομακρυσμένο κέντρο δεδομένων μέσω συνδέσεων backhaul, οι οποίες βοηθούν το διακομιστή MEC να εκφορτώσει περαιτέρω ορισμένες διεργασίες σε άλλους διακομιστές MEC ή σε μεγάλης κλίμακας κέντρα δεδομένων cloud. Για τις κινητές συσκευές που δεν μπορούν να επικοινωνήσουν απευθείας με διακομιστές MEC λόγω ανεπαρκών ασύρματων διασυνδέσεων, οι επικοινωνίες D2D με γειτονικές συσκευές παρέχουν τη δυνατότητα προώθησης των υπολογιστικών διεργασιών σε διακομιστές MEC. Επιπλέον, οι επικοινωνίες D2D επιτρέπουν επίσης

τη συνεργασία μεταξύ ομότιμων για την κοινή χρήση πόρων και την εξισορρόπηση υπολογιστικού φόρτου σε ένα σύμπλεγμα κινητών συσκευών.

Επί του παρόντος, υπάρχουν διαφορετικοί τύποι εμπορικών τεχνολογιών για τις κινητές επικοινωνίες, που αναφέρονται λεπτομερώς στο Κεφάλαιο 2. Για την ανάπτυξη ασύρματων τεχνολογιών σε συστήματα MEC, τα πρωτόκολλα επικοινωνίας και δικτύωσης πρέπει να επανασχεδιαστούν για να ενσωματώσουν τόσο τις υποδομές πληροφορικής όσο και επικοινωνίας και να βελτιώσουν αποτελεσματικά την απόδοση υπολογιστικών διεργασιών.

Αξίζει να αναφερθεί ότι η διαστασιολόγηση ενός δικτύου με δυνατότητες MEC είναι ένα δύσκολο εγχείρημα λόγω του τεράστιου πλήθους συσκευών IoT που περιέχει. Ακόμα, ο μεγάλος αυτός αριθμός των συσκευών δυσχεραίνει τη δημιουργία μοντέλου για την κίνηση της πληροφορίας εντός του δικτύου. Η συνεργατική μελέτη των ETSI και GSMA αναφέρει τις ανάγκες των εφαρμογών IoT ως προς τη συχνότητα αποστολής μηνυμάτων εντός μίας ημέρας, το μέγεθος του εκάστοτε μηνύματος και το ημερήσιο συνολικό φορτίο πληροφορίας ενός χρήστη της εφαρμογής.

Applications	Number of messages per day	Size of message	Total daily load (bytes/day)
Consumer – wearables	10 messages/ day	20 bytes	$10 \cdot 20 = 200$ bytes
Consumer – VIP / Pet tracking	2 every hour ($2 \cdot 24 = 48$)	50 bytes	$2 \cdot 24 \cdot 50 = 2400$ bytes
Consumer – smart bicycles	8 every hour ($8 \cdot 24 = 192$)	50 bytes	$8 \cdot 24 \cdot 50 = 9600$ bytes
Assisted Living / Medical	8 messages/day	100 bytes	$8 \cdot 100 = 800$ bytes
Microgeneration	2 messages/day	100 bytes	$2 \cdot 100 = 200$ bytes
Smoke detector – home/enterprise	2 messages/day	20 bytes	$2 \cdot 20 = 40$ bytes
Agriculture – live-stock tracking	100 messages/day	50 bytes	$100 \cdot 50 = 5000$ bytes
Environmental – near real-time monitoring	5 messages/day	50 bytes	$5 \cdot 50 = 250$ bytes

Industrial – asset tracking	100 messages/day	50 bytes	$100 \times 50 = 5000$ bytes
Industrial – tank process/ safety monitoring	2 messages/day	100 bytes	$2 \times 100 = 200$ bytes
Water/gas metering	8 messages/day	200 bytes	$8 \times 200 = 1600$ bytes
City – parking	60 messages/day	50 bytes	$60 \times 50 = 3000$ bytes
Building automation – alarms, actuators	5 messages/day	50 bytes	$5 \times 50 = 250$ bytes
Home automation	5 messages/day	50 bytes	$5 \times 50 = 250$ bytes
Industrial – machinery control	100 messages/day	50 bytes	$100 \times 50 = 5000$ bytes
Smart grid	10 messages/day	20 bytes	$10 \times 20 = 200$ bytes
Propane tank monitoring	2 messages/day	100 bytes	$2 \times 100 = 200$ bytes
Agri – stationary tracking/monitoring	4 messages/day	100 bytes	$4 \times 100 = 400$ bytes
City - Waste Management	1 message/hour	10 bytes	$24 \times 10 = 240$ bytes
Environmental monitoring: data collection	1 message/hour	200 bytes	$24 \times 200 = 4800$ bytes
City - lighting	5 messages/day	100 bytes	$5 \times 100 = 500$ bytes
Consumer – white goods	3 messages/day	20 bytes	$3 \times 20 = 60$ bytes
Vending machines – general	1 message/day	1000 bytes	$1 \times 1000 = 1000$ bytes
Vending machines – privacy/data verification	100 messages/day	100 bytes	$100 \times 100 = 10000$ bytes

Πίνακας 5.1 Οι απαιτήσεις των εφαρμογών IoT σε επικοινωνιακούς πόρους

5.3 Μοντέλα προθεσμίας εκτέλεσης διεργασιών και ενεργειακής κατανάλωσης στις κινητές συσκευές

Η CPU μίας κινητής συσκευής είναι ο κύριος μηχανισμός για την εκτέλεση υπολογιστικών διεργασιών τοπικά. Η απόδοση της CPU ελέγχεται από τη συχνότητα f_m , επίσης γνωστή ως η ταχύτητα ρολογιού της CPU. Η τελευταία τεχνολογίας αρχιτεκτονική CPU κινητών συσκευών υιοθετεί την προηγμένη τεχνική δυναμικής κλιμάκωσης συχνότητας και τάσης (DVFS). Η DVFS επιτρέπει την αύξηση ή την μείωση της συχνότητας ή της τάσης της , με αποτέλεσμα την αύξηση και τη μείωση της κατανάλωσης ενέργειας αντίστοιχα. Στην πράξη, η τιμή της f_m οριοθετείται από μία μέγιστη τιμή f_{max} , η οποία αντικατοπτρίζει τις περιορισμένες υπολογιστικές δυνατότητες των κινητών συσκευών. Με βάση το μοντέλο της παραγράφου 5.1.1, ο επιτρεπόμενος χρόνος καθυστέρησης για τη διεργασία $A(L, \tau, X)$ μπορεί να υπολογιστεί ως

$$t_m = \frac{LX}{f_m} \quad (5.3)$$

που υποδηλώνει ότι είναι επιθυμητή μία υψηλή ταχύτητα ρολογιού CPU προκειμένου να μειωθεί η καθυστέρηση στον χρόνο εκτέλεσης, με κόστος την υψηλότερη κατανάλωση ενέργειας της CPU.

Δεδομένου ότι οι κινητές συσκευές είναι ενεργειακά περιορισμένες, η κατανάλωση ενέργειας για τοπική εκτέλεση διεργασιών είναι ένα άλλο κρίσιμο μέγεθος για την απόδοση συστημάτων mobile computing. Με βάση τη θεωρία κυκλωμάτων, η κατανάλωση ισχύος της CPU αναλύεται σε διάφορους παράγοντες, συμπεριλαμβανομένων της δυναμικής, της στατικής και της κατανάλωσης ενέργειας βραχυκυκλώματος, με τη δυναμική κατανάλωση ενέργειας να κυριαρχεί έναντι των άλλων. Σύμφωνα με τη βιβλιογραφία η δυναμική κατανάλωση ενέργειας είναι ανάλογη της ποσότητας $V_{cir}^2 f_m$ όπου V_{cir} είναι η τάση που παρέχεται στο κύκλωμα. Επιπλέον, η συχνότητα ρολογιού της CPU είναι περίπου γραμμικώς ανάλογη με την τάση τροφοδοσίας κατά τη λειτουργία στα όρια χαμηλής τάσης. Έτσι, η κατανάλωση ενέργειας ενός κύκλου CPU δίνεται από την ποσότητα κf_m^2 , όπου το κ είναι μία σταθερά που σχετίζεται με την αρχιτεκτονική υλικού. Για την διεργασία $A(L, \tau, X)$ με ταχύτητα ρολογιού CPU f_m , η κατανάλωση ενέργειας μπορεί να προκύψει ως

$$E_m = \kappa L X f_m^2 \quad (5.4)$$

Από τις σχέσεις (5.3) και (5.4) παρατηρείται ότι μία κινητή συσκευή μπορεί να μην είναι σε θέση να ολοκληρώσει μία διεργασία εντός της απαιτούμενης προθεσμίας, ή αλλιώς η κατανάλωση ενέργειας που προκύπτει από την εκτέλεση της διεργασίας στην κινητή συσκευή είναι τόσο υψηλή που η ενσωματωμένη μπαταρία εξαντλείται αρκετά γρήγορα. Σε αυτές τις περιπτώσεις είναι επιθυμητή η εκφόρτωση της διεργασίας σε ένα διακομιστή MEC.

5.4 Μοντέλα προθεσμίας εκτέλεσης διεργασιών και ενεργειακής κατανάλωσης στο διακομιστή MEC

Η χρονική καθυστέρηση εκτέλεσης διεργασιών είναι αμελητέα σε σύγκριση με την καθυστέρηση επικοινωνίας ή με αυτή που οφείλεται σε τοπική εκτέλεση διεργασιών. Ακόμα, στα συστήματα MEC τα υπολογιστικά φορτία για διακομιστές είναι αρκετά χαμηλότερα από τις υπολογιστικές τους ικανότητες. Αυτή η ιδέα μπορεί επίσης να επεκταθεί και για συστήματα MEC πολλών χρηστών με διακομιστές που είναι περιορισμένοι σε πόρους και τα υπολογιστικά φορτία ρυθμίζονται από τη διαχείριση πόρων πολλών χρηστών υπό περιορισμούς χρονικής καθυστέρησης και υπολογιστικής χωρητικότητας.

Από την άλλη, καθώς οι διακομιστές MEC έχουν σχετικά περιορισμένους υπολογιστικούς πόρους είναι απαραίτητο να εξεταστεί ο μη αμελητέος χρόνος εκτέλεσης διακομιστή στο γενικό σχεδιασμό των συστημάτων MEC. Δύο πιθανά μοντέλα εξετάζονται στη βιβλιογραφία, που αντιστοιχούν στην ντετερμινιστική και την στοχαστική χρονική καθυστέρηση υπολογιστικών διαδικασιών των διακομιστών. Το ντετερμινιστικό μοντέλο προτείνει να ληφθεί υπόψη ο ακριβής χρόνος καθυστέρησης στην εκτέλεση διεργασιών διακομιστή για ευαίσθητες εφαρμογές στην καθυστέρηση, η οποία υλοποιείται χρησιμοποιώντας VM και την τεχνική DVFS. Επιπλέον, επιτρέπονται οι ανεξάρτητες υπολογιστικές διαδικασίες υποθέτοντας ότι ο διακομιστής MEC εκχωρεί διαφορετικά VM για διαφορετικές κινητές συσκευές. Έτσι, το $f_{s,n}$ υποδηλώνει τη συχνότητα κύκλου CPU των εκχωρημένων διακομιστών για την κινητή συσκευή n . Παρόμοια με την ενότητα 5.3, προκύπτει ότι ο χρόνος εκτέλεσης του διακομιστή που δηλώνεται με $t_{s,n}$ μπορεί να υπολογιστεί ως $t_{s,n} = \frac{w_n}{f_{s,n}}$, όπου w_n είναι ο αριθμός των απαιτούμενων κύκλων CPU για την επεξεργασία του εκφορτωμένου φόρτου διεργασιών. Αυτό το μοντέλο έχει χρησιμοποιηθεί ευρέως για

το σχεδιασμό πολιτικών κατανομής υπολογιστών πόρων. Κατά αυτό τον τρόπο οι κύκλοι CPU στο διακομιστή MEC κατανέμονται αναλογικά σε κάθε κινητή συσκευή, έτσι ώστε να αντιμετωπίζουν την ίδια καθυστέρηση στο χρόνο εκτέλεσης διεργασιών. Επιπλέον, εκτός από το χρόνο επεξεργασίας της CPU, η καθυστέρηση της ουράς προγραμματισμού διακομιστή πρέπει να υπολογίζεται για διακομιστές MEC με σχετικά μικρές υπολογιστικές ικανότητες. Η καθυστέρηση ουράς λαμβάνεται υπόψη σε περίπτωση όπου οι παράλληλες υπολογιστικές διαδικασίες μέσω τεχνικών εικονικής διαμόρφωσης δεν είναι εφικτές και συνεπώς η επεξεργασία του φόρτου διεργασιών γίνεται με διαδοχικό τρόπο. Χωρίς απώλεια της γενικότητας δηλώνεται ως n η σειρά επεξεργασίας για την κινητή συσκευή n . Έτσι, ο συνολικός χρόνος καθυστέρησης του διακομιστή, που περιλαμβάνει και την καθυστέρηση αναμονής για τη συσκευή n είναι ο $T_{s,n}$ και υπολογίζεται ως

$$T_{s,n} = \sum_{i \leq n} t_{s,i} \quad (5.5)$$

Για εφαρμογές που είναι ανεκτικές στην καθυστέρηση, ο μέσος χρόνος επεξεργασίας διακομιστών μπορεί να προκύψει με βάση στοχαστικά μοντέλα. Για παράδειγμα, οι αφίξεις διεργασιών και ο χρόνος εξυπηρέτησης διαμορφώνονται από τις διαδικασίες Poisson και εκθετικές κατανομές αντίστοιχα. Έτσι, ο μέσος χρόνος επεξεργασίας διακομιστή μπορεί να προκύψει χρησιμοποιώντας τεχνικές από τη θεωρία της αναμονής. Τέλος, για όλα τα παραπάνω μοντέλα ισχύει ότι πολλά VM μοιράζονται την ίδια φυσική μηχανή γεγονός που εισαγάγει την παρεμβολή εισόδου και εξόδου μεταξύ διαφορετικών VM. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα τη μεγαλύτερη καθυστέρηση επεξεργασίας για κάθε VM που δηλώνεται ως $T'_{s,n}$, η οποία μπορεί να μοντελοποιηθεί από τη σχέση

$$T'_{s,n} = T_{s,n} (1+\epsilon)^k \quad (5.6)$$

όπου ϵ είναι ο συντελεστής υποβάθμισης απόδοσης ως ποσοστό αύξησης του χρόνου καθυστέρησης και k είναι ο αριθμός των διαφορετικών VM στο ίδιο φυσικό μηχάνημα που αιτούνται ταυτόχρονα υπολογιστικούς πόρους για την εκτέλεση διεργασιών.

Η κατανάλωση ενέργειας ενός διακομιστή MEC καθορίζεται από κοινού από τη χρήση της CPU, της αποθήκευσης, της μνήμης και των διεπαφών δικτύου. Δεδομένου ότι η ενέργεια της CPU είναι κυρίαρχη μεταξύ αυτών των παραγόντων η

βιβλιογραφία επικεντρώνεται σε αυτή. Δύο μοντέλα χρησιμοποιούνται ευρέως για την κατανάλωση ενέργειας των διακομιστών MEC. Ένα μοντέλο βασίζεται στην τεχνική DVFS και εξετάζει ένα διακομιστή MEC που χειρίζεται n διεργασίες, καθώς και την κατανομή w_n κύκλων CPU στην n -ιοστή διεργασία με συχνότητα ρολογιού $f_{s,n}$. Ως εκ τούτου, η συνολική ενέργεια E_s που καταναλώνεται από την CPU στο διακομιστή MEC μπορεί να εκφραστεί ως

$$E_s = \sum_{i=1}^n \kappa w_i f_{s,i}^2 \quad (5.7)$$

που είναι παρόμοια με εκείνη για τις κινητές συσκευές. Ένα άλλο μοντέλο θεωρεί ότι η κατανάλωση ενέργειας του διακομιστή εξαρτάται γραμμικώς από τη χρήση της CPU ανάλογα με τον υπολογιστικό φόρτο. Επιπλέον, ένας αδρανής διακομιστής εξακολουθεί κατά μέσο όρο να καταναλώνει έως και το 70% της κατανάλωσης ενέργειας για την περίπτωση που λειτουργεί σε την πλήρη ταχύτητα της CPU. Έτσι, η κατανάλωση ενέργειας στο διακομιστή MEC μπορεί να υπολογιστεί ως

$$E_s = \alpha E_{max} + (1 - \alpha) E_{max} u \quad (5.8)$$

όπου E_{max} είναι η κατανάλωση ενέργειας για έναν πλήρως απασχολημένο διακομιστή, α είναι το ποσοστό της κατανάλωσης ενέργειας κατά την αδρανή λειτουργία και το u δηλώνει το ποσοστό χρήσης της CPU. Αυτό το μοντέλο για ενεργειακά αποδοτικά συστήματα MEC προτείνει τη μετάβαση των διακομιστών σε κατάσταση αδράνειας στην περίπτωση ελαφρού υπολογιστικού φορτίου και την ενοποίηση των φορτίων στους λιγότερους ενεργούς διακομιστές.

5.5 Ανάλυση κόστους σε περιβάλλον Edge Computing

Όπως έχει αναφερθεί προηγουμένως το MEC αποτελεί την τεχνολογία κλειδί για τα δίκτυα επομένης γενιάς, καθώς υποστηρίζει επικοινωνίες, υπολογιστικές δυνατότητες, έλεγχο δικτύου και διανομή περιεχομένου. Αυτές οι δυνατότητες του MEC έχουν προσελκύσει το επιστημονικό και επιχειρηματικό ενδιαφέρον, όπου τα τεχνικά ζητήματα αναλύονται στο μεγαλύτερο μέρος της παρούσας εργασίας. Όσον αφορά τον κόσμο των επιχειρήσεων η ανάλυση στα κόστη που σχετίζονται με το MEC είναι ιδιαίτερα σημαντική τόσο για την λήψη επενδυτικών αποφάσεων όσο και για την κατανομή της επένδυσης στις προσφερόμενες υπηρεσίες. Σύμφωνα με τη βιβλιογραφία το συνολικό κόστος ιδιοκτησίας ή αλλιώς Total Cost of Ownership

(TCO) είναι η κατάλληλη μέθοδος για την ανάλυση του κόστους της υποδομής MEC. Στο συνολικό κόστος ιδιοκτησίας περιλαμβάνονται τόσο το κεφάλαιο που απαιτείται για τη δημιουργία συστήματος MEC όσο και το κόστος λειτουργίας του. Συνεπώς η κατανόηση του συνολικού κόστους ιδιοκτησίας είναι ικανή να δώσει σημαντικές πληροφορίες σχετικά με την οικονομική αποδοτικότητα του συστήματος MEC.

Πριν να γίνει ο υπολογισμός του κόστους των στοιχείων σε περιβάλλον Edge Computing αξίζει να σημειωθεί ότι η παρακάτω ανάλυση βασίζεται σε αντίστοιχη για υπολογιστικά νέφη. Για αυτό το λόγο αναφέρεται το κόστος απαξίωσης λόγω χρήσης των φυσικών πόρων που υλοποιούν το περιβάλλον υπολογιστικού νέφους, καθώς το κόστος αυτό εμπεριέχεται στον υπολογισμό του κόστους αρκετών στοιχείων σε περιβάλλον Edge Computing. Πιο συγκεκριμένα, υπάρχουν αρκετοί παράγοντες που συνθέτουν ένα περιβάλλον υπολογιστικού νέφους, γεγονός που δυσκολεύει τον υπολογισμό του συνολικού κόστους ιδιοκτησίας. Μερικοί από αυτούς είναι η διαφορετική τιμή αγοράς των πόρων, η διαφορετική χρονική διάρκεια χρήσης τους και η πολιτική χρήσης του υπολογιστικού νέφους από τους χρήστες που ακολουθεί το μοντέλο πληρωμής κατά τη χρήση. Όλοι αυτοί οι παράγοντες συμβάλλουν στην εισαγωγή της έννοιας του κόστους απαξίωσης λόγω χρήσης των φυσικών πόρων. Έχει παρατηρηθεί γενικά, ότι ο υπολογισμός του κόστους απαξίωσης για κτηματομεσιτικές εγκαταστάσεις γίνεται σε δεκαετή βάση, ενώ για άλλους παράγοντες σε τριετή βάση και προσδιορίζεται ως ποσοστό της τάξεως του 5% της αρχικής τιμής απόκτησης. Έτσι, λοιπόν, ορίζεται ο συντελεστής Arp με δυνατότητες εφαρμογής του τόσο σε αγορές που πραγματοποιούνται μία φορά όσο και στα λειτουργικά έξοδα μίας επιχείρησης και δίνεται από τη σχέση που ακολουθεί

$$Arp = (1 + 0,05) * T_u / (30 * 24 * A_p) \quad (5.9)$$

όπου T_u είναι η διάρκεια σε ώρες χρησιμοποίησης ενός στοιχείου υπολογιστικού νέφους και A_p η περίοδος απαξίωσης σε μήνες.

Όσον αφορά το περιβάλλον Edge Computing, το συνολικό κόστος ιδιοκτησίας προκύπτει από το άθροισμα οχτώ κατηγοριών κόστους. Οι επιμέρους αυτές κατηγορίες είναι το κόστος των φυσικών συσκευών, του λογισμικού, της εγκατάστασης, της τεχνικής υποστήριξης του συστήματος, της κατανάλωσης ηλεκτρικής ενέργειας, της ψύξης και της κτηριακής υποδομής.

- Κόστος φυσικών συσκευών

Ένα υπολογιστικό σύστημα Edge Computing είναι ουσιαστικά ένας server, όπου κάθε συσκευή τύπου server αποτελείται από ένα πλήθος επεξεργαστών, μνημών RAM, καρτών γραφικών και σκληρών δίσκων συνθέτοντας ένα σύνολο υπολογιστικών πόρων. Για τον προσδιορισμό του κόστους φυσικών συσκευών θεωρείται ότι κάθε συσκευή τύπου server διαθέτει τα ίδια χαρακτηριστικά όσον αφορά τα εξαρτήματα που το αποτελούν. Έτσι, το κόστος φυσικών συσκευών $Cost_{EdgePhys}$ δίνεται από τη σχέση

$$Cost_{EdgePhys} = VI_{Eps} * N_{Es} * Arp (T_u) \quad (5.10)$$

όπου τα Arp και T_u ορίστηκαν στην (5.9), N_{Es} ο αριθμός των φυσικών συσκευών που διαθέτει ο πάροχος του edge computing και VI_{Eps} το κόστος ανά φυσική συσκευή server.

- Κόστος λογισμικού

Σε ένα περιβάλλον Edge Computing το λογισμικό διακρίνεται σε τρεις κατηγορίες. Οι κατηγορίες αυτές είναι το λογισμικό υπολογιστικού συστήματος, το λογισμικό διαχείρισης πόρων μέσω εικονικών μηχανημάτων και το λογισμικό διαχείρισης του συστήματος. Ο εν λόγω διαχωρισμός γίνεται σύμφωνα με τον τρόπο αδειοδότησης των δικαιωμάτων χρήσης λογισμικού, δηλαδή τον τρόπο κοστολόγησης τους. Η πρώτη κατηγορία περιλαμβάνει τα λειτουργικά συστήματα και οποιαδήποτε άλλα λογισμικά που κοστολογούνται με βάση το προσφερόμενο πακέτο (suite), καθώς και τον απαιτούμενο αριθμό αδειών για το σύνολο των εικόνων (images) που χρησιμοποιούν οι χρήστες του Edge Computing. Στη δεύτερη κατηγορία ανήκει το λογισμικό που υλοποιεί το επίπεδο εφαρμογής του φυσικού συστήματος (application server), το λογισμικό των VM και οποιοδήποτε άλλο λογισμικό του οποίου οι άδειες χρήσης εξαρτώνται από τον αριθμό των πυρήνων του επεξεργαστή ενός φυσικού μηχανήματος. Την τρίτη κατηγορία απαρτίζουν, ως επί το πλείστον, τα λογισμικά διαχείρισης των συστημάτων και η αδειοδότησή τους κοστολογείται ανάλογα με τον αριθμό των επεξεργαστών που διαχειρίζεται το λογισμικό. Συνεπώς το κόστος λογισμικού $Cost_{EdgeSof}$ δίνεται ως εξής

$$Cost_{EdgeSof} = [(S_s * VI_s * N_{serverlic}) + (S_o * VI_o * N_{oslic}) + (S_m * VI_m * N_{monitorlic})] * Arp (T_u) \quad (5.11)$$

όπου τα Arp και T_u ορίστηκαν στην (5.9), VI_o το κόστος ανά μονάδα για το λογισμικό της πρώτης κατηγορίας, VI_s το κόστος ανά μονάδα για το λογισμικό της δεύτερης κατηγορίας, VI_m το κόστος ανά μονάδα για το λογισμικό της τρίτης κατηγορίας, N_{oslic} ο αριθμός των αδειών για το λογισμικό της πρώτης κατηγορίας, $N_{serverlic}$ ο αριθμός των αδειών για το λογισμικό της δεύτερης κατηγορίας, $N_{monitorlic}$ ο αριθμός των αδειών για το λογισμικό της τρίτης κατηγορίας και S_s, S_o, S_m ο συντελεστής ανά μονάδα λογισμικού, που επιφέρει ετήσια συνδρομή για τη χρήση του λογισμικού κάθε κατηγορίας.

- Κόστος δικτυακής υποδομής

Η απόκτηση και χρήση μεταγωγών, καρτών δικτύου και καλωδίων για τη διασύνδεση των κόμβων MEC με το τηλεπικοινωνιακό δίκτυο σχετίζεται με το κόστος δικτυακής υποδομής. Τα κόστη για τις κάρτες δικτύου και των καλωδίων συνυπολογίζονται στα κόστη φυσικών συσκευών και εγκατάστασης αντίστοιχα, ενώ το κόστος των μεταγωγών αφορά τους τηλεπικοινωνιακούς παρόχους. Επιπλέον, το γεγονός ότι οι κόμβοι MEC επικοινωνούν με το δίκτυο κορμού χρησιμοποιώντας το υπάρχον δίκτυο μετάδοσης των τηλεπικοινωνιακών παρόχων δεν εισάγει πρόσθετα κόστη. Αντιθέτως, επιτυγχάνεται καταμερισμός του ήδη υπάρχοντος κόστους στην περίπτωση όπου τα συστήματα MEC συνυπάρχουν με σταθμούς βάσης. Ο μοναδικός παράγοντας που συμβάλει στο κόστος της δικτυακής υποδομής είναι η διασύνδεση μεταξύ των κόμβων MEC στην περίπτωση που δεν μπορεί να πραγματοποιηθεί απευθείας μέσω κεραιών, αλλά απαιτείται ενδιάμεσος κόμβος. Συνεπώς, το κόστος δικτυακής υποδομής $Cost_{EdgeNet}$ υπολογίζεται ως

$$Cost_{EdgeNet} = P_{Es} * N_{Es} * Arp(T_u) \quad (5.12)$$

όπου τα Arp και T_u ορίστηκαν στην (5.9), P_{Es} το κόστος ανά μηχάνημα που απαιτείται για τη δικτύωση των κόμβων MEC και N_{Es} ο αριθμός των φυσικών μηχανημάτων που απαιτείται στο σύνολο των κόμβων MEC.

- Κόστος τεχνικής υποστήριξης

Η τεχνική υποστήριξη περιλαμβάνει οποιαδήποτε διεργασία που εξασφαλίζει την ομαλή λειτουργία του συστήματος Edge Computing που πραγματοποιείται με την διαμεσολάβηση του ανθρώπινου παράγοντα. Ουσιαστικά, το κόστος τεχνικής υποστήριξης αποτελείται από το κόστος του εργατικού δυναμικού που απαιτείται για τη διαχείριση του συστήματος και των εγκαταστάσεων, καθώς και την αντιμετώπιση

βλάβης στο σύστημα ή την αναβάθμισή του. Οπότε, το κόστος τεχνικής υποστήριξης $Cost_{EdgeSup}$ υπολογίζεται σύμφωνα με τη σχέση

$$Cost_{EdgeSup} = N_{labor} * (T_{use} * N_S * T_{idle}) * R_{salary} \quad (5.13)$$

όπου N_{labor} ο αριθμός των διαχειριστών των συστημάτων που απαιτούνται για την τεχνική υποστήριξη, T_{use} ο χρόνος απασχόλησης σε φυσικά συστήματα που βρίσκονται σε κατάσταση λειτουργίας, N_S ο αριθμός των φυσικών μηχανημάτων server, T_{idle} ο χρόνος απασχόλησης σε αδρανή συστήματα και υποστηρικτικές διαδικασίες και R_{salary} ο μέσος μισθός των διαχειριστών του συστήματος.

- Κόστος κατανάλωσης ηλεκτρικής ενέργειας

Το κόστος κατανάλωσης ηλεκτρικής ενέργειας προκύπτει κυρίως από την ενέργεια που καταναλώνουν οι φυσικές συσκευές server, οι δικτυακοί καταναμητές και τα μηχανήματα UPS. Το κόστος ηλεκτρικής ενέργειας $Cost_{EdgePower}$ δεν περιλαμβάνει το κόστος ψύξης των φυσικών συσκευών και δίνεται από τη σχέση

$$Cost_{EdgePower} = L_S * E_S * N_S * Arp(T_u) \quad (5.14)$$

όπου τα Arp και T_u ορίστηκαν στην (5.9), N_S ο αριθμός των φυσικών συσκευών, L_S συντελεστής σταθερής κατάστασης και E_S το κόστος κατανάλωσης ηλεκτρικής ενέργειας για 1kW.

- Κόστος ψύξης

Το γεγονός ότι απαιτείται περαιτέρω μελέτη σχετικά με την τοποθεσία ανάπτυξης κόμβων MEC δυσχεραίνει τον ακριβή προσδιορισμό του κόστους ψύξης των φυσικών μηχανημάτων. Στην περίπτωση όπου οι κόμβοι MEC συνυπάρχουν με τους κυψελωτούς σταθμούς βάσης τότε μπορούν να μοιράζονται τα υπάρχοντα συστήματα ψύξης των τηλεπικοινωνιακών υποδομών.

- Κόστος εγκατάστασης

Το κόστος εγκατάστασης φυσικών μηχανημάτων περιλαμβάνει το σύνολο των απαραίτητων εργαλείων και πρόσθετων στοιχείων για τη λειτουργία φυσικών συστημάτων server, όπως είναι για παράδειγμα τα τροφοδοτικά, οι οθόνες και τα καλώδια. Στο συγκεκριμένο κόστος δεν λαμβάνεται υπόψη το κόστος φυσικών μηχανημάτων, το οποίο έχει υπολογιστεί προηγουμένως. Το κόστος εγκατάστασης δίνεται από τη σχέση

$$Cost_{EdgeFac} = N_{site} * VP_{Efp} * Arp (T_u) \quad (5.15)$$

όπου τα Arp και T_u ορίστηκαν στην (5.9), N_{site} το πλήθος των γεωγραφικών τοποθεσιών που εγκαθίστανται κόμβοι MEC και VP_{Efp} το κόστος ανά τοποθεσία εγκατάστασης.

- Κόστος κτιριακής υποδομής

Ο προσδιορισμός του κόστους κτιριακής υποδομής δεν μπορεί να γίνει για τον ίδιο λόγο που αναφέρεται στο κόστος ψύξης φυσικών μηχανημάτων. Στην περίπτωση κατά την οποία τα συστήματα MEC συνυπάρχουν με τις τηλεπικοινωνιακές υποδομές το κόστος κτιριακής υποδομής επιμερίζεται.

Κεφάλαιο 6: Συμπεράσματα και επεκτάσεις

Οι τεχνολογικοί κλάδοι της πληροφορικής και των τηλεπικοινωνιών καταβάλουν προσπάθειες για την υλοποίηση των δικτύων πέμπτης γενιάς. Οι συσκευές Internet of Things πρόκειται να διαδραματίσουν σημαντικό ρολό στα δίκτυα 5G, κυρίως για τις δυνατότητες που ενδέχεται να προσφέρουν. Καταλυτικό ρολό στα δίκτυα επομένης γενιάς και στις συσκευές Internet of Things έχει η τεχνολογία του Mobile Edge Computing. Το MEC μεταφέρει τις δυνατότητες υπολογιστικού νέφους κοντά στον τελικό χρήστη, μειώνει τις χρονικές καθυστερήσεις, αποφορτίζει τις συσκευές Internet of Things από υπολογιστικές διεργασίες, ενώ παράλληλα λειτουργεί ως πύλη Gateway για αυτές, προκειμένου να επιτρέψει τη σύνδεση τους με άλλα δίκτυα. Τα συμπεράσματα που προκύπτουν από την εργασία είναι τα ακόλουθα:

- i. Οι υπηρεσίες και εφαρμογές Internet of Things πρόκειται να αναπτυχθούν σε σημαντικό βαθμό τα επόμενα χρόνια.
- ii. Είναι σημαντική η επιλογή της κατάλληλης τεχνολογίας συνδεσιμότητας για τις συσκευές Internet of Things προκειμένου να ικανοποιούνται οι απαιτήσεις τις εκάστοτε εφαρμογής Internet of Things. Επιπλέον, είναι κρίσιμη η εύρεση λύσεων στα ζητήματα διαλειτουργικότητας αναμεσα σε συσκευές που υποστηρίζουν διαφορετικές τεχνολογίες συνδεσιμότητας και ανομοιογένειας που παρουσιάζουν οι συσκευές διαφορετικών κατασκευαστών.
- iii. Όσον αφορά τον κόμβο MEC, είναι σημαντικό να καθοριστούν τα χαρακτηριστικά του. Πιο συγκεκριμένα, είναι αναγκαία η εύρεση του βέλτιστου συνδυασμού λύσεων στα ζητήματα που περιγράφονται στο Κεφάλαιο 4 με σκοπό τη δημιουργία λειτουργικών και αποδοτικών κόμβων MEC.
- iv. Τα τεχνικά μοντέλα είναι ικανά να δώσουν σημαντικές πληροφορίες που σχετίζονται με τη συμπεριφορά του Mobile Edge Computing στα αιτήματα των συσκευών Internet of Things. Οι πληροφορίες αυτές πρόκειται να δώσουν κατευθυντήριες γραμμές για τον τρόπο διαχείρισης του συστήματος MEC όσον αφορά τις πολιτικές εξυπηρέτησης αιτημάτων, την κατανομή των υπολογιστικών πόρων και την ενεργειακή κατανάλωση.
- v. Τα οικονομικά μεγέθη που παρουσιάζονται στο Κεφάλαιο 5 αποτελούν μία εκτίμηση για το μέγεθος της απαιτούμενης επένδυσης στη τεχνολογία του

MEC και μία βάση για την κοστολόγηση των υποστηριζόμενων υπηρεσιών με στόχο την επίτευξη κέρδους.

Πιθανές επεκτάσεις της παρούσας εργασίας είναι οι εξής:

- i. Εφαρμογή προσομοιώσεων σύμφωνα με τα τεχνικά μοντέλα που έχουν παρουσιαστεί για την εξαγωγή αποτελεσμάτων.
- ii. Δημιουργία τεχνικών μοντέλων που περιλαμβάνουν επιπλέον παραμέτρους, όπως είναι για παράδειγμα οι απαιτήσεις σε μνήμη RAM και σε αποθηκευτικό χώρο.
- iii. Επέκταση και προσαρμογή των τεχνικών μοντέλων σε περιπτώσεις χρήσης του MEC όπως είναι για παράδειγμα η ανάλυση βίντεο, η εικονική πραγματικότητα και η βελτιωμένη πραγματικότητα.
- iv. Αναλυτική κατηγοριοποίηση των εφαρμογών και περιπτώσεων χρήσης του MEC με βάση τους υπολογιστικούς πόρους και την ενεργειακή κατανάλωση.
- v. Πραγματοποίηση τεχνοοικονομικής ανάλυσης σε περιβάλλον Mobile Edge Computing.

Βιβλιογραφία και αναφορές

- [1] «IEEE white paper».
- [2] «www.gsma.com/iot/extended-coverage-gsm-internet-of-things-ec-gsm-iot».
- [3] «www.rs-online.com/designspark/eleven-internet-of-things-iot-protocols-you-need-to-know-about?/designspark/electronics/knowledge-item/eleven-internet-of-things-iot-protocols-you-need-to-know-about».
- [4] «www.thisisant.com/developer/ant-plus/ant-antplus-defined».
- [5] «www.u-blox.com/en/technologies/lte-cat-m».
- [6] «www.u-blox.com/en/narrowband-iot-nb-iot».
- [7] «www.link-labs.com/blog/future-of-wifi-802-11ah-802-11ad».
- [8] «<https://www.pcsteps.gr/213103-%CF%84%CE%B9-%CE%B5%CE%AF%CE%BD%CE%B1%CE%B9-%CF%84%CE%BF-internet-of-things-iot-smart-home/>».
- [9] www.techopedia.com/definition/31012/context-aware-computing.
- [10] X. X. Παπαδόπουλος, «Cloud and Mobile Edge Computing Platforms for 5G Systems,» 2018.
- [11] Α. Μακρής, ΚΟΣΤΟΛΟΓΗΣΗ ΥΠΗΡΕΣΙΩΝ INTERNET OF THINGS ΣΕ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ MOBILE EDGE COMPUTING, ΜΑΡΤΙΟΣ 2019.
- [12] "<https://iot.eetimes.com/top-wireless-standards-for-iot-devices/>".
- [13] "<https://www.link-labs.com/blog/complete-list-iot-network-protocols>".
- [14] Lethaby Nick TEXAS INSTRUMENTS, "Wireless connectivity for the Internet of Things:One size does not fit all," 2017.
- [15] G. A. AKPAKWU, B. J. SILVA, G. P. HANCKE and A. M. ABU-MAHFOUZ, "A Survey on 5G Networks for the Internet of Things: Communication Technologies and Challenges," 2017.
- [16] A. Al-Fuqaha, M. Guizani, M. Mohammadi, M. Aledhari and M. Ayyash, "Internet of Things: A Survey on Enabling Technologies, Protocols, and Applications," 2015.
- [17] S. Arab, H. Ashrafzadeh and A. Alidadi, "Internet of Things: Communication

- Technologies, Features and Challenges," 2018.
- [18] E. Borgia, The Internet of Things vision: Key Features, Applications and Open Issues, Computer Communications, 2014.
- [19] M. Burhan, R. A. Rehman, B. Khan and B.-S. Kim, "IoT Elements, Layered Architectures and Security Issues: A Comprehensive Survey," August 2018.
- [20] S. Cheruvu, A. Kumar, N. Smith and D. M. Wheeler, Demystifying Internet of Things Security, Berkeley: Apress.
- [21] G. Dunko, J. Misra, J. Robertson and T. Snyder, A Reference Guide to the Internet of Things, Raleigh: Bridgera LLC, 2017.
- [22] W. Ejaz and A. Anpalagan, Communication Technologies and Protocols for Internet of Things, Cham: Springer, 2018.
- [23] N. Hassan, S. Gillani, E. Ahmed, I. Yaqoob and M. Imran, "The Role of Edge Computing in Internet of Things," *IEEE Communications Magazine*, August 2018.
- [24] N. HASSAN, K.-L. A. YAU and C. WU, "Edge Computing in 5G: A Review," August 2019.
- [25] X. Li, Y. Li, T. Liu, J. Qiu and F. Wang, "The Method and Tool of Cost Analysis for Cloud Computing," 2009.
- [26] S. Madakam, R. Ramaswamy and S. Tripathi, "Internet of Things (IoT): A Literature Review," *Journal of Computer and Communications*, 2015.
- [27] Y. Mao, C. You, J. Zhang, K. Huang and K. B. Letaief, "A Survey on Mobile Edge Computing: The Communication Perspective," 2017.
- [28] K. K. Patel, S. M. Patel and C. Salazar, "Internet of Things-IOT: Definition, Characteristics, Architecture, Enabling Technologies, Application & Future Challenges.," 2016.
- [29] K. Rose, S. Eldridge and L. Chapin, "The Internet of Things: An Overview Understanding the Issues and Challenges of a More Connected World," 2015.
- [30] D. Sabella, A. Vaillant, P. Kuure, U. Rauschenbach and F. Giust, "Mobile-Edge Computing Architecture: The role of MEC in the Internet of Things," October 2016.
- [31] O. Said and M. Masud, "Towards Internet of Things: Survey and Future Vision,"

International Journal of Computer Networks, 2013.

- [32] T. Salman and R. Jain, "Networking protocols and standards for internet of things," 2017.
- [33] S. Sarawi, M. Anbar, K. Alieyan and M. S. Alzubaidi, "Internet of Things (IoT) Communication Protocols : Review," 2017.
- [34] P. Sethi and S. R. Sarangi, "Internet of Things: Architectures, Protocols, and Applications," January 2017.
- [35] A. Triantafyllou, P. Sarigiannidis and T. D. Lagkas, "Network Protocols, Schemes, and Mechanisms for Internet of Things (IoT): Features, Open Challenges, and Trends," 2018.
- [36] C. R. Uruñuela, "AN IMPLEMENTATION OF TASK PROCESSING ON 4G-BASED MOBILE-EDGE COMPUTING SYSTEMS," June 2019.
- [37] O. Vermesan and P. Friess, *Internet of Things-From Research and Innovation to Market Deployment*, River Publishers, 2014.
- [38] S. Wang, X. Zhang, Y. Zhang, L. Wang, J. Yang and W. Wang, "A Survey on Mobile Edge Networks: Convergence of Computing, Caching and Communications," 2017.

