



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΑΤΤΙΚΗΣ

ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ ΚΑΙ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ

**Πρόγραμμα Μεταπτυχιακών Σπουδών
Επιστήμη και Τεχνολογία της Πληροφορικής και των
Υπολογιστών**

Ειδίκευση Δικτύων Επικοινωνιών και Καταμεμημένων Συστημάτων

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Κινητή Υπολογιστική Άκρου Σε Περιβάλλοντα 5G

**Γεώργιος Α. Τσουφαντάρης
Α.Μ. mcse19041**

Εισηγητής: Δρ Αντώνης Μπόγρης, Καθηγητής

Κινητή Υπολογιστική Άκρου Σε Περιβάλλοντα 5G

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Κινητή Υπολογιστική Άκρου Σε Περιβάλλοντα 5G

**Γεώργιος Α. Τσουφαντάρης
Α.Μ. msce19041**

Εισηγητής:

Αντώνης Μπόγρης, Καθηγητής

Εξεταστική Επιτροπή:

**Αντώνης Μπόγρης
Βασίλειος Μάμαλης
Νικόλαος Ψαρράς**

Ημερομηνία εξέτασης: 11/07/2022

Δήλωση Συγγραφέα Μεταπτυχιακής Εργασίας

Ο κάτωθι υπογεγραμμένος **Τσουφανάρης Γεώργιος** του **Αλεξάνδρου**, με αριθμό μητρώου **mcse19041** φοιτητής του Προγράμματος Μεταπτυχιακών Σπουδών **Επιστήμη και Τεχνολογία της Πληροφορικής και των Υπολογιστών** του Τμήματος **Μηχανικών Πληροφορικής και Υπολογιστών** της Σχολής **Μηχανικών** του Πανεπιστημίου Δυτικής Αττικής, δηλώνω ότι:

«Είμαι συγγραφέας αυτής της μεταπτυχιακής εργασίας και ότι κάθε βοήθεια την οποία είχα για την προετοιμασία της, είναι πλήρως αναγνωρισμένη και αναφέρεται στην εργασία. Επίσης, οι όποιες πηγές από τις οποίες έκανα χρήση δεδομένων, ιδεών ή λέξεων, είτε ακριβώς είτε παραφρασμένες, αναφέρονται στο σύνολό τους, με πλήρη αναφορά στους συγγραφείς, τον εκδοτικό οίκο ή το περιοδικό, συμπεριλαμβανομένων και των πηγών που ενδεχομένως χρησιμοποιήθηκαν από το διαδίκτυο. Επίσης, βεβαιώνω ότι αυτή η εργασία έχει συγγραφεί από μένα αποκλειστικά και αποτελεί προϊόν πνευματικής ιδιοκτησίας τόσο δικής μου, όσο και του Ιδρύματος.

Παράβαση της ανωτέρω ακαδημαϊκής μου ευθύνης αποτελεί ουσιώδη λόγο για την ανάκληση του πτυχίου μου».

Επιθυμώ την απαγόρευση πρόσβασης στο πλήρες κείμενο της εργασίας μου μέχρι 12/07/2022 και έπειτα από αίτηση μου στη Βιβλιοθήκη και έγκριση του επιβλέποντα καθηγητή.

Ο Δηλών



Ευχαριστίες

Θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένεια μου για στην στήριξη που μου παρείχε κατά την διάρκεια των σπουδών μου.

Επίσης, θα ήθελα να ευχαριστήσω ιδιαίτερος τον Καθηγητή Κο Αντώνη Μπόγρη για την καθοδήγηση και την βοήθεια που μου προσέφερε κατά την εκπόνηση της διπλωματικής.

Περίληψη

Στην παρούσα εργασία παρουσιάζεται μία μελέτη, αναφορικά με την Κινητή Υπολογιστική Άκρου σε τα Δίκτυα Επικοινωνιών Πέμπτης Γενιάς. Προσεγγίζονται και αναλύονται θέματα τα οποία αφορούν δομές και έννοιες που απαρτίζουν τα σύγχρονα αυτά δίκτυα, σε σχέση είτε με το Ακραίο τους δίκτυο.

Αρχικά, γίνεται περιγραφή της Αρχιτεκτονικής στα δίκτυα 5G, σχετικά με τις νέες προκλήσεις που προκύπτουν, βάσει των νέων αναγκών και απαιτήσεων των τελικών χρηστών. Στη συνέχεια, αναλύεται ο σχεδιασμός και η λειτουργία των βασικών τμημάτων Υπολογιστικής στο Ακραίο Δίκτυο (Edge Computing). Μελετώνται επίσης, η σημασία, οι ρόλοι και οι νέες εφαρμογές που προκύπτουν. Αναλύονται οι όροι και οι απαιτήσεις των URLLC επικοινωνιών και πώς αυτές ενσωματώνονται και εφαρμόζονται το «Διαδίκτυο των Πραγμάτων»..

Ακολούθως, παρουσιάζεται μία σύντομη ανασκόπηση στο Cloud Computing, στην αρχιτεκτονική του, στους τύπους Νέφους, στην σύγκρισή του με άλλες τεχνολογίες. Αναλύονται τα πλεονεκτήματα, αλλά και ζητήματα τα οποία προκύπτουν σχετικά (ασφάλεια, υπηρεσίες).

Στη συνέχεια, μελετάται η ανάγκη που προέκυψε για την μετάβαση της επεξεργασίας από τα Δίκτυα Νέφους στα Ακραία δίκτυα, αναφορικά με τις 5G τεχνολογίες. Αναλύεται ο ρόλος της εγγύτητας (proximity), της επεκτασιμότητας (scalability), καθώς και τα οφέλη που αποκομίζουμε. Επίσης γίνεται παρουσίαση της αρχιτεκτονικής, των απαιτήσεων από πλευράς δικτύου, του TSN (Time-Sensitive-Networking), και των πλεονεκτημάτων όσον αφορά την κατανάλωση ενέργειας.

Ως συνέχεια του Edge Computing, εισάγεται η έννοια του Mobile Edge Computing ή Multi-Access Edge Computing. Γίνεται εκτεταμένη αναφορά και ανάλυση των χαρακτηριστικών του, καθώς και των νέων τεχνολογιών που ενεργοποιεί το MEC. Περιγράφονται οι ρόλοι και οι εφαρμογές του, και γίνεται περιγραφή σεναρίων Use Cases.

Επίσης, αναλύονται εις βάθος οι ρόλοι και η συνεισφορά των μεθόδων NOMA (Non-Orthogonal Multiple Access), EH (Energy Harvesting), WPT (Wireless Power Transfer), UAV (Unmanned Aerial Vehicle) και H-RAN (HetNet-RAN) στην Υπολογιστική Άκρου.

Τέλος, γίνεται αναφορά στην τάση της αγοράς, σχετικά με την Υπολογιστική Άκρου, και το τρόπο που προσεγγίζουν οι «μεγάλοι παίκτες» (Εταιρίες) και οι Οργανισμοί (Ερευνητικά κέντρα, Πανεπιστήμια) την εισαγωγή της Υπολογιστικής Άκρου, στα δίκτυα Πέμπτης Γενιάς.

Στόχος της εργασίας είναι καλύψει εκτενώς τα κυριότερα πεδία σχετικά με την Κινητή Υπολογιστική Άκρου στα 5G δίκτυα, βάσει της αναγκαιότητας που προέκυψε για την μετάβαση από τη Υπολογιστική Νέφους. Παρουσιάζει μία ολοκληρωμένη εικόνα σχετικά με τον τρόπο σχεδιασμού και λειτουργίας των δικτύων αυτών. Επιπλέον ανοίγει νέα θέματα, που ενδεχομένως προκύπτουν βάσει των νέων αναγκών, για μελλοντική μελέτη.

Ακρωνύμια:

MEC: Mobile Edge Computing

EC: Edge Cloud

RAN: Radio Access Network

C-RAN: Cloud Radio Access Network

BS: Base Station

MCC: Mobile Cloud Computing

CC: Cloud Computing

AR/VR: Virtual Reality / Augmented Reality

SDN: Software Defined Network

NFV: Network Function Virtualization

VM: Virtual Machine

BBU: Baseband Unit

RRU: Remote Radio Unit

ICN: Information Centric Networking

VNF: Virtual Network Functions

D2D: Device-to-Device

TSN: Time-Sensitive Networking

AI: Artificial Intelligence

SMEC: Satellite MEC

MIMO: Multiple-Input Multiple-Output

mMIMO: massive Multiple-Input Multiple-Output

MISO: Multiple-Input Single-output

SISO: Single-Input Single Output

mmWave: Millimeter Wave

4C: Communication, Computation, Control, and Caching

SLA: Service Level Agreement

SaaS: Software as a Service

IaaS: Infrastructure as a Service

PaaS: Platform as a Service

CDN: content delivery networks

EC2: Elastic Compute Cloud

V2V: vehicle-to-vehicle

IoT: Internet of Things

IIoT: Industrial IoT

3GPP: 3rd Generation Partnership Project

PTP: Precision Time Protocol

gPTP: general Precision Time Protocol

GeSI: Global e-Sustainability Initiative

NOMA: Non-Orthogonal Multiple Access

N-OFDM: Non-orthogonal frequency-division multiplexing

PD-NOMA: Power-Domain Non-orthogonal frequency-division multiplexing

SIC: successive interference cancellation

CD-NOMA: Code-Domain NOMA

CDMA: code division multiple access

VLC: Visible light communication

NB-IoT: Narrowband Internet of Things
CSI: Channel state information
EH: Energy Harvesting
WPT: Wireless Power Transfer
RF: Radio Frequency
WSN: Wireless Sensor Network
eRAC: extremely Remote Area Communication
DL: Deep Learning
ML: Machine Learning
UAV: Unmanned Aerial Vehicles
SWIPT: simultaneous wireless communication and power transfer
HAPs: high altitude platforms
LAPs: Low altitude platforms
GBS: Ground Base Station
SCA: successive convex approximation
MAUP: MEC-ware UAV's Path Planing
HetNet: Heterogenous Network
ICI: inter-carrier interference
NR: New Radio
URLLC: ultra-reliable low latency communications
eMBB: enhanced mobile broadband
mMTC: massive machine-type communications
NB: Narrowband
DENM: decentralized environmental notification message
CAM: cooperative awareness message
RACS: Radio Applications Cloud Server
OTT: Over-the-top
QoS: Quality of Service
QoE: Quality of Experience

Λέξεις Κλειδιά:

Λανθάνων Χρόνος: Latency

Εύρος Ζωνής: Bandwidth

Δίκτυο Πυρήνα: Core

Τεμαχισμός δικτύου: Network Slicing

Εκφόρτωση υπολογισμών: Computation offload

Βασική ζώνη: Baseband

Επίπεδο δεδομένων: data plane

Επίπεδο ελέγχου: control plane

Πληροφοριο-Κεντρική Δικτύωση: Information Centric Networking

Προσωρινή αποθήκευση τοπικά: Local caching

Ευρυζωνική σύνδεση κινητής τηλεφωνίας: mobile broadband

Κατανόηση / αίσθηση κινούμενου πλήθους: mobile crowd sensing

Μη-Ορθογώνια Πολλαπλή Προσβαση: Non-Orthogonal Multiple Access

Κωδικοποίηση υπέρ-θέσης: superposition coding

Γνωστική επικοινωνία: Cognitive Communication

Απαιτηση ανάδρασης καναλιού: channel feedback requirements

Ανεπάρκεια κατάταξης: rank deficiency

Υπέρμετρη χωρικής πολυπλεξίας: excessive spatial multiplexing

IoT συστήματα στενής ζώνης: Narrowband Internet of Things

Πληροφορία Κατάστασης Καναλιού: channel state information

Κοινή διαμόρφωσης δέσμης: joint beamforming

Συγκομιδή Ενέργειας: Energy Harvesting

Ασύρματη Μεταφορά Ενέργειας: Wireless Power Transfer

Ασύρματο Δίκτυο Αισθητήρων: Wireless Sensor Network

Μη Επανδρωμένα Εναέρια Οχήματα: Unmanned Aerial Vehicles

Μέθοδος διαδοχικής κυρτής προσέγγισης: successive convex approximation

Εναλλασσόμενη Βελτιστοποίηση: Alternating Optimization

Μη-κυρτό: non-convex

Μεταπομπή: handover

Απτό διαδίκτυο: tactile internet

Περιεχόμενα

ΠΕΡΙΛΗΨΗ	9
ΕΙΣΑΓΩΓΗ	17
ΤΩΡΙΝΕΣ ΤΑΣΕΙΣ	17
ΕΝΟΤΗΤΑ 1 – ΑΡΧΙΤΕΚΤΟΝΙΚΗ 5G	19
1.1 ΠΡΟΚΛΗΣΕΙΣ, ΕΝΕΡΓΟΠΟΙΗΤΕΣ ΚΑΙ ΑΡΧΕΣ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ ΣΤΑ 5G ΔΙΚΤΥΑ	19
<i>Χωρητικότητα Συστήματος και Ρυθμός Μετάδοσης</i>	19
<i>Καθυστέρηση από Άκρο σε Άκρο (End-to-End Latency)</i>	22
<i>Μεγάλος Αριθμός Συνδεδεμένων Συσκευών</i>	22
<i>Κόστος</i>	23
<i>Ποιότητα Εμπειρίας Χρήσης (Quality of Experience)</i>	24
1.2 ΌΡΑΜΑ ΑΡΧΙΤΕΚΤΟΝΙΚΗΣ ΔΙΚΤΥΩΝ ΠΕΜΠΤΗΣ ΓΕΝΙΑΣ.....	25
<i>Λογικά Επίπεδα (Logical Layers) στα 5G Δίκτυα: Ράδιο – Δίκτυο και Δίκτυο Νέφους</i>	26
<i>Δυναμική Ανάπτυξη και Κλιμάκωση των Λειτουργιών του Δικτύου μέσω SDH και NFV</i>	27
<i>Δυναμικά Πρωτόκολλα (Lean Protocol Stack)</i>	28
<i>Ανεξάρτητη Παροχή Κάλυψης και Χωρητικότητας, με Αρχιτεκτονική Διαχωρισμού C/U plane</i>	29
<i>Πολλαπλές Συσκευές και Ομαδικής Κινητικότητα (Relaying & Nesting)</i>	29
<i>Ευφυές Δίκτυο βάσει των Δεδομένων</i>	29
<i>Ζητήματα Αρχιτεκτονικής</i>	30
ΕΝΟΤΗΤΑ 2 – EDGE COMPUTING ΣΤΟ 5G	32
ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	32
2.1 ΑΠΑΙΤΗΣΕΙΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ 5G	32
2.2 ΚΥΡΙΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ 5G	33
2.3 ΣΗΜΑΣΙΑ ΤΟΥ EDGE COMPUTING	33
2.4 ΒΑΣΙΚΕΣ ΑΠΑΙΤΗΣΕΙΣ EDGE COMPUTING ΣΤΟ 5G	34
2.5 ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΤΟΥ EDGE COMPUTING ΣΤΟ 5G.....	35
2.6 ΣΤΟΧΟΙ.....	36
2.7 ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΕΣ ΠΛΑΤΦΟΡΜΕΣ	37
2.8 ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ	38
2.9 ΟΙ ΡΟΛΟΙ ΤΟΥ EDGE COMPUTING ΣΤΟ 5G	39
2.10 ΜΕΤΡΑ ΑΠΟΔΟΤΙΚΟΤΗΤΑΣ	40
2.11 ΘΕΜΑΤΑ ΈΡΕΥΝΑΣ.....	41
ΕΝΟΤΗΤΑ 3 – URLL (ULTRA-RELIABLE LOW-LATENCY) ΥΠΗΡΕΣΙΕΣ ΚΑΙ ΔΙΑΔΙΚΤΥΟ ΤΩΝ ΠΡΑΓΜΑΤΩΝ	43
3.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ	43
<i>Σημασία του URLLC</i>	44
3.2 ΖΗΤΗΜΑΤΑ ΠΟΥ ΠΡΟΚΕΙΠΤΟΥΝ ΣΤΗΝ ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΤΩΝ URLLC	44
3.3 Ο ΡΟΛΟΣ ΤΟΥ URLLC ΣΤΟ ΙΟΤ	47
3.4 3GPP ΠΡΟΤΥΠΟΠΟΙΗΣΗ ΓΙΑ ΤΙΣ URLLC ΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΕΣ	50
ΕΝΟΤΗΤΑ 4 – CLOUD COMPUTING	50
ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	50
4.1 ΑΡΧΙΤΕΚΤΟΝΙΚΗ CLOUD	51
4.2 ΤΥΠΟΙ ΝΕΦΟΥΣ ΜΕ ΒΑΣΗ ΤΟ ΜΟΝΤΕΛΟ ΠΑΡΑΔΟΣΗΣ	52
4.3 CLOUD COMPUTING ΣΕ ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΜΕ ΑΛΛΕΣ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΕΣ.....	55
4.4 ΠΛΕΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ ΤΟΥ CLOUD COMPUTING	56
4.5 ΖΗΤΗΜΑΤΑ ΚΑΙ ΑΝΗΣΥΧΙΕΣ ΣΤΟ CLOUD COMPUTING	56
4.6 ΑΣΦΑΛΕΙΑ ΣΤΟ CLOUD COMPUTING.....	58
4.7 CLOUD COMPUTING ΥΠΗΡΕΣΙΕΣ	59
ΕΝΟΤΗΤΑ 5 – ΑΠΟ ΤΟ CLOUD ΣΤΟ EDGE COMPUTING	60
5.1 Η ΕΜΦΑΝΙΣΗ ΤΟΥ EDGE COMPUTING.....	60
5.2 ΠΡΟΕΛΕΥΣΗ ΚΑΙ ΙΣΤΟΡΙΚΟ.....	61

5.3 ΣΗΜΑΣΙΑ ΤΗΣ ΕΓΓΥΤΗΤΑΣ	62
5.4 ΥΠΗΡΕΣΙΕΣ ΝΕΦΟΥΣ ΥΨΗΛΗΣ ΑΠΟΚΡΙΣΗΣ (HIGHLY RESPONSIVE)	63
5.5 ΕΠΕΚΤΑΣΙΜΟΤΗΤΑ ΜΕΣΩ ΑΝΑΛΥΣΗΣ ΤΩΝ ΆΚΡΩΝ (EDGE ANALYTICS)	66
5.6 ΕΠΙΒΟΛΗ ΤΗΣ ΠΟΛΙΤΙΚΗΣ ΑΠΟΡΡΗΤΟΥ	68
5.7 ΚΑΛΥΨΗ ΤΩΝ ΔΙΑΚΟΠΩΝ ΤΟΥ ΝΕΦΟΥΣ	69
ΕΝΟΤΗΤΑ 6 – EDGE COMPUTING ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΚΑΙ ΑΠΑΙΤΗΣΕΙΣ.....	70
6.1 ΑΡΧΙΤΕΚΤΟΝΙΚΗ EDGE COMPUTING.....	70
6.2 ΑΠΑΙΤΗΣΕΙΣ ΔΙΚΤΥΟΥ	71
6.2.1 Αξιολόγηση των αναγκών, των πόρων και των στόχων στο Ακραίο Δίκτυο.....	71
6.2.2 Επιλογή και ανάπτυξη λύσεων Edge Computing.....	72
6.2.3 Διατήρηση, Ασφάλεια και Βελτιστοποίηση της Υποδομής Edge.....	72
6.3 EDGE COMPUTING HARDWARE	72
6.4 ΤΥΠΟΙ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΤΩΝ ΓΙΑ EDGE COMPUTING (xPU)	75
6.5 TIME SENSITIVE NETWORKING ΓΙΑ EDGE COMPUTING ΣΤΑ 5G ΔΙΚΤΥΑ	77
6.5.1 To 5G Edge Computing γίνεται διαδραστικό με το Time Sensitive Networking.....	77
6.5.2 Η επανάσταση του αυτοματισμού: Προγράμματα για ακριβή χρονισμό του δικτύου	80
6.6 EDGE COMPUTING ENERGY EFFICIENCY: ΑΛΛΑΓΗ ΤΟΥ ΙΣΟΖΥΓΙΟΥ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΣΤΑ 5G ΔΙΚΤΥΑ	81
ΕΝΟΤΗΤΑ 7 – MOBILE CLOUD COMPUTING & MOBILE EDGE COMPUTING & USE CASES	86
7.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	86
7.2 MEC ΓΙΑ 5G ΚΑΙ ΙΟΤ: ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ.....	86
7.2.1 Τυπικά χαρακτηριστικά.....	87
7.2.2 Σύγκριση MEC με το Mobile Cloud Computing (MCC).....	87
7.3 MEC ΓΙΑ 5G ΚΑΙ ΙΟΤ: ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΕΣ ΕΝΕΡΓΟΠΟΙΗΣΗΣ	89
7.3.1 Υπολογιστική Νέφος – Cloud Computing (CC).....	90
7.3.2 Δικτύωση Ορισμένη από το Λογισμικό - SDN.....	90
7.3.3 Εικονικοποίηση Λειτουργιών Δικτύου - Network function virtualization - NFV.....	91
7.3.4 Πληροφοριο-Κεντρική Δικτύωση - Information Centric Networking - ICN.....	91
7.3.5 Εικονικές Μηχανές και Containers	92
7.3.6 Έξυπνες Συσκευές.....	93
7.3.7 Τεμαχισμός δικτύου (Network Slicing).....	94
7.3.8 Εκφόρτωση Υπολογισμού (Computation Offloading)	95
7.4 ΤΟ MEC ΣΤΟ 5G ΚΑΙ ΤΟ ΙΟΤ: ΡΟΛΟΣ, ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ, ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΕΣ ΚΑΤΕΥΘΥΝΣΕΙΣ	96
7.4.1 Ο ρόλος του MEC στο 5G.....	96
7.4.2 Εφαρμογές 5G με δυνατότητα MEC (Use Cases).....	96
7.4.3 Μελλοντικές κατευθύνσεις του MEC ενσωματωμένες με 5G.....	99
ΕΝΟΤΗΤΑ 8 – ΒΕΛΤΙΩΣΕΙΣ MEC ΜΕΣΩ ΝΟΜΑ, ΕΗ, WPT, UAVS, C-RAN & H-RAN	101
8.1 MEC ΜΕ ΜΗ-ΟΡΘΟΓΩΝΙΑ ΠΟΛΛΑΠΛΗ ΠΡΟΣΒΑΣΗ (NON-ORTHOGONAL MULTIPLE ACCESS - NOMA).....	101
8.1.1 Βασικές αρχές της NOMA.....	101
8.1.2 Κίνητρο για συνδυασμό NOMA και MEC	102
8.1.3 Τεχνολογία Αιχμής / Υπάρχουσες Μελέτες.....	104
8.1.4 Συμπεράσματα και Μελλοντικές Έρευνες.....	105
8.2 MEC ΜΕ ΣΥΓΚΟΜΙΔΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ (ENERGY HARVESTING - EH) ΚΑΙ ΑΣΥΡΜΑΤΗ ΜΕΤΑΦΟΡΑ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ (WIRELESS POWER TRANSFER - WPT)	107
8.2.1 Βασικές αρχές Energy Harvesting (EH) και Wireless Power Transfer (WPT).....	107
8.2.2 Κίνητρα.....	109
8.2.3 Τεχνολογία Αιχμής / Υπάρχουσες Μελέτες.....	111
8.2.4 Συμπεράσματα και Μελλοντικές Έρευνες.....	113
8.3 MEC ΓΙΑ ΜΗ ΕΠΑΝΔΡΩΜΕΝΑ ΕΝΑΕΡΙΑ ΟΧΗΜΑΤΑ (UAVs).....	114
8.3.1 Βασικές Αρχές.....	114
8.3.2 Κίνητρο για συνδυασμό MEC και UAV	116
8.3.3 Τεχνολογία Αιχμής / Υπάρχουσες Μελέτες.....	118
8.3.4 Συμπεράσματα και Μελλοντικές Έρευνες.....	119
8.4 MEC ΜΕ ΕΤΕΡΟΓΕΝΕΣ C-RAN.....	120
8.4.1 Βασικές αρχές των ετερογενών C-RANs Cloud Radio Access (H-RANs).....	120

8.4.2 Κίνητρα Πλεονεκτήματα και Προκλήσεις.....	121
8.4.3 Τεχνολογία Αιχμής / Υπάρχουσες Μελέτες.....	123
8.4.4 Συμπεράσματα και Μελλοντικές Έρευνες.....	125
ΕΝΟΤΗΤΑ 9 – ΚΟΡΥΦΑΙΕΣ ΕΤΑΙΡΕΙΕΣ ΚΑΙ ΟΡΓΑΝΙΣΜΟΙ ΣΤΟ ΜΕΣ.....	126
9.1 IBM.....	128
9.2 INTEL.....	130
9.3 HUAWAI.....	132
9.4 AMAZON (AWS - AMAZON WEB SERVICES).....	133
9.5 GOOGLE.....	134
9.6 MICROSOFT.....	135
9.7 ERICSSON.....	136
9.8 CISCO.....	137
9.9 TENCENT.....	137
9.10 ZTE.....	138
9.11 ΣΥΓΧΩΝΕΥΣΕΙΣ ΚΑΙ ΕΞΑΓΟΡΕΣ (M & A - MERGERS AND ACQUISITIONS).....	139
ΕΝΟΤΗΤΑ 10 – ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....	141
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	144

Πίνακας Περιεχομένων Σχημάτων

ΣΧΗΜΑ 1 - ΟΙ ΠΡΟΚΛΗΣΕΙΣ ΣΤΟ 5G, ΕΝΕΡΓΟΠΟΙΗΤΕΣ, ΑΡΧΕΣ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ.....	20
ΣΧΗΜΑ 2 - Η ΠΡΟΟΠΤΙΚΗ ΤΟΥ 5G ΚΑΙ ΠΙΘΑΝΟΙ ΕΝΕΡΓΟΠΟΙΗΤΕΣ.....	26
ΣΧΗΜΑ 3 - ΔΙΚΤΥΟ ΝΕΦΟΥΣ 5G.....	27
ΣΧΗΜΑ 4 - ΘΕΜΑΤΑ ΠΡΟΣ ΑΝΤΙΜΕΤΩΠΙΣΗ ΓΙΑ ΤΗΝ ΥΛΟΠΟΙΗΣΗ 5G ΑΡΧΙΤΕΚΤΟΝΙΚΩΝ.....	30
ΣΧΗΜΑ 5 - ΕΠΙΛΟΓΕΣ ΚΑΙ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΑ SMALL CELL ΑΝΑΠΤΥΞΕΩΝ.....	31
ΣΧΗΜΑ 6 - CLOUD COMPUTING / EDGE COMPUTING.....	34
ΣΧΗΜΑ 7 - Η ΕΥΕΛΙΚΤΗ ΔΟΜΗ ΠΛΑΙΣΙΟΥ ΤΟΥ 5G NR. URLLC: ULTRA-RELIABLE LOW LATENCY COMMUNICATIONS, EMBB: ENHANCED MOBILE BROADBAND, mMTC: MASSIVE MACHINE-TYPE COMMUNICATIONS, IOT: INTERNET OF THINGS, NB: NARROWBAND.....	43
ΣΧΗΜΑ 8 - ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΚΑΙ ΣΧΕΔΙΟ ΒΕΛΤΙΩΣΗΣ ΓΙΑ ΤΟ ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΟ 5G.....	ERROR! BOOKMARK NOT DEFINED.
ΣΧΗΜΑ 9 - ΣΥΝΥΠΑΡΞΗ URLLC ΚΑΙ EMBB.....	45
ΣΧΗΜΑ 10 - BUFFER ΧΡΗΣΤΩΝ.....	46
ΣΧΗΜΑ 11 - ΒΑΣΙΚΗ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑ IOT ΜΕΣΩ TACTILE INTERNET ΣΕ mMIMO.....	47
ΣΧΗΜΑ 12 - ΈΝΝΟΙΑ ΤΗΣ ΠΑΡΑΔΟΣΙΑΚΗΣ ΜΗΧΑΝΙΚΗΣ ΜΑΘΗΣΗΣ (ML) (ΚΕΝΤΡΙΚΗ). AI, ΤΕΧΝΗΤΗ ΝΟΗΜΟΣΥΝΗ.....	48
ΣΧΗΜΑ 13 - ΒΑΣΙΚΗ ΟΔΙΚΗ ΑΣΦΑΛΕΙΑ ΟΧΗΜΑΤΟΣ ΠΡΟΣ ΟΧΗΜΑ (V2V).....	49
ΣΧΗΜΑ 14 - ΣΗΜΑΝΤΙΚΟΣ ΔΟΜΙΚΟΣ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΤΟΥ CLOUD.....	51
ΣΧΗΜΑ 15 - ΜΟΝΤΕΛΑ ΠΑΡΑΔΟΣΗΣ ΥΠΗΡΕΣΙΩΝ CLOUD.....	53
ΣΧΗΜΑ 16 - ΚΑΤΑΝΟΜΗ ΧΡΟΝΟΥ ΑΠΟΚΡΙΣΗΣ ΚΑΙ ΚΟΣΤΟΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΑΝΑ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑ ΜΙΑΣ (Α) ΕΦΑΡΜΟΓΗΣ ΕΠΑΥΞΗΜΕΝΗΣ ΠΡΑΓΜΑΤΙΚΟΤΗΤΑΣ ΚΑΙ (Β) ΕΦΑΡΜΟΓΗΣ ΑΝΑΓΝΩΡΙΣΗΣ ΠΡΟΣΩΠΟΥ ΣΕ ΜΙΑ ΦΟΡΗΤΗ ΣΥΣΚΕΥΗ.....	64
ΣΧΗΜΑ 17 - ΠΛΑΙΣΙΟ GIGASIGHT. Ένα CLOUDLET ΕΚΤΕΛΕΙ ΑΝΑΛΥΣΕΙΣ ΟΡΑΣΗΣ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΗ ΣΕ ΒΙΝΤΕΟ ΑΠΟ ΚΙΝΗΤΕΣ ΣΥΣΚΕΥΕΣ, ΣΕ ΣΧΕΔΟΝ ΠΡΑΓΜΑΤΙΚΟ ΧΡΟΝΟ, ΚΑΙ ΣΤΕΛΝΕΙ ΜΟΝΟ ΤΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΜΑΖΙ ΜΕ ΤΑ ΜΕΤΑΔΕΔΟΜΕΝΑ ΣΤΟ CLOUD, ΜΕΙΩΝΟΝΤΑΣ ΑΠΟΤΟΜΑ ΤΟ INGRESS BANDWIDTH ΣΤΟ CLOUD.....	66
ΣΧΗΜΑ 18 - IOT ΑΡΧΙΤΕΚΤΟΝΙΚΗ ΑΠΟΡΡΗΤΟΥ. ΟΙ ΕΝΟΤΗΤΕΣ ΛΟΓΙΣΜΙΚΟΥ ΕΚΤΕΛΟΥΝΤΑΙ ΣΕ ΕΝΑ CLOUDLET, ΕΝΤΟΣ ΤΟΥ ΤΟΜΕΑ ΕΜΠΙΣΤΟΣΥΝΗΣ ΕΝΟΣ ΑΙΣΘΗΤΗΡΑ, ΓΙΑ ΤΗΝ ΕΚΤΕΛΕΣΗ ΤΟΥ DENATURING ΚΑΙ ΤΗΣ ΕΠΙΒΟΛΗΣ ΤΗΣ ΠΟΛΙΤΙΚΗΣ ΑΠΟΡΡΗΤΟΥ ΣΤΙΣ ΡΟΕΣ ΑΙΣΘΗΤΗΡΩΝ.....	68
ΣΧΗΜΑ 19 - ΒΑΣΙΚΗ ΑΡΧΙΤΕΚΤΟΝΙΚΗ ΤΡΙΩΝ ΕΠΙΠΕΔΩΝ ΤΟΥ EDGE COMPUTING.....	70
ΣΧΗΜΑ 20 - CONVERGED EDGE ΣΥΣΤΗΜΑ HPE EDGELINE.....	73
ΣΧΗΜΑ 21 - CISCO ISR ROUTERS ΚΑΙ USC-E SERIES ΓΙΑ EDGE COMPUTING.....	73
ΣΧΗΜΑ 22 - ΤΑ OEM ΜΠΟΡΟΥΝ ΝΑ ΣΥΝΔΥΑΣΟΥΝ ΤΗ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΚΟΤΗΤΑ ΠΟΥ ΠΡΟΣΦΕΡΕΙ ΕΝΑ TPU, ΜΕ ΤΙΣ ΙΣΧΥΡΕΣ ΔΥΝΑΤΟΤΗΤΕΣ ΤΟΥ ITX-P-C444, ΕΚΜΕΤΑΛΛΕΥΟΜΕΝΟΙ ΤΟ SBC'S PCIe MINI CARD (mPCIe) SLOT.....	76
ΣΧΗΜΑ 23 - ΠΡΟΒΟΛΗ ΑΡΧΙΤΕΚΤΟΝΙΚΗΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΜΕ ΤΟ 5GS ΝΑ ΕΜΦΑΝΙΖΕΤΑΙ ΩΣ TSN BRIDGE.....	78
ΣΧΗΜΑ 24 - ΠΟΛΥΤΙΜΑ ΕΡΓΑΛΕΙΑ ΤΟΥ TSN ΠΟΥ ΕΠΙΤΡΕΠΟΥΝ ΤΗΝ ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΣΤΟΝ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΟ ΑΥΤΟΜΑΤΙΣΜΟ.....	79

Κινητή Υπολογιστική Άκρου Σε Περιβάλλοντα 5G

ΣΧΗΜΑ 25 - Το TSN & 5G ΕΦΑΡΜΟΖΕΤΑΙ ΣΤΟ ΣΕΝΑΡΙΟ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΑΣ	80
ΣΧΗΜΑ 26 - ΠΗΓΗ "CISCO VNI. FORECAST 2016 – 2020"	82
ΣΧΗΜΑ 27 - ΠΗΓΗ "EVALUATING SUSTAINABLE INTERACTION DESIGN OF DIGITAL SERVICES: THE CASE OF YOUTUBE (DANIEL SCHIEN, 2019)"	83
ΣΧΗΜΑ 28 - NETWORK SLICING ΚΑΙ Ο ΡΟΛΟΣ ΤΟΥ MEC, ΠΗΓΗ: [45]	95
ΣΧΗΜΑ 29 - MEC 5G ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ	97
ΣΧΗΜΑ 30 - ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΕΣ ΕΗ ΜΕ ΠΑΡΑΓΟΜΕΝΗ ΔΙΑΚΟΠΤΟΜΕΝΗ ΙΣΧΥ ΚΑΙ ΚΑΤΑΝΑΛΩΣΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ, ΓΙΑ ΔΙΑΦΟΡΕΣ ΣΥΣΚΕΥΕΣ	108
ΣΧΗΜΑ 31 - ΔΙΚΤΥΑ ΠΡΟΣΒΑΣΗΣ MEC ΜΕ ΔΥΝΑΤΟΤΗΤΑ ΕΗ/WPT	111
ΣΧΗΜΑ 32 - ΑΡΧΙΤΕΚΤΟΝΙΚΗ ΔΙΚΤΥΩΝ UAV ΜΕ ΔΥΝΑΤΟΤΗΤΑ MEC	ERROR! BOOKMARK NOT DEFINED.
ΣΧΗΜΑ 33 - ΑΡΧΙΤΕΚΤΟΝΙΚΗ H-CRAN MEC	121
ΣΧΗΜΑ 34 - ΚΟΡΥΦΑΙΟΙ ΟΡΓΑΝΙΣΜΟΙ ΜΕ ΤΙΣ ΠΕΡΙΣΣΟΤΕΡΕΣ ΠΑΤΕΝΤΕΣ EDGE COMPUTING (ΣΥΜΠΕΡΙΛΑΜΒΑΝΟΝΤΑΙ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΑ ΚΑΙ ΕΡΕΥΝΗΤΙΚΩΝ ΚΕΝΤΡΑ), ΠΗΓΗ GRAYB	127
ΣΧΗΜΑ 35 - ΚΟΡΥΦΑΙΟΙ ΟΡΓΑΝΙΣΜΟΙ ΜΕ ΤΙΣ ΠΕΡΙΣΣΟΤΕΡΕΣ ΠΑΤΕΝΤΕΣ EDGE COMPUTING (ΔΕΝ ΣΥΜΠΕΡΙΛΑΜΒΑΝΟΝΤΑΙ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΑ ΚΑΙ ΕΡΕΥΝΗΤΙΚΩΝ ΚΕΝΤΡΑ), ΠΗΓΗ GRAYB.....	127
ΣΧΗΜΑ 36 - ΚΟΡΥΦΑΙΑ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΑ ΚΑΙ ΕΡΕΥΝΗΤΙΚΩΝ ΚΕΝΤΡΑ ΜΕ ΤΙΣ ΠΕΡΙΣΣΟΤΕΡΕΣ ΠΑΤΕΝΤΕΣ EDGE COMPUTING (ΔΕΝ ΣΥΜΠΕΡΙΛΑΜΒΑΝΟΝΤΑΙ ΕΤΑΙΡΙΕΣ)	128
ΣΧΗΜΑ 37 - IBM EDGE COMPUTING ΑΡΧΙΤΕΚΤΟΝΙΚΗ	130

Πίνακας Περιεχομένων Πινάκων

ΠΙΝΑΚΑΣ 1 - ΑΝΑΜΕΝΟΜΕΝΕΣ ΑΠΑΙΤΗΣΕΙΣ ΠΟΙΟΤΗΤΑΣ ΥΠΗΡΕΣΙΑΣ (QoS) ΓΙΑ ΤΟ URLLC	45
ΠΙΝΑΚΑΣ 2 - ΑΠΑΙΤΗΣΕΙΣ ΚΙΝΗΤΙΚΟΤΗΤΑΣ ΓΙΑ ΤΟ URLLC	47
ΠΙΝΑΚΑΣ 3 - ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑΤΑ ΦΟΡΗΤΩΝ ΕΦΑΡΜΟΓΩΝ ΓΝΩΣΤΙΚΗΣ ΒΟΗΘΕΙΑΣ	65
ΠΙΝΑΚΑΣ 4 - ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΜΕΤΑΞΥ MEC ΚΑΙ MCC.....	88
ΠΙΝΑΚΑΣ 5 - ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΟΜΑ ΜΕ ΝΟΜΑ	101

Εισαγωγή

Παρά τις προόδους που σημειώθηκαν στο σχεδιασμό και την εξέλιξη των 4G δικτύων, οι απαιτήσεις από τα δίκτυα πέμπτης γενιάς (5G) είναι πολύ μεγαλύτερες καθώς προκύπτουν από νέους και όλο και πιο απαιτητικούς τρόπους για επικοινωνία. Νέες περιπτώσεις χρήσης, όπως high-resolution video streaming, απτό διαδίκτυο (tactile internet), οδική ασφάλεια, απομακρυσμένη παρακολούθηση και έλεγχος σε πραγματικό χρόνο, θέτουν νέες απαιτήσεις σχετικά με την απόδοση (throughput), την end-to-end καθυστέρηση (latency), την αξιοπιστία (reliability), και την ευρωστία (robustness) του δικτύου. Επιπλέον, οι υπηρεσίες θα σχεδιάζονται για να παρέχουν αδιάλειπτη υπερ-συνδεσιμότητα για machine-type επικοινωνίες (MTC), καλύπτοντας διάφορες υπηρεσίες όπως συνδεδεμένα αυτοκίνητα, συνδεδεμένα σπίτια, κινούμενα ρομπότ και αισθητήρες που πρέπει να υποστηρίζονται με αποτελεσματικό και επεκτάσιμο τρόπο. Επιπλέον, πολλές νέες/αναδυόμενες τάσεις, όπως wearable συσκευές, επαυξημένη πραγματικότητα (Augmented Reality) και 3D θα επηρεάζουν τη συμπεριφορά των τελικών χρηστών και συνεπώς θα επηρεάζουν άμεσα τις απαιτήσεις που θα τίθενται στο δίκτυο. Ταυτόχρονα, οι ultra-dense small cells υλοποιήσεις και οι νέες τεχνολογίες, όπως το massive MIMO (multi-input multi-output), τα δίκτυα οριζόμενα από το λογισμικό (SDN) και το Network Function Virtualization (NFV) συμβάλλουν ώστε να αναδιατυπωθούν ορισμένες από τις θεμελιώδεις αρχές σχεδιασμού των δικτύων, για να φτάσουμε σε αυτά της πέμπτης γενιάς.

Τωρινές τάσεις

Είναι πλέον γνωστό ότι η κατανάλωση δεδομένων κινητής τηλεφωνίας αυξάνεται ραγδαία, λόγω της όλο και μεγαλύτερης χρήσης έξυπνων συσκευών (smartphone και tablet), καλύτερου hardware (π.χ. καλύτερες οθόνες), καλύτερων διεπαφών (interface) με τον τελικό χρήστη, νέων απαιτητικών υπηρεσιών (π.χ. video streaming) καθώς επίσης επικρατεί και η επιθυμία για συνδεσιμότητα υψηλής ταχύτητας οπουδήποτε, οποτεδήποτε. Αυτό που ίσως δεν αναφέρεται ευρέως είναι ότι περισσότερο από το 70% αυτής της κατανάλωσης δεδομένων, πραγματοποιείται σε εσωτερικούς χώρους σε σπίτια, γραφεία, εμπορικά κέντρα, σιδηροδρομικούς σταθμούς και άλλους δημόσιους χώρους. Επιπλέον, παρόλο που η κίνηση δεδομένων κινητής τηλεφωνίας αυξάνεται με ταχύ ρυθμό, η κίνηση της σηματοδοσίας (signaling) αυξάνεται κατά 50% ταχύτερα από την κίνηση δεδομένων.

Περισσότεροι τελικοί χρήστες χρησιμοποιούν πολλαπλές συσκευές με διαφορετικές δυνατότητες για πρόσβαση σε ένα συνδυασμό best-effort υπηρεσιών (π.χ. άμεσων μηνυμάτων και email) και υπηρεσιών υψηλής σε Quality of Experience (QoE) (π.χ. voice and video streaming). Οι Over-the-top (OTT) players παρέχουν υπηρεσίες και εφαρμογές, μερικές από τις οποίες ανταγωνίζονται άμεσα με βασικές υπηρεσίες των Παρόχων (π.χ. voice, SMS και MMS). Η ποιότητα της συνδεσιμότητας αξιολογείται ολοένα και περισσότερο από τους τελικούς χρήστες, όσον αφορά το πόσο καλά λειτουργούν οι εφαρμογές τους - όπως αναμενόταν - ανεξάρτητα από το χρόνο ή την τοποθεσία και τείνουν να είναι αδιάφοροι προς τον Πάροχο κινητής τηλεφωνίας, όταν αυτές οι προσδοκίες δεν ικανοποιούνται. Επιπλέον, η διάρκεια ζωής της μπαταρίας των έξυπνων συσκευών και η απρόσκοπτη εμπειρία σε πολλές συσκευές (ή ένα οικοσύστημα συσκευών) έχουν γίνει επίσης σημαντικά ζητήματα για πολλούς τελικούς χρήστες.

Το Διαδίκτυο των Πραγμάτων (IoT), το οποίο προσθέτει το «οτιδήποτε» ως πρόσθετη διάσταση στη συνδεσιμότητα (σε συνδυασμό με το «οπουδήποτε» και το «οποτεδήποτε») γίνεται επίσης πραγματικότητα. Έξυπνες φορητές συσκευές (π.χ. βραχιόλια, ρολόγια, γυαλιά), έξυπνες οικιακές συσκευές (π.χ. τηλεοράσεις, ψυγεία, θερμοστάτες), αισθητήρες, αυτόνομα αυτοκίνητα και κινητά αντικείμενα όπως ρομπότ και drones υπόσχονται έναν υπερ-συνδεδεμένο έξυπνο κόσμο που θα μπορούσε να οδηγήσει σε πολλές ενδιαφέρουσες ευκαιρίες, σε πολλούς τομείς της ζωής όπως η υγειονομική περίθαλψη, η γεωργία, οι μεταφορές, η κατασκευή, η εφοδιαστική, η ασφάλεια, η εκπαίδευση και πολλά άλλα. Παρόλο που οι Πάροχοι επί του παρόντος βασίζονται στα υπάρχοντα δίκτυα (2G / 3G / 4G / fixed) για την υποστήριξη αναγκών του IoT, πολλές από τις νέες εφαρμογές που θα προκύψουν θα ενσωματώσουν και απαιτήσεις, όπως low latency και high reliability, με συνέπεια να μην υποστηρίζονται εύκολα από τα τρέχοντα δίκτυα.

Για να αντιμετωπίσουν αυτές τις εξελισσόμενες απαιτήσεις, οι Πάροχοι, επενδύουν συνεχώς για να βελτιώσουν τις δυνατότητες δικτύου και να βελτιστοποιήσουν τη χρήση του. Αναπτύσσουν περισσότερο localized χωρητικότητα, με τη μορφή των small cells (π.χ., pico και femto cell, RRUs - remote radio units, που συνδέονται με κεντρικές μονάδες βάσης BBUs με οπτικές ίνες) για τη βελτίωση της χωρητικότητας. Επιπλέον, το offload της κίνησης προς τα σταθερά δίκτυα μέσω τεχνολογιών, όπως το Wi-Fi σε μη αδειοδοτημένες ζώνες συχνοτήτων, είναι πλέον ευρέως διαδεδομένο. Για τη βελτιστοποίηση της χρήσης του δικτύου και για μεγαλύτερο QoE, τα δίκτυα κινητής τηλεφωνίας ενσωματώνουν επίσης περισσότερες λειτουργίες, όπως το Deep Packet Inspection (DPI), caching και transcoding. Ωστόσο, όλες αυτές οι βελτιώσεις έχουν σημαντικό κεφάλαιο και λειτουργικό κόστος.

Ενότητα 1 – Αρχιτεκτονική 5G

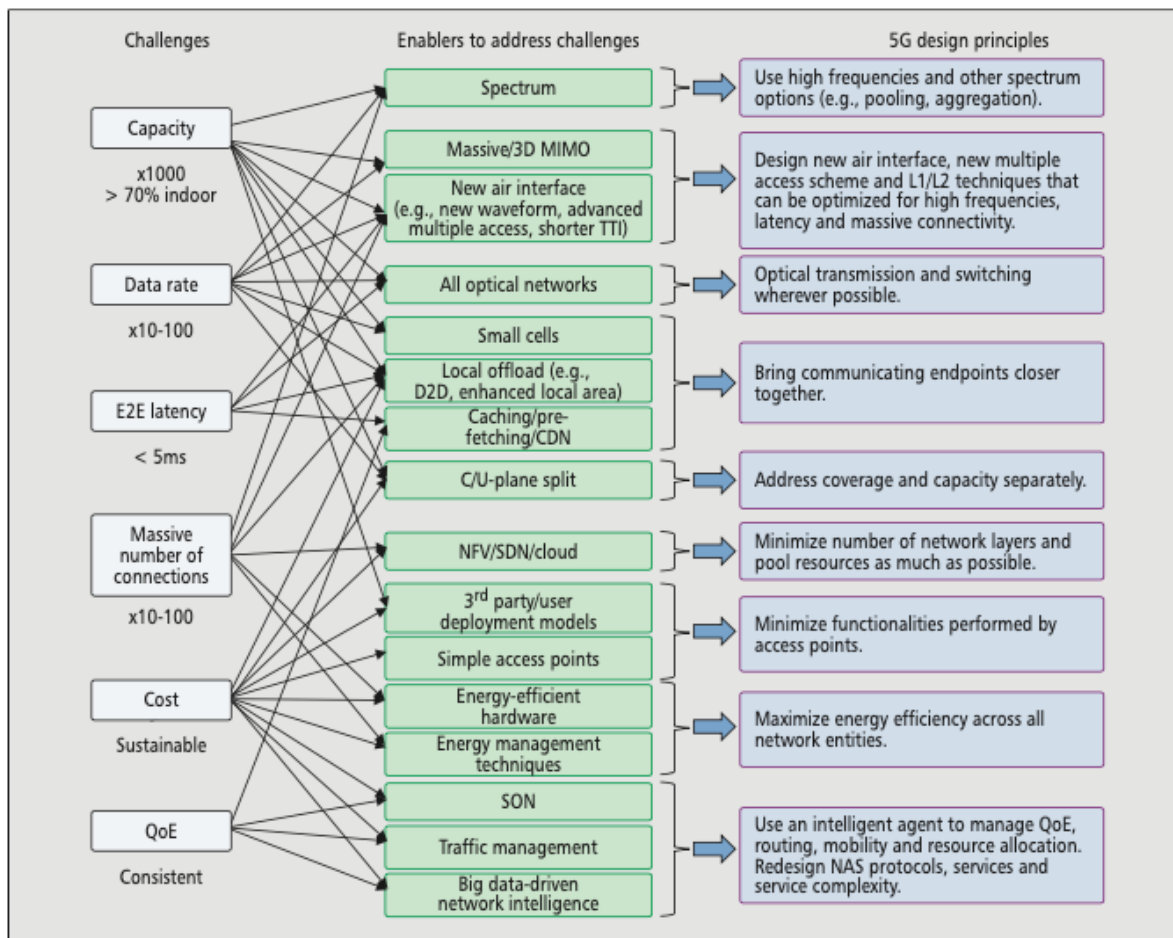
Σε αυτή την ενότητα παρουσιάζεται ένα μοντέλο αρχιτεκτονικής, για την αντιμετώπιση των προκλήσεων που τίθενται σε δίκτυα κινητής τηλεφωνίας πέμπτης γενιάς. Προτείνεται μια αρχιτεκτονική δύο επιπέδων, που αποτελείται από ένα radio δίκτυο και ένα cloud δικτύου, που ενσωματώνει διάφορους ενεργοποιητές (enablers), όπως τα small cells, massive MIMO, τον διαχωρισμό control & user plane, NFV και SDN. Τρεις βασικές έννοιες είναι ενσωματωμένες: α) ultra-dense small cell υλοποιήσεις σε αδειοδοτημένο και μη αδειοδοτημένο φάσμα, κάτω από διαχωρισμένη αρχιτεκτονική control / user plane, για την αντιμετώπιση προκλήσεων χωρητικότητας (capacity) και ρυθμού δεδομένων (data rate), β) NFV και SDN για την ευέλικτη ανάπτυξη και λειτουργία των δικτύων και γ) έξυπνη χρήση των παρεχόμενων δεδομένων του δικτύου για την βέλτιστη χρήση των πόρων του δικτύου, για τον σχεδιασμό και τον προγραμματισμό του κατάλληλου QoE (Quality of Experience). Τέλος, παρουσιάζονται ορισμένα ζητήματα που πρέπει να αντιμετωπιστούν για να υλοποιηθεί ένα πλήρες σχήμα αρχιτεκτονικής, ενός 5G δικτύου.

1.1 Προκλήσεις, Ενεργοποιητές και Αρχές Σχεδιασμού στα 5G Δίκτυα

Με βάση τις τρέχουσες τάσεις, είναι γενικά κατανοητό ότι τα δίκτυα κινητής τηλεφωνίας 5G πρέπει να αντιμετωπίσουν έξι προκλήσεις που δεν αντιμετωπίζονται επαρκώς από υπερσύγχρονα αναπτυγμένα δίκτυα (Long Term Evolution-Advanced, LTE-A): 1) υψηλότερη χωρητικότητα, 2) υψηλότερος ρυθμός δεδομένων (data rate), 3) μικρότερη E2E καθυστέρηση (latency), 4) τεράστιος αριθμός συνδεδεμένων συσκευών, 5) μειωμένο κόστος κεφαλαίου και λειτουργιών (CAPEX & OPEX) και 6) συνεπής παροχή QoE. Αυτές οι προκλήσεις συζητούνται συνοπτικά παρακάτω μαζί με μερικούς πιθανούς παράγοντες που μπορούν να τις αντιμετωπίσουν. Στο Σχήμα 1 παρουσιάζεται μια επισκόπηση των προκλήσεων, των ενεργοποιητών (enablers), και των αντίστοιχων αρχών σχεδιασμού για το 5G. Πρέπει να σημειωθεί ότι οι ενεργοποιητές που επισημαίνονται στο Σχήμα 1 εισάγουν επίσης το δικό τους σύνολο προκλήσεων και τους αντίστοιχους βασικούς δείκτες απόδοσης (KPI).

Χωρητικότητα Συστήματος και Ρυθμός Μετάδοσης

Σε συνέχεια του 2020, τα δίκτυα κινητής τηλεφωνίας πρέπει να υποστηρίξουν 1000 φορές αύξηση της κίνησης (traffic) σε σχέση με τα επίπεδα του 2010, και 10 έως 100 φορές αύξηση στους ρυθμούς δεδομένων (data rate) ακόμη και σε πολυσύχναστες περιοχές υψηλής κινητικότητας, εάν συνεχιστούν οι τρέχουσες τάσεις. Αυτό απαιτεί όχι μόνο περισσότερη χωρητικότητα στο δίκτυο ραδιοπρόσβασης (RAN – Radio Access Network), αλλά εξίσου σημαντικό, επίσης στο Backbone, στο Backhaul και στο Fronthaul δίκτυο. Τα μοντέλα τιμολόγησης μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τη διαχείριση και ενδεχομένως τη μείωση της αύξησης της κατανάλωσης δεδομένων (data consumption), όπως ήδη επιδεικνύεται από τους Παρόχους στην αγορά. Ωστόσο, καθώς οι πελάτες είναι πρόθυμοι να πληρώσουν για την παρεχόμενη υπηρεσία αντί για τον όγκο δεδομένων, τα μοντέλα τιμολόγησης ενδέχεται να μην είναι αποτελεσματικά για την μείωση της κίνησης στο μέλλον.



Σχήμα 1 - Οι προκλήσεις στο 5G, ενεργοποιητές, αρχές σχεδιασμού

Η, έως τώρα, επικρατούσα άποψη είναι ότι ένας συνδυασμός της χρήσης περισσότερων και υψηλότερης απόδοσης φασμάτων, με την αποφόρτιση (offload) και πύκνωση του δικτύου, είναι απαραίτητα για την αντιμετώπιση αυτών των προκλήσεων στο δίκτυο ραδιοπρόσβασης (RAN) [2]. Στις λύσεις για περισσότερα φάσματα συμπεριλαμβάνονται οι υψηλότερες μάντες συχνοτήτων (π.χ. millimeter wave, mmW), τα μη αδειοδοτημένα φάσματα και η συνάθροιση των πόρων κατακερματισμένου φάσματος (fragmented spectrum) χρησιμοποιώντας τεχνικές συνάθροισης του φορέα (carrier aggregation). Η δυνατότητα διπλής συνδεσιμότητας των τερματικών συσκευών σε πολλαπλούς σταθμούς βάσης, μπορεί να εκμεταλλευτεί τη συνολική χρήση του φάσματος που αναπτύσσεται σε διαφορετικούς σταθμούς βάσης. Εκτός από το διαθέσιμο εύρος ζώνης, οι ζώνες υψηλής συχνότητας (high frequency bands) επιτρέπουν στο mMIMO (massive MIMO) να χρησιμοποιεί συστοιχίες κεραιών - μικρού συντελεστή διαμόρφωσης - οι οποίες μπορούν να προσφέρουν 10 φορές αύξηση της χωρητικότητας, σε σύγκριση με τα συμβατικά συστήματα μονής κεραιάς. Ωστόσο, οι ζώνες υψηλής συχνότητας, έχουν ως μειονέκτημα την υψηλή εξασθένιση και περιορίζονται από το Line of Site (LOS). Το Massive MIMO μπορεί να αξιοποιηθεί για να επεκτείνει την κάλυψη των ζωνών υψηλότερης συχνότητας, στηριζόμενο στα πλεονεκτήματα του Beamforming.

Προηγμένες τεχνικές στο physical layer, όπως διαμόρφωση υψηλότερης τάξης (high-order modulation) και σχήματα κωδικοποίησης (MCS), όπως τα 256 QAM, αυξάνουν τη φασματική απόδοση και μπορούν να συνδυαστούν με mMIMO για αύξηση της χωρητικότητας του συστήματος. Προσθέτοντας κάποια νοημοσύνη στον πομπό και το δέκτη, οι πιθανές παρεμβολές μπορούν να συντονιστούν και να ακυρωθούν στον δέκτη, ώστε να αυξηθεί η απόδοση του συστήματος. Με τέτοιες τεχνικές, νέα σχήματα όπως τα Non-Orthogonal Multiple Access (NOMA), το φίλτρο πολλαπλών φορέων (Filter Bank Multicarrier - FBMC) και η αραιή κωδικοποίηση πολλαπλής πρόσβασης (Sparse Coded Multiple Access - SCMA) μπορούν να χρησιμοποιηθούν περαιτέρω για τη βελτίωση της φασματικής απόδοσης. Για παράδειγμα, το NOMA με τη χρήση του SIC (Successive Interference Cancelling) έχει αποδειχθεί ότι βελτιώνει τη συνολική απόδοση στα macrocells σε σύγκριση με τα orthogonal multiple access σχήματα, έως και 30 τοις εκατό ακόμη και για τερματικά υψηλών ταχυτήτων, με αναμενόμενα επιπλέον κέρδη με προηγμένο έλεγχο ισχύος.

Η πυκνωση του δικτύου (densification) αναφέρεται στην πυκνή ανάπτυξη πολλών small cells. Οι υψηλές συχνότητες φορέα είναι κατάλληλες για τα small cells. Η υψηλή εξασθένιση που παρουσιάζεται σε αυτές τις συχνότητες, δεν θεωρείται πλέον ως μειονέκτημα, αλλά μάλλον ως ένας ενεργοποιητής (enabler) ο οποίος παρέχει αποτελεσματικό διαχωρισμό και να μετριάσει τις παρεμβολές μεταξύ των πυκνών αναπτυχθέντων small cells. Για να επιτραπεί η αποτελεσματική βελτίωση της χωρητικότητας σε κρίσιμες τοποθεσίες, είναι επιθυμητό η κάλυψη και η χωρητικότητα να αντιμετωπίζονται ανεξάρτητα. Αυτό μπορεί να πραγματοποιηθεί μέσω μιας αρχιτεκτονικής όπου το Control Plane (C) και το User Data Plane (U) χωρίζονται μεταξύ διαφορετικών cells. Το πλεονέκτημα αυτής της προσέγγισης είναι ότι οι πόροι του U-plane μπορούν να διαβαθμιστούν ανεξάρτητα από τους πόρους του C-plane. Αυτό επιτρέπει να παρέχεται περισσότερο capacity στο U-plane, σε κρίσιμες περιοχές όπου είναι απαραίτητο, χωρίς να χρειάζεται να παρέχονται συνδυασμένες λειτουργίες του C-plane. Έτσι, μπορούν να αναπτυχθούν πιο ευέλικτες εφαρμογές, με χαμηλότερο κόστος. Σε μια τέτοια αρχιτεκτονική διαχωρισμού επιπέδου C / U, τα macrocells μπορούν να παρέχουν κάλυψη (C + U) και τα small cells μπορούν να παρέχουν τοπική χωρητικότητα (U).

Τεχνικές όπως το mMIMO (Massive MIMO) και MCS υψηλότερης τάξης μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε small cells για την μεγιστοποίηση του throughput. Το Massive MIMO παρουσιάζει αυξημένο ρίσκο για αδυναμία σύνδεσης (link failure) λόγω του στενού beamforming, αλλά αυτό θα μπορούσε να μετριαστεί χρησιμοποιώντας ισχυρές τεχνικές όπως διπλή συνδεσιμότητα (dual connectivity), η οποία παρέχει πάντα εναλλακτική λύση σε επίπεδο κάλυψης. Επιπρόσθετα, η τοπική αποφόρτιση του δικτύου (traffic offload), μέσω τεχνικών όπως η δικτυακή επικοινωνία συσκευής-με-συσκευή (Device-to-Device – D2D), μπορεί να αυξήσει περαιτέρω την απόδοση (throughput) του συστήματος.

Η πρόοδος των οπτικών δικτύων, συμπεριλαμβανομένης της οπτικής μεταγωγής (optical switching), ενδέχεται να είναι σε θέση να καλύψει τις απαιτήσεις χωρητικότητας (capacity) στο Backbone, στο Backhaul και στο Fronthaul δίκτυο. Επιπλέον, το mMIMO μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την παροχή ασύρματων συνδέσεων - υψηλής χωρητικότητας - του backhaul και του fronthaul δικτύου, σε συνθήκες LOS (Line of Site).

Καθυστέρηση από Άκρο σε Άκρο (End-to-End Latency)

Το end-to-end latency (καθυστέρηση) είναι κρίσιμο για την ενεργοποίηση νέων εφαρμογών σε πραγματικό χρόνο. Παράδειγμα αποτελούν τα απομακρυσμένα ελεγχόμενα ρομπότ που χρησιμοποιούνται στις ιατρικές εφαρμογές και ορισμένες βιομηχανικές εφαρμογές που απαιτούν άμεση ανάδραση (feedback) για την ορθή τους λειτουργία. Οι κρίσιμες για αυτοκίνητα και ανθρώπους, ενσωματωμένες στην επικοινωνία οχήματος-προς-όχημα (V2V – Vehicle-to-Vehicle) και οχήματος-προς-υποδομή (V2I – Vehicle-to-Infrastructure), απαιτούν επίσης πολύ γρήγορους κύκλους ελέγχου αιτήματος-απόκρισης (request-response) με υψηλή διαθεσιμότητα και αξιοπιστία (availability & reliability). Προκειμένου να υλοποιηθούν αυτές οι εφαρμογές, τα δίκτυα πρέπει να είναι σε θέση να υποστηρίξουν end-to-end latency της τάξης του 1 ms, με υψηλή αξιοπιστία.

Επιπλέον, το end-to-end latency, μπορεί να μειωθεί με βελτιώσεις σε πρωτόκολλα υψηλότερου επιπέδου (π.χ. χρήση αλγορίθμων εισόδου / συμφόρησης (admission / congestion), με γνώμονα το δίκτυο, για αντικατάσταση της αργής εκκίνησης του TCP), φέρνοντας πιο κοντά τα τελικά σημεία επικοινωνίας, καθώς επίσης και με την προσθήκη περισσότερης νοημοσύνης στην άκρη του δικτύου (edge). Το τελευταίο μπορεί να πραγματοποιηθεί, π.χ., μέσω τεχνικών προσωρινής αποθήκευσης (caching) και προ-ανάκτησης (pre-fetching), ή την κατάλληλη τοποθέτηση και ενορχήστρωση του Control Plane (εξαρτώμενο από την υπηρεσία). Για παράδειγμα, τα Control Plane πρωτόκολλα που είναι απαραίτητα για τις κρίσιμες υπηρεσίες (latency-critical MTC services) μπορούν να διανέμονται στην άκρη του δικτύου, ενώ τα Control Plane πρωτόκολλα που απαιτούνται για υπηρεσίες, με μικρότερες απαιτήσεις σε latency, να βρίσκονται σε μια κεντρικοποιημένη οντότητα. Ο αποτελεσματικός σχεδιασμός των Non-Access Stratum (NAS) πρωτοκόλλων θα μπορούσε, επίσης, να βοηθήσει στη μείωση του E2E latency.

Μεγάλος Αριθμός Συνδεδεμένων Συσκευών

Ο αριθμός των συνδεδεμένων συσκευών αναμένεται να αυξηθεί από 10 έως και 100 φορές μετά το 2020. Ο τύπος των συσκευών αυτών θα ποικίλει: από συσκευές με περιορισμένους πόρους που απαιτούν μόνο διαλείπουσα συνδεσιμότητα για αναφορά (π.χ. αισθητήρες) έως συσκευές που απαιτούν συνεχή σύνδεση για παρακολούθηση (π.χ. κάμερες ασφαλείας, στόλος μεταφορών). Εκτός λοιπόν από τον τεράστιο αριθμό συνδεδεμένων συσκευών, μια πρόκληση είναι και η υποστήριξη αυτής της ποικιλίας των συσκευών, και των απαιτήσεων της εκάστοτε υπηρεσίας, με δυνατότητα αποτελεσματικής επέκτασης.

Η εξέλιξη στο σχεδιασμό των air interfaces, η βελτιστοποίηση της σηματοδοσίας και οι έξυπνες τεχνικές ομαδοποίησης και αναμετάδοσης, μπορούν να συμβάλουν στην υποστήριξη της υπερσύνδεσης (hyper-connectivity). Για παράδειγμα, η χρήση μιας συσκευής ως gateway για τη συγκέντρωση της κίνησης από πολλές συσκευές, μπορεί να μειώσει το φορτίο της σηματοδοσίας στο δίκτυο. Τα αποδοτικότερα πρωτόκολλα που συνδυάζουν AS (Access Stratum) και NAS (Non-Access Stratum) μειώνουν επίσης το φορτίο σηματοδοσίας. Επιπλέον, οι connection-based και οι connectionless διαδικασίες πρόσβασης μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την αποτελεσματική υποστήριξη MTC εφαρμογών που απαιτούν μόνο διαλείπουσα (intermittent) συνδεσιμότητα για τη μετάδοση μικρών πακέτων.

Επίσης, δεν είναι εφικτό όλα τα τερματικά να είναι εξοπλισμένα με συσκευές υψηλής ακρίβειας, όπως για παράδειγμα, με αυστηρό συγχρονισμό για τη διατήρηση της ορθογωνικότητας των σημάτων σε περιβάλλον πολλαπλής πρόσβασης (multiple access) όταν εισάγεται νέα αριθμολογία για τη μείωση του latency. Για να μετριαστεί αυτό, μπορούν να διερευνηθούν νέες κυματομορφές όπως το FBMC (Filter Bank Multi Carrier), οι οποίες μπορούν να καταστέλλουν τις εκπομπές εκτός ζώνης, ώστε να μειώσουν τις παρεμβολές σε ένα ασύγχρονο περιβάλλον. Το FBMC έχει επίσης τη δυνατότητα να αντιμετωπίσει καλύτερα από το OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing) με την χρήση διπλών διασκορπιστικών καναλιών (doubly dispersive channels), όταν κινούνται τόσο τα τελικά σημεία μετάδοσης όσο και λήψης (π.χ. εφαρμογές V2V).

Επιπλέον, η υποστήριξη συσκευών με περιορισμένους πόρους (π.χ. περιορισμός σε αισθητήρες), θα απαιτήσει πρόοδο στις τεχνολογίες συλλογής ενέργειας από τη μία πλευρά και στα αποδοτικά πρωτόκολλα σηματοδότησης και μετάδοσης δεδομένων από την άλλη. Για παράδειγμα, θα μπορούσαν να διερευνηθούν robust τεχνικές πρόσβασης μέσου που συνδυάζουν την μετάδοση δεδομένων (data) και ελέγχου (control).

Κόστος

Η συνδεσιμότητα (connectivity) θεωρείται ως ένας σημαντικός παράγοντας για την κοινωνικο-οικονομική ανάπτυξη. Ως εκ τούτου, είναι σημαντικό να μειωθεί το κόστος των υποδομών καθώς και το αντίστοιχο κόστος που σχετίζεται με την ανάπτυξη, τη συντήρηση, τη διαχείριση και τη λειτουργία τους, ώστε η συνδεσιμότητα να είναι καθολικά διαθέσιμη, προσιτή και βιώσιμη. Η πρόκληση για το σχεδιασμό του 5G είναι ότι απαιτούνται τεράστιες βελτιώσεις για την αντιμετώπιση των νέων απαιτήσεων, αλλά οι πελάτες δεν είναι πρόθυμοι να πληρώσουν αναλογικά. Στην πραγματικότητα, το 5G θα πρέπει να είναι ένα δίκτυο (RAN, core, backbone routers και backhaul) που καλύπτει όλες τις νέες απαιτήσεις με κόστος που θα κάνει την παροχή υπηρεσιών βιώσιμη.

Επίσης, πολύ δαπανηρή όσον αφορά τον εξοπλισμό, τη συντήρηση και τη λειτουργία, μπορεί να είναι η επίλυση των προκλήσεων χωρητικότητας (capacity) και ρυθμού δεδομένων (data rate), με βάση την πυκνότητα του δικτύου. Ένας τρόπος για να μειωθεί το κόστος του εξοπλισμού, είναι να ελαχιστοποιηθεί ο αριθμός των λειτουργιών στο σταθμό βάσης (BTS). Αυτό θα μπορεί να επιτευχθεί εφαρμόζοντας μόνο λειτουργίες επιπέδου 1/2 (L1 / L2) στο σταθμό βάσης, μετακινώντας λειτουργίες υψηλότερου επιπέδου σε ένα cloud-based δίκτυο, το οποίο θα εξυπηρετεί πολλούς σταθμούς βάσης. Η μείωση του αριθμού των λειτουργιών, οδηγεί σε απλούστερους σταθμούς βάσης, οι οποίοι θα μπορούν να αναπτυχθούν από τους χρήστες και να διαχειριστούν από απόσταση, ώστε να μειωθεί το κόστος ανάπτυξης και λειτουργίας.

Η κατανάλωση ενέργειας είναι ένας σημαντικός παράγοντας του κόστους λειτουργίας, με το RAN (Radio Access Network) να εκτιμάται ότι καταναλώνει το 70-80% των ενεργειακών απαιτήσεων. Επομένως, οι έξυπνες τεχνικές διαχείρισης ενέργειας, ειδικά στο RAN, θα μπορούσαν να παρέχουν ένα βιώσιμο μέσο για τη μείωση του συνολικού κόστους λειτουργίας του δικτύου. Η σχεδίαση ενεργειακά αποδοτικού hardware και χαμηλής κατανάλωσης Backhaul δικτύου, σε συνδυασμό με τις έξυπνες τεχνικές διαχείρισης

ενέργειας, ειδικά σε εξαιρετικά πυκνά δίκτυα, ώστε να σταματήσει ο σταθμός βάσης όταν δεν χρησιμοποιείται, μπορεί να συμβάλει στη μείωση του κόστους λειτουργίας ενός δικτύου 5G.

Τα NFV και SDN αποτελούν, επίσης, βιώσιμα μέσα για τη μείωση του κόστους. Το NFV διαχωρίζει τη λειτουργικότητα του δικτύου από το dedicated hardware και προωθεί την λειτουργικότητας αυτή σε software – γενικού σκοπού - που λειτουργούν σύμφωνα με το cloud μοντέλο. Το SDN διαχωρίζει τα C- και U- planes από τις συσκευές του δικτύου, και παρέχει κεντροποιημένα την προβολή και τον έλεγχο του δικτύου. Οι τεχνολογίες αυτές, κάνουν το δίκτυο πιο ευέλικτο, καθώς μπορούν να εισαχθούν νέες λειτουργίες με απλές αναβαθμίσεις λογισμικού. Επίσης, μπορούν να χρησιμοποιηθούν πιο εξελιγμένοι αλγόριθμοι για τη διαχείριση του δικτύου. Επιπλέον, οι ομαδοποιημένοι πόροι υλικού μπορούν να μοιραστούν μεταξύ πολλαπλών λειτουργιών, δημιουργώντας έτσι πολλαπλά κέρδη και μειώνοντας την ποσότητα του απαραίτητου υλικού. Οι νέες δυνατότητες που εισάγει το NFV και τα SDN μπορούν να καταστήσουν τα δίκτυα ταχύτερα αναπτυσσόμενα και προσαρμόσιμα στις νέες ανάγκες.

Ποιότητα Εμπειρίας Χρήσης (Quality of Experience)

Το QoE (Quality of experience) περιγράφει την υποκειμενική αντίληψη του χρήστη ως προς το πόσο καλά λειτουργεί μια εφαρμογή ή μια υπηρεσία. Το QoE είναι ειδικά εφαρμοσμένο για το χρήστη και δεν μπορεί να γενικευτεί. Η παράδοση μιας εφαρμογής με πολύ χαμηλό QoE οδηγεί σε δυσαρέσκεια του χρήστη, ενώ το πολύ υψηλό QoE αδειάζει άσκοπα πόρους τόσο στην πλευρά του χρήστη (π.χ. μπαταρία συσκευής) όσο και του Παρόχου (π.χ. πόροι στο radio και transport δίκτυο, ισχύς σταθμού βάσης). Ως εκ τούτου, μια πρόκληση για το 5G είναι η υποστήριξη εφαρμογών και υπηρεσιών με βέλτιστο και συνεπές επίπεδο QoE, οπουδήποτε και οποτεδήποτε.

Παρά την ποικιλομορφία των απαιτήσεων του QoE, η παροχή χαμηλού latency και υψηλού bandwidth βελτιώνει γενικά το QoE. Ως εκ τούτου, οι περισσότεροι ενεργοποιητές (enablers) που αναφέρθηκαν προηγουμένως μπορούν να βελτιώσουν το QoE. Επί πρόσθετα, μπορούν να χρησιμοποιηθούν τεχνικές βελτιστοποίησης στο ρυθμό της κίνησης για την κάλυψη των αυξανόμενων προσδοκιών του QoE. Επιπλέον, η εγκατάσταση κρυφής μνήμης και υπολογιστικών πόρων στην άκρη του δικτύου (edge) επιτρέπει σε έναν Πάροχο να τοποθετήσει περιεχόμενο και υπηρεσίες κοντά στον τελικό χρήστη. Αυτό μπορεί να επιτρέψει πολύ χαμηλό latency και υψηλό QoE, ειδικά για delay-critical υπηρεσίες, όπως επεξεργασία βίντεο και επαυξημένη πραγματικότητα (AR).

Εμφανίζονται επίσης, καλύτερα μοντέλα που περιγράφουν τη σχέση του QoE με τις μετρήσιμες παραμέτρους των υπηρεσιών στο δίκτυο (π.χ. bandwidth, delay) και τις παραμέτρους του περιβάλλοντος (π.χ. συσκευή, χρήστης και περιβάλλον). Η αξιοποίηση των Big Data, συμπεριλαμβανομένων των πληροφοριών που συλλέγονται από αισθητήρες (π.χ. στη συσκευή) και των στατιστικών δεδομένων του χρήστη, μπορεί να χρησιμοποιηθεί έξυπνα με τέτοια μοντέλα για την ακριβέστερη αξιολόγηση του QoE που αναμένεται από τον χρήστη. Τα Big Data μπορούν επίσης να αξιοποιηθούν για τον προσδιορισμό των βέλτιστων πόρων

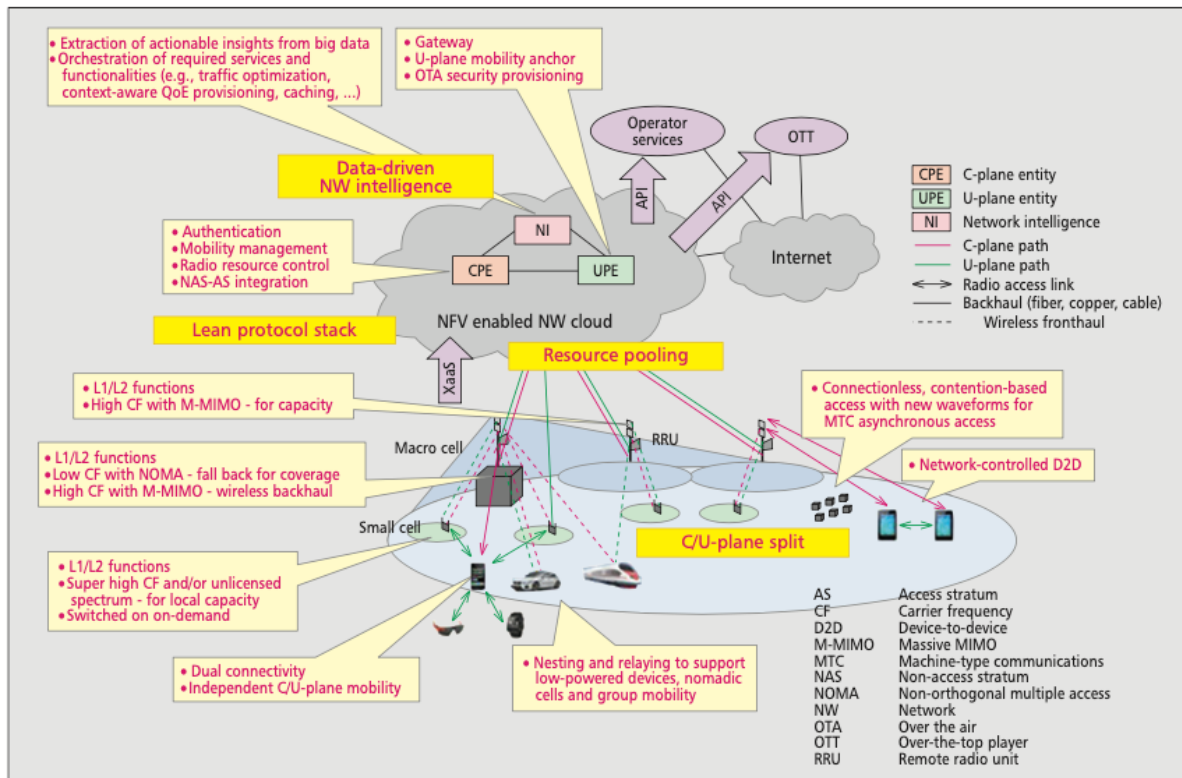
του δικτύου, για την κάλυψη του αναμενόμενου QoE. Το SDN μπορεί, στη συνέχεια, να χρησιμοποιηθεί για την ευέλικτη παροχή των απαραίτητων πόρων.

Εκτός από το δίκτυο κινητής τηλεφωνίας (mobile), αντίστοιχη πρόοδος απαιτείται και στο σταθερό δίκτυο (fixed) και πιθανή σύγκλιση των δικτύων αυτών, για την αντιμετώπιση των προκλήσεων που επισημαίνονται.

1.2 Όραμα Αρχιτεκτονικής Δικτύων Πέμπτης Γενιάς

Το Σχήμα 2 απεικονίζει την αρχιτεκτονική ενός δικτύου κινητής τηλεφωνίας 5G, που χρησιμοποιεί τους ενεργοποιητές που συζητήθηκαν προηγουμένως. Τα βασικά στοιχεία της αρχιτεκτονικής συνοψίζονται παρακάτω:

- Δύο λογικά επίπεδα δικτύου, ένα ραδιο-δίκτυο (RN) που παρέχει μόνο το ελάχιστο σύνολο λειτουργιών L1 / L2 και ένα cloud δίκτυο που παρέχει όλες τις λειτουργίες υψηλότερου επιπέδου.
- Δυναμική ανάπτυξη και κλιμάκωση των λειτουργιών στο cloud δίκτυο μέσω SDN και NFV.
- Ένα protocol stack που επιτυγχάνεται μέσω της εξάλειψης των περιττών λειτουργιών και της ενσωμάτωσης των AS και NAS.
- Ξεχωριστή παροχή κάλυψης και χωρητικότητας στο ραδιο-δίκτυο με χρήση split αρχιτεκτονικής στα C / U-plane και χρήση διαφορετικών ζωνών συχνοτήτων για κάλυψη και χωρητικότητα.
- Αναμετάδοση και Ένθεση (Relaying / Nesting) (σύνδεση συσκευών με περιορισμένους πόρους στο δίκτυο, μέσω μίας ή περισσότερων συσκευών που διαθέτουν περισσότερους πόρους) για την υποστήριξη πολλαπλών συσκευών, ομαδικής κινητικότητας, σε πολλαπλά σημεία πρόσβασης.
- Connectionless και Connection-based πρόσβαση με νέες κυματομορφές, για ασύγχρονη πρόσβαση τεράστιου αριθμού MTC συσκευών.
- Ευφυΐα δικτύου - καθοδηγούμενη από τα δεδομένα - για βελτιστοποίηση της χρήσης και του σχεδιασμού των πόρων του.

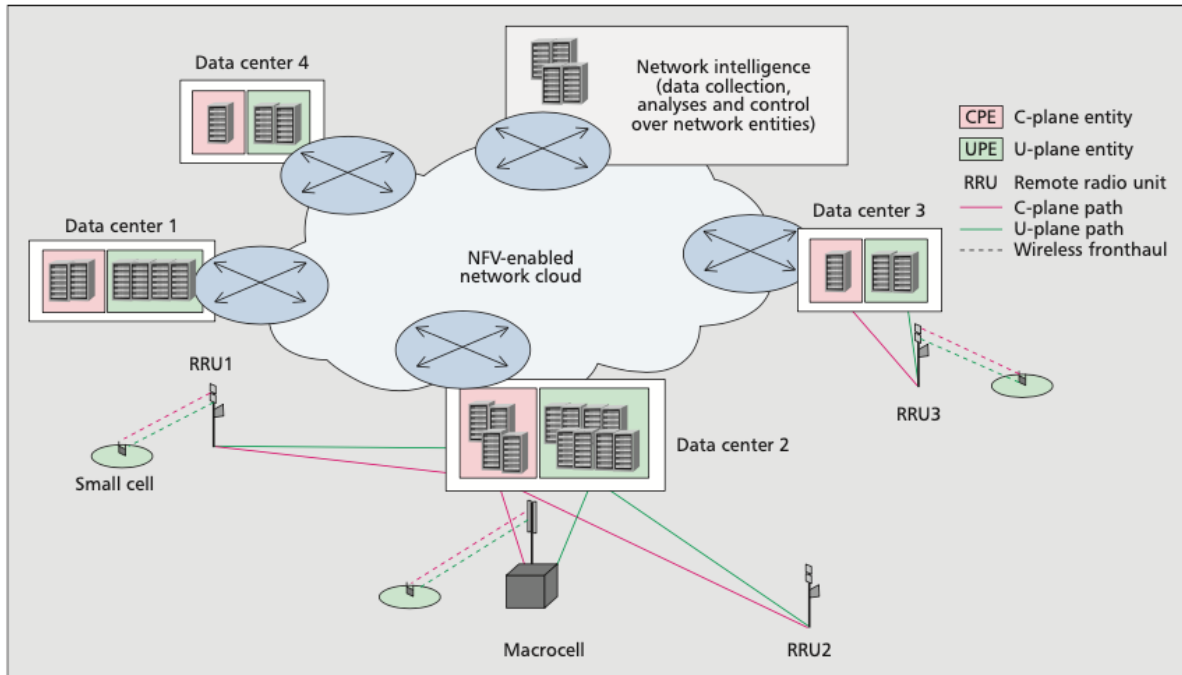


Σχήμα 2 - Η προοπτική του 5G και πιθανοί ενεργοποιητές.

Λογικά Επίπεδα (Logical Layers) στα 5G Δίκτυα: Ράδιο – Δίκτυο και Δίκτυο Νέφους

Η αρχιτεκτονική του δικτύου αποτελείται από δύο μόνο λογικά επίπεδα: ένα ραδιο-δίκτυο και ένα cloud δίκτυο. Διαφορετικοί τύποι σταθμών βάσης (BTS) και RRU (Remote Radio Unit) που εκτελούν ένα ελάχιστο σύνολο λειτουργιών L1 / L2 αποτελούν το ραδιο-δίκτυο. Το cloud δίκτυο αποτελείται από τις οντότητες U-plane (UPE) και C-plane (CPE) όπου εκτελούνται λειτουργίες υψηλότερου επιπέδου, και που σχετίζονται με το κάθε επίπεδο, αντίστοιχα (Σχήμα 2).

Όπως φαίνεται στο Σχήμα 3, η φυσική υλοποίηση του cloud δικτύου θα μπορούσε να προσαρμοστεί για να επιτύχει διάφορους στόχους απόδοσης. Για παράδειγμα, τα UPEs και CPEs θα μπορούσαν να υλοποιηθούν κοντά στους σταθμούς βάσης και στα RRU, με σκοπό να καλύψουν τις ανάγκες των latency-critical υπηρεσιών. Για την υποστήριξη των υπηρεσιών αυτών, για παράδειγμα, το RRU3 θα μπορούσε να συνδεθεί κοντά σε ένα μικρό Data Center (Data Center 3) παρά σε ένα μεγάλο κέντρο δεδομένων πιο μακριά (Data Center 2). Από την άλλη πλευρά, το RRU1 μπορεί να είναι συνδεδεμένο σε ένα μεγάλο Data Center που βρίσκεται πιο μακριά (Data Center 2) και όχι σε ένα κοντινό μικρό Data Center (Data Center 1) εάν και εφόσον δεν απαιτείται υποστήριξη latency-critical υπηρεσιών. Αυτή η ευελιξία επιτρέπει στον Πάροχο να αναπτύξει τόσο μεγάλα όσο και μικρά Data Centers για να υποστηρίξει συγκεκριμένες υπηρεσίες.



Σχήμα 3 - Δίκτυο Νέφους 5G

Η αρχιτεκτονική αυτή, απλοποιεί το δίκτυο, καθώς διευκολύνει τη γρήγορη και ευέλικτη ανάπτυξη και διαχείρισή του. Οι σταθμοί βάσης θα γίνουν απλούστεροι και θα καταναλώνουν λιγότερη ενέργεια, λόγω των μειωμένων λειτουργιών, καθιστώντας έτσι τις πυκνές εφαρμογές προσιτές στην ανάπτυξη και την λειτουργία τους [3]. Επιπλέον, το cloud δίκτυο επιτρέπει τη συγκέντρωση πόρων, μειώνοντας την υπερ-παροχή και την υπο-χρησιμοποίηση των πόρων του δικτύου.

Δυναμική Ανάπτυξη και Κλιμάκωση των Λειτουργιών του Δικτύου μέσω SDN και NFV

Με τη χρήση SDN και NFV, οι λειτουργίες CPE και UPE στο cloud δίκτυο, μπορούν να αναπτύσσονται γρήγορα, και να διαχειρίζονται, ανάλογα με την απαίτηση των τελικών χρηστών. Για παράδειγμα, όταν ένα τοπικό Data Center δεν είναι σε θέση να αντιμετωπίσει ένα στιγμιαίο τεράστιο όγκο αιτημάτων (π.χ. λόγω μιας τοπικής καταστροφής - σεισμός), η πρόσθετη χωρητικότητα μπορεί να δανειστεί γρήγορα από τα υπόλοιπα Data Centers. Επιπλέον, οι πόροι εντός του Data Center, μπορούν να μετατοπιστούν γρήγορα, για να υποστηρίξουν δημοφιλείς εφαρμογές, με την προσθήκη επιπλέον instances του απαιτούμενου λογισμικού.

Εκτός από την ευελιξία σε επίπεδο εφαρμογής, η χρήση μιας υποδομής cloud παρέχει επίσης ευελιξία σε σχέση με τη διαθέσιμη χωρητικότητα επεξεργασίας (processing capacity). Οι εφεδρικοί πόροι του cloud, μπορούν να εκμισθωθούν όταν η ζήτηση είναι χαμηλή, ενώ επιπλέον πόροι μπορούν να ενοικιαστούν μέσω της υποδομής, ως ένα επιχειρηματικό μοντέλο Infrastructure as a Service (IaaS), κατά τις ώρες αιχμής. Επιπλέον, μπορεί να προβλεφθεί ένα ευρύ φάσμα επιχειρηματικών μοντέλων “as a Service”, βασιζόμενο στην παροχή συγκεκριμένων λειτουργιών δικτύου “ως Υπηρεσία” (π.χ. XaaS). Ολόκληρα ή συγκεκριμένα τμήματα του δικτύου, θα μπορούσαν να παρασχεθούν σε πελάτες (π.χ. παρόχους δικτύου, Over-The-Top players, επιχειρήσεις) που έχουν συγκεκριμένες

απαιτήσεις, για παράδειγμα σε μοντέλα "Mobile Network as a Service" ή "Radio Network as a Service". Μπορούν, επίσης, να εξεταστούν μοντέλα «UPE / CPE / NI as a Service», όπου ειδικές λειτουργίες του Core δικτύου (Σχήμα 2) του να παρέχονται ως «a la carte» υπηρεσία. Τέλος, ορισμένα τμήματα της πλατφόρμας, θα μπορούσαν να ενοικιαστούν σε τρίτους, Over-The-Top players, για να επιτρέψουν με την σειρά τους, την παροχή υπηρεσιών και εφαρμογών που απαιτούν εξαιρετικά χαμηλό latency στους τελικούς χρήστες. Η ευελιξία του cloud, σε συνδυασμό με τις τεχνολογίες SDN και NFV, καθιστά το δίκτυο ευκολότερο, γρηγορότερο και φθηνότερο, στην ανάπτυξη και την διαχείριση.

Δυναμικά Πρωτόκολλα (Lean Protocol Stack)

Με την Εικονικοποίηση (Virtualization), οι διεπαφές μεταξύ των λειτουργιών του δικτύου γίνονται διεπαφές μεταξύ του λογισμικού. Δύο ξεχωριστά πρωτόκολλα για το C-plane, ενδέχεται να μην είναι πλέον συναφή, εάν και τα δύο πρωτόκολλα NAS και AS μπορούν να εικονικοποιηθούν. Σύμφωνα με ένα ενοποιημένο πρότυπο cloud, τα πρωτόκολλα NAS και AS μπορούν να ενσωματωθούν σε ένα πρωτόκολλο, αφαιρώντας την περιττή λειτουργικότητα. Στο τρέχον LTE, για παράδειγμα, τα μηνύματα NAS ServiceRequest και RRC ConnectionRequest συνενώνονται σειριακά. Τα μηνύματα αυτά θα μπορούσαν να συγχωνευτούν σε ένα και μόνο μήνυμα, σε ένα cloud-based και εικονικοποιημένο δίκτυο. Παρομοίως, ορισμένες διαδικασίες που σχετίζονται με τη διαχείριση της κινητικότητας, τη διαχείριση συνεδριών και την ασφάλεια, μπορούν ενδεχομένως να καταργηθούν. Για παράδειγμα, η διαδικασία δημιουργίας σύνδεσης (connection establishment) μπορεί να απλοποιηθεί σημαντικά, απαιτώντας "handshake" μόνο μεταξύ των peer ενός μεμονωμένου πρωτοκόλλου. Αυτό με τη σειρά του, θα πραγματοποιήσει ταχύτερη δημιουργία σύνδεσης. Η διαχείριση του Bearer-based QoS, θα μπορούσε επίσης να αντικατασταθεί από το IP marking, ώστε με την χρήση κατάλληλων IP μηχανισμών, να αποφευχθεί η σήμανση (marking) των πακέτων με το υψηλότερο QoS class.

Αντίστοιχα, για το U-plane, μπορεί να εξεταστεί η συγχώνευση των λειτουργιών του L2 Radio Access Network και Gateway λειτουργιών, στο υφιστάμενο Core δίκτυο (Core Network). Η εικονικοποίηση του U-plane θεωρείται γενικά πιο δύσκολη από εκείνη του C-plane, λόγω του καθαρού όγκου των δεδομένων που πρόκειται να υποβληθούν σε επεξεργασία. Η εικονικοποίηση των RAN L2 πρωτοκόλλων μπορεί να απαιτήσει σημαντική επεξεργαστική ισχύ, καθώς τα πρωτόκολλα L2 υποστηρίζουν διάφορα δυναμικά χαρακτηριστικά, όπως το Dynamic Transport Block Size (ανάλογα με την κατανομή πόρων και τη στιγμιαία κατάσταση του ραδιο-δικτύου), την τμηματοποίηση (Segmentation) και συνένωση (Concatenation) των πακέτων. Προηγμένες λειτουργίες, όπως το mMIMO, καθώς και η λειτουργικότητα του Radio Scheduler, απαιτούν ακριβείς πληροφορίες κατάστασης καναλιού (Channel State Information - CSI) για να είναι αποτελεσματικές. Ως εκ τούτου, εάν πρόκειται να εικονικοποιηθούν τέτοιου είδους χαρακτηριστικά, το CSI πρέπει να ενταχθεί στην εικονικοποιημένη οντότητα, επιβάλλοντας, ενδεχομένως, σημαντική επιβάρυνση κατά την μετάδοση (transport overhead).

Ανεξάρτητη Παροχή Κάλυψης και Χωρητικότητας, με Αρχιτεκτονική Διαχωρισμού C/U plane

Η κάλυψη και η χωρητικότητα παρέχονται ανεξάρτητα στο ραδιο-δίκτυο, με αρχιτεκτονική split C / U-plane. Οι Macro & Metro σταθμοί βάσης παρέχουν κάλυψη χρησιμοποιώντας το αδειοδοτημένο φάσμα σε ζώνες χαμηλών συχνοτήτων στις υφιστάμενες κυψέλες, ενσωματώνοντας, για παράδειγμα, τις υλοποιήσεις NOMA (Non-Orthogonal Multiple Access) και SIC (Self-interference cancellation) για την αύξηση της χωρητικότητας.

Οι σταθμοί βάσης Small Cells (π.χ. Phantom cell) και οι RRU παρέχουν χωρητικότητα τοπικά, χρησιμοποιώντας ένα συνδυασμό φάσματος με άδεια και χωρίς άδεια, σε ζώνες χαμηλής και υψηλής συχνότητας. Οι κυψέλες αυτές αναπτύσσονται σε εσωτερικούς και εξωτερικούς χώρους. Εφαρμόζονται επίσης, προηγμένα σχήματα (π.χ. mMIMO), σε ορισμένες RRU και σε small cells, για την ενίσχυση της χωρητικότητας. Τα small cells, μπορούν να τεθούν σε αναστολή λειτουργίας ή να απενεργοποιηθούν εντελώς όταν δεν χρειάζονται, λόγω της εξαιρετικά μεταβλητής κατανομής χρηστών και κυκλοφορίας, για την εξοικονόμηση ενέργειας. Η δυναμική ενεργοποίηση και απενεργοποίηση των small cells, μπορεί να προσφέρει σημαντική εξοικονόμηση ενέργειας, χωρίς υποβάθμιση της απόδοσης του δικτύου [3].

Ο διαχωρισμός της κάλυψης από τη χωρητικότητα, επιτρέπει την ανεξάρτητη κινητικότητα (independent mobility) του C-plane και του U-plane, σε περιοχές με αλληλεπικαλυπτόμενη κάλυψη σταθμών βάσης macro και small cells. Στην πραγματικότητα, τα C-plane και U-plane, μπορούν να ακολουθήσουν διαφορετικές διαδρομές για ένα τερματικό. Σε αυτή την περίπτωση, το τερματικό θα πρέπει να υποστηρίξει τη σύνδεση σε πολλούς σταθμούς βάσης, ταυτόχρονα.

Πολλαπλές Συσκευές και Ομαδική Κινητικότητα (Relaying & Nesting)

Τα Relays χρησιμοποιούνται ως μέσο για την υποστήριξη της ομαδικής κινητικότητας (π.χ. τερματικών σε κινούμενο όχημα) και των νομαδικών σημείων πρόσβασης (nomadic hotspots). Σε τέτοια σενάρια, όλες οι μεταδόσεις εντός της ομάδας συγκεντρώνονται σε μία ή περισσότερες οντότητες (π.χ., ένα small cell) και μεταδίδονται στο δίκτυο μέσω wireless backhaul, το οποίο συνδέεται με το cloud δίκτυο (Σχήμα 2). Συσκευές με περιορισμένους πόρους, όπως φορητές συσκευές χαμηλής ισχύος (wearables), συνδέονται, non-transparently, στο δίκτυο μέσω μίας ή περισσότερων συσκευών που διαθέτουν περισσότερους πόρους (nesting, Σχήμα 2). Με τη σύνδεση “χωρίς διαφάνεια” (non-transparently), μπορούν να χρησιμοποιηθούν διαδικασίες τηλεειδοποίησης (network paging procedures) για την έναρξη συνδέσεων με τέτοιες συσκευές, μειώνοντας έτσι την κυκλοφορία σηματοδότησης και την κατανάλωση ενέργειας. Μαζί, το Relaying και το Nesting παρέχουν υποστήριξη για έναν τεράστιο αριθμό συσκευών, με διαφορετικές δυνατότητες, με κλιμακούμενο και αποτελεσματικό τρόπο.

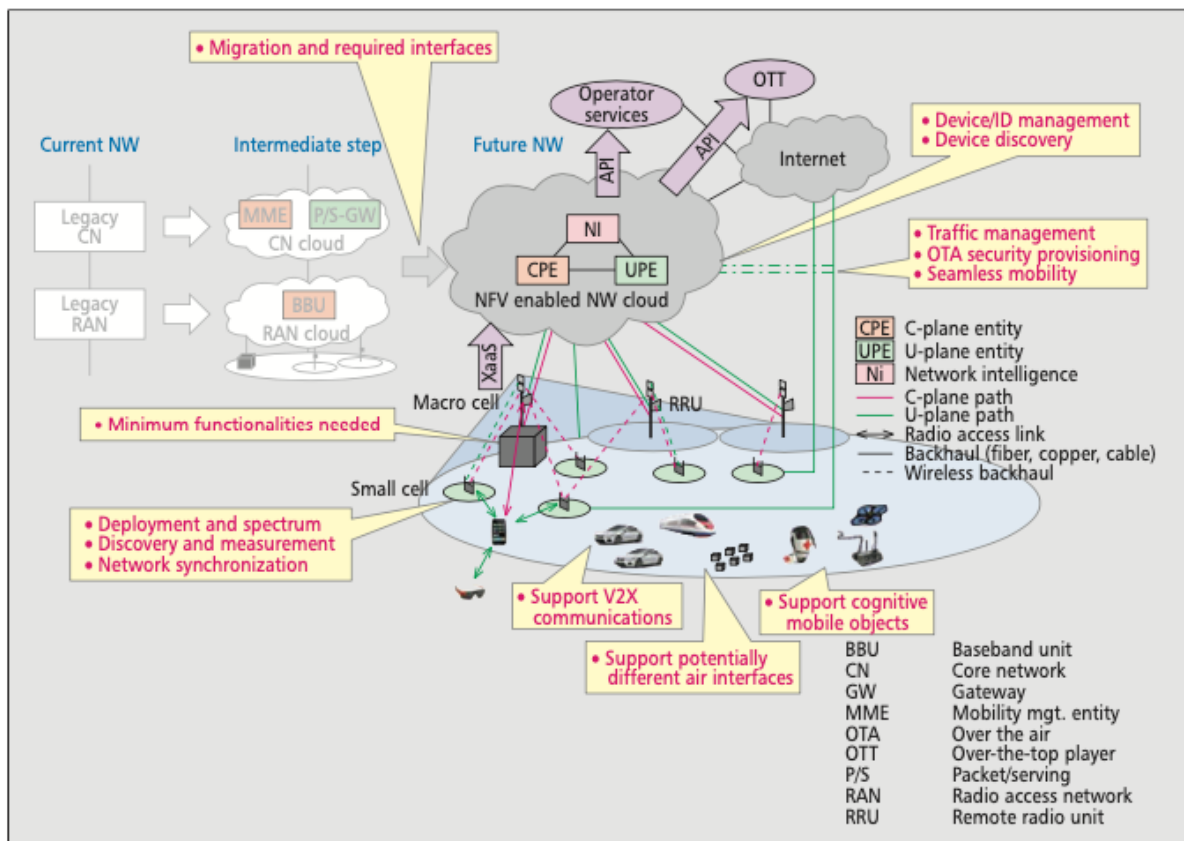
Ευφυές Δίκτυο βάσει των Δεδομένων

Η 5G αρχιτεκτονική επιτρέπει στο cloud δίκτυο να συλλέγει διάφορους τύπους δεδομένων, είτε αυτά είναι user-centric, network-centric ή context-centric. Το cloud χρησιμοποιεί ευφυείς αλγόριθμους για να παρέχει πληροφορίες σε πραγματικό χρόνο, για την

αποτελεσματική διαχείριση των πόρων, διαχείριση της κινητικότητας, την διαχείριση του QoE, την δρομολόγηση ή το offload του traffic, και την παροχή υπηρεσιών με γνώμονα το περιβάλλον (π.χ. geocasting). Επιπλέον, τα δεδομένα που συλλέγονται μπορούν να παρέχουν χρήσιμη είσοδο (input) για τον προγραμματισμό δικτύου. Με την χρήση των APIs στο cloud δίκτυο, τα δεδομένα που συλλέγονται μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε διάφορες μορφές για κοινό σκοπό (π.χ. αστικό σχεδιασμό) και για εμπορικούς λόγους. Για παράδειγμα, τα APIs μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τη διευκόλυνση νέων επιχειρήσεων, με βάση την διαχείριση της γνώσης τους σχετικά με τις συνθήκες δικτύου, ως υπηρεσία σε Over-The-Top παίκτες, οι οποίες μπορούν να τους επιτρέψουν να παρέχουν σταθερή ποιότητα υπηρεσίας στους τελικούς χρήστες.

Ζητήματα Αρχιτεκτονικής

Ένα ζήτημα που πρέπει να αντιμετωπιστεί είναι ο τρόπος με τον οποίο θα διασυνδέονται και θα λειτουργούν τα δίκτυα παλαιού τύπου (legacy) με τη νέα αρχιτεκτονική δικτύου. Θα μπορούσε κανείς να φανταστεί ένα βήμα μετεγκατάστασης, όπου τα παλιά Core και Radio Access δίκτυα μετεγκατασταθούν σε ξεχωριστές πλατφόρμες cloud, κατά τη φάση ανάπτυξης του 5G (Σχήμα 4). Προκειμένου να αποφευχθεί η δημιουργία παράλληλων δικτύων, θα είναι απαραίτητο να καθοριστούν διασυνδέσεις και πρωτόκολλα μεταξύ οντοτήτων στο legacy cloud και του cloud των νέων δικτύων, για τη διασφάλιση της διαλειτουργικότητας.



Σχήμα 4 - Θέματα προς αντιμετώπιση για την υλοποίηση 5G αρχιτεκτονικών

Ένα άλλο ζήτημα είναι να καθοριστεί η βέλτιστη φυσική υλοποίηση του cloud δικτύου, για την επίτευξη των στόχων απόδοσης και κόστους. Ενώ η συγκέντρωση των πόρων θα

μπορούσε να οδηγήσει σε εξοικονόμηση πόρων, θα μπορούσε επίσης να οδηγήσει σε σημεία συμφόρησης των επιδόσεων, υψηλότερη καθυστέρηση και μεμονωμένα σημεία αποτυχίας (SPOFs). Πρόσθετα μέτρα, επίσης, θα απαιτηθούν επίσης για να αποφευχθεί ο καταστροφικός αντίκτυπος στη διαθεσιμότητα υπηρεσιών, σε περίπτωση που παρουσιαστεί δυσλειτουργία στην κεντρική οντότητα. Επιπλέον, η κεντρικοποίηση (centralization) θα μπορούσε να οδηγήσει στην ανάγκη μεγαλύτερης επεξεργαστικής και μεταφορικής ικανότητας στην κεντρική οντότητα, ώστε να μπορεί να επεξεργάζεται και να μεταφέρει τη συνολική κίνηση, γεγονός που θα μπορούσε να μειώσει την εξοικονόμηση κόστους. Από την άλλη πλευρά, η διανομή πόρων θα μπορούσε να οδηγήσει σε βελτιώσεις όσον αφορά την απόδοση, και να μειώσει το latency. Η εύρεση της σωστής ισορροπίας είναι ένα σημαντικό ζήτημα.

Η εξαιρετικά πυκνή ανάπτυξη (ultra-dense) των small cells θα είναι ιδιαίτερα χρήσιμη για περιβάλλοντα εσωτερικού χώρου και hotspots. Όπως φαίνεται στο Σχήμα 5, διαφορετικές επιλογές ανάπτυξης έχουν διαφορετικές επιπτώσεις για το δίκτυο.

	Operator-deployed	User-deployed
Licensed spectrum	<p>Pros</p> <ul style="list-style-type: none"> • Cell sites fully controlled by the operator • Easier to provide QoE • Advanced resource allocation (RA) techniques become easier to realize <p>Cons</p> <ul style="list-style-type: none"> • Cost (equipment, deployment, operation) • Limited spectrum • Spectrum license fees <p>Issues</p> <ul style="list-style-type: none"> • Backhaul provisioning 	<p>Pros</p> <ul style="list-style-type: none"> • Reduced cost (equip., deployment, operation) <p>Cons</p> <ul style="list-style-type: none"> • Additional operation costs to provide after-service customer support <p>Issues</p> <ul style="list-style-type: none"> • Regulatory issues • Access control (public or private) • Ensuring QoE, e.g., new mechanisms to control interference (e.g., low Tx power) • Impact of diverse backhaul types on advanced RA techniques (e.g., CoMP) • Provisioning of over-the-air security
Unlicensed spectrum	<p>Pros</p> <ul style="list-style-type: none"> • Cell sites fully controlled by the operator • Additional spectrum for operators to exploit <p>Cons</p> <ul style="list-style-type: none"> • Cost (equipment, deployment, operation) • Lack of QoE guarantees <p>Issues</p> <ul style="list-style-type: none"> • Mechanisms to ensure fair-play (definition and implementation of incentive-compatible spectrum etiquette) • Coexistence with Wi-Fi, Bluetooth, etc. • Backhaul provisioning 	<p>Pros</p> <ul style="list-style-type: none"> • Reduced cost (equip., deployment, operation) <p>Cons</p> <ul style="list-style-type: none"> • Lack of QoE guarantees <p>Issues</p> <ul style="list-style-type: none"> • Access control • Mechanisms to ensure fair-play (definition and implementation of incentive-compatible spectrum etiquette) • Coexistence with Wi-Fi, Bluetooth, etc. • Impact of diverse backhaul types on advanced RA techniques (e.g., CoMP) • Provisioning of over-the-air security

Σχήμα 5 - Επιλογές και προβλήματα small cell αναπτύξεων

Ενότητα 2 – Edge Computing στο 5G

Εισαγωγή

Το Edge Computing είναι ένα υπολογιστικό παράδειγμα που ενεργοποιεί τους ακραίους διακομιστές σε μικρά και ακραία νέφη, και τους επιτρέπει να επεκτείνουν τις δυνατότητες του cloud στην άκρη του δικτύου, ώστε να εκτελούν εργασίες που απαιτούν μεγάλη υπολογιστική ισχύ και να αποθηκεύουν τεράστια ποσότητα δεδομένων, σε κοντινή απόσταση από τον εξοπλισμό του χρήστη (UEs). Το παραδοσιακό cloud computing, το οποίο είναι ένα κεντρικοποιημένο σύστημα που παρέχει συνεχή πρόσβαση σε κέντρα δεδομένων (DCs) υψηλών δυνατοτήτων, έχει υιοθετηθεί για να επιτρέπει στους τελικούς χρήστες να μεταφέρουν τον υπολογισμό και την αποθήκευση, στα κέντρα δεδομένων. Αυτό συμβαίνει επειδή οι εξοπλισμοί των τελικών χρηστών έχουν περιορισμένες δυνατότητες επεξεργασίας, υπολογισμού και αποθήκευσης. Ωστόσο, το EC θα προτιμηθεί για να καλύπτει τις απαιτήσεις των νέων εφαρμογών επόμενης γενιάς, όπως η επαυξημένη πραγματικότητα (augmented reality) και η εικονική πραγματικότητα (virtual reality), οι οποίες είναι διαδραστικές με το περιβάλλον. Αυτές οι εξαιρετικά διαδραστικές εφαρμογές έχουν τεράστιες απαιτήσεις σε υπολογιστική ισχύ και σε υψηλό QoS, συμπεριλαμβανομένων του χαμηλού latency και του υψηλού throughput (π.χ. ultra reliable low latency communication - URLLC, από Διαδίκτυο - tactile internet). Το πιο σημαντικό είναι ότι οι εφαρμογές αυτές αναμένεται να παράγουν τεράστια ποσότητα δεδομένων, έως και 30,6 exabytes ανά μήνα. Οι περιορισμένες δυνατότητες των τερματικών συσκευών των χρηστών (User Equipments - UEs), οδηγούν στην ανάγκη για EC τεχνολογίες: α) για την λήψη και αποθήκευση τεράστιου όγκου δεδομένων σε πραγματικό χρόνο, β) για την επεξεργασία, υπολογισμός και ανάλυση των δεδομένων, και γ) για την λήψη και κατανομή αποφάσεων στα μικρά νέφη (mini cloud) τοπικά. Ως εκ τούτου, οι ακραίοι διακομιστές στα Mini Clouds, έχουν τις δυνατότητες ενός cloud αλλά σε διαφορετική κλίμακα και βρίσκονται τοπικά αντί στα απομακρυσμένα κέντρα δεδομένων που μπορεί να απέχουν πολύ από τα UEs.

2.1 Απαιτήσεις Συστημάτων 5G

Το 5G είναι το ασύρματο δίκτυο κινητής τηλεφωνίας για την κάλυψη των αναγκών των δικτύων της επόμενης γενιάς. Το 5G διαθέτει τρία κύρια χαρακτηριστικά, σε σχέση με τους προκατόχους του (2G, 3G, 4G).

1. Δημιουργείται τεράστιος **όγκος δεδομένων**. Σύμφωνα με τη Διεθνή Ένωση Τηλεπικοινωνιών (ITU), ο αριθμός των κινητών συσκευών αναμένεται να αυξηθεί στα 25 δισεκατομμύρια έως το 2022, συμβάλλοντας στα υπερ-πυκνά (ultra-dense) δίκτυα. Κατά συνέπεια, υπάρχει μια εκρηκτική αύξηση της ποσότητας δεδομένων από 16,5 exabytes το 2014 σε μια εκτίμηση 500 exabytes το 2022.
2. Επιβάλλονται αυστηρές **απαιτήσεις QoS** για την υποστήριξη διαδραστικών εφαρμογών, που απαιτούν εξαιρετικά χαμηλό λανθάνοντα χρόνο και υψηλή απόδοση.
3. Τα **ετερογενή περιβάλλοντα** πρέπει να υποστηρίζουν την διαλειτουργικότητα ενός διαφορετικού εύρους τερματικών συσκευών (π.χ. έξυπνα τηλέφωνα και tablet), απαιτήσεις QoS (π.χ. διαφορετικά επίπεδα καθυστέρησης και απόδοσης για εφαρμογές πολυμέσων), τύπους δικτύου (π.χ. IEEE 802.11, IoT).

Το 5G αποτελείται από τρεις κύριες νέες τεχνολογίες για την παροχή μεγαλύτερης χωρητικότητας δικτύου, προκειμένου να υποστηρίξει μεγαλύτερο αριθμό UEs.

1. **mmWave επικοινωνία:** η οποία χρησιμοποιεί ζώνες υψηλής συχνότητας (δηλαδή, 30 GHz έως 300 GHz), παρέχει υψηλό εύρος ζώνης (δηλ. Τουλάχιστον 11 Gbps).
2. **Ανάπτυξη small cells:** επιτρέπει στα UEs να επικοινωνούν χρησιμοποιώντας mmWave προκειμένου να μειωθεί το εύρος μετάδοσης και οι παρεμβολές.
3. **mMIMO:** επιτρέπει στους σταθμούς βάσης (BS) να χρησιμοποιούν μεγάλο αριθμό κεραιών (π.χ. έως 16 κεραιές ανά τομέα) για την παροχή κατευθυντικής μετάδοσης (ή δέσμης) για τη μείωση των παρεμβολών, επιτρέποντας στους γειτονικούς κόμβους να επικοινωνούν ταυτόχρονα [4].

2.2 Κύρια χαρακτηριστικά Δεδομένων 5G

Τα δεδομένα μπορούν να ταξινομηθούν σε τρεις κύριες κατηγορίες, με βάση τον χρόνο:

- **Hard real-time** δεδομένα, έχουν αυστηρά προκαθορισμένο latency. Εφαρμογές, όπως βίντεο streaming, gaming και υπηρεσίες υγείας, δημιουργούν τέτοιου είδους δεδομένα.
- **Soft real-time** δεδομένα, έχουν προκαθορισμένο latency, αλλά μπορούν να ανεχθούν κάποια προκαθορισμένη και οριοθετημένη καθυστέρηση. Εφαρμογές, όπως το έξυπνο σύστημα ελέγχου σήματος κυκλοφορίας, δημιουργούν τέτοιου είδους δεδομένα.
- **Non-real-time** δεδομένα, δεν είναι ευαίσθητα στο χρόνο και μπορούν να ανεχθούν την καθυστέρηση.

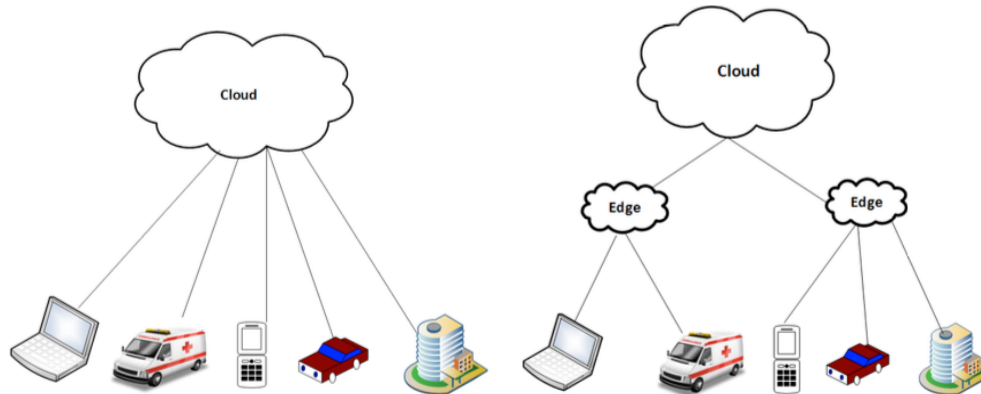
Το Edge computing θα χειρίζεται εφαρμογές και υπηρεσίες με hard real-time απαιτήσεις, χρησιμοποιώντας ακραίους διακομιστές, λόγω της εγγύτητάς τους με τα τερματικά. Στις Soft real-time εφαρμογές και υπηρεσίες, οι εργασίες θα γίνονται από τους ακραίους διακομιστές, σε περίπτωση που η καθυστέρηση απόκρισης μεταξύ των τερματικών και του κεντροποιημένου cloud είναι υψηλότερη από την απαίτηση. Διαφορετικά, οι εργασίες θα μπορούν να πραγματοποιηθούν στο cloud. Για non-real-time εφαρμογές και υπηρεσίες, οι εργασίες θα μπορούν να εκτελούνται εξ ολοκλήρου στο cloud, για την εξισορρόπηση του φόρτου.

2.3 Σημασία του Edge Computing

Το Edge computing υιοθετεί ένα αποκεντρωμένο μοντέλο, το οποίο φέρνει τις δυνατότητες υπολογιστικού νέφους πιο κοντά στα UEs προκειμένου να μειωθεί η καθυστέρηση. Το Σχήμα 6 δείχνει τα μοντέλα υπολογιστικού νέφους και υπολογιστικών άκρων. Το Edge computing μπορεί να λειτουργήσει είτε ως μία πλατφόρμα υπολογιστών είτε ως μια συνεργατική πλατφόρμα μαζί με άλλα στοιχεία, συμπεριλαμβανομένου του cloud. Το Edge computing είναι απαραίτητο, καθώς το παραδοσιακό μοντέλο cloud computing δεν είναι κατάλληλο για διαδραστικές εφαρμογές που απαιτούν υπολογιστική ένταση και έχουν υψηλές απαιτήσεις QoS. Αυτό συμβαίνει επειδή το cloud μπορεί να απέχει πολύ από UE, γεγονός που αυξάνει

επίσης την κατανάλωση ενέργειας. Με άλλα λόγια, οι διακομιστές cloud βρίσκονται συνήθως στο κεντρικό δίκτυο και οι ακραίοι διακομιστές, των mini clouds, βρίσκονται στην άκρη του δικτύου.

Για να κατανοήσουμε την ανάγκη ενός υπολογισμού στο ακραίο δίκτυο, μπορούμε να σκεφτούμε την επικοινωνία, σε πραγματικό χρόνο, ενός αυτοκινούμενου οχήματος, η οποία απαιτεί end-to-end καθυστέρηση μικρότερη από 10 ms. Η ελάχιστη end-to-end καθυστέρηση για πρόσβαση στο cloud είναι μεγαλύτερη από 80 ms, η οποία δεν είναι αποδεκτή. Το Edge computing πληροί τις χρονικές απαιτήσεις των 5G εφαρμογών και μειώνει την κατανάλωση ενέργειας κατά περίπου 30% έως 40%.



Σχήμα 6 - Cloud Computing / Edge Computing

2.4 Βασικές Απαιτήσεις Edge Computing στο 5G

Υπάρχουν τέσσερις βασικές προϋποθέσεις για την επιτυχή ανάπτυξη και λειτουργία του edge computing στο 5G. Ενώ και οι τέσσερις βασικές απαιτήσεις είναι σημαντικές, η επίτευξη ισορροπημένης εναλλαγής μεταξύ τους, πρέπει να λαμβάνεται υπόψη ανάλογα με τις εφαρμογές.

1. Η **αλληλεπίδραση σε πραγματικό χρόνο**, η οποία είναι το θεμελιώδες κίνητρο για τη χρήση του edge computing πάνω από το cloud computing, εξασφαλίζει χαμηλό latency για την υποστήριξη delay-sensitive εφαρμογών (π.χ. απομακρυσμένη χειρουργική επέμβαση, απτό διαδίκτυο, URLLC, μη επανδρωμένα οχήματα και πρόληψη ατυχημάτων οχημάτων) προκειμένου να βελτιωθεί το QoS. Ένα ευρύ φάσμα υπηρεσιών, συμπεριλαμβανομένης της λήψης αποφάσεων και της ανάλυσης δεδομένων, μπορεί να παρέχεται από τους ακραίους διακομιστές, σε πραγματικό χρόνο.
2. Η **επεξεργασία τοπικά** είναι εφικτή, δεδομένου ότι τα δεδομένα και τα αιτήματα των χρηστών μπορούν να υποβληθούν σε επεξεργασία από ακραίους διακομιστές και όχι από το cloud. Αυτό σημαίνει ότι, μειώνοντας τον φόρτο της κίνησης κατά τη σύνδεση μεταξύ ενός small cell και του κεντρικού δικτύου: α) το bandwidth της σύνδεσης μπορεί να αυξηθεί και να αποφευχθεί η συμφόρηση και β) ο φόρτος της κίνησης προς στο κεντρικό δίκτυο μειώνεται.

3. Ο **υψηλός ρυθμός δεδομένων** (data rate) είναι απαραίτητος για τη μετάδοση του μεγάλου όγκου δεδομένων που δημιουργούνται από ένα διαφορετικό εύρος εφαρμογών (π.χ. εικονική πραγματικότητα, απομακρυσμένη χειρουργική επέμβαση) στα ακραία νέφη. Οι ακραίοι διακομιστές, οι οποίοι μπορούν να ενσωματωθούν στους σταθμούς βάσης, επιτρέπουν την εύκολη πρόσβαση στα ακραία νέφη, χωρίς την ανάγκη πρόσβασης στο κεντρικό δίκτυο. Η χρήση ζωνών συχνοτήτων mmWave σε ένα small cell, παρέχει μετάδοση υψηλού ρυθμού δεδομένων.
4. Η **υψηλή διαθεσιμότητα** διασφαλίζει τη διαθεσιμότητα των υπηρεσιών νέφους, στα άκρα (edges). Δεδομένου ότι το edge computing ωθεί τα δεδομένα στα ακραία νέφη, η διαθεσιμότητα αυτών είναι σημαντική.

2.5 Εφαρμογές του Edge Computing στο 5G

Πολλές εφαρμογές του 5G βασίζονται στο edge computing για αλληλεπίδραση σε πραγματικό χρόνο, επεξεργασία τοπικά, υψηλό ρυθμό δεδομένων και υψηλή διαθεσιμότητα, όπως:

- **Υπηρεσίες Υγείας**, όπως μία απομακρυσμένη χειρουργική επέμβαση και διαγνωστικά, καθώς και παρακολούθηση ζωτικών σημείων και δεδομένων του ασθενούς. Οι γιατροί μπορούν να χρησιμοποιήσουν μια απομακρυσμένη πλατφόρμα για να χειριστούν χειρουργικά εργαλεία από απόσταση, σε ένα ασφαλές περιβάλλον.
- **Εφαρμογές ψυχαγωγίας και πολυμέσων**, όπως HD-TV ή 3D-TV streaming.
- **Εικονική πραγματικότητα**, επαυξημένη πραγματικότητα και μικτή πραγματικότητα, όπως ροή περιεχομένου βίντεο σε γυαλιά εικονικής πραγματικότητας. Το μέγεθος των γυαλιών μπορεί να μειωθεί, μεταφέροντας τον φόρτο των υπολογισμών από τα γυαλιά στους ακραίους διακομιστές.
- **Απτό Διαδίκτυο** (Tactile internet), που είναι η επόμενη εξέλιξη του Διαδικτύου των πραγμάτων, παρέχει μια εξαιρετικά ανταποκρισιμη (ultra-responsive) και εξαιρετικά αξιόπιστη (ultra-reliable) σύνδεση στο δίκτυο, προκειμένου να εξασφαλίσει την εμπειρία φυσικής «αφής», σε πραγματικό χρόνο, από απόσταση.
- Το **URLLC** (ultra-reliable and low latency communication), το οποίο διασφαλίζει υψηλή αξιοπιστία μεταξύ των UEs, ειδικά στις επικοινωνίες M2M, υποστηρίζει μεταδόσεις μικρών ωφέλιμων φορτίων με μικρό χρόνο καθυστέρησης, με πολύ υψηλή αξιοπιστία, όπως π.χ. σε συστήματα συναγερμού.
- **Διαδίκτυο των πραγμάτων**, όπως έξυπνες συσκευές (π.χ. οικιακές συσκευές) που συνδέονται στο Διαδίκτυο.
- **Εργοστάσια του μέλλοντος**, όπως έξυπνα μηχανήματα, για τη βελτίωση της ασφάλειας και της παραγωγικότητας. Οι χειριστές μπορούν να χρησιμοποιούν μια απομακρυσμένη πλατφόρμα για τη λειτουργία βαρέων μηχανημάτων - ιδίως εκείνων που βρίσκονται σε δυσπρόσιτα και μη ασφαλή μέρη - από ένα ασφαλές περιβάλλον.
- **Αντιμετώπιση έκτακτης ανάγκης**, όπου συλλέγονται διαφορετικά είδη δεδομένων και πληροφοριών για ένα συμβάν, από διαφορετικές πηγές, σε διαφορετικές χρονικές στιγμές. Τα δεδομένα χρησιμοποιούνται για τη λήψη κρίσιμων αποφάσεων και παρέχουν μια πληρέστερη εικόνα του συμβάντος, με την πάροδο του χρόνου. Οι

αποφάσεις που λαμβάνονται κοινοποιούνται στην ομάδα αντιμετώπισης έκτακτης ανάγκης (π.χ. πυροσβέστες) σε πραγματικό χρόνο.

- **Ευφύες σύστημα μεταφοράς**, με το οποίο οι οδηγοί μπορούν να μοιράζονται ή να συλλέγουν πληροφορίες από κέντρα πληροφοριών κυκλοφορίας, για να αποφύγουν οχήματα που βρίσκονται σε κίνδυνο ή να σταματήσουν απότομα, σε πραγματικό χρόνο, προκειμένου να αποφευχθούν ατυχήματα. Επιπλέον, τα μη επανδρωμένα οχήματα μπορούν αντιλαμβάνονται το περιβάλλον τους, και να κινούνται αυτόνομα και με ασφάλεια [5].

2.6 Στόχοι

Υπάρχουν πέντε κύριοι στόχοι του edge computing στο 5G ως εξής:

1. **Βελτίωση της διαχείρισης δεδομένων** για τον χειρισμό μεγάλου όγκου delay-sensitive δεδομένων, τα οποία δημιουργούνται από UEs, τα οποία πρέπει να αντιμετωπίζονται τοπικά σε πραγματικό χρόνο. Για παράδειγμα, οι τοπικοί UEs σε ένα έξυπνο εργοστάσιο, αναμένεται να παράγουν έως και 1 petabyte δεδομένων καθημερινά [35]. Δεδομένου ότι η πρόσβαση στο cloud προκαλεί υψηλό latency, τα δεδομένα μπορούν να αντιμετωπιστούν τοπικά από ακραίους διακομιστές. Απαιτείται αποτελεσματική διαχείριση δεδομένων για την υποστήριξη των τοπικών λειτουργιών (π.χ. D2D) και των εφαρμογών σε πραγματικό χρόνο (π.χ. απομακρυσμένη χειρουργική επέμβαση)
2. **Βελτίωση του QoS**, προκειμένου να βελτιωθεί η ποιότητα της εμπειρίας (QoE). Αυτό βοηθά στην υποστήριξη εφαρμογών επόμενης γενιάς, συμπεριλαμβανομένων διαδραστικών εφαρμογών και υπηρεσιών κατ' απαίτηση. Για παράδειγμα, οι υπηρεσίες over-the-top (OTT) επιτρέπουν την διαδικτυακή παροχή περιεχομένου πολυμέσων, τα οποία γενικά απαιτούν χαμηλό latency και υψηλό bandwidth, χωρίς οι πάροχοι υπηρεσιών να συμμετέχουν ενεργά στον έλεγχο και τη διανομή του περιεχομένου [6]. Αυτή η υπηρεσία μπορεί να προωθήσει νέες και εξατομικευμένες εφαρμογές, οι οποίες επιτρέπουν στους παρόχους των υπηρεσιών να προσαρμόσουν το QoS. Οι πάροχοι των υπηρεσιών, πρέπει να έχουν μια ολιστική άποψη των συνδρομητών και των πελατών, καλύπτοντας σχετικές / υποκειμενικές πληροφορίες, όπως τις προτιμήσεις και τα ενδιαφέροντά τους. Στη συνέχεια, οι πληροφορίες μπορούν να εξατομικευτούν, για την προσέλκυση δυνητικών πελατών και την ενίσχυση του QoE τους.
3. **Πρόβλεψη της ζήτησης** του δικτύου, για την εκτίμηση των απαιτούμενων πόρων δικτύου για την κάλυψη της ζήτησης τοπικά, και στη συνέχεια για παροχή βέλτιστης κατανομής πόρων για τη διαχείριση της τοπικής ζήτησης δικτύου. Μια ακριβής πρόβλεψη της ζήτησης βοηθά στο να αποφασιστεί εάν η ζήτηση αυτή πρέπει να αντιμετωπιστεί τοπικά στην άκρη (edge) ή cloud, και έτσι παρέχει μια αποτελεσματική κατανομή πόρων (π.χ. bandwidth).
4. Διαχείριση της **ετοιμότητας της τοποθεσίας**, ώστε να επιτρέπεται στους γεωγραφικά κατανομημένους ακραίους διακομιστές να βρίσκουν τις δικές τους τοποθεσίες, και

να παρακολουθούν τη θέση των τερματικών, για την υποστήριξη location-based υπηρεσιών. Αυτό επιτρέπει στους παρόχους να αναθέτουν τις location-based υπηρεσίες και τα δεδομένα τους στα edge clouds. Για παράδειγμα, οι κινητές τερματικές συσκευές μπορούν να υποβάλουν ερωτήματα και να αναζητήσουν πληροφορίες σχετικά με σημεία ενδιαφέροντος σε τοποθεσίες, δεδομένης της γεωγραφικής τους τοποθεσίας. Ο αριθμός των ερωτημάτων μπορεί να είναι υψηλός, όπως ερωτήματα που σχετίζονται με νοσοκομεία και ιατρικές συμβουλές κατά την αντιμετώπιση καταστάσεων έκτακτης ανάγκης.

5. **Βελτίωση της διαχείρισης πόρων**, για την βελτίωση της απόδοσης του δικτύου, λόγω των περιορισμένων πόρων, που διατίθενται στο edge cloud, σε σύγκριση με το cloud. Αυτό αποτελεί πρόκληση, καθώς είναι μια πολυ-αντικειμενική λειτουργία που πρέπει να καλύπτει ένα ευρύ φάσμα εφαρμογών, καθώς και τις απαιτήσεις των χρηστών, οι οποίες ποικίλλουν με την πάροδο του χρόνου.

2.7 Υπολογιστικές Πλατφόρμες

Διαφορετικές υπολογιστικές πλατφόρμες παρέχουν διαφορετικές δυνατότητες υπολογισμού (π.χ., όσον αφορά την επεξεργασία του φόρτου) με διαφορετικά χαρακτηριστικά (π.χ., όσον αφορά τη διαθεσιμότητα και την πολυπλοκότητα της υποδομής του δικτύου) για την επεξεργασία δεδομένων, σε διαφορετικές γεωγραφικές τοποθεσίες. Η υπολογιστική πλατφόρμα μπορεί να χρησιμοποιηθεί είτε μεμονωμένα, είτε σε συνδυασμό με βάση τα σενάρια δικτύου και τις απαιτήσεις εφαρμογής / υπηρεσίας. Ως παράδειγμα για την υπολογιστική πλατφόρμα που χρησιμοποιείται μεμονωμένα, είναι οι εφαρμογές και οι υπηρεσίες με αυστηρές απαιτήσεις σε QoS, οι οποίες μπορούν να χρησιμοποιούν ακραίους διακομιστές για την επεξεργασία δεδομένων σε πραγματικό χρόνο. Ως παράδειγμα για την υπολογιστική πλατφόρμα που χρησιμοποιείται σε συνδυασμό, είναι οι εφαρμογές και οι υπηρεσίες υγειονομικής περίθαλψης με δεδομένα σε πραγματικό χρόνο και σε μη-πραγματικό χρόνο, οι οποίες μπορούν να χρησιμοποιούν ακραίους διακομιστές για την επεξεργασία δεδομένων πραγματικού χρόνου και μικρού όγκου δεδομένων (lightweight data) και το cloud για την επεξεργασία μεγάλου όγκου δεδομένων (heavyweight data). Υπάρχουν τρεις κύριες υπολογιστικές πλατφόρμες στο 5G ως εξής:

1. Το **Cloud computing** συγκεντρώνει, επεξεργάζεται και αποθηκεύει ένα τεράστιο όγκο δεδομένων και πληροφοριών, σε ολόκληρο το δίκτυο από τα τερματικά των χρηστών. Στη συνέχεια, στέλνει πίσω στα τερματικά τα δεδομένα και τις πληροφορίες, ή τις αποφάσεις. Ενώ το cloud μπορεί να ενισχύσει τα τερματικά με μικρές υπολογιστικές δυνατότητες και δυνατότητες αποθήκευσης, δεν είναι κατάλληλο να παρέχουμε υπηρεσίες σε πραγματικό χρόνο, επειδή το cloud μπορεί να απέχει πολύ από τα UEs.
2. Το **Edge computing** συγκεντρώνει, επεξεργάζεται και αποθηκεύει τεράστιο αριθμό τοπικών δεδομένων και πληροφοριών από τα τερματικά σε μια τοπική περιοχή. Το Edge computing βρίσκεται πολύ κοντά στα UEs.
 - Στο **Fog computing** αναπτύσσονται τοπικά "fog" κόμβοι, όπως switches και routers, για την παροχή τοπικού υπολογισμού. Σύμφωνα με το OpenFog

Consortium, το fog computing είναι «μια οριζόντια αρχιτεκτονική σε επίπεδο συστήματος, η οποία κατανέμει τους πόρους και τις υπηρεσίες του υπολογισμού, της αποθήκευσης, του ελέγχου και της δικτύωσης οπουδήποτε, από το νέφος (cloud) προς τα αντικείμενα (things)». Το Fog computing μοιράζεται παρόμοια οφέλη με άλλες παραλλαγές του edge computing (π.χ. MEC) για την παροχή real-time αναλυτικών στοιχείων, χαμηλού latency. Ωστόσο, έχει χαμηλή χωρητικότητα αποθήκευσης.

- Το **MEC (Mobile Edge Computing)** παρέχει αποθηκευτικές και υπολογιστικές δυνατότητες στην άκρη του δικτύου, για τη βελτίωση της - σχετικής με το τοπικό περιβάλλον - ετοιμότητας, και τη μείωση του latency. Οι διακομιστές MEC, οι οποίοι συνήθως τοποθετούνται σε πολλαπλούς κεντρικούς υπολογιστές (π.χ. στους σταθμούς βάσης), χρησιμοποιούν μια εικονικοποιημένη διεπαφή για πρόσβαση σε εγκαταστάσεις αποθήκευσης (storage) και υπολογισμού (computing). Ένας ενορχηστρωτής MEC παραβλέπει τους κεντρικούς υπολογιστές MEC, συγκεντρώνοντας και παρέχοντας πληροφορίες σε πραγματικό χρόνο, σχετικά με τις υπηρεσίες που προσφέρονται από κάθε κεντρικό υπολογιστή, τους διαθέσιμους πόρους, την τοπολογία του δικτύου, καθώς και διαχείριση εφαρμογών MEC.
3. Το **Hybrid** συνδυάζει το cloud computing και το edge computing, έτσι ώστε να μπορούν να συνεργαστούν. Για παράδειγμα, μία διεργασία edge computing επεξεργάζεται δεδομένα σε πραγματικό χρόνο και λαμβάνει αποφάσεις σε πραγματικό χρόνο, ενώ μία διεργασία cloud computing επεξεργάζεται δεδομένα μη-πραγματικού χρόνου και λαμβάνει αποφάσεις σε μη-πραγματικό χρόνο. Η υβριδική υποδομή συνδυάζει τα πλεονεκτήματα τόσο του edge (δηλαδή, των απαντήσεων σε πραγματικό χρόνο) όσο και του cloud (δηλαδή, υψηλών δυνατοτήτων υπολογισμού και αποθήκευσης). Ο υπολογισμός μπορεί να πραγματοποιηθεί σε διαφορετικά στρώματα, ιδιαίτερα στο στρώμα cloud (upper layer) και στο στρώμα fog ή edge (bottom layer). Γενικά, οι εργασίες σε πραγματικό χρόνο εκτελούνται στο επίπεδο fog και οι εργασίες που απαιτούν υψηλό υπολογισμό εκτελούνται στο επίπεδο cloud. Ωστόσο, η υβριδική πλατφόρμα είναι πιο περίπλοκη σε σύγκριση με τις ξεχωριστές πλατφόρμες cloud computing και edge computing.

2.8 Ιδιότητες

Το Edge computing έχει τρεις χαρακτηριστικές ιδιότητες:

1. Η χαμηλή καθυστέρηση και η κοντινή απόσταση επιτρέπουν στον edge computing την μείωση της **καθυστερήσης απόκρισης**, που αντιμετωπίζουν τα τερματικά κατά την πρόσβαση τους στο παραδοσιακό νέφος. Υπάρχουν τρία κύρια στοιχεία στην καθυστέρηση απόκρισης: α) καθυστέρηση επικοινωνίας που εξαρτάται από το ρυθμό δεδομένων. β) υπολογιστική καθυστέρηση που εξαρτάται από τον υπολογιστικό χρόνο και γ) καθυστέρηση διάδοσης που εξαρτάται από την απόσταση διάδοσης. Γενικά, στο cloud computing, η καθυστέρηση από άκρο σε άκρο είναι μεγαλύτερη από 80 ms (ή 160 ms για καθυστέρηση απόκρισης). Αυτό δεν είναι κατάλληλο για εφαρμογές ευαίσθητες σε καθυστέρηση, που απαιτούν ταχύτητες αφήs με

καθυστέρηση απόκρισης το πολύ 1 ms. Η στρατηγική θέση του edge cloud μειώνει τις καθυστερήσεις της επικοινωνίας και της διάδοσης. Για παράδειγμα, η απόσταση διάδοσης μειώνεται σε μερικές δεκάδες μέτρα, μέσω επικοινωνίας device-to-device (D2D) και small cells, και γενικά είναι περιορισμένη σε ακτίνα ενός χιλιομέτρου από τα τερματικά [7].

2. Η **ετοιμότητα της τοποθεσίας** επιτρέπει στους ακραίους διακομιστές να συλλέγουν και να επεξεργάζονται τα δεδομένα που δημιουργούνται από τα τερματικά, βάσει της γεωγραφικής τους θέσης. Αυτό επιτρέπει την παροχή εξατομικευμένων υπηρεσιών βάσει της τοποθεσιών των UEs. Οι ακραίοι διακομιστές μπορούν να συλλέγουν δεδομένα που δημιουργούνται από πηγές πολύ κοντά σε αυτούς, χωρίς να τα στέλνουν στο cloud (centralized).
3. Η **ετοιμότητα του περιβάλλοντος** του δικτύου επιτρέπει στους ακραίους διακομιστές να αποκτούν πληροφορίες από το ευρύτερο περιβάλλον του δικτύου. Αυτό συμβαίνει επειδή οι ακραίοι διακομιστές τείνουν να διαθέτουν πληροφορίες, για τις συνθήκες του δικτύου σε πραγματικό χρόνο (π.χ. φόρτος κίνησης των cell, πληροφορίες για το RAN) και για τα τερματικά των χρηστών (π.χ. κατανομή bandwidth, τοποθεσία χρήστη). Οι πληροφορίες επιτρέπουν στους διακομιστές να προσαρμόζονται και να ανταποκρίνονται στις διαφορετικές συνθήκες του δικτύου και των UEs, και στη συνέχεια να βελτιστοποιούν τη χρήση δικτυακών πόρων. Αυτό βοηθά τους ακραίους διακομιστές να διαχειρίζονται τεράστιο όγκο επισκεψιμότητας, προκειμένου να βελτιώσουν την απόδοση του δικτύου.

2.9 Οι Ρόλοι του Edge Computing στο 5G

Υπάρχουν έξι βασικοί ρόλοι του Edge computing για την υποστήριξη διαδραστικών εφαρμογών και υπηρεσιών, σε πραγματικό χρόνο:

1. **Χώρος αποθήκευσης τοπικά.** Με το edge computing μεταφέρεται ένας τεράστιος όγκος δεδομένων από τερματικά στα edge clouds. Ενώ οι ακραίοι διακομιστές προσφέρουν καταμεμημένο τοπικό χώρο αποθήκευσης για σημαντικό αριθμό δεδομένων, ωστόσο ο συνολικός αποθηκευτικός τους χώρος είναι πολύ χαμηλότερος από αυτόν στο cloud, το οποίο έχει σχεδόν απεριόριστη χωρητικότητα αποθήκευσης. Ορισμένοι τύποι δεδομένων που αποθηκεύονται στα edge clouds αφορούν στρατηγικές υπολογισμού (computing strategies), metadata (π.χ. γεωγραφικές τοποθεσίες) και δεδομένα παρακολούθησης. Οι ακραίοι διακομιστές παρέχουν διαφορετικούς τύπους στρατηγικών αποθήκευσης για την υποστήριξη διαφορετικών ειδών δεδομένων.
2. **Υπολογισμός τοπικά.** Το Edge computing μεταφέρει τους υπολογισμούς και τις διεργασίες από λιγότερο περίπλοκα (π.χ. έξυπνα τηλέφωνα) και περισσότερο περίπλοκα (π.χ. χειρουργικά εργαλεία και έξυπνα εργοστάσια) από τα τερματικά στα edge clouds. Ενώ οι παραδοσιακές τεχνολογίες πρόσβασης (π.χ. IEEE 802.11) παρέχουν απλό υπολογισμό, το edge cloud είναι ένα έξυπνο υπολογιστικό σύστημα που παρέχει δυνατότητες τοπικού υπολογισμού και επεξεργασίας δεδομένων κοντά στα UEs, με ανεξάρτητο και αυτόνομο τρόπο. Τα αποτελέσματα των υπολογισμών και

των διεργασιών αυτών, μπορούν να αποτελέσουν πολύτιμες εισροές για άλλα UEs, όπως αυτά σε ένα έξυπνο εργοστάσιο. Το πλεονέκτημα είναι ότι τα edge clouds εκτελούν μικρές εργασίες και παρέχουν τοπικές απαντήσεις σε πραγματικό χρόνο, οι οποίες συμβάλλουν στη μείωση του κόστους και της καθυστέρησης που απαιτείται για την αποστολή των απαιτούμενων δεδομένων στο cloud.

3. **Ανάλυση δεδομένων τοπικά.** Το Edge computing εκτελεί κρίσιμες αναλύσεις δεδομένων, σε πραγματικό χρόνο, σε μεγάλο όγκο πρωτογενών δεδομένων (raw data) που συλλέγονται από διαφορετικές εφαρμογές, σε κοντινή απόσταση, για τη δημιουργία πολύτιμων πληροφοριών. Η δυνατότητα τοπικής ανάλυσης δεδομένων μειώνει την καθυστέρηση που απαιτείται για την αποστολή δεδομένων στο, καθώς και την αναμονή για απαντήσεις από το cloud. Στη συνέχεια, τα αποτελέσματα της τοπικής ανάλυσης δεδομένων χρησιμοποιούνται για τη λήψη αποφάσεων.
4. **Λήψη αποφάσεων τοπικά.** Το Edge computing βοηθά στη λήψη αποφάσεων, σε πραγματικό χρόνο, καθώς επίσης και σε ανάλογες ενέργειες, με αυτοματοποιημένο τρόπο, βασισμένες σε καλά επεξεργασμένα δεδομένα. Η ικανότητα λήψης αποφάσεων σε τοπικό επίπεδο, μειώνει την εμπλοκή από περισσότερα στοιχεία και ανταλλαγή δεδομένων ή πληροφοριών, οδηγώντας σε: α) βελτιωμένη διαθεσιμότητα συστήματος, ιδίως το cloud. και β) βελτιωμένη διαθεσιμότητα bandwidth. Για παράδειγμα, το edge computing διευκολύνει την τοπική λήψη αποφάσεων σε αυτοματοποιημένα εργοστάσια. Πολλές οντότητες μπορούν να λαμβάνουν αποφάσεις, με συνεργατικό τρόπο.
5. **Λειτουργία τοπικά.** Το Edge computing επιτρέπει τον τηλε-χειρισμό και την τηλε-παρακολούθηση - ιδιαίτερα συσκευών που βρίσκονται σε μη ασφαλές περιβάλλον - από πιο άνετα και ασφαλέστερα μέρη.
6. **Ενίσχυση ασφάλειας τοπικά.** Το Edge computing χρησιμεύει ως ένα επιπλέον επίπεδο μεταξύ του cloud και των συνδεδεμένων συσκευών, προκειμένου να βελτιωθεί η ασφάλεια του δικτύου. Τα edge clouds μπορούν να χρησιμεύσουν επίσης και ως ασφαλείς κατανεμημένες πλατφόρμες που παρέχουν α) διαχείριση διαπιστευτηρίων ασφαλείας, β) ανίχνευση κακόβουλου λογισμικού, γ) διανομή επιδιορθώσεων λογισμικού και δ) αξιόπιστες επικοινωνίες για τον εντοπισμό και την αντιμετώπιση επιθέσεων. Το πλεονέκτημα είναι ότι, λόγω της εγγύτητας του edge computing, οι κακόβουλες οντότητες μπορούν να εντοπιστούν και να απομονωθούν γρήγορα. Επίσης, οι ενέργειες αποκατάστασης από τις επιθέσεις, πραγματοποιούνται σε πραγματικό χρόνο, οπότε έχουμε ελαχιστοποίηση των διακοπών της υπηρεσίας.

2.10 Μέτρα Αποδοτικότητας

Υπάρχουν τρία κύρια μέτρα αποδοτικότητας:

1. **Χαμηλότερο λειτουργικό κόστος.** Το Edge computing μειώνει το λειτουργικό κόστος παρέχοντας λειτουργίες τοπικά (στα edge clouds), αντί να μεταφέρονται στο cloud.

Αυτό μειώνει την κατανάλωση των απαιτούμενων δικτυακών πόρων (π.χ. bandwidth) για την μεταφορά των δεδομένων στο cloud.

2. **Υψηλότερο QoS.** Το Edge computing βελτιώνει το QoS, παρέχοντας λειτουργίες τοπικά (στα edge clouds). Αυτό μειώνει το πλήθος των εργασιών και των δεδομένων που φορτώνονται στο cloud, και έτσι αυξάνει την απόδοση του δικτύου (π.χ. υψηλότερη απόδοση, χαμηλότερη καθυστέρηση), οι οποίες είναι σημαντικές για πολλές εφαρμογές (π.χ. απομακρυσμένη χειρουργική επέμβαση, διαδικτυακό παιχνίδι).
3. **Μεγαλύτερη ενεργειακή απόδοση.** Το Edge computing μειώνει την κατανάλωση ενέργειας, παρέχοντας λειτουργίες τοπικά (στα edge clouds). Αυτό μειώνει την ποσότητα ενέργειας που απαιτείται για την μεταφορά των εργασιών και των δεδομένων στο cloud (δηλαδή, την ενέργεια που προκύπτει στην επικοινωνία), και έτσι αυξάνει τη διάρκεια ζωής του δικτύου.

2.11 Θέματα Έρευνας

Αυτή η ενότητα υπογραμμίζει τα ανοιχτά ερευνητικά ζητήματα για την επιτυχή ανάπτυξη του cloud edge στο περιβάλλον 5G.

Βελτίωση Υπηρεσιών: QoE

Το QoE είναι ένα μέτρο του συνολικού επιπέδου ικανοποίησης των πελατών, με έναν πάροχο υπηρεσιών. Το QoE σχετίζεται με το QoS, (αλλά διαφέρει και από αυτό) το οποίο ενσωματώνει την ιδέα ότι τα χαρακτηριστικά του υλικού (π.χ. η χωρητικότητα αποθήκευσης και ο αριθμός των επεξεργασιών στους διακομιστές) και τα χαρακτηριστικά του λογισμικού - π.χ., η ανάπτυξη διεπαφής) μπορούν να μετρηθούν, να βελτιωθούν και να παρέχουν εγγύηση. Η πρόκληση είναι να επιτευχθεί μια ισορροπημένη αντιστάθμιση μεταξύ: α) υψηλότερης διαθεσιμότητας ή απρόσκοπτης συνδεσιμότητας μιας εφαρμογής, η οποία μπορεί να παρέχεται από το cloud όταν ένα UE βρίσκεται εκτός εγγύτητας από τον ακραίο διακομιστή και β) υψηλότερο QoE της εφαρμογής, το οποίο μπορεί να παρέχεται από το edge cloud, όταν το UE βρίσκεται κοντά σε αυτό, προκειμένου να μειώσει την καθυστέρηση και το jitter. Ως εκ τούτου, μπορούν να χρησιμοποιηθούν συνεργατικές υπολογιστικές προσεγγίσεις, όπως υβριδικός υπολογισμός. Το Edge Computing μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τη διατήρηση της κατάστασης του δικτύου ή των υπηρεσιών (π.χ. τη διαθεσιμότητα και το κόστος των διασυνδέσεων, καθώς και τον τρόπο με τον οποίο ένα switch προωθεί την κίνηση) για εφαρμογές video streaming 4K. Διατηρώντας την κατάσταση του δικτύου, η αντιστάθμιση μεταξύ της διαθεσιμότητας και της απόδοσης QoE μπορεί να επιτευχθεί με μειωμένη επιβάρυνση της σηματοδοσίας, που προκύπτει από τις διεργασίες του δικτύου (π.χ. handover). Τα μηνύματα της σηματοδοσίας μπορούν επίσης να συγκεντρωθούν για να μειωθεί η επιβάρυνση της σηματοδοσίας. Αυτό οδηγεί σε μειωμένη κυκλοφοριακή συμφόρηση, βελτιώνοντας έτσι την επεκτασιμότητα του δικτύου και την απόδοση αυτού (π.χ. υψηλότερο throughput). Η αντιμετώπιση αυτού του ανοιχτού ζητήματος μπορεί να βελτιώσει το QoS.

Τυποποίηση Πρωτοκόλλων

Η τυποποίηση των πρωτοκόλλων απαιτεί την τυποποίηση φορέων ή οργανισμών, με σκοπό την παροχή ενός συνόλου, καθολικά αποδεκτών, κανόνων του Edge Computing σε περιβάλλον 5G. Υπάρχουν δύο κύριες προκλήσεις. Πρώτον, είναι δύσκολο να συμφωνηθεί ένα πρότυπο (π.χ., η θέση και οι δυνατότητες του edge cloud) λόγω της ευελιξίας του και της διαφοροποιημένης προσαρμογής από διαφορετικούς παρόχους. Δεύτερον, ένας μεγάλος αριθμός ετερογενών UEs χρησιμοποιούν διαφορετικά interfaces για να επικοινωνούν με το Edge Cloud. Η προσπάθεια τυποποίησης, όπως η πρωτοβουλία του Ευρωπαϊκού Ινστιτούτου Προτύπων Τηλεπικοινωνιών (European Telecommunications Standards Institute - ETSI), έχει τεθεί σε εφαρμογή έτσι ώστε τα ετερογενή UEs να μπορούν να επικοινωνούν με τους ακραίους διακομιστές, και διαφορετικά επίπεδα και υπολογιστικά πρότυπα να είναι ικανά να συνεργαστούν μεταξύ τους, σε ένα περιβάλλον πολλαπλών παρόχων.

Αντιμετώπιση της Ετερογένειας

Η ετερογένεια στον τομέα των επικοινωνιών (π.χ. εύρος μετάδοσης και ρυθμός δεδομένων) και των υπολογιστών (π.χ. hardware αρχιτεκτονική και λειτουργικά συστήματα) στο edge computing για το 5G, οδήγησε σε δυσκολίες στην ανάπτυξη μιας λύσης που να είναι φορητή και κατάλληλη σε διαφορετικά περιβάλλοντα. Τα προγράμματα που βασίζονται στο λογισμικό (ή στον προγραμματισμό) ενδέχεται να αναπτύξουν ένα μοντέλο προγραμματισμού για edge nodes, αποσκοπώντας στο να διευκολύνουν την εκτέλεση των διεργασιών ταυτόχρονα, σε πολλαπλά επίπεδα hardware. Ωστόσο, ένα ολοκληρωμένο καταμετρημένο υπολογιστικό σύστημα πρέπει να επιτρέπει στα διαφορετικά συστήματα να λειτουργούν με συνεργατικό τρόπο. Τα δεδομένα και οι παραλληλισμοί σε επίπεδο εργασιών (task-level parallelism) διαχωρίζουν τον φόρτο εργασίας σε ανεξάρτητες και μικρότερες εργασίες που μπορούν να εκτελεστούν παράλληλα σε διαφορετικό hardware και layers στα edge clouds. Οι προτεινόμενες λύσεις επιτρέπουν στα ετερογενή UEs να επικοινωνούν με τους ακραίους διακομιστές.

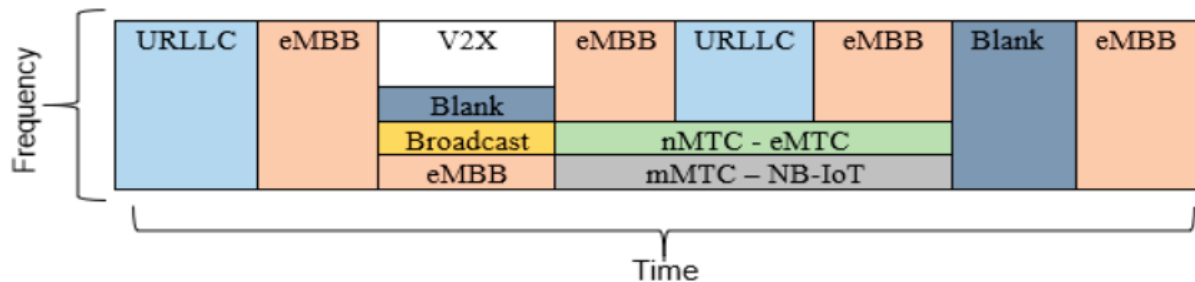
Ασφάλεια και Απόρρητο

Ενώ η ασφάλεια και το απόρρητο ενισχύονται στο edge computing, καθώς τα δεδομένα δε ταξιδεύουν σε όλο το δίκτυο, υπάρχουν δύο κύρια προβλήματα που μπορούν να αυξήσουν την ευπάθεια του δικτύου στην άκρη του. Πρώτον, το δυναμικό περιβάλλον προκαλεί την ταχεία μεταβολή των απαιτήσεων των δεδομένων και του δικτύου, από διαφορετικές οντότητες δικτύου. Δεύτερον, ο αυξανόμενος αριθμός συσκευών που επικοινωνούν μεταξύ τους πρέπει να απαιτεί μια επεκτάσιμη λύση. Ως εκ τούτου, η διαχείριση εμπιστοσύνης και ασφάλειας πρέπει να αντιμετωπίσει τα προαναφερθέντα προβλήματα, προκειμένου να αντιμετωπίσει την ευπάθεια του δικτύου. Ωστόσο, αυτό μπορεί να συνεπάγεται υψηλή πολυπλοκότητα και κόστος. Η ενίσχυση της ασφάλειας και του απορρήτου είναι σημαντική, λόγω της σημασίας των δεδομένων (π.χ. πληροφορίες υγείας). Υπάρχουν δύο πιθανές λύσεις. Πρώτον, οι εφαρμογές που εκτελούνται στο edge cloud πρέπει να είναι τυφλές (blind), αγνοώντας τις πρώτογενής πληροφορίες (raw information). Επομένως, οι ανεπεξέργαστες πληροφορίες (raw information) (π.χ. προσωπικά δεδομένα, συμπεριλαμβανομένων πληροφοριών υγειονομικής περίθαλψης) πρέπει να κρυπτογραφούνται ή να υποβάλλονται σε επεξεργασία. Δεύτερον, οι πρώτογενής πληροφορίες (raw information) μπορούν να αφαιρεθούν πριν φτάσουν στο edge cloud, για να διασφαλιστεί η ιδιωτικότητα.

Ενότητα 3 – URLL (Ultra-Reliable Low-Latency) Υπηρεσίες και Διαδίκτυο των Πραγμάτων

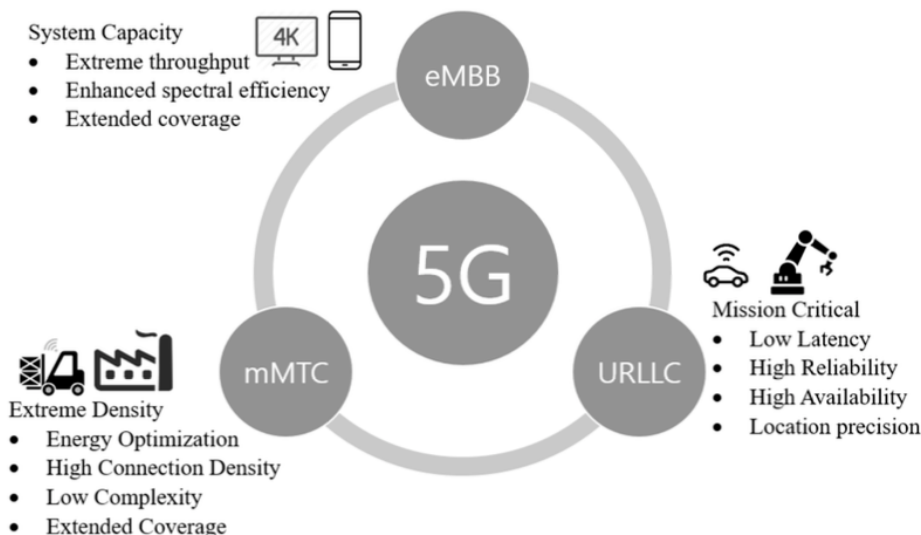
3.1 Εισαγωγή

Μία από τις κρίσιμότερες τεχνολογίες για την εφαρμογή του 5G είναι το νέο radio (new radio - NR), μια νέα τεχνολογία ραδιοπρόσβασης. Το NR είναι η νέα μέθοδος διασύνδεσης και πρόσβασης στο ραδιοδίκτυο, που αναπτύχθηκε για να διευκολύνει τις αυξανόμενες απαιτήσεις του 5G, στο προσεχές μέλλον. Όπως φαίνεται στο Σχήμα 7, το NR παρέχει μια ευέλικτη δομή πλαισίου για την υποστήριξη όλων των απαιτήσεων υπηρεσιών 5G που ορίζονται από τη Διεθνή Ένωση Τηλεπικοινωνιών (ITU).



Σχήμα 7 - Η ευέλικτη δομή πλαισίου του 5G NR. URLLC: ultra-reliable low latency communications, eMBB: enhanced mobile broadband, mMTC: massive machine-type communications, IoT: Internet of Things, NB: Narrowband

Το NR διευκολύνει τις επικοινωνίες μεταξύ του σταθμού βάσης και της κινητής συσκευής. Με τόσο γρήγορες αλλαγές στην τεχνολογία και τις απαιτήσεις των χρηστών, το NR έχει σχεδιαστεί όχι μόνο για να διευκολύνει τις τρεις καθορισμένες κατηγορίες ITU, αλλά και να παρέχει χώρο για μελλοντική ανάπτυξη της τεχνολογίας, όπως φαίνεται στο Σχήμα 8. Οι τρεις βασικές κατηγορίες που διαμόρφωσε η ITU για 5G [8] έχουν ως εξής:



Σχήμα 8 - Χαρακτηριστικά και σχέδιο βελτίωσης για το μελλοντικό 5G

1. βελτιωμένη κινητή ευρυζωνικότητα (enhanced mobile broadband - eMBB),
2. εξαιρετικά αξιόπιστες επικοινωνίες χαμηλού λανθάνοντος χρόνου (ultra-reliable low-latency communications - URLLC) και

3. μαζικές επικοινωνίες τύπου-μηχανής (massive machine-type communications - mMTC).

Σημασία του URLLC

Και οι τρεις κατηγορίες, που ορίζονται από την ITU, έχουν τη σημασία τους όπως φαίνεται παρακάτω [9]:

- Το **eMBB (enhanced mobile broadband)** εστιάζει σε υψηλότερο ρυθμό δεδομένων, με μεγάλο ωφέλιμο φορτίο και εφαρμογές παρατεταμένης σύνδεσης στο Διαδίκτυο. Πιθανές εφαρμογές που θα μπορούσαν να περιλαμβάνουν είναι: cloud office, gaming, εικονική & επαυξημένη πραγματικότητα (VR / AR) και βίντεο τριών διαστάσεων / εξαιρετικά υψηλής ευκρίνειας (3D / UHD).
- Το **URLLC (ultra-reliable low latency communications)** εστιάζει σε μια εξαιρετικά αποκρίσιμη σύνδεση με εξαιρετικά χαμηλό λανθάνοντα χρόνο. Ο ρυθμός δεδομένων δεν αναμένεται να είναι πολύ υψηλός στο URLLC, αλλά προσφέρει υψηλή κινητικότητα. Πιθανές εφαρμογές του URLLC περιλαμβάνουν τον βιομηχανικό αυτοματισμό, αυτόνομη οδήγηση, κρίσιμες αποστολές / εφαρμογές και απομακρυσμένη ιατρική βοήθεια.
- Το **mMTC (massive machine-type communications)** εστιάζει στην παροχή συνδεσιμότητας σε μεγάλο αριθμό συσκευών (IoT), αλλά με χαμηλή αξιοπιστία. Μπορεί να παρέχει επικοινωνία μεγάλης εμβέλειας με ενεργειακή απόδοση και ασύγχρονη πρόσβαση. Τέτοια χαρακτηριστικά είναι πολύ κατάλληλα για συσκευές χαμηλής ισχύος, σε τεράστια ποσότητα.

Η επίτευξη των απαιτήσεων για URLLC αποτελεί πρόκληση και θα απαιτήσει τεράστιες τροποποιήσεις στο σχεδιασμό του συστήματος της τρέχουσας τηλεπικοινωνιακής υποδομής, καθώς επίσης θα διαδραματίσει αναπόσπαστο ρόλο, στην εποχή των 5G δικτύων. Αν και οι τρέχουσες απαιτήσεις των χρηστών βασίζονται αρχικά σε υψηλό εύρος ζώνης, η καθυστέρηση και η αξιοπιστία αναμένεται επίσης να διαδραματίσουν ζωτικό ρόλο σε εφαρμογές, σε πραγματικό χρόνο.

3.2 Ζητήματα που προκύπτουν στην εφαρμογή των URLLC

Ποιότητα υπηρεσίας (QoS) στις URLLC

Οι εφαρμογές που επικεντρώνονται στο URLLC απαιτούν παράδοση δεδομένων από άκρο σε άκρο (E2E) με αξιοπιστία, ασφάλεια και ελάχιστο λανθάνοντα χρόνο. Τέτοιες απαιτήσεις οδήγησαν το 3ο Generation Partnership Project (3GPP) να ορίσει τις επιθυμητές απαιτήσεις ποιότητας υπηρεσίας (QoS), όπως λανθάνοντα χρόνο στον αέρα 1 ms και 99,999% αξιοπιστία συστήματος για το URLLC. Αυτές οι απαιτήσεις QoS για το URLLC, ανάλογα με τις διάφορες εφαρμογές της, παρουσιάζονται στον Πίνακα 1.

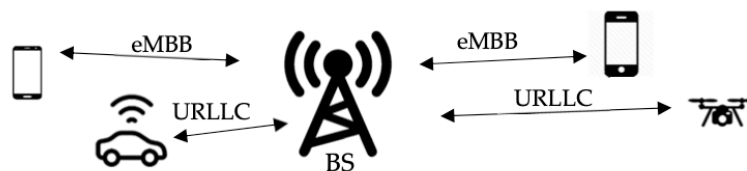
Industry	Error Rate/Reliability	Latency (ms)
Augmented/Virtual Reality	$10^{-3} - 10^{-5}$	5-10
Autonomies/guided vehicle	$\geq 10^{-3}$	5-10
Automated Industry	$10^{-5} - 10^{-9}$	1
IoT (Internet of things/Tactile Internet)	10^{-5}	1

Πίνακας 1 - Αναμενόμενες απαιτήσεις ποιότητας υπηρεσίας (QoS) για το URLLC

Η ποιότητα του καναλιού και η έλλειψη αποκλειστικού εύρους ζώνης μπορεί να αποτελέσουν εμπόδιο στην ικανοποίηση της επιθυμητής απαίτησης καθυστέρησης για το URLLC. Η επίτευξη της επιθυμητής αξιοπιστίας στο URLLC είναι επίσης μια πρόκληση. Καθώς αρκετές εφαρμογές για κινητές συσκευές βασίζονται σε διαφορετικές μεθόδους αναμετάδοσης, η αναμετάδοση δεδομένων στο URLLC μπορεί να υποβαθμίσει την καθυστέρηση, εκτός εάν οι μέθοδοι αναμετάδοσης έχουν σχεδιαστεί σύμφωνα με τις απαιτήσεις του URLLC. Η τρέχουσα εξέλιξη των 4G δικτύων (LTE) δεν είναι αρκετά κατάλληλη, για τη διαχείριση των απαιτήσεων URLLC. Υπάρχει μια αντιστάθμιση μεταξύ αξιοπιστίας και καθυστέρησης, η οποία μπορεί να βασίζεται στις απαιτήσεις της εφαρμογής. Το φυσικό στρώμα παίζει σημαντικό ρόλο στην επίτευξη τόσο χαμηλού λανθάνοντος χρόνου και αξιοπιστίας. Ωστόσο, υπάρχουν τρεις μεγάλες ανησυχίες. Πρώτον, θα πρέπει να ελαχιστοποιηθεί η επιβάρυνση του συστήματος όσον αφορά την πρόσβαση στο κανάλι, τον χρονοπρογραμματισμό του χρήστη και την κατανομή πόρων. Δεύτερον, η πιθανότητα σφάλματος πακέτου θα πρέπει να ελαχιστοποιηθεί για να επιτευχθεί χαμηλότερος λανθάνων χρόνος. Τρίτον, πρέπει να δοθεί προτεραιότητα στη μετάδοση πακέτων URLLC και θα πρέπει να μεταδοθούν μόλις δημιουργηθούν. Αν και οι απαιτήσεις που αναφέρονται από το 3GPP και το ITU για το URLLC βασίζονται σε μονόδρομη επικοινωνία, ο λανθάνων χρόνος πρέπει να καθοριστεί με βάση την επικοινωνία E2E.

Συνύπαρξη με το eMBB

Τα 5G δίκτυο πρέπει να παρέχουν υπηρεσίες σε διαφοροποιημένες εφαρμογές με διαφορετικές απαιτήσεις. Οι εφαρμογές που βασίζονται στο URLLC απαιτούν χαμηλό λανθάνοντα χρόνο με υψηλή αξιοπιστία, ενώ το eMBB απαιτεί υψηλούς ρυθμούς δεδομένων. Για την συνύπαρξη URLLC και eMBB στους ίδιους φυσικούς πόρους, όπως φαίνεται στο Σχήμα 9, απαιτείται μια αποτελεσματική μέθοδος για τη διατήρηση του απαιτούμενου QoS.



Σχήμα 9 - Συνύπαρξη URLLC και eMBB

Το προτεινόμενο πλαίσιο 5G δείχνει υποσχόμενα αποτελέσματα για τις απαιτήσεις λανθάνοντος χρόνου URLLC, χρησιμοποιώντας διαφορετικά χρονικά διαστήματα μετάδοσης (transmission time intervals - TTI) για το URLLC και το eMBB, ώστε να ικανοποιήσουν τις επιθυμητές φασματικές αποδόσεις τους (spectral efficiencies - SE). Για παράδειγμα, η URLLC κίνηση μπορεί να προγραμματιστεί με μικρότερη TTI διάρκεια, για την επίτευξη του στόχου

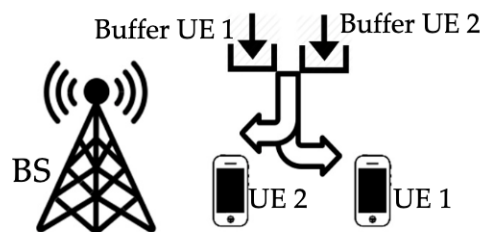
χαμηλού λανθάνοντος χρόνου, και η επισκεψιμότητα eMBB μπορεί να προγραμματιστεί με μεγάλη TTI διάρκεια, για να διατηρήσει τις SE απαιτήσεις. Ωστόσο, μια τέτοια περίπτωση θα επιφέρει επιπλέον επιβάρυνση στη σηματοδότηση ελέγχου, η οποία μπορεί να οδηγήσει στην υποβάθμιση της χωρητικότητας του καναλιού ελέγχου (control channel - CCH).

Σχεδιασμός URLLC πακέτων

Ο σχεδιασμός των πακέτων είναι ένα από τα βασικά ζητήματα στο URLLC. Με μια αποτελεσματική δομή πακέτων, ο λανθάνων χρόνος μπορεί να ελαχιστοποιηθεί όσον αφορά τον χρόνο επεξεργασίας πακέτων και τον χρόνο μετάδοσης πακέτων. Η επεξεργασία πακέτων περιλαμβάνει τον χρόνο απόκτησης ενός πακέτου, την πρόσβαση σε πληροφορίες καναλιού, την εξαγωγή πληροφοριών προγραμματισμού (έλεγχος), την αποκωδικοποίηση του πακέτου και τον έλεγχο σφαλμάτων.

Χρονο-προγραμματισμός του URLLC

Ο χρονο-προγραμματισμός μιας απροσδόκητης δημιουργίας πακέτων από το URLLC είναι ένα από τα πιο σημαντικά ζητήματα. Όταν φτάνουν τα δεδομένα χρήστη, αποθηκεύονται σε ένα buffer μετάδοσης για συγκεκριμένο χρήστη, όπως φαίνεται στο Σχήμα 10. Η μετάδοση κάθε πακέτου λαμβάνει τουλάχιστον ένα TTI. Ωστόσο, οι συνθήκες του ραδιο-καναλιού, το μέγεθος ωφέλιμου φορτίου και η διαθεσιμότητα πόρων ενδέχεται να αναγκάσουν τον προγραμματισμό να αυξήσει τα TTI ενός πακέτου.



Σχήμα 10 - Buffer χρηστών

Ενεργειακή απόδοση των συσκευών των χρηστών

Οι περισσότερες από τις ασύρματες συσκευές χρησιμοποιούν μια λειτουργία αναστολής (sleep mode) για εξοικονόμηση ενέργειας. Οι συσκευές πρέπει να ενεργούν αμέσως μόλις λάβουν ένα πακέτο από ένα δίκτυο, για να αποφευχθεί οποιαδήποτε καθυστέρηση. Ομοίως, οι συσκευές ελέγχουν περιοδικά τα πακέτα που περιμένουν στο δίκτυο, ώστε να αποφευχθεί η καθυστέρηση. Οι τρέχουσες καταστάσεις εξοικονόμησης ενέργειας που ορίζονται για τους εξοπλισμούς των χρηστών (User Equipment - UE) δεν είναι κατάλληλες για υπηρεσίες που βασίζονται σε URLLC. Τα UEs μπορεί να χάσουν γρήγορα την μπαταρία τους, ως αποτέλεσμα των συνεχών ελέγχων δεδομένων που πραγματοποιούν, μέσω του δικτύου.

Ζητήματα Handover στο URLLC

Η μεταβίβαση (handoff / handover) είναι ένα αναπόσπαστο μέρος κάθε τηλεπικοινωνιακής υποδομής. Το NR για τα 5G πρέπει να μπορεί να υποστηρίξει τις απαιτήσεις κινητικότητας που παρουσιάζονται στον Πίνακα 2.

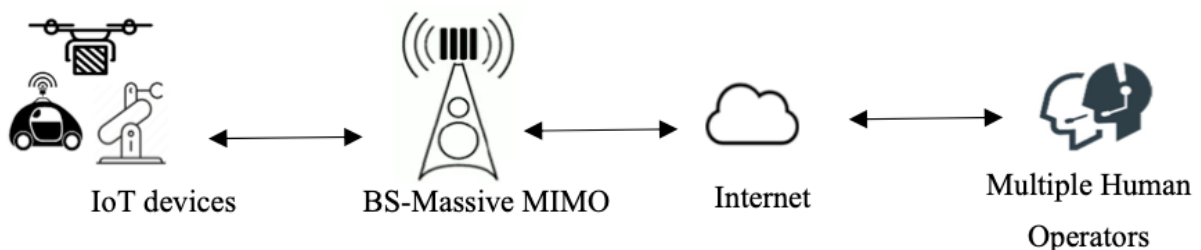
User	Speed
Normal vehicle	120 km/h
Drones	160 km/h
High-speed vehicle	250 km/h
Trains	500 km/h

Πίνακας 2 - Απαιτήσεις κινητικότητας για το URLLC

Η βασική διαδικασία μεταβίβασης στα 5G, είναι παρόμοια με αυτήν της μεταβίβασης στα LTE. Το NR υποστηρίζει την μεταβίβαση σε δύο διαφορετικά επίπεδα, για τη διαχείριση της απρόσκοπτης λειτουργίας της. Η κινητικότητα, σε επίπεδο κυψέλης (cell), διαχειρίζεται χρησιμοποιώντας ένα επίπεδο ελέγχου πόρων ραδιοσυχνοτήτων (radio resource control - RRC), με τον ίδιο τρόπο όπως στα LTE. Καθώς το NR υιοθετεί τις ίδιες διαδικασίες μεταβίβασης σηματοδότησης με το LTE, κληρονομεί δύο σοβαρά ζητήματα της ανθεκτικότητας στην κινητικότητα (mobility robustness) και του χρόνου διακοπής της κινητικότητας (mobility interruption time - MIT).

3.3 Ο Ρόλος του URLLC στο IoT

Παρόλο που το mMTC έχει κατηγοριοποιηθεί και σχεδιαστεί ειδικά για να ικανοποιεί τις απαιτήσεις του IoT, το URLLC διατηρεί τα βασικά συστατικά για τις αποτελεσματικές λειτουργίες του IoT. Όταν πολλοί χειριστές ελέγχουν συσκευές απομακρισμένα, όπως φαίνεται στο Σχήμα 11, η καθυστέρηση και η αξιοπιστία παίζουν ζωτικό ρόλο στην ομαλή λειτουργία των συσκευών IoT. Είναι γενικά μεγάλη πρόκληση, η χρήση συσκευών IoT (mission-critical και real-time), μέσω ασύρματης σύνδεσης. Επίσης, η τεχνολογία πολλαπλών εισόδων-εξόδων (mMIMO) γίνεται εφαρμόσιμη για τη διαχείριση ενός τεράστιου αριθμού συσκευών.



Σχήμα 11 - Βασική λειτουργία IoT μέσω tactile internet σε mMIMO

Με την ενσωμάτωση τεχνολογιών του "Απτού Διαδικτύου", του URLLC και του mMIMO, μπορούν να ξεπεραστούν πολλά πιθανά επιχειρησιακά ζητήματα πραγματικού-χρόνου IoT. Στις ακόλουθες υποενότητες εξηγούνται ορισμένα από τα βασικά προβλήματα των URLLC, κατά τη λειτουργία συσκευών IoT.

URLLC και μαζική συνδεσιμότητα συσκευών

Οι υπάρχουσες υπηρεσίες και οι προδιαγραφές των κινητών συσκευών, δεν είναι πλήρως εξοπλισμένες για την οικονομικά αποδοτική παροχή των URLLC. Επιπλέον, δεν έχουν την ικανότητα να παρέχουν μια αξιόπιστη επικοινωνία χαμηλού λανθάνοντος χρόνου, σε

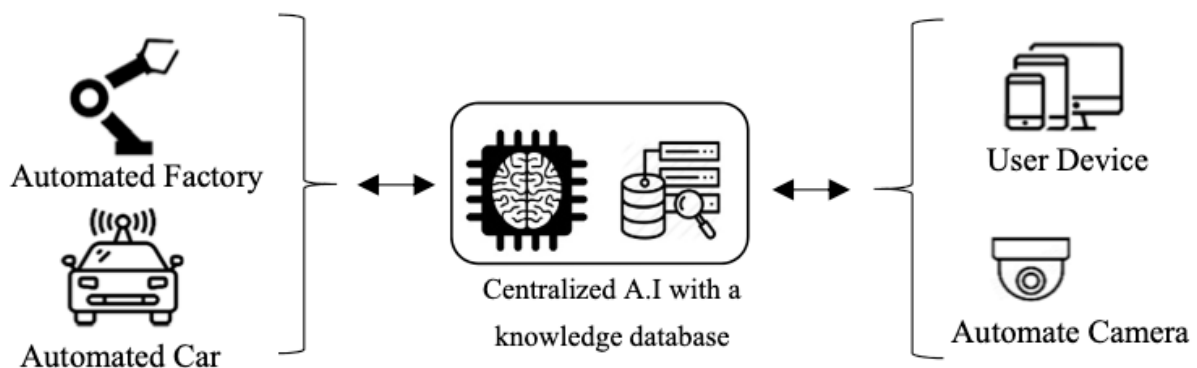
πολλούς χρήστες ταυτόχρονα. Είναι ιδιαίτερα δύσκολο να διασφαλιστεί η αξιοπιστία και η καθυστέρηση σε επίπεδο σύνδεσης, σε μια ευρεία περιοχή, όπως φαίνεται στο Σχήμα 9.

Ωστόσο, πόροι όπως η ενέργεια και η υπολογιστική ισχύς, των συσκευών IoT, διαδραματίζουν επίσης σημαντικό ρόλο, όταν λειτουργούν μέσω URLLC. Για να πληρούν τις απαιτήσεις καθυστέρησης για το URLLC, οι συσκευές IoT αναγκάζονται να χρησιμοποιούν υπερβολική υπολογιστική / επεξεργαστική ισχύ, που δεν είναι κατάλληλη για τη διάρκεια ζωής των συσκευών IoT. Ωστόσο, οι περισσότερες συσκευές IoT έχουν περιορισμένους πόρους [10].

Τεχνητή νοημοσύνη στη συσκευή και URLLC

Τα υφιστάμενα δίκτυα επικοινωνίας έχουν σχεδιαστεί με κεντρική διαχείριση των πόρων τους, με σκοπό την επίτευξη υψηλού ρυθμού δεδομένων. Για την εκπλήρωση των επερχόμενων απαιτήσεων καθυστέρησης και αξιοπιστίας, η αρχιτεκτονική των δικτύων ωθείται πλέον να είναι αποκεντρωμένη. Οι περισσότερες από τις συσκευές IoT έχουν σχεδιαστεί για να ελέγχονται από απόσταση ή να λειτουργούν σε περιορισμένο και απλό περιβάλλον. Ωστόσο, ορισμένες από τις μηχανές / εφαρμογές απαιτούν μηχανική εκμάθηση (ML) ή τεχνητή νοημοσύνη (AI) προκειμένου να είναι πιο αποτελεσματικές και αποδοτικές για την επίτευξη των στόχων των εφαρμογών.

Είναι σαφές ότι η συνήθης προσέγγιση μηχανικής εκμάθησης που βασίζεται στην κεντροποιημένη αρχιτεκτονική, όπως φαίνεται στο Σχήμα 12, δεν είναι πολύ κατάλληλη για τις εφαρμογές που απαιτούν χαμηλό λανθάνων χρόνο. Ωστόσο, οι περισσότερες από τις συσκευές IoT έχουν περιορισμένους πόρους και τέτοιες συσκευές ενδέχεται να μην είναι σε θέση να πραγματοποιήσουν αποτελεσματικά αλγόριθμους που βασίζονται σε ML ή AI, ενώ ικανοποιούν τις απαιτήσεις καθυστέρησης. Κατά συνέπεια, μελετούνται αποκεντρωμένες προσεγγίσεις, όπως καταναμημένα συστήματα μηχανικής εκμάθησης ή τεχνητής νοημοσύνης στα ακραία δίκτυα, που περιλαμβάνουν συλλογική επίλυση προβλημάτων. Ακόμη και με τη μηχανική εκμάθηση στη συσκευή, οι συσκευές απαιτούν σημαντική αποθήκευτική και υπολογιστική ικανότητα, την οποία δεν διαθέτουν οι περισσότερες από τις συσκευές IoT.



Σχήμα 12 - Έννοια της παραδοσιακής μηχανικής μάθησης (ML) (κεντρική). AI, τεχνητή νοημοσύνη

URLLC και Vehicle-to-Vehicle (V2V)

Μία από τις πιο ελπιδοφόρες και σημαντικές εφαρμογές του μελλοντικού δικτύου 5G είναι η επικοινωνία V2V. Η επικοινωνία V2V είναι μία από τις τεχνολογίες που μπορούν να οδηγήσουν σε ένα ευφυές σύστημα μεταφορών. Φυσικά, για το V2V, η οδική ασφάλεια (ευαισθητοποίηση απόστασης για αποφυγή σύγκρουσης, όρια ταχύτητας, ταξίδια βάσει

τοποθεσίας, περιβαλλοντικές πληροφορίες, κατάσταση δρόμου) παίζει ζωτικό ρόλο και είναι εξαιρετικά κρίσιμη ως προς το χρόνο, όπως φαίνεται στο σχήμα 13.



Σχήμα 13 - Βασική οδική ασφάλεια οχήματος προς όχημα (V2V)

Λόγω της ανησυχίας για την ασφάλεια, το Ευρωπαϊκό Ινστιτούτο Τηλεπικοινωνιών Πρότυπο (ETSI) έχει τυποήσει πρωτόκολλα ασφάλειας που βασίζονται σε δύο μηνύματα βασισμένα στην ετοιμότητα (awareness-based messages): αποκεντρωμένο μήνυμα περιβαλλοντικής ειδοποίησης (decentralized environmental notification message - DENM) και μήνυμα συνεργατικής ετοιμότητας (cooperative awareness message - CAM). Η επικοινωνία V2V πρέπει να έχει το χαρακτηριστικό χαμηλού λανθάνοντος χρόνου του URLLC, ώστε να αντικατοπτρίζει τα οχήματα με βάση τα αναφερόμενα πρότυπα ασφαλείας. Η μεταβίβαση (handover / handoff) εξακολουθεί να αποτελεί πρόβλημα στην υλοποίηση του URLLC, λόγω της κινητικότητας των οχημάτων (όπως φαίνεται στον Πίνακα 2).

Ενεργειακή απόδοση IoT

Στις επικοινωνίες IoT και μηχανή-με-μηχανή (machine-to-machine - M2M), η ενεργειακή απόδοση θα διαδραματίσει σημαντικό ρόλο, ειδικά για εξοπλισμούς όπως αισθητήρες με περιορισμένους πόρους, για παράδειγμα, περιορισμένη μπαταρία και υπολογιστική ισχύ. Ορισμένες εφαρμογές των URLLC απαιτούν πολλούς υπολογισμούς, οι οποίοι δεν μπορούν να πραγματοποιηθούν από ορισμένες συσκευές IoT.

Πυκνότητα σταθμών βάσης και D2D επικοινωνίες

Μία από τις σημαντικότερες περιπτώσεις χρήσης για το 5G URLLC, είναι η υποστήριξη του ασύρματου βιομηχανικού αυτοματισμού (π.χ. Industry 4.0 [11]). Στον βιομηχανικό αυτοματισμό, οι επικοινωνίες M2M και D2D απαιτούν χαρακτηριστικά URLLC, για την παράδοση σύντομων μηνυμάτων από έναν ελεγκτή, σε ένα σύμπλεγμα αισθητήρων ή μηχανών. Ένα λογικό ποσό κίνησης αναμένεται να αντιμετωπιστεί με WiFi και τεχνολογία μικρών κυψελών, με βάση τις συχνότητες mmWave, όπως φαίνεται στο σχήμα 11. Το έργο METIS εκτιμά ότι οι πυκνές μητροπολιτικές περιοχές ενδέχεται να έχουν έως και 200 συσκευές ανά τετραγωνικό χιλιόμετρο, με αναμενόμενο όγκο δεδομένων κάθε συσκευής, έως και 500 Gbyte / μήνα. Ένας τέτοιος αριθμός συσκευών θα μπορούσε να αναγκάσει μια δραστική αλλαγή στην υποδομή δικτύου, ώστε να αποφευχθεί η συμφόρηση στη διαθεσιμότητα των υπηρεσιών. Η βελτίωση της φασματικής απόδοσης (SE) θα μπορούσε να είναι μια απάντηση, για την υποστήριξη του όγκου των δεδομένων.

Η τοπολογία δικτύου mMIMO μπορεί να υποστηρίξει κυκλοφορία υψηλής πυκνότητας [12]. Η θεωρητική απόδοση και οι περιορισμοί των mMIMO επικοινωνιών μελετώνται εκτενώς από έναν αριθμό ερευνητών [12–14].

3.4 3GPP Προτυποποίηση για τις URLLC επικοινωνίες

Η 3GPP και οι συνεργάτες της εξακολουθούν να εργάζονται και να σχεδιάζουν βελτιώσεις σε πολλές πτυχές της αρχιτεκτονικής 5G. Μερικά από τα πρόσφατα κρίσιμα σημεία που επισημάνθηκαν από το 3GPP Release 16, περιλαμβάνουν τα ακόλουθα:

- Μεταβίβαση (Handover / Handoff)
- Κινητικότητα χρηστών (User Mobility)
- Παρακολούθηση QoS για την υποστήριξη των URLLCs
- Πιθανό σχέδιο ολοκλήρωσης 5G από 3GPP σε Αυτόνομα (Stand-Alone) και Μη-αυτόνομα (Non-Stand-Alone) δίκτυα

Ενότητα 4 – Cloud Computing

Εισαγωγή

Υπάρχουν διάφοροι διαφορετικοί ορισμοί της "Υπολογιστικής Νέφους" (Cloud Computing). Η πλειοψηφία τους ασχολείται αποκλειστικά με τεχνολογικές δυσκολίες. Το Cloud Computing είναι ένας όρος που αναφέρεται σε μια τεράστια συλλογή ποικίλου λογισμικού, υλικού και άλλων υπηρεσιών, τις οποίες μπορεί να χειριστεί κανείς μέσω του περιβάλλοντος "cloud". Ολόκληρη η βάση των πόρων τους είναι διαθέσιμη, ανά πάσα στιγμή και από οποιαδήποτε τοποθεσία. Η υπηρεσία του Cloud Παρόχου διατίθεται βάσει πληρωμής ανά-χρήση. Δηλαδή, επιδεικνύει υψηλό βαθμό προσαρμοστικότητας στη χρήση αυτών των υπηρεσιών, ως νέοι πόροι οι οποίοι είναι πάντα διαθέσιμοι.

Η μεθοδολογία είναι η πιο αποτελεσματική στρατηγική για τη δυναμική αύξηση των δυνατοτήτων ή της χωρητικότητας, χωρίς να απαιτείται νέα υποδομή, σε όλους τους κλάδους της μηχανικής, των επιχειρήσεων και άλλων επιστημών.

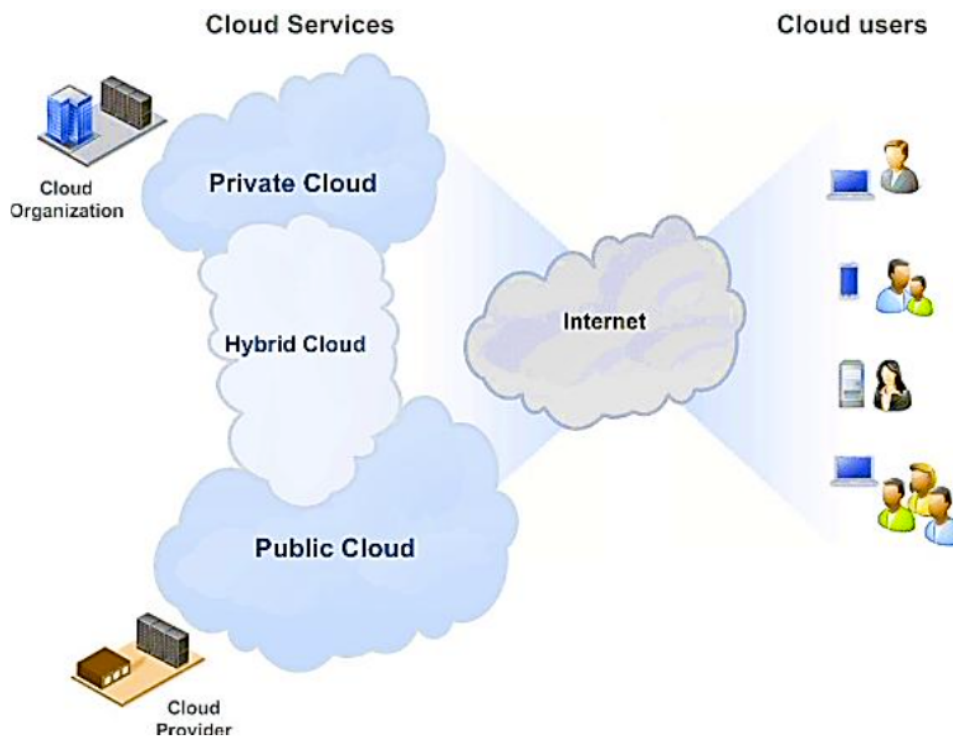
Το Εθνικό Ινστιτούτο Προτύπων και Τεχνολογίας των Η.Π.Α. (U.S. National Institute of Standards and Technology) ορίζει το Cloud Computing ως έναν τρόπο παροχής - στους χρήστες - στιγμιαίας πρόσβασης, κατ' απαίτηση, σε μια κοινόχρηστη δεξαμενή αναδιαμορφώσιμων υπολογιστικών πόρων (όπως διακομιστές, αποθηκευτικός χώρος κ.α.), οι οποίοι μπορούν να φτάσουν στην ώρα τους, χωρίς να έχουν υποστεί κάποια διαταραχή ή περεταίρω επέκταση.

Το Cloud Computing, ως έννοια, εμφανίστηκε μεταξύ 2004 και 2005. Πριν από το 1994, το εικονίδιο του Cloud συμβόλιζε την έννοια του Διαδικτύου. Το 2006, όταν ιδρύθηκε το Web Amazon Service (AWS) με πρωταρχικό στόχο το Utility Computing, ανέπτυξε τη θεμελιώδη ιδέα του κλάδου για το Cloud Computing. Ο J.C.R. Licklider πρότεινε την ιδέα ενός «διαγαλαξιακού δικτύου υπολογιστών» στη δεκαετία του 1960, ενώ ήταν υπεύθυνος για την προώθηση του ARPANET (Advanced Research Projects Agency Network) το 1969.

Η εικονικοποίηση των Cloud υπηρεσιών (virtualization), η γρήγορη ελαστικότητα (elasticity), η ευρεία συνδεσιμότητα δικτύου (connectivity) και η καλύτερη απόδοση (performance) είναι οι κύριοι μοχλοί της εκθετικής ανάπτυξης αυτής της τεχνολογίας. Ενώ συνήθως, με τα συνηθισμένα πακέτα λογισμικού, μια εφαρμογή εγκαθίσταται στον κύριο διακομιστή του οργανισμού και στη συνέχεια σε κάθε προσωπικό υπολογιστή.

4.1 Αρχιτεκτονική Cloud

Όσον αφορά την αρχιτεκτονική, είναι δύσκολο να πει κανείς πώς το cloud computing είναι ισοδύναμο ή διαφορετικό από τα παραδοσιακά υπολογιστικά μοντέλα ή πώς αυτές οι ισοδυναμίες ή διαφορές επηρεάζουν τη διαχείριση, τη λειτουργία και τις πρακτικές πτυχές των διαδικασιών ασφάλειας δικτύου και πληροφοριών. Το Σχήμα 14 απεικονίζει τους διαφορετικούς τύπους μοντέλων στο Νέφος. Αυτοί είναι: α) Δημόσιο Cloud (Public Cloud), β) Ιδιωτικό Cloud (Private Cloud) και γ) Υβριδικό Cloud (Hybrid Cloud). Παρόλα αυτά, ορισμένες cloud υπηρεσίες, όπως το Community Cloud και το Mobile Cloud, είναι εμπορικά βιώσιμες.



Σχήμα 14 - Σημαντικός δομικός σχεδιασμός του Cloud

Για παράδειγμα, ένας πάροχος υπηρεσιών μπορεί να προσφέρει χώρο αποθήκευσης, καθώς και άλλους πόρους, σε ολόκληρη την κοινότητα, δωρεάν ή με τιμή κόστους ανά χρήση.

Μια εσωτερικά ή εξωτερικά διαχειριζόμενη, εγχώρια ή εξωτερικά φιλοξενούμενη ιδιωτική υποδομή cloud, είναι αφιερωμένη σε έναν οργανισμό.

Όσον αφορά την ασφάλεια, υπάρχουν λιγότερες ανησυχίες, κατά τη φιλοξενία mission-critical προγραμμάτων σε ιδιωτικά cloud. Τα ιδιωτικά και δημόσια νέφη μπορούν επίσης να συνυπάρχουν σε ένα υβριδικό περιβάλλον cloud. Όταν συνδυάζονται πολλά μοντέλα νέφους

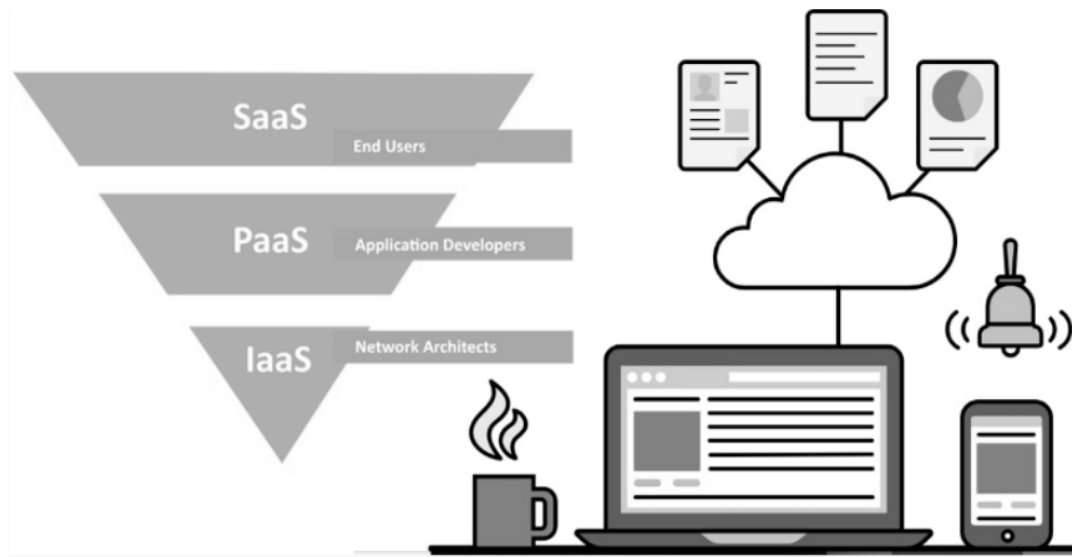
(private, communal, ή public), παραμένουν μεν χωριστά, αλλά συνδέονται μεταξύ τους, επιτρέποντας τη χρήση ενός ευρέος φάσματος μοτίβων ανάπτυξης.

Υπάρχουν πολλές επιχειρήσεις που έχουν κοινές ανησυχίες (ασφάλεια, συμμόρφωση, δικαιοδοσία κ.λπ.) και θέλουν να συγκεντρώσουν τους υπολογιστικούς τους πόρους, ώστε να δημιουργήσουν ένα κοινοτικό νέφος (community cloud). Αυτό το νέφος μπορεί να διαχειρίζεται εσωτερικά ή από ένα τρίτο οργανισμό, και μπορεί να φιλοξενηθεί τοπικά ή στο cloud. Ωστόσο, επιτυγχάνεται μόνο ένα μέρος των δυνατοτήτων εξοικονόμησης του cloud computing, επειδή το κόστος κατανέμεται σε μεγαλύτερο αριθμό χρηστών σε ένα Private Cloud. Χρησιμοποιώντας το Community Cloud, πολλοί πάροχοι υπηρεσιών συνεργάζονται για να δημιουργήσουν μια διαδικτυακή κοινότητα γύρω από μια συγκεκριμένη υπηρεσία.

Η φράση "Κινητή Υπολογιστική Νέφος - Mobile Cloud Computing (MCC)" αναφέρεται στη χρήση υπηρεσιών υπολογιστικού νέφους σε κινητές συσκευές. Λόγω της διαθεσιμότητας αυτού του δικαιώματος εισόδου κατ' απαίτηση, τα δεδομένα και οι συναλλαγές τηρούνται πιο ελεύθερα στο Διαδίκτυο, παρά σε οντότητες των ίδιων των συσκευών. Ένας ανεξάρτητος διακομιστής μπορεί να ελέγχει cloud εφαρμογές για φορητές συσκευές, οι οποίες στη συνέχεια αποστέλλονται στη συσκευή του χρήστη. Στην παγκόσμια αγορά κινητής τηλεφωνίας, αυτές οι εφαρμογές αντιπροσωπεύουν ένα ταχέως αναπτυσσόμενο τμήμα.

4.2 Τύποι Νέφους με Βάση το Μοντέλο Παράδοσης

Όπως υποδεικνύεται στο Σχήμα 15, οι διακομιστές υπολογιστικού νέφους δημιουργούν τρεις υπηρεσίες που ορίζονται κυρίως ως α) Υποδομή ως υπηρεσία (IaaS), β) Λογισμικό ως υπηρεσία (SaaS) και γ) Πλατφόρμα ως υπηρεσία (PaaS). Το IaaS είναι η παροχή υπολογιστικής υποδομής ως υπηρεσία, συνήθως με τη μορφή ενός περιβάλλοντος εικονικοποίησης πλατφόρμας. Αυτή η βασική προσέγγιση υπολογιστικού νέφους παρέχει επεξεργαστές και άλλους πόρους, με τη μορφή σημαντικών ή γενικά εικονικών μηχανών. Επίσης, το SaaS παραδίδει εφαρμογές σε εκατομμύρια πελάτες, μέσω προγράμματος περιήγησης. Χρησιμοποιείται συχνά σε συστήματα προγραμματισμού πόρων επιχειρήσεων (Enterprise Resource Planning - ERP) και σε συστήματα οργάνωσης μεμονωμένων πόρων. Το Yahoo και η Google είναι δύο εφαρμογές που παρέχουν αυτού του είδους τις υπηρεσίες. Τέλος, το PaaS παρέχει ένα πλαίσιο/πλατφόρμα ως επίπεδο υπηρεσίας, πάνω στο οποίο μπορούν να χτιστούν οι εφαρμογές λογισμικού, με συνέπεια και αξιοπιστία. Η Forrester Research ορίζει το PaaS ως μια εξωτερικά φιλοξενούμενη υπηρεσία, η οποία παρέχει ένα ολοκληρωμένο πλαίσιο για την ανάπτυξη, την διαχείριση και την ενεργοποίηση των εφαρμογών. Το Cloud Foundry, το Microsoft Azure, το Amazon Elastic Beanstalk, το Google App Engine, το EngineYard και το Mendix είναι όλα παραδείγματα του PaaS.



Σχήμα 15 - Μοντέλα παράδοσης υπηρεσιών cloud

Στις περισσότερες περιπτώσεις, το cloud computing αποτελείται από τρία θεμελιώδη στοιχεία: α) τους διακομιστές (servers), β) κέντρα δεδομένων (data centers) και γ) πελάτες (clients). Είναι όλα συνδεδεμένα μέσω του Διαδικτύου, και είναι προσβάσιμα ως ρυθμίσεις δικτύου (network setups).

Κέντρα δεδομένων και κατακεμημένοι διακομιστές

Συνήθως, τα κέντρα δεδομένων στεγάζουν τις υπηρεσίες που επιθυμούν οι αγοραστές, ανά πάσα στιγμή. Είναι συνήθως ένα μεγάλο δωμάτιο που περιέχει όλους τους διακομιστές που παρέχουν αυτές τις υπηρεσίες και υποστηρίζουν τη λειτουργία τους. Είναι επίσης δυνατό να ενσωματωθούν εικονικοί διακομιστές που μειώνουν τον συνολικό αριθμό φυσικών διακομιστών και το κενό που προκύπτει. Οι κατακεμημένοι διακομιστές είναι ένας όρος που αναφέρεται σε ομαδοποιήσεις διακομιστών, οι οποίοι δεν βρίσκονται φυσικά στην ίδια τοποθεσία. Δεν υπάρχει ιδιαίτερο πρόβλημα εάν αυτοί οι διακομιστές έχουν παραβιαστεί. Ο τελικός χρήστης, δεν θα αντιληφθεί καμία διαφορά. Οι κατακεμημένοι διακομιστές προσφέρουν μεγαλύτερη ελαστικότητα, επειδή η τοποθεσία τους και η άμεση σύνδεσή τους στο διαδίκτυο δεν έχουν σημασία. Υπάρχει η επιλογή δημιουργίας αντιγράφου ασφαλείας σε άλλους διακομιστές. Επιπλέον, δεν υπάρχουν περιορισμοί στην εντατικοποίηση των ρυθμίσεων των cloud υπηρεσιών.

Πελάτες

Οι πελάτες αντιπροσωπεύονται συνήθως από τυπικούς φορητούς ή επιτραπέζιους υπολογιστές. Άλλοι τύποι πελατών είναι τα φορητά τερματικά, όπως για παράδειγμα τα PDA, αλλά και τα κινητά τηλέφωνα. Τα PDA απεικονίζουν ένα σημαντικό όγκο κίνησης, όσον αφορά την υπολογιστική νέφος. Προσφέρουν σημαντική κινητικότητα σε όποιον προσπαθεί να φτάσει στο cloud. Κατά γενικό κανόνα, υπάρχουν τρεις διαφορετικοί τύποι πελατών προς διαφοροποίηση: λεπτοί, κινητοί και χοντροί (thin, mobile & thick). Οι Mobile πελάτες συνοδεύονται συνεχώς από τα κινητά τηλέφωνα. Οι Thin πελάτες εκτελούν διεργασίες σε ξεχωριστό λογισμικό και υλικό. Ότι βλέπει ένας χρήστης, το αναγνωρίζει ο διακομιστής, αλλά όχι ο προσωπικός σκληρός δίσκος και το λειτουργικό του σύστημα.

Συγκριτικά, οι Thick πελάτες χρησιμοποιούν τους σκληρούς τους δίσκους και έχουν πρόσβαση στο cloud, μέσω ενός προγράμματος περιήγησης, σε συχνή βάση.

Χρήστες

Φυσικά, οι χρήστες θα εμφανίζονται μετά τους πελάτες. Χωρίς χρήστες, δεν υπάρχει λόγος να υπάρχει το νέφος. Τρεις διαφορετικοί τύποι χρηστών μπορούν να ταξινομηθούν, χρησιμοποιώντας την cloud τεχνολογία:

1) Οι Cloud Προγραμματιστές (Internet-infrastructure Developers) είναι οι ειδικοί, οι οποίοι επεκτείνουν και συντηρούν το cloud. Αυτοί οι προγραμματιστές θα πρέπει να διασφαλίσουν την ακεραιότητα των συνδεδεμένων υπηρεσιών και να τις δημιουργήσουν πλήρως [15]. Η ευθύνη τους είναι να παρέχουν μια εύκολη διεπαφή στους τελικούς πελάτες, διατηρώντας παράλληλα στο ελάχιστο τα ζητήματα πολυπλοκότητας.

2) Οι δημιουργοί ή οι κατασκευαστές υπηρεσιών (Service Authors / Makers) διαφέρουν αρκετά από τους προγραμματιστές, παρά το γεγονός ότι οι εργασίες τους μερικές φορές αλληλεπικαλύπτονται. Ενώ οι προγραμματιστές επικεντρώνονται στην παροχή όλων των υπηρεσιών, οι συγγραφείς επικεντρώνονται σε οντότητες υπηρεσιών, οι οποίες μπορούν να χρησιμοποιηθούν πιο άμεσα. Ωστόσο, εάν οι προγραμματιστές δεν απαιτείται να κατανοήσουν πλήρως τα πρότυπα της cloud τεχνολογίας, μπορούν να επικεντρωθούν μόνο στην παροχή αποδεκτής ευελιξίας για την χρήση υπηρεσιών [15].

3) Οι ειδικοί ενσωμάτωσης και παροχής (Integration & Provisioning Specialists) είναι πλέον πλήρως επικεντρωμένοι σε λύσεις τελικού χρήστη. Οι ευθύνες τους περιλαμβάνουν την αλληλεπίδραση με τους τελικούς χρήστες και την προσπάθεια να ανταποκριθούν στις απαιτήσεις τους. Όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, η τελική σύνδεση τοποθετείται στον τελικό χρήστη. Οι χρήστες θεωρούν ότι οι cloud υπηρεσίες τους θα έχουν απλές διεπαφές, καθώς και βιώσιμους όρους. Επιπλέον, τα παιδιά πρέπει να απομονώνονται από όλους τους πιθανούς κινδύνους. Επομένως είναι κρίσιμο να προσφέρεται ασφάλεια σε cloud περιβάλλοντα. Αυτά τα όρια, δεν έχουν καμία απόκλιση, για τους χρήστες αυτούς, ως αποτέλεσμα. Πολλοί πελάτες μπορούν να εγγραφούν για cloud υπηρεσίες μέσα σε λίγες ώρες ή για πολλά χρόνια. Αυτοί οι ανόμοιοι τελικοί χρήστες πρέπει να συνδυάζουν πανομοιότυπες υπηρεσίες, καθώς πιθανότατα θα ενσωματώνουν πανομοιότυπα κρίσιμες ροές δεδομένων στο νέφος. Επιπλέον, η υπηρεσία διέπεται και από την Συμφωνία Επιπέδου Υπηρεσίας (SLA - Service Level Agreement).

Το SLA (Service Level Agreement) είναι ενσωματωμένο στη συμφωνία παροχής υπηρεσιών μεταξύ των δύο μερών. Αυτή η συμφωνία καταδεικνύει ότι μόνο το ένα μέρος υποχρεούται να παρέχει αυτού του είδους τις υπηρεσίες στο άλλο. Για παράδειγμα, περιγράφει, όχι μόνο τη συμμόρφωση με τις επιδόσεις, αλλά και τη συμβατότητα ασφάλειας.

Όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, το cloud computing αποτελείται από τρία επίπεδα: SaaS (λογισμικό), PaaS (Πλατφόρμα) και IaaS (Υποδομή) (υποδομή). Όλα αυτά τα ακρωνύμια ολοκληρώνονται με τη φράση "ως Υπηρεσία", υπονοώντας ότι όλα τα επίπεδα παρέχουν μια ποικιλία υπηρεσιών στους τελικούς καταναλωτές.

4.3 Cloud Computing σε Σύγκριση με άλλες Τεχνολογίες

Ο ορισμός του υπολογιστικού νέφους μπορεί να επικαλύπτεται με αυτόν άλλων τεχνολογιών. Αυτή η ενότητα συζητά τη σημασία του κατάλληλου ορισμού του υπολογιστικού νέφους και τις διακρίσεις του από άλλες συγκρίσιμες τεχνολογίες. Γενικά, αυτές οι τεχνολογίες προηγούνται του υπολογιστικού νέφους και είναι πιο γνωστές στο ευρύ κοινό. Ως εκ τούτου, είναι σημαντικό να το διακρίνουμε από το cloud computing [16].

Τα **αυτόνομα υπολογιστικά συστήματα** (autonomic computing systems) είναι εξαιρετικά πιθανό να εμπλέκονται στο cloud computing. Αυτή η υπολογιστική δομή είναι μοναδική ως προς τον μηχανισμό λειτουργίας της. Ο στόχος του αυτόνομου υπολογισμού είναι να κάνει τα συστήματα διαθέσιμα για αυτόνομη εργασία. Συγκεκριμένα, είναι ικανά για αυτοδιαχείριση. Πρέπει να συντονίζουν και να επιδιορθώνουν μόνα τους τις βλάβες. Το αυτόνομο υπολογιστικό σύστημα έχει μεγάλη ομοιότητα με το υπολογιστικό νέφος καθώς επίσης χρησιμοποιεί μεγάλα συστήματα υπολογιστών που ρυθμίζονται σε υψηλότερο επίπεδο, από τον άνθρωπο.

Η διάκριση μεταξύ **υπολογιστικού πλέγματος** (grid computing) και υπολογιστικού νέφους (cloud computing) είναι πιο περίπλοκη, αν και είναι απλή στην κατανόηση. Το Grid Computing επικεντρώνεται σε υπολογισμούς μεγάλης κλίμακας, ενώ το cloud computing προσφέρει υπηρεσίες τόσο σε μεγάλα όσο και σε μικρά μεγέθη. Το Grid Computing διατηρεί ένα σταθερό επίπεδο απόδοσης, αλλά το κύριο χαρακτηριστικό του cloud computing είναι ότι παρέχει απόδοση όπως απαιτείται.

Με τα **Mainframes***, μια πρόσθετη ανομοιότητα είναι προφανής, αλλά υπάρχουν και κάποιες αντιστοιχίες. Ένα Mainframe μπορεί να αναπαρασταθεί οπτικά ως νέφος. Ωστόσο, είναι λογικό ότι ένας κεντρικός υπολογιστής παρέχει πρόσβαση στο προσωπικό μεγάλων οργανισμών, όπου ο κεντρικός υπολογιστής είναι εντελώς κεντρικός. Εκεί είναι που το cloud computing, εκτός από την απόδοσή του, διαφέρει. Ενώ τα Mainframes παρέχουν πάντα ανώτερη απόδοση, το cloud computing την παρέχει κατ' απαίτηση.

Επιπλέον, η σύγκριση πραγματοποιήθηκε χρησιμοποιώντας **peer-to-peer τεχνολογίες**. Ο λόγος για αυτό είναι ότι ένα ολόκληρο νέφος χρηστών αποτελείται τόσο από «πελάτες» και από «διακομιστές», μια διάκριση που είναι επίσης σημαντική. Οι πελάτες δεν εκτελούν καμία παροχή υπηρεσιών στο cloud computing.

Η τελική σύγκριση που θα γίνει είναι με το **service-oriented computing**. Εκτός θέματος, το cloud computing αναφέρεται στο service-oriented computing. Ωστόσο, στο service-oriented computing δίνεται μεγαλύτερη έμφαση στις λύσεις που βασίζονται σε SaaS. Όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, το cloud computing επικεντρώνεται στην παροχή υπηρεσιών υπολογιστών ανεξάρτητα από την τεχνική τους.

**Τα Mainframes είναι ένας τύπος υπολογιστή που είναι ευρέως γνωστός για το μεγάλο του μέγεθος, τον όγκο μνήμης, την υπολογιστική ταχύτητα και την υψηλή του απόδοση. Οι μεγαλύτερες εταιρείες τα χρησιμοποιούν κυρίως για κρίσιμες εφαρμογές που απαιτούν μεγάλες ποσότητες αποθήκευσης δεδομένων.*

4.4 Πλεονεκτήματα του Cloud Computing

Είναι αυτονόητο ότι το cloud computing παρέχει σημαντικά πλεονεκτήματα σε όσους το χρησιμοποιούν. Αυτή η ενότητα θα εξηγήσει ποια είναι ουσιαστικά αυτά τα οφέλη. Συνήθως, τα οφέλη που τονίζονται αφορούν τη συλλογή των τελικών χρηστών. Όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, το πρωταρχικό όφελος για κάθε τελικό χρήστη είναι αναμφισβήτητα η ευκολία με την οποία το cloud computing **μπορεί να εφαρμοστεί ανά πάσα στιγμή**. Είναι ένας οργανισμός που λειτουργεί βάσει πληρωμής. Δεν υπάρχει σημαντική απαίτηση χώρου - εξ αρχής - για κάθε εξάρτημα / υλικό που πρόκειται να εγκατασταθεί. Επιπλέον, δεν απαιτείται συντήρηση για κανένα υλικό.

Είναι οι εφαρμογές, όχι η τεχνολογία, που επιτρέπουν την υλοποίηση των οφελών. Το νέφος βρίθκει από έτοιμες-προς-χρήση εφαρμογές, και ακόμα καλύτερα, τα **δεδομένα** που χρησιμοποιούνται σε αυτές τις εφαρμογές είναι **ανά πάσα στιγμή προσβάσιμα** από παντού στον κόσμο.

Τα **SLA** επαληθεύουν ότι οι αξιολογήσεις ποιότητας πραγματοποιούνται πριν από την πρόσβαση στο cloud. Αυτά τα SLA είναι κρίσιμα για τους χρήστες και μπορούν να οδηγήσουν σε αυξημένο κόστος συντήρησης, σε περίπτωση που ένας οργανισμός/σύλλογος αποκτήσει όλο το λογισμικό και την υποδομή.

Τα **κέντρα δεδομένων** όχι μόνο θεωρούνται έμμεσο πλεονέκτημα, αλλά είναι επίσης κρίσιμα, καθώς συχνά βρίσκονται σε ειδικά καθορισμένα μέρη για τη μείωση του κόστους συντήρησης, ιδιαίτερα σε χώρες χαμηλού εισοδήματος.

Η βαθύτερη συγκέντρωση στους cloud χρήστες αποκαλύπτει πιο απτά οφέλη. Όπως είναι προφανές αυτή τη στιγμή, η **επεκτασιμότητα** είναι το πρωταρχικό όφελος. Καθώς ένας οργανισμός αναμένει τα σημαντικά σημεία αιχμής με τη χρήση του IT του, μπορεί απλώς να λαμβάνει πρόσθετες IT υπηρεσίες από το cloud. Αυτό αποτελεί παράδειγμα της γοητείας του cloud computing. Είναι αρκετά απλό. Καθώς οι μεγάλοι οργανισμοί ασχολούνται με το cloud computing, τα άτομα (individuals) μπορούν επίσης να διαμορφώσουν το υψηλό επίπεδο ασφάλειας.

Ως αποτέλεσμα, το cloud computing επιτρέπει την ομαδοποίηση **οικονομικών οφελών και οφελών απόδοσης**. Το οικονομικό όφελος αναφέρεται στις χρεώσεις που πρέπει να καταβληθούν όταν ένας οργανισμός απαιτεί πρόσθετες υπηρεσίες πληροφορικής, για να επιτύχει τα οφέλη απόδοσης. Η πρόσθετη απόδοση αποκτάται όταν απαιτείται, και με τον τρόπο αυτό βελτιώνει άμεσα την απόδοση του οργανισμού.

4.5 Ζητήματα και Ανησυχίες στο Cloud Computing

Οι σύγχρονες τεχνολογίες μπορεί να συνοδεύονται από κινδύνους και άγνωστα στοιχεία. Κάτι ανάλογο ισχύει και με το cloud computing. Εξ ορισμού, οι οργανισμοί που εξαρτώνται σε μεγάλο βαθμό από την τεχνολογία των πληροφοριών, αναθέτουν σε **εξωτερικούς συνεργάτες** τις δραστηριότητές τους. Αρκετοί από αυτούς μπορεί να εμπλέκονται σε

κρίσιμες συναλλαγές. Αυτές οι ενώσεις αναμένεται να αντιμετωπίσουν σημαντικές απειλές, σε περίπτωση που τα αναλυτικά τους δεδομένα εκτεθούν στον εξωτερικό κόσμο, υπό συνθήκες ανεπαρκούς ασφάλειας. Πρέπει να εξεταστούν πρόσθετα προβλήματα σχετικά με το απόρρητο και νομικά ζητήματα.

Ο Catteddu [17] έκανε επίσης διάκριση μεταξύ διακριτών κινδύνων και τους κατέταξε σε τέσσερις μεγάλες ομάδες. Υπάρχουν τρεις κατηγορίες: **1) τεχνολογικές δυσκολίες** (που είναι συγκρίσιμες με ζητήματα ασφάλειας, **2) νομικά ζητήματα** και **3) προκλήσεις οργάνωσης** και πολιτικής, οι οποίες σχετίζονται κυρίως με τους προμηθευτές. Αυτά τα προβλήματα ή ζητήματα διαφέρουν από τα ζητήματα απορρήτου που συζητήθηκαν προηγουμένως.

Ενώ οι νομικές δυσκολίες διαφέρουν ανάλογα με τη χώρα, υπάρχει μια γενική προσδοκία, ότι δεν θα εξουσιοδοτηθεί κάθε οργανισμός να χρησιμοποιεί Public Clouds. Επομένως, θα υπάρξει αύξηση στη χρήση των Private Clouds. Παρακάτω παρουσιάζονται, εν συντομία, ζητήματα απορρήτου, τεχνολογίας και ασφάλειας, υπό το πρίσμα της συνεχούς συνάφειάς τους με τους χρήστες.

Η ασφάλεια του cloud computing μπορεί να ομαδοποιηθεί σε επτά διακριτές κατηγορίες. Αυτές οι απειλές αντιπροσωπεύουν τη νοοτροπία του πελάτη. Η ένωση (association) δεν χειρίζεται τα δεδομένα. Καθώς δημιουργείται μία υπεργολαβία η οποία θα χειρίζεται αυτά τα δεδομένα, η ένωση εκχωρεί οποιοδήποτε είδος ασφάλειας στην υπεργολαβική ένωση (subcontracting association), με συνέπεια να δημιουργείται σημαντικός κίνδυνος. Ως εκ τούτου, είναι σημαντικό για τους χρήστες να είναι εξοικειωμένοι με τις μεθόδους διαχείρισης κινδύνου, εκ των προτέρων. Τελικά, ο χρήστης εξακολουθεί να είναι υπεύθυνος. Οι πάροχοι πρέπει να συμμορφώνονται με ορισμένα πρότυπα ασφαλείας, ωστόσο αυτά μπορεί να είναι ανεπαρκή για οποιονδήποτε επιδιώκει να προκαλέσει βλάβη σε μια ένωση. Ως εκ τούτου, είναι σημαντικό να είναι γνωστές και να υλοποιούνται οι μέθοδοι που ακολουθεί ο προμηθευτής. Επιπλέον, απαιτείται από τον χρήστη να προστατεύει τη σύνδεση μεταξύ της ένωσης και του παρόχου.

Όπως σημειώθηκε προηγουμένως, η φυσική θέση του νέφους δεν είναι συγκεκριμένη. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα, να μην γίνεται ποτέ γνωστό στον αγοραστή το μέρος στο οποίο βρίσκονται οι πληροφορίες του, οποιαδήποτε στιγμή. Μπορούν επίσης να συμπεριλαμβάνονται υπηρεσίες, που λειτουργούν σε χώρες, που έχουν τις δικές τους νομικές δυσκολίες. Οπότε, σύμφωνα με τους κανόνες ασφαλείας του κάθε έθνους, τίθεται σε κίνδυνο η λειτουργία της ένωσης, στο περιβάλλον των cloud υπηρεσιών.

Πολλές διαφορετικές ενώσεις μπορούν να λειτουργούν ταυτόχρονα, χρησιμοποιώντας πρακτικά ένα μόνο Νέφος. Για παράδειγμα, ας φανταστούμε εξήντα ανόμοιες εταιρείες, οι οποίες έχουν πρόσβαση σε «κοινό» cloud, με συνέπεια τα δεδομένα τους να επικαλύπτονται πλήρως, από όλους τους οργανισμούς. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα μια σειρά από ανησυχίες για την ασφάλεια. Για παράδειγμα, εάν δεν είναι γνωστή η τοποθεσία των δεδομένων, τι θα συνέβαινε σε περίπτωση φυσικής καταστροφής; Ο πάροχος πρέπει να έχει ένα εφεδρικό σχέδιο, για τέτοιες περιπτώσεις.

Υπάρχουν προκλήσεις που δεν μπορεί να αντιμετωπίσει το cloud computing, όπως ο **καθορισμός του δικαιώματος εισόδου**, από την πλευρά του παρόχου. Ο πάροχος μπορεί να

καθορίσει ποιοι υπάλληλοι έχουν πρόσβαση. Ωστόσο, δεν μπορεί να έχει και τον έλεγχο της πρόσβασης. Οποιοσδήποτε διαθέτει τα διαπιστευτήρια σύνδεσης του οργανισμού, μπορεί να έχει πρόσβαση στο cloud και σε όλα τα δεδομένα του.

Υπάρχουν ανησυχίες σχετικά με το **απόρρητο**, καθώς η υποδομή ανήκει εν μέρει σε έναν πάροχο. Πιθανώς ζωτικής σημασίας πληροφορίες, όπως προσωπικές πληροφορίες, διανέμονται σε cloud περιβάλλον, καθώς βρίσκονται εκτός του εύρους ελέγχου του οργανισμού. Πρέπει να ληφθούν οι αντίστοιχες διαβεβαιώσεις από τον πάροχο, ότι το δικαίωμα εισόδου είναι προσβάσιμο και λειτουργεί αποκλειστικά για τους εξουσιοδοτημένους νέους υπαλλήλους.

Ένα επιπλέον σημείο διαμάχης είναι ο τρόπος λειτουργίας του cloud. Είναι σημαντικό να μην έχουν όλοι το ίδιο **επίπεδο πρόσβασης και ορατότητας** σε όλα τα δεδομένα στο cloud. Η ανώτατη διοίκηση απαιτεί πληροφορίες που δεν απαιτούνται από έναν τυπικό υπάλληλο. Επιπλέον, θα πρέπει να παρέχουν επιπλέον όρους πληροφόρησης. Είναι επικίνδυνο για οποιοδήποτε μέλος του προσωπικού να μπορεί να αναγνωρίσει ζωτικής σημασίας πληροφορίες, από μη κρίσιμες πληροφορίες, καθώς αυτές θα μπορούσαν να αποκαλυφθούν ευθέως στον έξω κόσμο.

4.6 Ασφάλεια στο Cloud Computing

Είναι σημαντικό για το Νέφος να έχει υψηλό βαθμό διαφάνειας. Κάθε χρήστης που ζητά πρόσβαση στο cloud πρέπει να παρέχει μια λογική για τα δεδομένα που επιθυμεί να έχει πρόσβαση, πώς σκοπεύει να τα χρησιμοποιήσει και γιατί σκοπεύει να τα χρησιμοποιήσει. Χωρίς αμφιβολία, η πλήρης δραστηριότητα του χρήστη cloud πρέπει να επαληθεύεται και να διευκρινίζεται. Χωρίς αυτό το επίπεδο ελέγχου, τα δεδομένα μπορούν απλώς να **αποκαλυφθούν σε ανταγωνιστές**. Επιπλέον, οι χρήστες πρέπει να εμφανίζουν μόνο πληροφορίες που είναι απαραίτητες για την εκπλήρωση των απαιτήσεών τους. Επίσης, δεν πρέπει να παρέχει άλλες πληροφορίες εκτός από αυτές που είναι απαραίτητες για την πραγματοποίηση του σκοπού που επιθυμεί ένας χρήστης, όπως καθορίζεται από την κατηγορία του χρήστη. Όλες οι συναλλαγές που πραγματοποιούνται σε cloud περιβάλλον πρέπει να τηρούν ένα όριο δεδομένων. Οι σαφείς επιτυχίες απαιτούν μόνο μια συγκεκριμένη ποσότητα δεδομένων, με δυνατότητα προκαθορισμού. Αυτός ο περιορισμός των δεδομένων προσδιορίζει το "ποιος επιχειρεί να βλάψει τον οργανισμό" στο cloud περιβάλλον. Κατόπιν αυτού, πρέπει να δημιουργηθεί μια σύνδεση στο σύστημα, οριοθετημένη από δραστηριότητες και δεδομένα. Θα συνδέει απλώς τα δεδομένα (connected-data) σε μια συγκεκριμένη cloud δραστηριότητα.

Ενώ οι καταναλωτές επιθυμούν να γνωρίζουν το προσωπικό τους απόρρητο, πρέπει να μπορούν να διακρίνουν μεταξύ **προσωπικών και μη-προσωπικών δεδομένων**. Έτσι, είναι απαραίτητο όχι μόνο τα προσωπικά δεδομένα να είναι σωστά, αλλά και οι χρήστες να μην μπορούν να παρατηρήσουν τα προσωπικά δεδομένα άλλων χρηστών. Τέλος, όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, πρέπει να υπάρχει κάποιος υπεύθυνος για να διασφαλίσει ότι όλα γίνονται όπως έχουν προγραμματιστεί. Θα πρέπει να υπάρχουν ορισμένες εργασίες που επαληθεύουν ότι όλες οι συνήθειες ενέργειες εκτελούνται από κάθε χρήστη.

4.7 Cloud Computing Υπηρεσίες

Σε οποιοδήποτε βαθμό, το περιβάλλον cloud δεν είναι μόνο μια υποθετική κατανόηση. Αυτήν τη στιγμή χρησιμοποιείται από διάφορους ανθρώπους, εκτός από τις εκφραστικές δραστηριότητες στις οποίες συμμετέχουν. Για παράδειγμα, εξετάστε τις πλατφόρμες μέσων κοινωνικής δικτύωσης όπως το Facebook. Είναι μία από τις πιο ευρέως χρησιμοποιούμενες πλατφόρμες κοινοτικών μέσων (community media platforms), η οποία κάνει επίσης χρήση του cloud computing. Ως εκ τούτου, πληροί τις προϋποθέσεις ως λογισμικό ως υπηρεσία (SaaS). Κάθε χρήστης στην πλατφόρμα του Facebook μπορεί να έχει πρόσβαση στα προσωπικά του στοιχεία, χρησιμοποιώντας την «εφαρμογή Facebook». Ωστόσο, δεν έχουν τη δυνατότητα να επεξεργαστούν οτιδήποτε σχετικά με αυτό το «πρόγραμμα». Ως αποτέλεσμα, ο πάροχος υπηρεσιών διατηρεί τον πλήρη έλεγχο της εφαρμογής Facebook.

Ένα άλλο γνωστό και σημαντικό δείγμα προς συζήτηση είναι τα Έγγραφα Google (Google Docs). Η παραγωγή ενός προσωπικού κειμένου word, excel ή PowerPoint μέσω του διαδικτυακού εργαλείου Google Docs είναι εφικτή. Σε εκείνο το σημείο, αυτό το έγγραφο αποθηκεύεται προσωρινά στον διακομιστή. Αυτός ο διακομιστής αποθηκεύει επίσης τυχόν ενημερώσεις ή τροποποιήσεις σε αυτό το έγγραφο. Οι συναλλαγές επεξεργασίας κειμένου της Google είναι εντελώς δωρεάν και δεν χρειάζονται αγορά. Η Google καθιστά τον όρο "κεντρική μονάδα επεξεργασίας" (central processing unit) διαθέσιμο σε οποιονδήποτε θέλει να τον χρησιμοποιήσει. Επιπλέον, υπάρχει η επιλογή κοινής χρήσης εγγράφων με άλλους χρήστες που έχουν πρόσβαση στο cloud. Σε περιβάλλον cloud, άλλοι χρήστες έχουν τη δυνατότητα να τροποποιήσουν τα έγγραφά σας εάν έχουν την απαραίτητη πρόσβαση. Μαζί με το περιεχόμενο που ανεβάσατε, έχουν πρόσβαση, σε πραγματικό χρόνο, στην cloud-based επεξεργασία κειμένου.

Η IBM και η Amazon είναι δύο γνωστοί πάροχοι υπηρεσιών cloud computing. Παρέχουν ολοκληρωμένες λύσεις, οι οποίες δεν είναι απλώς SaaS. Επιπλέον, παρέχουν υποδομές και πλατφόρμες ως υπηρεσία (PaaS). Ενώ το Facebook και η Google επικεντρώθηκαν κυρίως σε δωρεάν υπηρεσίες υπολογιστικού νέφους, η Amazon και η IBM προσφέρουν επιπλέον απόλυτες λύσεις. Οι πελάτες τους λαμβάνουν πρόσθετες παραμέτρους ασφαλείας, επειδή το εμπόριο των κόμβων τους (hub-commerce) υποβάλλεται σε επεξεργασία μέσω του cloud computing.

Ενότητα 5 – Από το Cloud στο Edge Computing

5.1 Η Εμφάνιση του Edge Computing

Οι επενδύσεις του κλάδου και το ερευνητικό ενδιαφέρον για την υπολογιστική άκρου, έχουν αυξηθεί δραματικά τα τελευταία χρόνια. Αυτή η αναδυόμενη τεχνολογία υπόσχεται να προσφέρει α) υπηρεσίες νέφους υψηλής απόκρισης για την κινητή υπολογιστική, β) επεκτασιμότητα και επιβολή της πολιτικής απορρήτου για το Διαδίκτυο των Πραγμάτων, καθώς και γ) τη δυνατότητα απόκρυψης παροδικών διακοπών στο νέφος.

Η υπολογιστική νέφους, η οποία κυριάρχησε στον χώρο της πληροφορικής την τελευταία δεκαετία, έχει μια πρόταση διπλής αξίας. Πρώτον, η κεντροποίηση (centralization) εκμεταλλεύεται τις οικονομίες κλίμακας για να μειώσει το οριακό κόστος διαχείρισης και λειτουργίας του συστήματος. Δεύτερον, οι οργανισμοί μπορούν να αποφύγουν τις κεφαλαιουχικές δαπάνες για τη δημιουργία ενός κέντρου δεδομένων, καταναλώνοντας υπολογιστικούς πόρους μέσω του Διαδικτύου από έναν μεγάλο πάροχο υπηρεσιών. Αυτές οι εκτιμήσεις οδήγησαν στην ενοποίηση της υπολογιστικής ικανότητας σε πολλαπλά μεγάλα κέντρα δεδομένων, τα οποία διασκορπίζονται σε όλο τον κόσμο. Τα αποδεδειγμένα οικονομικά οφέλη του υπολογιστικού νέφους καθιστούν πιθανό να παραμείνει μόνιμο χαρακτηριστικό του μελλοντικού τεχνολογικού τοπίου.

Ωστόσο, οι δυνάμεις που οδηγούν στην κεντροποίηση δεν είναι οι μόνες που λειτουργούν. Οι νεοφυείς τεχνολογίες και εφαρμογές για την Κινητή Υπολογιστική και το Διαδίκτυο των Πραγμάτων (IoT) οδηγούν τους υπολογιστές προς τη διασπορά. Η Υπολογιστική Άκρου είναι ένα νέο παράδειγμα στο οποίο σημαντικοί υπολογιστικοί και αποθηκευτικοί πόροι - που αναφέρονται συχνά ως Cloudlets, micro datacenters ή fog nodes - τοποθετούνται στην άκρη του Διαδικτύου σε κοντινή απόσταση από κινητές συσκευές ή αισθητήρες.

Οι επενδύσεις του κλάδου και το ερευνητικό ενδιαφέρον για την Υπολογιστική Άκρου έχουν αυξηθεί δραματικά τα τελευταία χρόνια. Η Nokia και η IBM παρουσίασαν από κοινού το Radio Applications Cloud Server (RACS), μια πλατφόρμα υπολογιστικής άκρου για δίκτυα 4G/LTE, στις αρχές του 2013. Το επόμενο έτος, ξεκίνησε μια προσπάθεια τυποποίησης της Κινητής Υπολογιστικής Άκρου, υπό την αιγίδα του European Telecommunications Standards Institute (ETSI). Η πρωτοβουλία Open Edge Computing (OEC - opengecomputing.org) ξεκίνησε τον Ιούνιο του 2015 από τη Vodafone, την Intel και την Huawei σε συνεργασία με το Πανεπιστήμιο Carnegie Mellon (CMU) και επεκτάθηκε ένα χρόνο αργότερα για να συμπεριλάβει τις Verizon, Deutsche Telekom, T-Mobile, Nokia και Crown Castle. Αυτή η συνεργασία περιλαμβάνει τη δημιουργία ενός εργαστηρίου Living Edge στο Πίτσμπουργκ της Πενσυλβάνια, για την απόκτηση πρακτικής εμπειρίας με μια ζωντανή ανάπτυξη εφαρμογών βασισμένων σε Cloudlet. Το πρώτο Mobile Edge Computing Congress συνήλθε στο Λονδίνο τον Σεπτέμβριο του 2015 και διοργανώθηκε από τον κλάδο των τηλεπικοινωνιών, και ξανά στο Μόναχο ένα χρόνο αργότερα. Το Open Fog Consortium (www.openfogconsortium.org) δημιουργήθηκε από τη Cisco, τη Microsoft, την Intel, την Dell και την ARM σε συνεργασία με το Πανεπιστήμιο του Πρίνστον τον Νοέμβριο του 2015 και έκτοτε επεκτάθηκε για να συμπεριλάβει πολλές άλλες εταιρείες. Το Πρώτο Συμπόσιο IEEE/ACM on Edge Computing (conferences.computer.org/SEC) διεξήχθη τον Οκτώβριο του 2016 στην Ουάσιγκτον, DC.

Οι παραπάνω εξελίξεις απαντούν σε πολλά ερωτήματα, σχετικά με το γιατί εμφανίστηκε το Edge Computing, και ποιες νέες δυνατότητες επιτρέπει σε σχέση με το Cloud Computing [18]:

5.2 Προέλευση και Ιστορικό

Οι ρίζες του Edge Computing φτάνουν πίσω στα τέλη της δεκαετίας του 1990, όταν η Akamai εισήγαγε τα δίκτυα παράδοσης περιεχομένου (content delivery networks - CDN) για να επιταχύνει την απόδοση ιστού. Ένα CDN χρησιμοποιεί κόμβους στην άκρη κοντά στους χρήστες για την - εκ των προτέρων - λήψη και αποθήκευση περιεχομένου ιστού. Αυτοί οι ακραίοι κόμβοι μπορούν επίσης να πραγματοποιήσουν κάποια προσαρμογή περιεχομένου, όπως η προσθήκη διαφήμισης σχετικής με την τοποθεσία. Τα CDN είναι ιδιαίτερα πολύτιμα για περιεχόμενο βίντεο, επειδή η εξοικονόμηση bandwidth από την προσωρινή αποθήκευση μπορεί να είναι σημαντική.

Η Υπολογιστική Άκρου γενικεύει και επεκτείνει την ιδέα του CDN αξιοποιώντας την υποδομή υπολογιστικού νέφους. Όπως και με τα CDN, η εγγύτητα των Cloudlets με τους τελικούς χρήστες είναι ζωτικής σημασίας. Ωστόσο, αντί να περιορίζεται στην προσωρινή αποθήκευση περιεχομένου ιστού, ένα Cloudlet μπορεί να εκτελεί τυχαίο κώδικα ακριβώς, όπως στην Υπολογιστική Νέφος. Αυτός ο κώδικας συνήθως ενσωματώνεται σε μια εικονική μηχανή (VM) ή σε ένα κοντέινερ μικρότερου βάρους, για απομόνωση, ασφάλεια, διαχείριση πόρων και μέτρηση.

Το 1997, ο Brian Noble και οι συνεργάτες του κατέδειξαν για πρώτη φορά τη δυνητική αξία της Υπολογιστικής Άκρου για την Κινητή Υπολογιστική. Έδειξαν πώς η αναγνώριση ομιλίας θα μπορούσε να εφαρμοστεί με αποδεκτή απόδοση σε μια φορητή συσκευή περιορισμένων πόρων, εκφορτώνοντας τον υπολογισμό σε έναν κοντινό διακομιστή. Δύο χρόνια αργότερα, οι Jason Flinn και Mahadev Satyanarayanan επέκτειναν την προσέγγιση αυτή για της βελτίωση της διάρκειας ζωής της μπαταρίας. Σε ένα άρθρο του 2001 που γενίκευε αυτές τις έννοιες, εισήχθη ο όρος αναζήτηση "τροφής" στον κυβερνοχώρο (cyber foraging) για την ενίσχυση των υπολογιστικών δυνατοτήτων μιας κινητής συσκευής αξιοποιώντας την κοντινή υποδομή [19].

Η εμφάνιση της Υπολογιστικής Νέφος στα μέσα της δεκαετίας του 2000 οδήγησε στο να γίνει το Νέφος η πιο προφανής υποδομή για αξιοποίηση από μια φορητή συσκευή. Σήμερα, το Siri της Apple και οι υπηρεσίες αναγνώρισης ομιλίας της Google εκφορτώνουν τον υπολογισμό στο Νέφος. Δυστυχώς, η ενοποίηση συνεπάγεται μεγάλο μέσο διαχωρισμό μεταξύ μιας κινητής συσκευής και του βέλτιστου κέντρου δεδομένων στο Νέφος. Ο Ang Li και οι συνάδελφοί του ανέφεραν ότι ο μέσος χρόνος μετ' επιστροφής από 260 παγκόσμια σημεία προς τα βέλτιστα EC2 κέντρα της Amazon (Elastic Compute Cloud - EC2) είναι 74 ms. Σε αυτό πρέπει να προστεθεί και η καθυστέρηση ενός ασύρματου first-hop. Όσον αφορά το jitter, πρέπει να συμπεριληφθεί η εγγενής διακύμανση εγγενής ενός multihop δικτύου. Σαφώς, η εξάρτηση από ένα κέντρο δεδομένων στο Νέφος δεν ενδείκνυται για εφαρμογές που απαιτούν τον αυστηρό έλεγχο της καθυστέρησης από άκρο σε άκρο. Ο αυστηρός έλεγχος της καθυστέρησης είναι επίσης απαραίτητος για αναδυόμενες εφαρμογές, όπως η επαυξημένη πραγματικότητα (AR).

Αυτές οι παρατηρήσεις σχετικά με τον λανθάνοντα χρόνο, από άκρο σε άκρο, και την Υπολογιστική Νέφους, διατυπώθηκαν για πρώτη φορά από τους Paramvir Bahl, Ramón Cáceres και Nigel Davies & Mahadev Satyanarayanan, το 2009, το οποίο έθεσε την εννοιολογική βάση για την Υπολογιστική Άκρου [20]. Υποστηρίχθηκε η αρχιτεκτονική δύο επιπέδων: Το πρώτο επίπεδο είναι η σημερινή μη τροποποιημένη υποδομή cloud. Το δεύτερο επίπεδο αποτελείται από διασκορπισμένα στοιχεία που ονομάζονται Cloudlets, σε κατάσταση προσωρινής αποθήκευσης από το πρώτο επίπεδο. Η χρήση μόνιμης προσωρινής αποθήκευσης (αντί για hard state αποθήκευση), απλοποιεί τη διαχείριση των Cloudlet, παρά τη φυσική τους διασπορά στην άκρη του Διαδικτύου. Η έννοια του Cloudlet μπορεί, φυσικά, να επεκταθεί σε μια πολυεπίπεδη ιεραρχία Cloudlet.

Το 2012, ο Flavio Bonomi και οι συνεργάτες του εισήγαγαν τον όρο fog computing για να αναφερθούν σε αυτή τη διάσπαρτη υποδομή cloud. Ωστόσο, το κίνητρό τους για αποκεντροποίηση είναι η επεκτασιμότητα της υποδομής IoT, και όχι η διαδραστική απόδοση των εφαρμογών για κινητές συσκευές. Οι ερευνητές οραματίζονται μια πολυεπίπεδη ιεραρχία fog κόμβων, που εκτείνονται από το Νέφος έως τις Ακραίες IoT συσκευές.

5.3 Σημασία της Εγγύτητας

Καθώς θα εξερευνούμε νέες εφαρμογές και περιπτώσεις χρήσης τόσο για το mobile computing όσο και για το IoT, η σημασία της εγγύτητας γίνεται όλο και πιο εμφανής. Στον φυσικό κόσμο, η σημασία της εγγύτητας δεν αμφισβητήθηκε ποτέ. Το παλιό αξίωμα σχετικά με τους τρεις κορυφαίους καθοριστικούς παράγοντες της αξίας της ακίνητης περιουσίας είναι «τοποθεσία, τοποθεσία και τοποθεσία», αποτυπώνει ακριβώς την παρατήρηση αυτή. Στον κόσμο του κυβερνοχώρου, η απρόσκοπτη συνδεσιμότητα που προσφέρει το Διαδίκτυο, μας έχει υποβάλει σε μια ψευδή αίσθηση περιφρόνησης για τη φυσική εγγύτητα. Επειδή η λογική εγγύτητα δικτύου χαρακτηρίζεται εξ ολοκλήρου από χαμηλή καθυστέρηση, χαμηλό jitter και υψηλό bandwidth, η ερώτηση "Πόσο κοντά είναι το αρκετά κοντά;" ("How close is physically close enough?") δεν μπορεί να απαντηθεί αφηρημένα. Εξαρτάται από παράγοντες όπως οι τεχνολογίες δικτύωσης που χρησιμοποιούνται, η διαφοροποιήσεις του δικτύου, τα χαρακτηριστικά εφαρμογής και η ανοχή του χρήστη για κακή διαδραστική απόκριση (interactive response).

Η φυσική εγγύτητα επηρεάζει τον λανθάνοντα χρόνο από άκρο σε άκρο, το οικονομικά βιώσιμο bandwidth, την εδραίωση εμπιστοσύνης και τη δυνατότητα επιβίωσης. Η έλλειψη εγγύτητας μπορεί να καλυφθεί, εν μέρει, με αρκετή προσπάθεια και επένδυση πόρων. Για παράδειγμα, μια απευθείας σύνδεση οπτικών ινών μπορεί να επιτύχει χαμηλή καθυστέρηση και υψηλό bandwidth μεταξύ απομακρυσμένων σημείων. Ωστόσο, υπάρχουν όρια σε αυτή την προσέγγιση. Η ταχύτητα του φωτός είναι ένα προφανές φυσικό όριο στον λανθάνοντα χρόνο. Η ανάγκη χρήσης μιας στρατηγικής δικτύωσης multihop για την κάλυψη μιας μεγάλης γεωγραφικής περιοχής με πολλά σημεία πρόσβασης επιβάλλει ένα οικονομικό όριο, τόσο στην καθυστέρηση όσο και στο bandwidth. Κάθε hop εισάγει καθυστέρηση ουράς και δρομολόγησης, καθώς και bloat buffer.

Η εγγύτητα των Cloudlets βοηθά με τουλάχιστον τέσσερις διαφορετικούς τρόπους:

1. **Υπηρεσίες νέφους υψηλής απόκρισης (highly responsive):** Η φυσική εγγύτητα ενός Cloudlet με μια φορητή συσκευή, διευκολύνει την επίτευξη χαμηλής καθυστέρησης από άκρο σε άκρο, υψηλό bandwidth και χαμηλό jitter, σε υπηρεσίες που βρίσκονται στο Cloudlet. Αυτό είναι πολύτιμο για εφαρμογές όπως το AR και η εικονική πραγματικότητα, οι οποίες εκφορτώνουν τους υπολογισμούς στο Cloudlet.
2. **Επεκτασιμότητα μέσω ανάλυσης στο Άκρο:** Η συσσωρευτική ζήτηση bandwidth εισόδου στο Νέφος από μια μεγάλη συλλογή αισθητήρων IoT υψηλού εύρους ζώνης, όπως βιντεοκάμερες, είναι σημαντικά χαμηλότερη εάν αναλυθούν τα πρωτογενή δεδομένα σε Cloudlets. Μόνο οι (πολύ μικρότερες) εξαγόμενες πληροφορίες και τα metadata πρέπει να μεταδίδονται στο Νέφος.
3. **Επιβολή της Πολιτικής Απορρήτου:** Χρησιμοποιώντας ως το πρώτο σημείο επαφής στην υποδομή για δεδομένα αισθητήρων IoT, ένα Cloudlet μπορεί να επιβάλει τις πολιτικές απορρήτου του ιδιοκτήτη του, πριν από την κυκλοφορία των δεδομένων στο Νέφος.
4. **Κάλυψη των Διακοπών Επικοινωνίας του Νέφους:** Εάν μια υπηρεσία cloud δεν είναι διαθέσιμη λόγω αποτυχίας δικτύου, αποτυχίας cloud ή επίθεσης άρνησης υπηρεσίας, μια εναλλακτική υπηρεσία σε ένα κοντινό Cloudlet μπορεί να κρύψει προσωρινά την αποτυχία αυτή.

Παρακάτω αναλύονται τα πλεονεκτήματα αυτά λεπτομερώς.

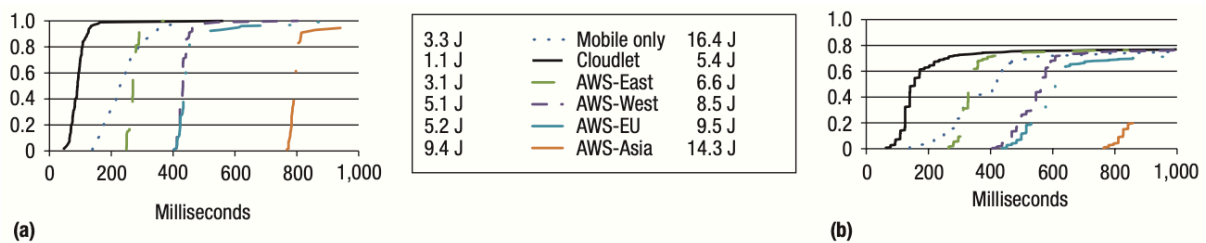
5.4 Υπηρεσίες Νέφους Υψηλής Απόκρισης (Highly Responsive)

Γενικά οι άνθρωποι είναι αρκετά ευαίσθητοι στις καθυστερήσεις αλληλεπίδρασης, και η απόδοσή τους σε γνωστικές εργασίες είναι εξαιρετικά γρήγορη και ακριβής. Για παράδειγμα, υπό κανονικές συνθήκες φωτισμού, η αναγνώριση προσώπου διαρκεί 370–620 ms, ανάλογα με την εξοικείωση. Η αναγνώριση ομιλίας απαιτεί 300–450 ms για σύντομες φράσεις και απαιτεί μόνο 4ms για να αντιληφθεί ότι ο ήχος που ακούει είναι ανθρώπινη φωνή. Οι εφαρμογές εικονικής πραγματικότητας (VR) που χρησιμοποιούν συστήματα ανίχνευσης κεφαλής (head-tracked systems) απαιτούν καθυστερήσεις μικρότερες από 16 ms, ώστε να επιτύχουν ικανοποιητική σταθερότητα. Ο λανθάνων χρόνος μερικών δεκάδων ms, από άκρο σε άκρο, είναι ένας ασφαλής αλλά εφικτός στόχος.

Το σχήμα 16 («Κατανομή χρόνου απόκρισης και κόστος ενέργειας ανά λειτουργία μιας (α) εφαρμογής επαυξημένης πραγματικότητας και (β) εφαρμογής αναγνώρισης προσώπου σε μια φορητή συσκευή, στην οποία μια εικόνα από τη συσκευή μεταδίδεται μέσω ενός Wi-Fi first hop σε ένα Cloudlet ή κέντρο δεδομένων Amazon Web Services (AWS). Το ιδανικό προσεγγίζεται καλύτερα από ένα Cloudlet, καταδεικνύοντας τη σημασία των υπηρεσιών εκφόρτωσης χαμηλής καθυστέρησης. Πηγή [21]») απεικονίζει τη σημασία των Cloudlets για υπηρεσίες εκφόρτωσης χαμηλής καθυστέρησης. Τα γραφήματα δείχνουν τη συσσωρευτική κατανομή των χρόνων απόκρισης για ένα Augmented Reality σύστημα και μια εφαρμογή αναγνώρισης προσώπου σε μια φορητή συσκευή. Μια εικόνα από την κινητή συσκευή, η οποία βρίσκεται στο Πίτσμπουργκ, μεταδίδεται μέσω ενός first-hop Wi-Fi σε ένα Cloudlet ή σε ένα κέντρο δεδομένων της Amazon Web Services (AWS). Η εικόνα επεξεργάζεται στον προορισμό μέσω ενός κώδικα όρασης (vision code) ο οποίος εκτελείται σε μία Εικονική

Μηχανή. Για την απτή πραγματικότητα, τα τμήματα στην εικόνα αναγνωρίζονται και οι ετικέτες που αντιστοιχούν στην ταυτότητά τους μεταδίδονται πίσω στην κινητή συσκευή. Για την αναγνώριση προσώπου, επιστρέφεται η ταυτότητα του ατόμου.

Η ιδανική καμπύλη στο Σχήμα 16 θα ήταν μια συνάρτηση βήματος που μεταβαίνει στο 1.0 στην αρχή. Όπως δείχνει το σχήμα, το ιδανικό προσεγγίζεται καλύτερα από ένα Cloudlet. Ο λανθάνοντας χρόνος δικτύου από άκρο σε άκρο εμποδίζει την απόδοση, όπως υποδεικνύεται από τις επιδεινούμενες καμπύλες χρόνου απόκρισης, που αντιστοιχούν σε πιο απομακρυσμένες τοποθεσίες AWS. Η αύξηση του χρόνου απόκρισης αυξάνει επίσης την κατανάλωση ενέργειας, ανά λειτουργία, στην κινητή συσκευή. Αυτή η τιμή υποδεικνύεται δίπλα στην αντίστοιχη ετικέτα στο υπόμνημα του σχήματος. Για παράδειγμα, η συσκευή καταναλώνει 1.1 J κατά μέσο όρο, για να εκτελέσει μια λειτουργία AR στο Cloudlet, αλλά 3.1 J, 5.1 J και ούτω καθεξής όταν την εκτελεί σε AWS-East, AWS-West κλπ. Παρόμοια αποτελέσματα μπορούν να αναμένονται με οποιαδήποτε υπηρεσία εκφόρτωσης, που είναι συγκεντρωμένη σε μερικά μεγάλα κέντρα δεδομένων.






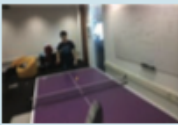








Σχήμα 16 - Κατανομή χρόνου απόκρισης και κόστος ενέργειας ανά λειτουργία μιας (α) εφαρμογής επαυξημένης πραγματικότητας και (β) εφαρμογής αναγνώρισης προσώπου σε μια φορητή συσκευή

Η ετικέτα «μόνο κινητό» («mobile only») στο σχήμα αντιστοιχεί σε περίπτωση όπου δεν εκτελείται εκφόρτωση και ο κωδικός όρασης (vision code) εκτελείται στην κινητή συσκευή. Παρά την αποφυγή του κόστους ενέργειας και απόδοσης της επικοινωνίας Wi-Fi, αυτή η επιλογή είναι πιο αργή, από τη χρήση του Cloudlet. Η εκφόρτωση είναι σαφώς σημαντική για αυτές τις εφαρμογές.

Τα Cloudlets είναι μια τεχνολογία που φέρνει υψηλής τεχνολογίας υπολογιστική, σε ένα ασύρματο hop κινητών συσκευών, επιτρέποντας νέες (computation-intensive και latency-sensitive) εφαρμογές. Ένα χαρακτηριστικό παράδειγμα είναι η wearable γνωστική βοήθεια (wearable cognitive assistance), η οποία συνδυάζει μια συσκευή όπως το Google Glass, με επεξεργασία που βασίζεται στα Cloudlet, για να καθοδηγήσει τους χρήστες σε μια περίπλοκη εργασία. Όπως συμβαίνει με ένα σύστημα GPS, ο χρήστης ακούει μια συνθετική φωνή που περιγράφει τι πρέπει να κάνει στη συνέχεια και βλέπει οπτικές ενδείξεις στην οθόνη. Το σύστημα εντοπίζει τα σφάλματα αμέσως και διορθώνει τον χρήστη. Η τελική έκθεση του National Science Foundation Workshop, σχετικά με τις μελλοντικές κατευθύνσεις στην ασύρματη δικτύωση, χαρακτήρισε αυτό το νέο είδος εφαρμογών ως «εκπληκτικά μεταμορφωτικό».

Στο Cloudlet, η ροή εργασίας αυτών των εφαρμογών αποτελείται από δύο φάσεις. Στην πρώτη φάση, οι είσοδοι του αισθητήρα αναλύονται για να εξαχθεί μια συμβολική αναπαράσταση της προόδου της εργασίας (τέταρτη στήλη του Πίνακα 3). Αυτή είναι μια

εξιδανικευμένη αναπαράσταση των τιμών του αισθητήρα εισόδου σε σχέση με την εργασία και αποκλείει κάθε άσχετη λεπτομέρεια.

App name	Example input video frame	App description	Symbolic representation	Example guidance
Face		Jogs user's memory of a familiar face whose name cannot be recalled. Detects and extracts a tightly cropped image of each face, then applies popular open source face recognizer OpenFace (cmusatyalab.github.io/openface), which is based on a deep neural network (DNN) algorithm. Whispers name of person. Can be used in combination with mood detection algorithms to offer conversational hints.	ASCII text of name	Whispers "Barack Obama"
Pool		Helps novice pool player aim correctly. Gives continuous visual feedback (left arrow, right arrow, or thumbs up) as user turns cue stick. Correct shot angle is calculated based on widely used fractional aiming system. Uses color, line, contour, and shape detection. Symbolic representation describes positions of cue ball, object ball, target pocket, and top and bottom of cue stick.	<Pocket, object ball, cue ball, cue top, cue bottom>	
Ping-Pong		Tells novice player to hit ball to left or right, depending on which is more likely to beat opponent. Uses color, line, and optical-flow-based motion detection to detect ball, table, and opponent. Symbolic representation is a 3-tuple: in rally or not, opponent position, ball position. Whispers "left" or "right."	<InRally, ball position, opponent position>	Whispers "Left"
Workout		Guides correct user form in exercise actions like sit-ups and push-ups, and counts out repetitions. Uses volumetric template matching on a 10- to 15-frame video segment to classify poorly performed repetitions as distinct types of exercise (for example, "bad push-up"). Uses smartphone on floor for third-person viewpoint.	<Action count>	Says "8"
Lego		Guides user in assembling 2D Lego models. Analyzes each video frame in three steps: (1) finds board using its distinctive color and black dot pattern, (2) locates Lego bricks on board using edge and color detection, and (3) assigns brick color using weighted majority voting within each block. Symbolic representation is matrix showing color for each brick.	[[0, 2, 1, 1], [0, 2, 1, 6], [2, 2, 2, 2]]	 Says "Find a 1 x 3 green piece and put it on top"
Draw		Helps user to sketch better. Builds on third-party app originally designed to input sketches from pen tablets and output corrective guidance on desktop screen. Our implementation preserves back-end logic. New Google Glass-based front end allows use of any drawing surface and instrument and displays guidance on Glass. Displays error alignment in sketch.		
Sandwich		Helps cooking novice prepare sandwiches according to a recipe. Because real food is perishable, we use realistic plastic toy food as ingredients. Object detection uses a region proposal and DNN approach. Implementation is on top of Caffe (caffe.berkeleyvision.org) and Dlib (dlib.net). Transfer learning saves time in labeling and training.	Object: "Lettuce on top of ham and bread"	 Says "Now put a piece of bread on the lettuce"

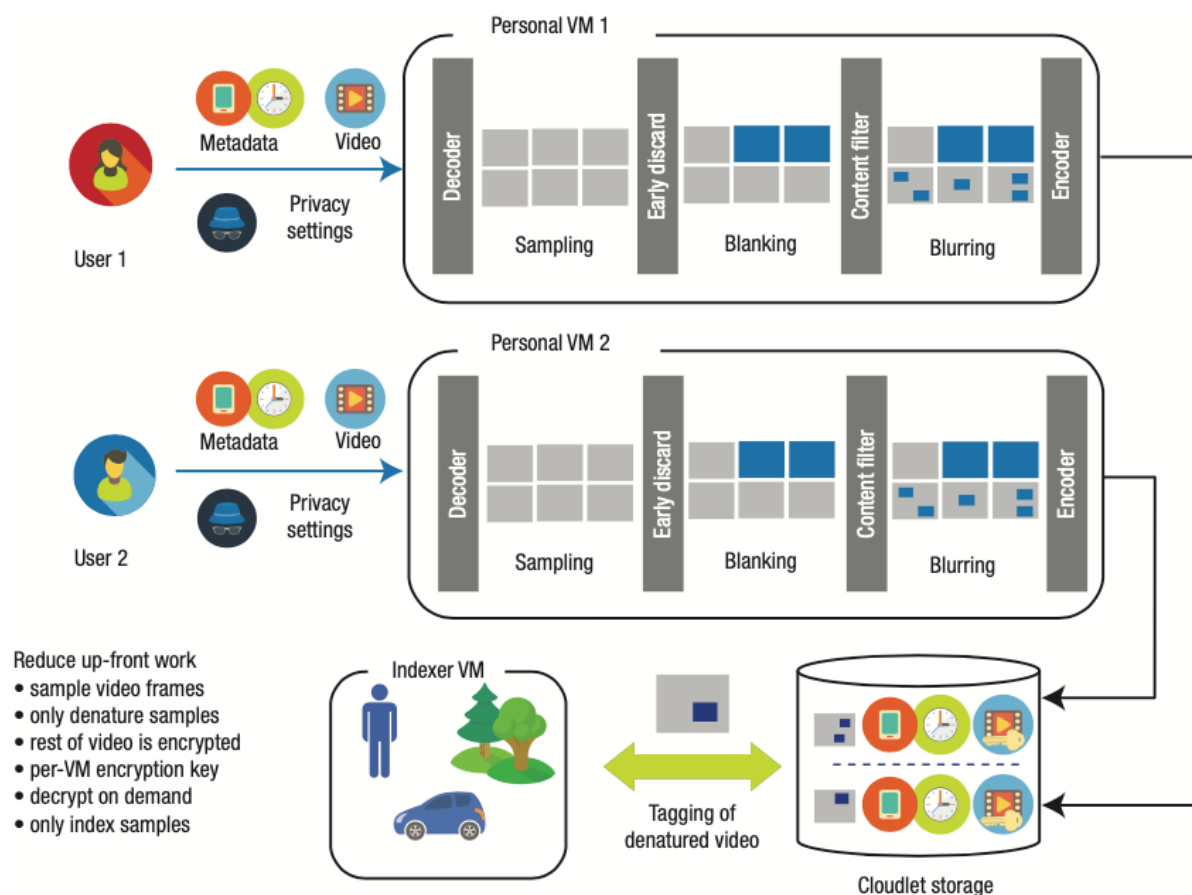
Πίνακας 3 - Παραδείγματα φορητών εφαρμογών γνωστικής βοήθειας

Αυτή η φάση πρέπει να είναι ανεκτική σε σημαντική μεταβλητότητα του πραγματικού κόσμου - για παράδειγμα, διαφορετικά επίπεδα φωτισμού, πηγές φωτός, τις θέσεις του θεατή σε σχέση με τα τεχνουργήματα της εργασίας, ακαταστασία που δεν σχετίζεται με

εργασίες στο παρασκήνιο κλπ. Κάποιος μπορεί να δει την εξαγωγή μιας συμβολικής αναπαράστασης ως μια «αναλογική σε ψηφιακή» μετατροπή για συγκεκριμένη εργασία: ο τεράστιος χώρος κατάστασης των τιμών του αισθητήρα απλοποιείται σε έναν πολύ μικρότερο χώρο καταστάσεων ειδικής εργασίας. Η δεύτερη φάση κάθε ροής εργασιών εργασίας λειτουργεί αποκλειστικά στη συμβολική αναπαράσταση. Η σύγκριση της συμβολικής αναπαράστασης με την αναμενόμενη κατάσταση εργασίας δημιουργεί την καθοδήγηση του χρήστη για το επόμενο βήμα (τελευταία στήλη του Πίνακα 3). Η καθοδήγηση βίντεο εμφανίζεται στην οθόνη και η ηχητική καθοδήγηση παρέχεται χρησιμοποιώντας το API μετατροπής κειμένου σε ομιλία Android.

5.5 Επεκτασιμότητα μέσω Ανάλυσης των Άκρων (Edge Analytics)

Ανεξάρτητα από τις εκτιμήσεις του λανθάνοντος χρόνου, τα Cloudlets μπορούν επίσης να μειώσουν το εύρος ζώνης της ingress κίνησης (ingress bandwidth) στο cloud. Σκεφτείτε μια εφαρμογή στην οποία πολλοί χρήστες - στην ίδια τοποθεσία - μεταδίδουν συνεχώς βίντεο από το smartphone τους στο cloud, για ανάλυση περιεχομένου (content analysis). Ο αθροιστικός ρυθμός δεδομένων, ακόμη και για ένα μικρό κλάσμα χρηστών σε μια πόλη μέτριου μεγέθους, θα δημιουργούσε έντονη συμφόρηση στο μητροπολιτικό της δίκτυο. Για παράδειγμα, 12.000 χρήστες που μεταδίδουν βίντεο 1080p θα απαιτούσαν μια σύνδεση 100 Gbps, ενώ ένα εκατομμύριο χρήστες θα απαιτούσαν μια σύνδεση 8,5 Tbps.



Σχήμα 17 - Πλαίσιο GigaSight. Ένα Cloudlet εκτελεί αναλύσεις όρασης υπολογιστή σε βίντεο από κινητές συσκευές, σε σχεδόν πραγματικό χρόνο, και στέλνει μόνο τα αποτελέσματα μαζί με τα μεταδεδομένα στο cloud, μειώνοντας απότομα το ingress bandwidth στο cloud

Το σχήμα 17 δείχνει πώς τα Cloudlets μπορούν να λύσουν αυτό το πρόβλημα. Στο προτεινόμενο πλαίσιο (GigaSight), βίντεο από μια φορητή συσκευή ταξιδεύουν μόνο μέχρι ένα κοντινό Cloudlet. Το Cloudlet εκτελεί αναλύσεις θέασης (computer vision analytics) σχεδόν σε πραγματικό χρόνο και στέλνει μόνο τα αποτελέσματα (ετικέτες περιεχομένου, αναγνωρισμένα πρόσωπα κ.λπ.) μαζί με μεταδεδομένα (κάτοχος, τοποθεσία λήψης, χρονική σήμανση κ.λπ.) στο cloud. Αυτό μπορεί να μειώσει το ingress bandwidth στο νέφος, από τρεις έως έξι φορές. Επίσης, το GigaSight δείχνει ότι οι ετικέτες και τα μεταδεδομένα στο cloud, μπορούν να οδηγήσουν σε βαθύτερες και πιο προσαρμοσμένες αναζητήσεις του περιεχομένου ενός τμήματος βίντεο, κατά τη διάρκεια της (πεπερασμένης) περιόδου διατήρησής του σε ένα Cloudlet.

Μια βιντεοκάμερα είναι μόνο ένα παράδειγμα αισθητήρα υψηλής ταχύτητας δεδομένων στο IoT. Ένα άλλο παράδειγμα είναι ένα σύγχρονο αεροσκάφος, το οποίο μπορεί να παράγει σχεδόν μισό terabyte δεδομένων από αισθητήρες, κατά τη διάρκεια μιας πτήσης. Η ανάλυση - σε πραγματικό χρόνο - των δεδομένων αυτών σε ένα Cloudlet στο αεροσκάφος, θα μπορούσε να συμβάλει στην έγκαιρη πρόληψη την συντήρηση, την οικονομία καυσίμου, καθώς και σε άλλα οφέλη για το αεροσκάφος.

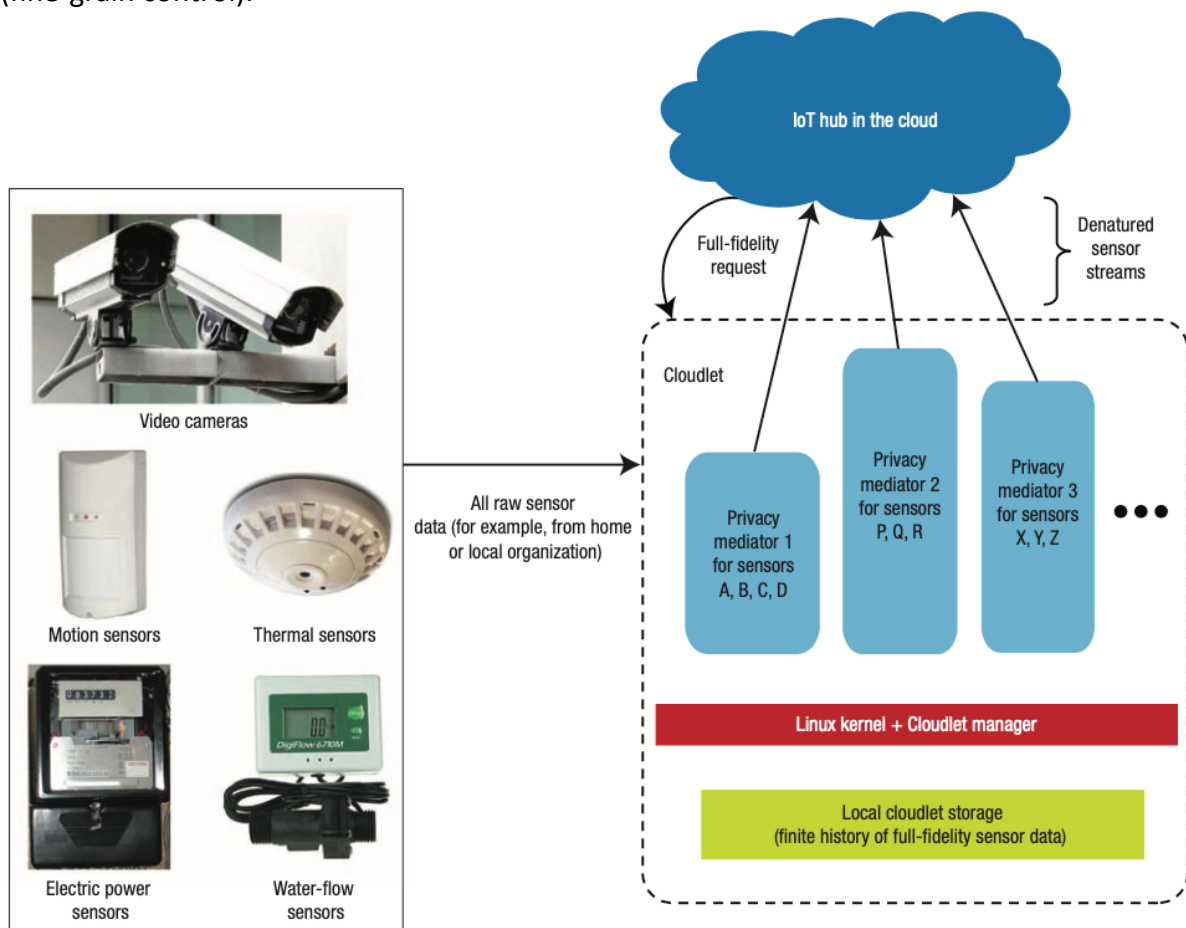
Τα πλεονεκτήματα του latency και του bandwidth των Cloudlet, είναι επίσης ιδιαίτερα σημαντικά στο πλαίσιο των αυτοκινήτων, για να συμπληρώσουν τις προσεγγίσεις vehicle-to-vehicle (V2V), οι οποίες διερευνώνται για τον έλεγχο σε πραγματικό χρόνο και την αποφυγή ατυχημάτων. Για το άμεσο μέλλον, το cloud connectivity από ένα κινούμενο αυτοκίνητο θα είναι τουλάχιστον 4G ή 5G. Ένα σημαντικό ερώτημα είναι εάν τα Cloudlet θα πρέπει να βρίσκονται στα αυτοκίνητα ή σε μέρος της υποδομής τηλεπικοινωνιών (ίσως ένα Cloudlet συνδεδεμένο, μέσω συνδέσεων οπτικών ινών, σε πολλαπλούς πύργους κινητής τηλεφωνίας σε μια περιοχή). Και οι δύο εναλλακτικές έχουν αξία.

Μια εφαρμογή, όπως ένα βιντεοπαιχνίδι για πολλούς παίκτες, για επιβάτες αυτοκινήτων, φιλοξενείται καλύτερα στο Cloudlet του οχήματος. Το Cloudlet θα μπορούσε επίσης να εκτελεί αναλύσεις σε πραγματικό χρόνο, ροών αισθητήρων υψηλής ταχύτητας δεδομένων, από τον κινητήρα και άλλες πηγές του οχήματος, για να ειδοποιήσει τον οδηγό για επικείμενη βλάβη ή την ανάγκη για προληπτική συντήρηση. Επιπλέον, αυτές οι πληροφορίες θα μπορούσαν να μεταδοθούν στο cloud, για την ενσωμάτωσή τους στη βάση δεδομένων του κατασκευαστή του οχήματος. Η λεπτομερής ανάλυση τέτοιων δεδομένων, μπορεί να αποκαλύψει ελαττώματα, ειδικά για το μοντέλο του αυτοκινήτου, οι οποίες θα μπορούσαν να διορθωθούν εγκαίρως.

Για άλλες εφαρμογές αυτοκινήτου, όπως η αποφυγή κινδύνων στο δρόμο σε πραγματικό χρόνο, το Cloudlet είναι το βέλτιστο μέσο. Για παράδειγμα, εάν ένα όχημα χτυπήσει σε μια λακκούβα ή στρίψει για να αποφύγει ένα πεσμένο κλαδί δέντρου, οι συντεταγμένες του κινδύνου μπορούν να κοινοποιηθούν άμεσα μέσα στο νέφος, και στη συνέχεια να χρησιμοποιηθούν για πολλές ώρες από άλλα αυτοκίνητα για να αντιμετωπίσουν προληπτικά τον κίνδυνο (για παράδειγμα, προειδοποιώντας τους οδηγούς να κάνουν πρόωρη αλλαγή λωρίδας).

5.6 Επιβολή της Πολιτικής Απορρήτου

Τα Cloudlets θα μπορούσαν να βοηθήσουν στην αντιμετώπιση ενός σημαντικού προβλήματος, σχετικά με το απόρρητο των δεδομένων που προκύπτουν από την υπερκεντροποίηση του IoT συστήματος. Οι χρήστες και οι οργανισμοί επιθυμούν τον έλεγχο της απελευθέρωσης των ακατέργαστων δεδομένων αισθητήρων, καθώς παρουσιάζονται όλο και πιο διστακτικοί στο να απελευθερώνουν τα δεδομένα αυτά στους IoT Cloud κόμβους. Για παράδειγμα, ένας χρήστης θα πρέπει να μπορεί να διαγράψει ή να μετατρέψει ένα υποσύνολο δεδομένων αισθητήρων που θεωρεί ευαίσθητο. Από την οπτική γωνία του τελικού χρήστη, τα δεδομένα αισθητήρων που έχουν υποστεί κάποια μετατροπή από τον χρήστη, είναι πλέον ασφαλή να απελευθερωθούν στον έξω κόσμο. Για παράδειγμα, τα πρόσωπα στις εικόνες μπορούν να θολωθούν, οι μετρήσεις των αισθητήρων μπορούν να συγκεντρωθούν ή να παραληφθούν σε συγκεκριμένες ώρες της ημέρας ή της νύχτας, και ούτω καθεξής. Οι σημερινές αρχιτεκτονικές του IoT, στις οποίες τα δεδομένα μεταδίδονται απευθείας από τους αισθητήρες σε έναν κόμβο cloud, καθιστούν αδύνατο αυτόν τον έλεγχο (fine-grain control).



Σχήμα 18 - IoT Αρχιτεκτονική Απορρήτου. Οι ενόητες λογισμικού εκτελούνται σε ένα Cloudlet, εντός του τομέα εμπιστοσύνης ενός αισθητήρα, για την εκτέλεση του denaturing και της επιβολής της πολιτικής απορρήτου στις ροές αισθητήρων

Ο Nigel Davies και οι συνεργάτες του [22] προτείνουν μια αρχιτεκτονική απορρήτου IoT (βλ. σχήμα 18) που αξιοποιεί ένα Cloudlet, εντός του τομέα εμπιστοσύνης ενός κατόχου αισθητήρα. Αυτό το Cloudlet είναι το πρώτο σημείο επαφής της υποδομής για τις ροές

αισθητήρων. Αξιόπιστα τμήματα λογισμικού, τα οποία ονομάζονται διαμεσολαβητές απορρήτου (privacy mediators), εκτελούνται στο Cloudlet, για την μετατροπή και την επιβολή της πολιτικής απορρήτου, στις ροές των αισθητήρων. Τα Cloudlet παρέχουν έτσι τη βάση για μια επεκτάσιμη και ασφαλή λύση απορρήτου, η οποία ευθυγραμμίζεται με τα φυσικά οργανωτικά όρια εμπιστοσύνης και ευθύνης.

Όπως δείχνει το σχήμα 18, τα δεδομένα αισθητήρα πλήρους πιστότητας (full-fidelity sensor data) μπορούν να αρχειοθετηθούν σε ένα Cloudlet για πεπερασμένη διάρκεια, όπως μερικές ώρες, ημέρες ή εβδομάδες, ανάλογα με τον όγκο δεδομένων και το μέγεθος τοπικής αποθήκευσης. Αυτό θα μπορούσε να είναι πολύτιμο σε περίπτωση που ο IoT κόμβος ανακαλύψει μια ανωμαλία και επιστρέψει ένα αίτημα για πιο εις-βάθος ανάλυση δεδομένων, χρησιμοποιώντας λιγότερο επιθετικά μετουσιωμένα δεδομένα (denatured data). Το εάν θα χαλαρώσετε την κανονική πολιτική απορρήτου σε τέτοιες περιπτώσεις, είναι μια απόφαση που παραμένει υπό τον έλεγχο του τελικού χρήστη.

5.7 Κάλυψη των Διακοπών του Νέφους

Καθώς η εξάρτησή μας από το cloud αυξάνεται, τόσο αυξάνεται και η ευπάθειά μας στις διακοπές της λειτουργίας του. Στη σύγκλιση του Mobile Computing & του Edge Computing, έμμεση είναι η υπόθεση ότι το cloud είναι εύκολα προσβάσιμο, ανά πάσα στιγμή. Με άλλα λόγια, ότι υπάρχει καλή ποιότητα δικτύου από άκρο σε άκρο, και σχετικά λίγες αστοχίες του δικτύου ή του νέφους. Ωστόσο, υπάρχουν περιβάλλοντα χρήσης στα οποία η πρόσβαση στο cloud πρέπει να θεωρείται ως περιστασιακή πολυτέλεια, παρά ως βασική ανάγκη. Αυτή η άποψη ισχύει για πολλά σημαντικά περιβάλλοντα, τα οποία μπορούν να αναφερθούν ως εχθρικά περιβάλλοντα.

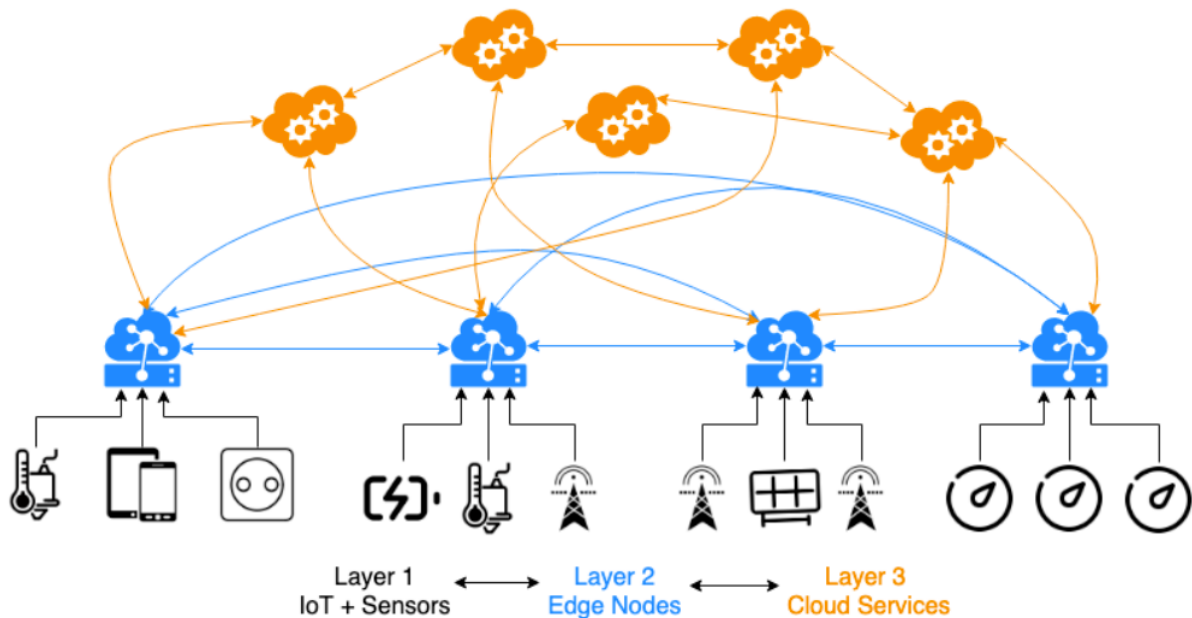
Ένα πρωταρχικό παράδειγμα εχθρικού περιβάλλοντος, είναι ένα κέντρο στρατιωτικών επιχειρήσεων - που έχει ως κύριο στόχο την εμπλοκή του στο δίκτυο του εχθρού. Ένα άλλο παράδειγμα, είναι μια γεωγραφική περιοχή της οποίας η υποδομή δικτύωσης έχει καταστραφεί από φυσική καταστροφή ή τρομοκρατική επίθεση, και η ανάκαμψή της βρίσκεται σε εξέλιξη. Ένα τρίτο παράδειγμα είναι μια αναπτυσσόμενη χώρα με αδύναμη υποδομή δικτύωσης. Ένα τέταρτο παράδειγμα είναι οποιοδήποτε μέρος του Διαδικτύου που έχει γίνει προσωρινά εχθρικό περιβάλλον, επειδή δέχεται κυβερνο-επίθεση. Υπάρχει αυξανόμενη ανησυχία ότι οι επιθέσεις στον κυβερνοχώρο θα μπορούσαν σύντομα να γίνουν σημαντικά όπλα του οργανωμένου εγκλήματος, καθώς και όργανα εθνικής πολιτικής. Εάν αυτές οι τρομερές προβλέψεις πραγματοποιηθούν, ολόκληρο το Διαδίκτυο μπορεί να πρέπει να θεωρηθεί ως εχθρικό περιβάλλον στο μέλλον.

Τα Cloudlets μπορούν να απορροφήσουν τις διακοπές του cloud. Λόγω της φυσικής εγγύτητας, τα χαρακτηριστικά επιβίωσης ενός Cloudlet είναι πιο κοντά στις κινητές συσκευές του, παρά στο μακρινό νέφος. Αυτό ανοίγει την πόρτα σε προσεγγίσεις στις οποίες μια εναλλακτική υπηρεσία σε ένα Cloudlet, μπορεί να "κρύψει" προσωρινά τη μη προσβασιμότητα στο νέφος. Κατά τη διάρκεια των διακοπών/αστοχιών, ένα Cloudlet μπορεί να χρησιμεύσει ως διακομιστής μεσολάβησης για το Cloud και να εκτελέσει τις κρίσιμες υπηρεσίες του. Μετά την αποκατάσταση της αστοχίας, οι ενέργειες που δεσμεύτηκαν δοκιμαστικά στο Cloudlet, ενδεχομένως χρειαστεί να διαδοθούν και στο Cloud, ώστε να επέλθει σχετική συμφωνία.

Ενότητα 6 – Edge Computing Χαρακτηριστικά και Απαιτήσεις

6.1 Αρχιτεκτονική Edge Computing

Τα τελευταία χρόνια, έχει σημειωθεί μεγάλη αύξηση των λύσεων απο-κεντροποίησης των επικοινωνιών, της συλλογής και της επεξεργασίας δεδομένων, μεταφέροντας όλες αυτές τις εργασίες στο ακραίο δίκτυο. Με αυτόν τον τρόπο, οι υπολογιστικοί και δικτυακοί πόροι είναι πιο κοντά στην πηγή των δεδομένων, παρά στα κέντρα δεδομένων cloud. Το Edge Computing επιτρέπει τη βελτίωση της απόδοσης των συστημάτων μειώνοντας την καθυστέρηση, μειώνοντας το κόστος των πόρων και αυξάνοντας την ανταπόκριση (responsiveness), την επεκτασιμότητα (scalability), την αξιοπιστία (reliability), την ασφάλεια (security) και το απόρρητο (privacy). Τα συστήματα IoT σχηματίζονται από πολλαπλές και ετερογενείς συσκευές (αισθητήρες, οχήματα, μηχανήματα, συσκευές, μετρητές, κ.λπ.) που συνδέονται μέσω διαφορετικών πρωτοκόλλων επικοινωνίας. Πολλοί κλάδοι επωφελούνται από τις IoT λύσεις, όπως η βιομηχανία 4.0, η ενεργειακή απόδοση, τα έξυπνα σπίτια, οι έξυπνες πόλεις ή η υγειονομική περίθαλψη. Η διαχείριση των δικτύων IoT καθιστά πρόκληση λόγω της ετερογένειας των πόρων του, δημιουργώντας δυσκολίες στα πρωτόκολλα επικοινωνίας, τις διαδικασίες σε πραγματικό χρόνο, τη διαχείριση δεδομένων, την αποθήκευση μεγάλων δεδομένων και την ασφάλεια. Από αυτή την άποψη, οι αρχιτεκτονικές Edge Computing προσφέρουν μια λύση στις υποδομές IoT, επειδή είναι σε θέση να διαχειρίζονται τα ετερογενή δεδομένα που παράγονται από συσκευές IoT. Το Σχήμα 19 δίνει ένα παράδειγμα βασικής αρχιτεκτονικής υπολογιστικής άκρου τριών επιπέδων [23]:



Σχήμα 19 - Βασική αρχιτεκτονική τριών επιπέδων του Edge Computing

- Επίπεδο 1 – IoT + Αισθητήρες:** Αυτό το επίπεδο περιλαμβάνει συσκευές IoT (αισθητήρες, έξυπνους μετρητές, έξυπνα βύσματα κ.λπ.) καθώς και χρήστες. Το πρώτο επίπεδο είναι υπεύθυνο για την απορρόφηση δεδομένων και τις σχετικές λειτουργίες.

- **Επίπεδο 2 — Edge Nodes:** Το δεύτερο επίπεδο σχηματίζεται από τους ακραίους κόμβους. Αυτοί οι κόμβοι είναι υπεύθυνοι για εργασίες επεξεργασίας δεδομένων, δρομολόγησης και υπολογισμών.
- **Επίπεδο 3 — Υπηρεσίες Cloud:** Αυτό το επίπεδο σχηματίζεται από πολλαπλές υπηρεσίες cloud με υψηλές υπολογιστικές απαιτήσεις. Είναι υπεύθυνο για την ανάλυση των δεδομένων, την τεχνητή νοημοσύνη, τη μηχανική μάθηση, την οπτικοποίηση κ.α.

Όπως αναφέρθηκε παραπάνω, τα έξυπνα ενεργειακά περιβάλλοντα μπορούν να επωφεληθούν από τις προσεγγίσεις του IoT. Η παρακολούθηση της κατανάλωσης ενέργειας και άλλων παραμέτρων επιτρέπει τη μείωση της κατανάλωσης ενέργειας κατά 40% [24]. Οι αισθητήρες και οι έξυπνες συσκευές έχουν μεταμορφώσει την ενεργειακή βιομηχανία, επιτρέποντας τη βαθύτερη κατανόηση του τρόπου με τον οποίο δαπανάται η ενέργεια, και των παραγόντων οι οποίοι επηρεάζουν την κατανάλωσή της. Υπάρχει ένας μεγάλος αριθμός προτάσεων και προσεγγίσεων στη βιβλιογραφία που αντιμετωπίζουν αυτό το πρόβλημα, αν και όλες έχουν διαφορετικούς στόχους, όπως η επίτευξη καλύτερης απόδοσης και διαχείρισης πόρων, η μείωση των εκπομπών άνθρακα και του κόστους, η βελτίωση των συστημάτων απόκρισης της ζήτησης (Demand Response Systems- DRS) και βελτίωση της γνώσης και του αυτοματισμού του συστήματος, μέσω συσχέτισης δεδομένων (όπως θερμοκρασία, υγρασία, φωτεινότητα ή άλλοι αισθητήρες, πληροφορίες καιρού, προφίλ χρήστη, προφίλ κτιρίου κ.λπ.).

6.2 Απαιτήσεις Δικτύου

Τα ολοκληρωμένα δίκτυα Edge Computing απαιτούν μια μακροπρόθεσμη στρατηγική με επαρκείς πόρους, συνεργάτες και σχέδιο υλοποίησης. Με την παροχή κατάλληλης κατανομημένης υποδομής δικτύου, οι οργανισμοί μπορούν να αξιολογήσουν τοποθεσίες και στόχους για τα πιθανά Edge δίκτυα [25].

6.2.1 Αξιολόγηση των αναγκών, των πόρων και των στόχων στο Ακραίο Δίκτυο

Οι οργανισμοί που ενδιαφέρονται να αναπτύξουν edge computing δίκτυα πρέπει πρώτα να γνωρίζουν το κοινό στο οποίο απευθύνονται. Το κοινό αυτό μπορεί να συμπεριλαμβάνει υπάρχοντες ή δυνητικούς πελάτες, που θα επωφελούνται από την πρόσθετη υποδομή. Η γνώση των απαιτήσεων των πελατών, όπως α) οι παγκόσμιες γεωγραφικές τοποθεσίες, β) οι περιοχές συγκεντρωμένων υπηρεσιών και γ) οι ταχύτητες παράδοσης περιεχομένου, μπορεί να βοηθήσουν στη λήψη αποφάσεων γύρω από μια επένδυση Edge.

Η δημιουργία καταλόγου υφιστάμενων κέντρων δεδομένων και κατανομημένης υποδομής δικτύου — συμπεριλαμβανομένων συσκευών και αισθητήρων IoT — είναι απαραίτητη για την ανάπτυξη νέων ακραίων δικτύων. Το επόμενο βήμα είναι η εύρεση ευέλικτων λύσεων Edge computing, ώστε να ενσωματωθούν τα πιο πρόσφατα προϊόντα στα παλαιού τύπου συστήματα.

6.2.2 Επιλογή και ανάπτυξη λύσεων Edge Computing

Οι εταιρείες Edge computing είναι οι προμηθευτές που προσφέρουν στους οργανισμούς το υλικό, τα μηχανήματα δικτύωσης, τους επεξεργαστές, τις συμβάσεις συνεγκατάστασης κέντρων δεδομένων και τις καινοτόμες τεχνολογίες αιχμής που απαιτούνται για τη δημιουργία ενός δικτύου Edge.

Οι επιχειρησιακοί οργανισμοί, με τις υπάρχουσες παγκόσμιες υποδομές και τα δίκτυα, θα έχουν την δυνατότητα να προσθέσουν - ευκολότερα - συσκευές edge και να μεταμορφώσουν τα δίκτυα παλαιού τύπου, ώστε να εξυπηρετήσουν τους κοντινούς τελικούς χρήστες.

Εναλλακτικά, οι νεοσύστατες επιχειρήσεις και οι μικρότερες εταιρείες θα πρέπει να αποκτήσουν την απαιτούμενη υποδομή και τις λύσεις που παρέχονται από παρόχους Edge Computing, για τη δημιουργία Edge δικτύων. Λόγω της ευαίσθητης φύσης του χρόνου λειτουργίας και της αξιόπιστης υπηρεσίας, οι οργανισμοί πρέπει να επιδεικνύουν τη δέουσα επιμέλεια για την επιλογή των κατάλληλων λύσεων.

6.2.3 Διατήρηση, Ασφάλεια και Βελτιστοποίηση της Υποδομής Edge

Τα Edge Computing δίκτυα απαιτούν συνεχή συντήρηση και συντονισμό απόδοσης, όπως κάθε άλλο δίκτυο πληροφορικής. Οι διαχειριστές μπορούν να αξιολογούν τα πιθανά προβλήματα και να τα επιδιορθώσουν, όπως απαιτείται, για να βελτιστοποιήσουν το κατανεμημένο δίκτυο.

Οι οργανισμοί που υιοθετούν πρόσθετα edge δίκτυα, τα οποία βρίσκονται απομονωμένα σε μεγάλες γεωγραφικές αποστάσεις, πρέπει να αναπτύξουν μια στρατηγική που να λαμβάνει υπόψη και να διατηρεί κεντρικά μια σειρά απομακρυσμένων δικτύων.

6.3 Edge Computing Hardware

Το Edge computing hardware είναι οι διακομιστές και οι μηχανές που συνδέουν και διαχειρίζονται τα edge δίκτυα. Οι ανθεκτικοί αυτοί υπολογιστές, οι οποίοι είναι σχεδιασμένοι να συλλέγουν, να αποθηκεύουν, να επεξεργάζονται και να αναλύουν τα δεδομένα στα ακραία δίκτυα, πρέπει να διαχειρίζονται μια ποικιλία από εξωγενείς παράγοντες, στο εξωτερικό περιβάλλον. Πρέπει επίσης να παρέχουν συνεχή απόδοση και να συνδέονται με τα υπάρχοντα συστήματα δικτύου.

Λειτουργικότητα και απόδοση

Το Edge Hardware, όπως και οι υπόλοιπες υποδομές δικτύου, έχει μια συγκεκριμένη λειτουργία. Για κατανεμημένα δίκτυα, οι υπολογιστές edge χρειάζονται προηγμένες I/O Ports, για τη σύνδεση νέου και παλαιού τύπου μηχανημάτων, την πιο πρόσφατη ασφάλεια για προστασία από κρυπτογραφικές απειλές, και επαρκή χώρο αποθήκευσης με SSD ή HDD.

Το Edge hardware πρέπει να προσφέρει τόσο socket-based βιομηχανικούς υπολογιστές, όσο και επιλογές SoC (System-on-a-Chip) όπως GPUs και CPUs, ανάλογα με τις απαιτήσεις απόδοσης. Οι οργανισμοί πρέπει να επιλέγουν προσεκτικά, καθώς οι επεξεργαστές επηρεάζουν την ταχύτητα και την ποσότητα του φόρτου εργασίας, που ολοκληρώνεται στο ακραίο δίκτυο. Οι επιταχυντές απόδοσης (performance accelerators), συμπεριλαμβανομένων των πολυπύρηνων CPUs, των VPUs και των NVMe (nonvolatile memory express), είναι απαραίτητα πρόσθετα για περαιτέρω βελτιστοποίηση της απόδοσης του Edge hardware (βλ Σχήμα 20).



Σχήμα 20 - Converged Edge Σύστημα HPE Edgeline

Κατασκευασμένο για οποιοδήποτε περιβάλλον

Σε αντίθεση με τα παραδοσιακά κέντρα δεδομένων, τα edge δίκτυα μπορούν να λάβουν πολλές ρυθμίσεις και η απομακρυσμένη φύση τους μπορεί να σημαίνει έκθεση σε διάφορα στοιχεία. Οι συσκευές Edge hardware είναι συμπαγείς και αξιόπιστοι υπολογιστές, κατασκευασμένοι για να διαχειρίζονται ακραίες θερμοκρασίες, διάφορες επιλογές εύρους ισχύος, και έκθεση σε διακοπές που προκαλούνται από τις καιρικές συνθήκες.

Άλλοι περιβαλλοντικοί παράγοντες που πρέπει να ληφθούν υπόψη, περιλαμβάνουν το φυσικό μέγεθος του Edge δικτύου, τους ρύπους και την έκθεση σε ηλεκτρομαγνητικά κύματα ή κραδασμούς (βλ Σχήμα 21).



Σχήμα 21 - Cisco ISR Routers και USC-E Series για Edge Computing

Συνεργασία με εταιρείες Edge Computing

Η δημιουργία ενός Edge δικτύου συχνά απαιτεί την απόκτηση προϊόντων ή υπηρεσιών, από πολλές Edge Computing εταιρείες που προσφέρουν υπηρεσίες cloud, τηλεπικοινωνίες, edge hardware και πολλά άλλα.

Παραδείγματα προμηθευτών Edge Computing

Public Cloud Computing

- Amazon Web Services
- Google Cloud
- IBM Cloud
- Microsoft Azure
- Rackspace

Content Delivery Networks

- Akamai
- Cloudflare
- Fastly
- Imperva
- KeyCDN

Edge Computing Hardware

- ADLINK Technology
- Arista Networks
- Cisco
- Dell EMC
- HP Enterprise

Θεωρήσεις και ερωτήματα για τις λύσεις Edge Computing

Η προσθήκη των ακραίων δικτύων, στην υποδομή κάποιου οργανισμού, απαιτεί μια συντονισμένη στρατηγική, η οποία θα λαμβάνει υπόψη τους επιχειρηματικούς στόχους, τις απαιτήσεις απόδοσης και χωρητικότητας, τις μεταβολές της τοποθεσίας, την ασφάλεια και πολλά άλλα. Κατά την αξιολόγηση των λύσεων, οι υπεύθυνοι αγορών θα πρέπει να έχουν υπόψη τους τα ακόλουθα ερωτήματα:

- Ποιοι στόχοι επιτυγχάνονται με την αγορά αυτής της λύσης;
- Πληροί η λύση τον προϋπολογισμό και τις τεχνικές απαιτήσεις του οργανισμού;
- Πώς προσεγγίζουν οι λύσεις προμηθευτών τη συμμόρφωση και τις κανονιστικές απαιτήσεις;
- Ποιες ενσωματωμένες λειτουργίες και εργαλεία συνοδεύονται από τις λύσεις;
- Είναι η λύση αρκετά ευέλικτη ώστε να ενσωματώνεται με παλαιά και πιθανά μελλοντικά συστήματα;
- Η νέα λύση ξεπερνά τις υφιστάμενες, όσον αφορά τη συνδεσιμότητα και την ανταπόκριση;
- Ποιοι είναι οι όροι παροχής υπηρεσιών και το επίπεδο συνεχούς υποστήριξης και συντήρησης;

- Προσφέρει ο προμηθευτής διαχειριζόμενες ή φιλοξενούμενες υπηρεσίες edge computing;

Καθώς οι οργανισμοί προετοιμάζονται για την επόμενη γενιά παροχής υπηρεσιών σε πελάτες και τελικούς χρήστες, η προσθήκη Edge Computing λύσεων μπορεί να κάνει τη διαφορά στη δημιουργία ισχυρών και ευέλικτων edge δικτύων.

6.4 Τύποι Επεξεργασιών για Edge Computing (xPU)

Κατανόηση των διαφορών μεταξύ των Edge-Based επεξεργασιών

Όσον αφορά το Edge του IoT ή το Industrial IoT (IIoT), πρέπει να οριστούν ορισμένα στοιχεία. Ένα από τα στοιχεία αυτά είναι, το «**πού ακριβώς βρίσκεται το Άκρο;**» Σε ορισμένες περιπτώσεις, το Άκρο αναφέρεται στα πιο εξωτερικά στοιχεία, τις συσκευές που αγγίζουν πραγματικά τον έξω κόσμο. Για παράδειγμα, θα μπορούσε να αναφέρεται σε έναν αισθητήρα θερμοκρασίας ή υγρασίας, σε μία κάμερα ή σε μία άλλη συσκευή απεικόνισης.

Ορισμένοι θεωρούν ότι το Edge αναφέρεται στο στοιχείο επεξεργασίας που συνδέεται με το Cloud, συνήθως ένα σύστημα που έχει χαρακτηριστικά που μοιάζουν με διακομιστή. Αυτός ο υπολογιστής Άκρου έχει γενικά μεγάλη επεξεργαστική ισχύ και μερικά διαφορετικά μέσα επικοινωνίας, τα οποία θα μπορούσαν να είναι ενσύρματα ή ασύρματα, συχνά ανάλογα με το πόσο μακριά πρέπει να ταξιδέψουν τα δεδομένα.

Επιλογές

Καθώς οι απαιτήσεις απόδοσης για τους Ακραίους Υπολογιστές που χρησιμοποιούνται σε εφαρμογές τεχνητής νοημοσύνης, όρασης και αυτόνομων οχημάτων αυξάνονται, απαιτούν πολλαπλά στοιχεία επεξεργασίας για τον χειρισμό των δεδομένων και των διαδικασιών λήψης αποφάσεων. Μερικά από τα πιο κοινά στοιχεία επεξεργασίας περιλαμβάνουν CPU (κεντρικές μονάδες επεξεργασίας), GPU (μονάδες γραφικής επεξεργασίας), TPU (μονάδες επεξεργασίας Tensor) και VPU (μονάδες επεξεργασίας όρασης). Ενώ αυτοί οι όροι χρησιμοποιούνται μερικές φορές εναλλακτικά, οι μονάδες αυτές είναι αρκετά διαφορετικές, όσον αφορά την λειτουργία και την χρήση τους [26].

CPU (Central Processing Units)

Μια CPU, ο πιο κοινός τύπος επεξεργαστή, εμπίπτει συχνά σε μία από τις δύο κατηγορίες — Intel (ή X86) ή Arm. Η CPU τυπικά βρίσκεται σε οποιαδήποτε κύρια υπολογιστική πλατφόρμα και συχνά επαυξάνεται (ή εκφορτώνεται) από έναν από τους άλλους τύπους επεξεργασιών. Ως στοιχείο γενικής χρήσης, η CPU χειρίζεται τις γενικές εργασίες υπολογισμού, οι οποίες περιλαμβάνουν την είσοδο/εξόδο και την ανάλυση εργασιών σε άλλους επεξεργαστές. Ο επεξεργαστής κινητής υποδιαστολής (floating-point processor - FPU), ο οποίος θα βρίσκεται δίπλα στην CPU σε πολλά σχέδια, έχει τυλιχθεί στο ίδιο κομμάτι πυριτίου, εξαλείφοντας μια συσκευή και αυξάνοντας την απόδοση.

GPU (Graphical Processing Units)

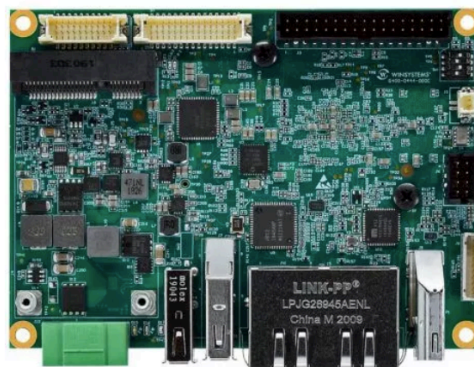
Η GPU, με την εξαιρετικά παραλληλισμένη δομή της, έχει σχεδιαστεί ειδικά για την επιτάχυνση των δεδομένων εικόνας, μεταφέροντας συνήθως τα δεδομένα μέσα και έξω από ένα frame buffer, μεταφέροντας τελικά αυτά τα δεδομένα προς τα έξω σε μια οθόνη. Τέτοιες συσκευές είναι αρκετά κοινές σε ενσωματωμένα συστήματα, φορητές συσκευές, διακομιστές και κονσόλες παιχνιδιών. Είναι αυτός ο παραλληλισμός που ταιριάζει σε δεδομένα εικόνας, σε σύγκριση με μια CPU.

VPU (Vision Processing Units)

Οι VPU's, όπως το Movidius της Intel, επιτρέπουν εργασίες θέασης high-end υπολογιστών καθώς και εργασίες τεχνητής νοημοσύνης στο Άκρο του δικτύου. Τέτοιοι επεξεργαστές έχουν τη δυνατότητα να συνδυάζουν εξαιρετικά παράλληλους προγραμματιζόμενους υπολογισμούς, με επιτάχυνση υλικού (hardware acceleration) για συγκεκριμένο φόρτο εργασίας, με ελάχιστη κίνηση δεδομένων. Έχουν σχεδιαστεί για να ελαχιστοποιούν την κατανάλωση ενέργειας, ενώ μεγιστοποιούν την απόδοση για εφαρμογές βίντεο, όπως έξυπνες κάμερες και συσκευές τεχνητής νοημοσύνης.

TPU (Tensor Processing Units)

Με την πρόσφατη τάση προς την τεχνητή νοημοσύνη (AI) και τη μηχανική μάθηση (ML), το TPU βρίσκεται στο επίκεντρο. Όπως ο επεξεργαστής X86 που ξεκίνησε ως σχεδιασμός της Intel, ο TPU είναι ένας επιταχυντής τεχνητής νοημοσύνης ASIC (AI accelerator ASIC) ο οποίος αναπτύχθηκε από την Google, ειδικά για το δικό της λογισμικό TensorFlow, για εφαρμογές νευρωνικού δικτύου μηχανικής μάθησης. Το σύνολο οδηγιών είναι πλέον διαθέσιμο για χρήση από τρίτους, πράγμα που σημαίνει ότι ανεξάρτητοι προμηθευτές CPU μπορούν να υλοποιήσουν και να αναπτύξουν συσκευές για την cloud υποδομή της Google. Μικρά TPUs μπορούν να προστεθούν σε Ακραίους Υπολογιστές, όπως το ITX-P-C444 της WINSYSTEMS, μέσω της υποδοχής Mini-PCIe, για τη βελτίωση της μηχανής συμπερασμάτων AI (βλ. Σχήμα 22).



Σχήμα 22 - Τα OEM μπορούν να συνδυάσουν τη λειτουργικότητα που προσφέρει ένα TPU, με τις ισχυρές δυνατότητες του ITX-P-C444, εκμεταλλευόμενοι το SBC's PCIe Mini Card (mPCIe) slot

Το ITX-P-C444 είναι ένα βιομηχανικό SBC (Industrial Single Board Computer) σχεδιασμένο σύμφωνα με τον παράγοντα Pico-ITX. Η καρδιά του SBC είναι ένας επεξεργαστής εφαρμογών NXP i.MX8M, ο οποίος συνδυάζεται βιομηχανικό I/O και άλλες επιλογές επέκτασης, με dual Ethernet. Το i.MX8M έχει σχεδιαστεί για να μεγιστοποιεί την επεξεργασία βίντεο, ενώ το M4 MCU χειρίζεται τις λειτουργίες σε πραγματικό χρόνο και τις λειτουργίες καθαριότητας. Ως εκ τούτου, είναι κατάλληλο για εφαρμογές IIoT (Industrial IoT) που λειτουργούν δυναμικά σε

δύσκολες συνθήκες, όπως η ψηφιακή σήμανση (digital signage), ο βιομηχανικός αυτοματισμός (industrial automation) και ο αυτοματισμός κτιρίων (building automation).

XPU

Τέλος, το XPU, ή αλλιώς το Server GPU, είναι μια πρόσφατη ιδέα της Intel στο γενικό πλαίσιο των επεξεργαστών, αρχικά με στόχο το data center. Ένας από τους στόχους της Intel στο XPU ήταν να απλοποιήσει τη διαδικασία σχεδιασμού λογισμικού για προγραμματιστές, οι οποίοι μπορούν πλέον να έχουν πρόσβαση σε ένα κοινό, ανοιχτό και βασισμένο-σε-πρότυπα μοντέλο προγραμματισμού, σε όλη την οικογένεια προϊόντων XPU της εταιρείας.

6.5 Time Sensitive Networking για Edge Computing στα 5G δίκτυα

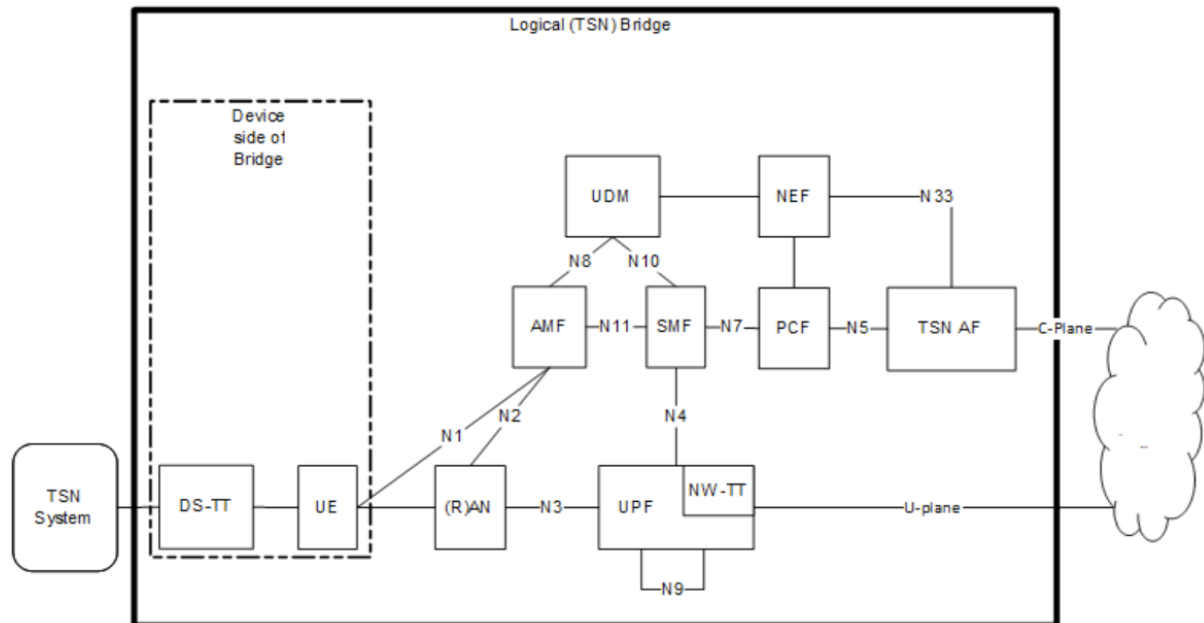
6.5.1 Το 5G Edge Computing γίνεται διαδραστικό με το Time Sensitive Networking

- Η συνδεσιμότητα θα παίζει σημαντικό ρόλο στον αυτοματισμό εργοστασίων και στη Βιομηχανία 4.0**. Η ασφαλής μεταφορά δεδομένων έγκαιρα είναι μία από τις βασικές απαιτήσεις της βιομηχανικής τεχνολογίας επικοινωνιών. Το Time Sensitive Networking (TSN), ένα Ethernet πρότυπο της IEEE, είναι ένας κύριος παράγοντας για την ικανοποίηση αυτής της απαίτησης, όπως και η τεχνολογία κινητής τηλεφωνίας 5G, τυποποιημένη από το 3GPP.
- Το Edge Computing τοποθετεί το 5G δίκτυο και τους υπολογιστικούς πόρους σε κοντινή τοποθεσία από τους χρήστες, γεγονός που διευκολύνει τις URLLC εφαρμογές (Ultra-Reliable Low-Latency Communication).

*** Η Βιομηχανία 4.0 (Industry 4.0) είναι η ονομασία που δόθηκε στην τρέχουσα τάση της αυτοματοποίησης και της ανταλλαγής δεδομένων στις τεχνολογίες παραγωγής. Περιλαμβάνει τα κυβερνο-φυσικά συστήματα, το Διαδίκτυο των πραγμάτων, το cloud computing και την γνωστική υπολογιστική. Η βιομηχανία 4.0 αναφέρεται συνήθως ως η Τέταρτη Βιομηχανική Επανάσταση (πηγή Wiki)*

Συνεργασία 5G και TSN

Η συνεργασία των 5G δικτύων και του TSN θα επιτρέψει ολιστικές επικοινωνίες για βιομηχανικούς αυτοματισμούς [27]



Σχήμα 23 - Προβολή αρχιτεκτονικής συστήματος με το 5G να εμφανίζεται ως TSN Bridge

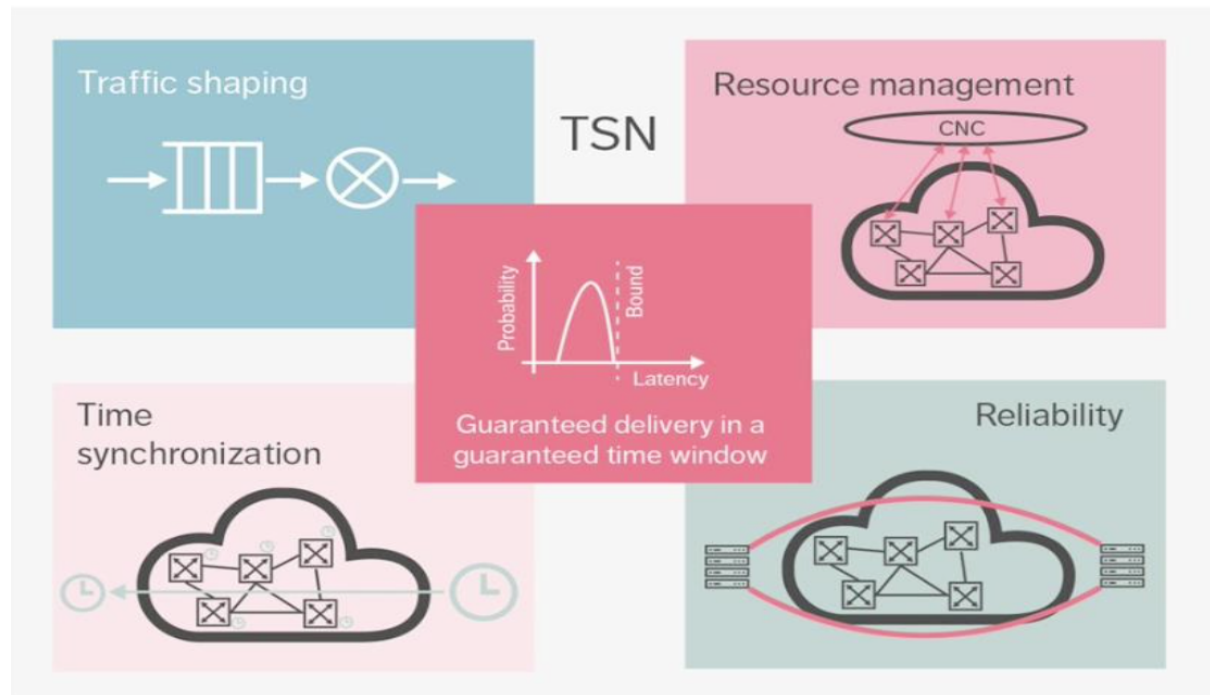
Το 5G θα διαδραματίζει σημαντικό ρόλο σε ένα βιομηχανικό περιβάλλον

- Η τεχνολογία 5G μπορεί να μειώσει το κόστος που σχετίζεται με την υποδομή καλωδίωσης, να υποστηρίξει εφαρμογές για κινητές συσκευές όπως αυτόνομα καρότσια ή κινούμενα AGV (Average Autonomous Vehicle) και να αυξήσει την ευελιξία στις βιομηχανικές εφαρμογές.
- Στον τομέα της μεταποίησης, υπάρχει μια αυξανόμενη ζήτηση για ειδικά κατασκευασμένα προϊόντα, γεγονός που οδηγεί σε μια τάση προς πιο ευέλικτες τοποθεσίες παραγωγής.
- Με την αρχιτεκτονική του Edge Computing, το δίκτυο 5G βρίσκεται εντός του πεδίου του εργοστασίου.

Σχετικά με τον κόσμο του TSN

Ο κύριος στόχος ενός δικτύου TSN είναι να παρέχει ντετερμινιστικές υπηρεσίες μέσω ενσύρματων δικτύων IEEE 802 (Ethernet). Αυτό σημαίνει εγγυημένη μεταφορά πακέτων, με περιορισμένη καθυστέρηση και χαμηλή απώλεια πακέτων.

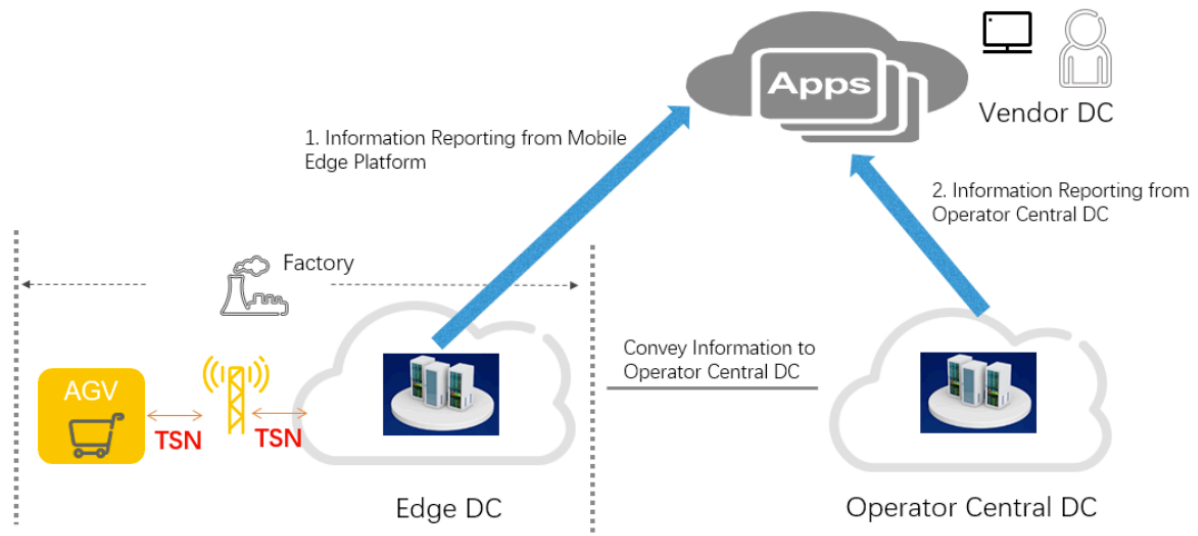
Τα πρότυπα TSN μπορούν να εφαρμοστούν σε πολλούς κλάδους, για παράδειγμα βιομηχανικά δίκτυα και δίκτυα αυτοκινήτων.



Σχήμα 24 - Πολύτιμα εργαλεία του TSN που επιτρέπουν την ανάπτυξη στον βιομηχανικό αυτοματισμό

Ενσωμάτωση 5G με TSN

- Το 5G είναι η ενδεδειγμένη λύση, για να συνδεθούν οι συσκευές (βιομηχανικοί αισθητήρες/ενεργοποιητές) ασύρματα σε ένα δίκτυο TSN. Οι νέες δυνατότητες του 5G, ειδικά στο Δίκτυο Ραδιοπρόσβασης (RAN), παρέχουν ακόμη καλύτερη αξιοπιστία και χαμηλότερη καθυστέρησης μετάδοσης, σε σύγκριση με το 4G. Η νέα αρχιτεκτονική του συστήματος 5G επιτρέπει ευέλικτες αναπτύξεις. Ως αποτέλεσμα, το 5G μπορεί να ενεργοποιήσει δίκτυα TSN που δεν περιορίζονται από εγκαταστάσεις καλωδίων.
- Για την υποστήριξη υπηρεσιών TSN μέσω συστημάτων 5G, απαιτείται περαιτέρω βελτίωση στο δίκτυο ραδιοπρόσβασης και στο κεντρικό δίκτυο. Οι κύριες προκλήσεις είναι να καταστεί δυνατή η διασύνδεση του δικτύου TSN και 5G. Το παρακάτω σχήμα δείχνει ένα παράδειγμα: πώς το δίκτυο 5G επεκτείνει ένα ενσύρματο δίκτυο TSN.



Σχήμα 25 - Το TSN & 5G εφαρμόζεται στο σενάριο βιομηχανίας

Ενεργοποιητές 3GPP*** για TSN μέσω 5G

Οι δυνατότητες 3GPP για υποστήριξη παρέχουν πληροφορίες αναφοράς χρόνου στο UE (User Equipment).

Λειτουργίες 3GPP για την υποστήριξη του λανθάνοντος χρόνου, βελτιώνοντας το φυσικό επίπεδο και το επίπεδο πρόσβασης.

Λειτουργίες 3GPP, όπως η βελτίωση του προγραμματισμού, για την υποστήριξη της κυκλικής κίνησης (cyclic traffic).

Χαρακτηριστικά 3GPP, όπως το edge computing για υποστήριξη TSN μετάδοσης.

Χαρακτηριστικά 3GPP, όπως ο έλεγχος πολιτικής (policy control) για την TSN κίνηση.

***Το 3rd Generation Partnership Project (3GPP) είναι ένας γενικός όρος για έναν αριθμό οργανισμών προτυποποίησης, οι οποίοι αναπτύσσουν πρωτόκολλα για τις κινητές τηλεπικοινωνίες. Το πιο γνωστό έργο του είναι η ανάπτυξη και των συντήρηση GSM, UMTS, LTE & 5G δικτύων

6.5.2 Η επανάσταση του αυτοματισμού: Προγράμματα για ακριβή χρονισμό του δικτύου

Το IEEE/IEC 60802 Industrial Time Sensitive Networking (TSN) περιγράφει την υλοποίηση συγχρονισμού υψηλής ακρίβειας χρησιμοποιώντας το IEEE 802.1AS (gPTP) [28]. Παρακάτω περιγράφεται μια επισκόπηση των προδιαγραφών για ακριβή χρονισμό και η συνιστώμενη βέλτιστη πρακτική για την απόδειξη της απόδοσης gPTP συσκευών και δικτύων.

Ο συγχρονισμός (Time synchronization) ήταν πάντα μια κρίσιμη πτυχή στα δίκτυα επικοινωνιών. Δεν αποτελεί εξαίρεση η διασφάλιση της διατήρησης της απόδοσης χρονισμού στα δίκτυα Ethernet και τις τελικές εφαρμογές. Πέρα από αυτό, υπάρχουν πιθανές βελτιώσεις απόδοσης που μπορούν να επιτευχθούν σε δίκτυα με ακόμη υψηλότερα επίπεδα συγχρονισμού ακριβείας. Το ερώτημα είναι, πώς μπορεί να επιτευχθεί;

Το Precision Time Protocol (PTP) γίνεται η μέθοδος επιλογής για τη διανομή χρόνου, μέσω Ethernet. Καθώς οι υλοποιήσεις έχουν αυξηθεί, το ίδιο συμβαίνει και με τη συνειδητοποίηση ότι διαφορετικές πτυχές των PTP δυνατοτήτων ταιριάζουν σε διαφορετικές ανάγκες ανάπτυξης, συχνά σε συνδυασμό με άλλες τεχνολογίες. Ως εκ τούτου, υπάρχουν πλέον πολλά «προφίλ» PTP, προσφέροντας περισσότερες επιλογές στους τελικούς χρήστες. Ένα παράδειγμα είναι το γενικό προφίλ PTP (general PTP - gPTP) το οποίο έχει μια σειρά από μοναδικά χαρακτηριστικά για την επίτευξη υψηλής ακρίβειας χρονισμού. Για παράδειγμα:

- Λογικός συντονισμός (Logical syntonization) όπου το κλείδωμα συχνότητας μπορεί να επιτευχθεί με off-the-shelf στοιχεία. Αυτό είναι οικονομικότερο για αναπτύξεις μεγάλης κλίμακας και υποστηρίζει γρήγορη ενεργοποίηση για «άμεσες» ανάγκες εφαρμογής.
- Η διαδρομή του χρονισμού μπορεί να αναδιαμορφωθεί πιο εύκολα, κάτι που βοηθάει στην ύπαρξης εφεδρείας και την ανοχή των σφαλμάτων.

Φυσικά, ορισμένες εφαρμογές απαιτούν εγγενώς ακριβή συγχρονισμό, λόγω των λειτουργικών απαιτήσεων και των σχετικών διεθνών προτύπων. Κάποιες άλλες εφαρμογές αποκτούν πλεονέκτημα απόδοσης από την πρόσθετη ακρίβεια των χρονικών σημάνσεων ή των παραγόμενων σημάτων φάσης και συχνότητας.

Ο Χρονισμός Υψηλής Ακρίβειας (High Precision Timing) δεν απαιτείται μόνο για τα πρότυπα

Ενώ οι προτυποποιημένοι φορείς καθορίζουν τις λειτουργικές απαιτήσεις στα Ethernet δίκτυα (πχ το IEC/IEEE 60802 για τον Βιομηχανικό Αυτοματισμό) και παρέχουν διαφορετικά προφίλ για την υποστήριξη ορισμένων εφαρμογών, ακόμα και τα δίκτυα τα οποία δεν λειτουργούν με πρότυπα αυστηρών χρονικών περιορισμών αντιμετωπίζουν σοβαρούς κινδύνους, αν δεν επιδιώξουν την υψηλή ακρίβεια. Ορισμένα παραδείγματα - Αυτόνομα Self-driving οχήματα, VR και AR - δείχνουν μια σειρά περιβαλλόντων όπου τα προβλήματα συγχρονισμού μπορεί να προκαλέσουν προβλήματα από κακή εμπειρία χρήστη και εμπορική μη-βιωσιμότητα.

Οι απαιτήσεις συγχρονισμού για τα προϊόντα και τις εφαρμογές που λειτουργούν σε αυτά τα περιβάλλοντα είναι πολύ αυστηρές. Απαιτούν μετρήσεις με την υψηλότερη δυνατή ακρίβεια και υψηλό bandwidth, ώστε για να μειωθούν τυχόν κίνδυνοι απόδοσης και να διατηρηθεί η αξιοπιστία.

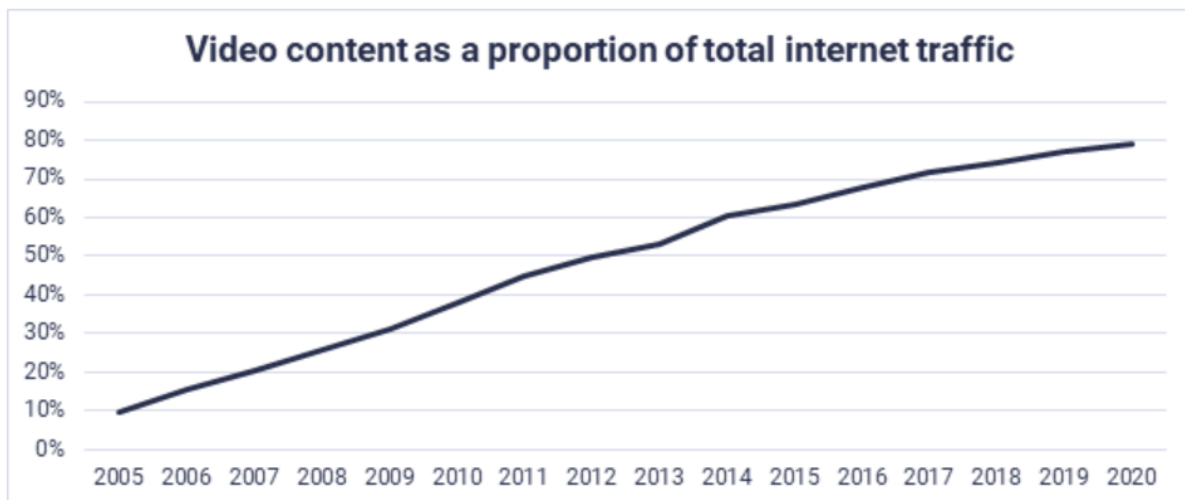
6.6 Edge computing Energy Efficiency: Αλλαγή του ισοζυγίου ενέργειας στα 5G δίκτυα

Μία από τις πιο σημαντικές προκλήσεις που συζητούνται σήμερα, είναι αυτή του περιορισμού της κατανάλωσης ενέργειας, για την καταπολέμηση των συνεχώς αυξανόμενων επιπέδων εκπομπών άνθρακα. Υπάρχει ένας αυξανόμενος αριθμός εταιρειών που εντείνουν τις προσπάθειές τους να μειώσουν τα επίπεδα εκπομπών, καθώς και η κατεύθυνση από τις κυβερνήσεις και τους αρμόδιους φορείς παγκοσμίως, σε όλους τους κλάδους. Οι επενδυτές

απαιτούν επίσης περισσότερη διαφάνεια από τις εταιρείες στην αναφορά των εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα. Ωστόσο, υπάρχει αυξανόμενη ανησυχία ότι ο κλάδος της "Τεχνολογίας Πληροφοριών και Επικοινωνίας" (Information and Communications Technology - ICT industry) συγκεκριμένα, προβλέπεται να είναι υπεύθυνος έως και για το 14% των παγκόσμιων εκπομπών άνθρακα, έως το 2040. Δύο σημαντικοί παράγοντες που συμβάλουν σε αυτό είναι τα δίκτυα και τα κέντρα δεδομένων. Ιδιαίτερα τα κέντρα δεδομένων της ICT βιομηχανίας, υπολογίζεται ότι θα καταναλώνουν το 33% της συνολικής παγκόσμιας παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, το 2025. Σε αυτή την ενότητα παρουσιάζονται οι λόγοι για τους οποίους η Υπολογιστική Άκρου θα μπορούσε να είναι μέρος της λύσης, όταν πρόκειται να επηρεάσει θετικά την ισορροπία της κατανάλωσης ενέργειας.

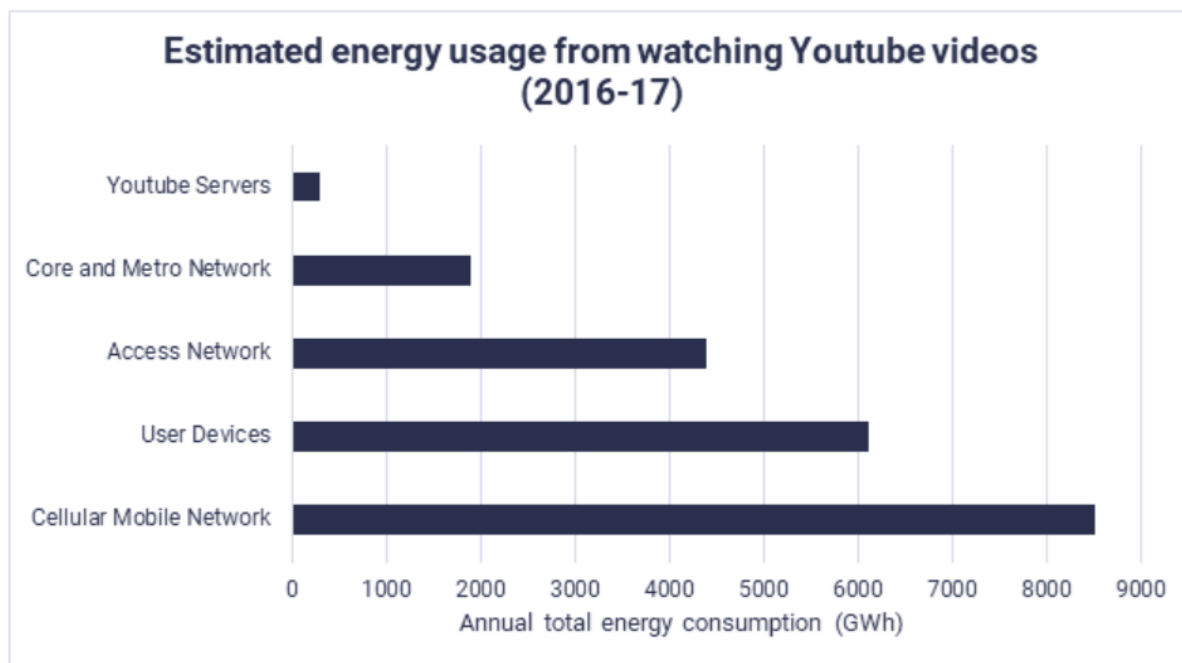
Κατανάλωση Bandwidth σε σχέση με τις Εκπομπές Άνθρακα

Λόγω των νέων τεχνολογιών (π.χ. cloud) και των νέων εφαρμογών (π.χ. βίντεο κατ' απαίτηση), η κατανάλωση bandwidth δικτύου έχει εκτοξευθεί τα τελευταία χρόνια. Οι υπηρεσίες ροής βίντεο, όπως το YouTube και το Netflix, καταναλώνουν περίπου το 80% του συνολικού bandwidth στο Διαδίκτυο (όπως φαίνεται παρακάτω). Αυτό οφείλεται εν μέρει στο ότι κάθε ροή αποτελείται από ένα μεγάλο αρχείο, αλλά και λόγω της φύσης του τρόπου με τον οποίο διανέμεται το περιεχόμενο βίντεο κατ' απαίτηση. Τα δεδομένα βίντεο μεταδίδονται από το νέφος σε εκατομμύρια ανθρώπους, με τρόπο ένας-προς-έναν, σε αντίθεση με την παραδοσιακή μετάδοση όπου η «ροή» βίντεο διανέμεται σε μαζικό πληθυσμό σε προγραμματισμένη ώρα (ένα-προς-πολλά).



Σχήμα 26 - Πηγή "Cisco VNI. forecast 2016 – 2020"

Η κατανάλωση υψηλού bandwidth συσχετίζεται με υψηλή κατανάλωση ενέργειας (και κατά συνέπεια υψηλές εκπομπές άνθρακα). Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι το δίκτυο χρησιμοποιείται πιο έντονα και απαιτεί σημαντικές ποσότητες ενέργειας για την παροχή αυτής της αυξανόμενης ποσότητας δεδομένων. Ο Daniel Schien στο Πανεπιστήμιο του Μπρίστολ ανέφερε ότι οι συνολικές εκπομπές από τους ανθρώπους που παρακολουθούσαν το YouTube παγκοσμίως το 2016, ισοδυναμούσαν με 10 εκατομμύρια τόνους CO₂. Όπως φαίνεται παρακάτω, πολλά από αυτά προέρχονται από το δίκτυο.



Σχήμα 27 - Πηγή "Evaluating Sustainable Interaction Design of Digital Services: The Case of YouTube (Daniel Schien, 2019)"

Βελτιστοποίηση της χρήσης Ενέργειας με το Edge Computing

Διαπιστώσαμε ότι η αυξημένη χρήση του Νέφους και της Δικτύωσης έχει ως αποτέλεσμα την υψηλή κατανάλωση σε bandwidth, οδηγώντας σε υψηλότερη χρήση ενέργειας. Αυτό το ζήτημα είναι διαδεδομένο, όχι μόνο στις υπηρεσίες ροής βίντεο, αλλά σε μια ποικιλία εφαρμογών που χρησιμοποιούν τα ενεργά δίκτυα και τα κέντρα δεδομένων. Το Edge Computing θα μπορούσε να το αντιμετωπίσει μειώνοντας τα φορτία δικτύου, βελτιστοποιώντας την ενέργεια που χρησιμοποιείται για υπολογισμούς και αποθήκευση, καθώς και επιτρέποντας λύσεις που θα βοηθούσαν τις επιχειρήσεις να παρακολουθούν και να διαχειρίζονται καλύτερα την κατανάλωση ενέργειας. Αυτοί οι παράγοντες διερευνώνται παρακάτω:

A) Το Edge μπορεί να μειώσει τον όγκο των δεδομένων που διασχίζουν το δίκτυο (ένας σημαντικός παράγοντας κατανάλωσης ενέργειας κατά την χρήση του YouTube)

Το Edge Computing ουσιαστικά μετακινεί την επεξεργαστική ισχύ από το Cloud σε ένα σημείο πιο κοντά στον τελικό χρήστη ή τη συσκευή [29]. Όπως αναφέρθηκε, αυτό είναι ιδιαίτερα σημαντικό για τις υπηρεσίες ροής βίντεο, όπου τα δίκτυα κινητής τηλεφωνίας αντιπροσώπευαν τη μεγαλύτερη πηγή κατανάλωσης ενέργειας του YouTube. Αν και υπάρχουν ήδη δίκτυα παράδοσης περιεχομένου για να μετριάσουν την ανάγκη μεταφοράς της ίδιας κίνησης μέσω των κορμών του Διαδικτύου, αυτά λειτουργούν κυρίως εκτός των πραγματικών δικτύων κινητής τηλεφωνίας. Η επισκεψιμότητα μέσω του δικτύου κινητής τηλεφωνίας θα μπορούσε να μετριαστεί περαιτέρω με τη φιλοξενία περιεχομένου πιο κοντά στον πελάτη, εντός του Ακραίου Δικτύου.

Η ανάπτυξη της ροής βίντεο και η χρήση άλλων εφαρμογών με μεγάλο bandwidth, όπως το gaming, θα επιδεινώσει περαιτέρω την αύξηση της κυκλοφορίας και της ενέργειας, ιδιαίτερα

καθώς το περιεχόμενο γίνεται πιο προσαρμοσμένο, υψηλότερης ευκρίνειας και πιο διαδραστικό. Μέρος αυτού του προβλήματος αντιμετωπίζεται μέσω νέων τεχνολογιών δικτύου.

Το Edge computing μειώνει επίσης την κατανάλωση ενέργειας στα δίκτυα, μειώνοντας τη συνολική ποσότητα δεδομένων που διασχίζουν το δίκτυο. Με την εκτέλεση εφαρμογών στο άκρο, τα δεδομένα μπορούν να υποβληθούν σε επεξεργασία και να αποθηκευτούν πιο κοντά στις συσκευές, αντί να βασίζονται σε κέντρα δεδομένων που βρίσκονται εκατοντάδες μίλια μακριά. Αυτό θα μπορούσε να οδηγήσει σε σημαντική μείωση της κατανάλωσης ενέργειας που σχετίζεται με τη μεταφορά μέσω δικτύου. Επίσης θα επωφεληθεί και από τη χαμηλή καθυστέρηση, που παρέχει αυτό το πλεονέκτημα.

B) Τα κέντρα δεδομένων στο Άκρο θα μπορούσαν να είναι πιο αποτελεσματικά από τα κέντρα δεδομένων στο Νέφος

Σύμφωνα με την παγκόσμια πρωτοβουλία ηλεκτρονικής βιωσιμότητας (Global e-Sustainability Initiative - GeSI), τα κέντρα δεδομένων καταναλώνουν ήδη πάνω από το 3% της συνολικής παγκόσμιας ηλεκτρικής ενέργειας και παράγουν το 2% των παγκόσμιων εκπομπών CO₂. Τα κέντρα δεδομένων προβλέπεται να χρησιμοποιούν περίπου 200 TWh ηλεκτρικής ενέργειας συνολικά έως το 2022, εκ των οποίων τα εταιρικά κέντρα δεδομένων θα αντιπροσωπεύουν περίπου το 25%, και τα κέντρα δεδομένων νέφους/υπερκλίμακας σχεδόν το 75%.

Παρόλο που τα μεγάλα κέντρα δεδομένων μπορούν να συναθροίσουν τις ανάγκες υπολογισμού και αποθήκευσης πολλών χιλιάδων χρηστών, ενδέχεται να μην βελτιστοποιούνται πάντα στον τρόπο με τον οποίο χρησιμοποιούν την ενέργεια. Τα κέντρα δεδομένων στο Νέφος λειτουργούν συχνά 24 ώρες το 24ωρο, 7 ημέρες την εβδομάδα, ακόμη και όταν δεν χρησιμοποιούνται. Τα κέντρα δεδομένων στο Άκρο μπορεί να χρειαστεί να αντιμετωπίσουν μεγαλύτερη ποικιλία στη χρήση και, επομένως, να σχεδιαστούν για να το διαχειρίζονται πιο αποτελεσματικά (για παράδειγμα, καθιστώντας τους πόρους «αδρανείς» όταν δεν απαιτούνται). Η ενορχήστρωση και η διαχείριση ενός κατακευματισμένου συνόλου (μικρότερων) κέντρων δεδομένων θα πρέπει να ενσωματωθούν στη σχεδίαση, και να διασφαλιστεί ότι οι υπολογιστικοί πόροι (και επομένως η ενέργεια) χρησιμοποιούνται αποτελεσματικά.

Απαιτείται ενέργεια για την τροφοδοσία και την ψύξη των κέντρων δεδομένων. Αναμφισβήτητα, ένα κέντρο δεδομένων στο Άκρο μπορεί να απαιτεί λιγότερη ενέργεια για ψύξη, σε σχέση με το μέγεθός του. Αυτό είναι γνωστό ως «δωρεάν» ψύξη και είναι ιδιαίτερα σημαντικό σε ψυχρότερα κλίματα. Μερικά rack διακομιστών (ακραίο "κέντρο δεδομένων") θα είχαν μεγαλύτερη επιφάνεια ανά διακομιστή από ό,τι αν το ίδιο μέγεθος rack επεξεργαζόταν σε ένα κέντρο δεδομένων υπερκλίμακας. Επί του παρόντος, η ψύξη των κέντρων δεδομένων αντιπροσωπεύει το 40% της συνολικής κατανάλωσης ενέργειας από τα κέντρα δεδομένων, επομένως, ανάλογα με την τοποθεσία τους, η συνολική κατανάλωση ενέργειας για τη λειτουργία και την ψύξη των μίνι κέντρων δεδομένων θα μπορούσε να μειωθεί.

Γ) Το Edge computing ενεργοποιεί πιο έξυπνα δίκτυα και επιτρέπει στις επιχειρήσεις να διαχειρίζονται καλύτερα την κατανάλωση ενέργειας

Το Edge Computing έχει βασικό ρόλο στην υποστήριξη εφαρμογών έξυπνων δικτύων, όπως η διαχείριση της ζήτησης και η βελτιστοποίηση του δικτύου. Σε ορισμένες περιπτώσεις, το Edge Computing μπορεί να βοηθήσει στη διαχείριση ενέργειας σε όλες τις επιχειρήσεις. Αισθητήρες και συσκευές IoT οι οποίες συνδέονται σε μια πλατφόρμα στο Άκρο σε εργοστάσια ή γραφεία, χρησιμοποιούνται για την παρακολούθηση της χρήσης ενέργειας και την ανάλυση των επιπέδων ενέργειας σε πραγματικό χρόνο. Με την παρακολούθηση της χρήσης ενέργειας σε πραγματικό χρόνο και την οπτικοποίηση της μέσω εργαλείων, οι επιχειρήσεις μπορούν να διαχειρίζονται καλύτερα την κατανάλωση ενέργειας και να εφαρμόζουν προληπτικά μέτρα για τον περιορισμό της χρήσης της.

Δ) Το Edge computing μπορεί να είναι ιδιαίτερα χρήσιμο για τη διαχείριση ανανεώσιμων πηγών ενέργειας

Επεκτείνοντας τα παραπάνω, το edge computing μπορεί να προωθήσει τη βιώσιμη διαχείριση των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας. Τα συστήματα που θα λειτουργούν στο ακραίο δίκτυο θα επιτρέψουν την αξιολόγηση σε πραγματικό χρόνο της προσφοράς και της ζήτησης για περιορισμένους ανανεώσιμους πόρους ενέργειας, όπως η ηλιακή και η αιολική ενέργεια. Το Edge computing θα χρησιμοποιηθεί για να παρέχει μια εικόνα σε πραγματικό χρόνο των επιπέδων προσφοράς και ζήτησης ενέργειας σε μια περιοχή, αλληλοεπιδρώντας με εφαρμογές IoT, σε εξαιρετικά χαμηλή καθυστέρηση. Με τη βοήθεια μικροδικτύων, οι πάροχοι ηλεκτρικής ενέργειας θα είναι συνέχεια σε θέση να παρέχουν επαρκή επίπεδα ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, ώστε να ανταποκρίνονται στη ζήτηση ηλεκτρικής ενέργειας μιας τοπικής περιοχής.

Συνολικά, είναι σημαντικό να αξιολογηθεί ο τρόπος με τον οποίο το edge computing θα επηρεάσει περαιτέρω την κατανάλωση ενέργειας και να αξιολογήσει τον πιθανό αντίκτυπό του στην ισορροπία. Οι επιχειρήσεις θα γίνονται όλο και πιο επιφυλακτικές σχετικά με τη χρήση του edge έναντι του cloud, όσον αφορά την κατανάλωση ενέργειας, καθώς επιδιώκουν να επιτύχουν τους στόχους εκπομπών άνθρακα.

Ενότητα 7 – Mobile Cloud Computing & Mobile Edge Computing & Use Cases

7.1 Εισαγωγή

Η γέννηση της Κινητής Υπολογιστικής Άκρου (MEC – Mobile Edge Computing) και τα πλεονεκτήματά της

Λαμβάνοντας υπόψη τα μειονεκτήματα του MCC, προτάθηκε η έννοια του ακραίου νέφους (EC – Edge Cloud). Ως έννοια το Cloudlet είναι το μεσαίο στρώμα ενός μοντέλου τριών επιπέδων, που αποτελείται από ένα κεντροποιημένο κέντρο δεδομένων, μια πλατφόρμα νέφους (πχ Cloudlet) και μια τερματική συσκευή. Το Cloudlet, ως η αρχική μορφή του EC, μπορεί να διευκολύνει τους τελικούς χρήστες ως προς τις υπολογιστικές και τις αποθηκευτικές δυνατότητες. Με το Cloudlet, οι υπηρεσίες νέφους του απομακρυσμένου κέντρου δεδομένων, μπορούν να επεκταθούν στους τελικούς χρήστες, σε κοντινή απόσταση. Καθώς, το Cloudlet είναι προσβάσιμο μόνο από σημεία πρόσβασης WiFi, τα οποία μπορούν να καλύψουν μόνο μικρές περιοχές, δεν μπορεί να εφαρμοστεί καθολικά στο δίκτυο.

Για την επίλυση των προαναφερθεισών προκλήσεων, το European Telecommunications Standard Institute (ETSI) πρότεινε αρχικά (εν έτει 2014) την ιδέα μιας νέας αρχιτεκτονικής για το MEC. Το MEC είναι μια νέα πλατφόρμα, η οποία μπορεί να παρέχει δυνατότητες υπολογιστικού νέφους και πληροφορικής εντός του Δικτύου Ραδιο-Προσβασης (RAN – Radio Access Network), σε κοντινή απόσταση από χρήστες κινητών τηλεφώνων. Ο αρχικός ορισμός του MEC αναφέρεται στη χρήση Σταθμών Βάσης (BS – Base Station) για την εκφόρτωση εργασιών που απαιτούν υπολογισμούς από τερματικές συσκευές. Αργότερα, τον Δεκέμβριο του 2014, με την έναρξη της ομάδας "MEC Industry Specification Group (ISG)", το ETSI ξεκίνησε την προτυποποίηση του MEC, για την προώθηση και την επιτάχυνση της ανάπτυξης του ακραίου υπολογιστικού νέφους (MCC – Mobile Cloud Computing) σε δίκτυα κινητής τηλεφωνίας. Το ETSI MEC ISG κατάφερε να ξεπεράσει τις προκλήσεις που αντιμετωπίζει το παράδειγμα του κεντροποιημένου υπολογιστικού νέφους (CC – Cloud Computing), σχετικά με τη διασφάλιση υψηλότερων ταχυτήτων και καθυστέρησης, παρέχοντας τα ανοιχτά περιβάλλοντα σε πλατφόρμες νέφους πολλών προμηθευτών (multi-vendor cloud platforms) που βρίσκονται στην άκρη του RAN. Από τον Σεπτέμβριο του 2016, με σκοπό τη διεύρυνση της δυνατότητας εφαρμογής της σε ετερογενή δίκτυα (πχ τεχνολογία σταθερής πρόσβασης, WiFi κλπ), η λέξη "Mobile" αφαιρέθηκε από το MEC, και το ETSI ISG μετονόμασε το Mobile Edge Computing σε Multi-access Edge Computing.

Το MEC, το οποίο αναπτύσσει διακομιστές νέφους στην άκρη του RAN (πχ σε BS), μεταφέρει στην άκρη του RAN τις δυνατότητες του Cloud Computing, δημιουργώντας έτσι ένα περιβάλλον παροχής χαμηλής καθυστέρησης (low latency) και υψηλού εύρους ζώνης (high bandwidth), με πρόσβαση σε πραγματικό χρόνο, στα ραδιο-δίκτυα.

7.2 MEC για 5G και IoT: Χαρακτηριστικά

Σε αυτήν την ενότητα, παρουσιάζονται τα τυπικά χαρακτηριστικά του MEC στο πλαίσιο του 5G και του IoT και, στη συνέχεια, συνοψίζεται η σύγκριση μεταξύ MEC (Mobile Edge Computing) και MCC (Mobile Cloud Computing).

7.2.1 Τυπικά χαρακτηριστικά

Το MEC έχει τυπικά χαρακτηριστικά όπως η εγγύτητα, η χαμηλή καθυστέρηση, το υψηλό εύρος ζώνης, η επίγνωση των πληροφοριών του ραδιο-δικτύου σε πραγματικό χρόνο, η επίγνωση τοποθεσίας, η υποστήριξη κινητικότητας, η ασφάλεια και η προστασία της ιδιωτικότητας.

1. **Εγγύτητα:** Το MEC αναπτύσσεται στην άκρη του δικτύου, εντός του ραδιο-δικτύου, το οποίο βρίσκεται σε κοντινή απόσταση από τους τελικούς χρήστες.
2. **Χαμηλή καθυστέρηση:** Το MEC μπορεί να παρέχει υπηρεσίες χαμηλού λανθάνοντος χρόνου, εκφορτώνοντας εργασίες εντατικού υπολογισμού σε κοντινούς MEC-διακομιστές, στο ακραίο δίκτυο, αντί για τον κεντρικό διακομιστή μέσω του δικτύου πυρήνα, γεγονός που μειώνει την πιθανή συμφόρηση του δικτύου και επιταχύνει την απόκριση της εφαρμογής.
3. **Υψηλό Bandwidth:** Το MEC παρέχει υψηλό bandwidth καθώς τα δεδομένα και οι εργασίες μετατοπίζονται στον κοντινό MEC-διακομιστή και όχι στον κεντρικό διακομιστή μέσω του δικτύου πυρήνα (Core). Επομένως, η μετάδοση δεδομένων μεταξύ του διακομιστή και του χρήστη καταλαμβάνει το πλήρες εύρος του δικτύων πρόσβασης, με υψηλή ταχύτητα.
4. **Πληροφορίες του ραδιο-δικτύου σε πραγματικό χρόνο:** Οι MEC-διακομιστές μπορούν να λαμβάνουν δεδομένα σε πραγματικό χρόνο, από τις συσκευές των χρηστών και μπορούν να εκτιμήσουν τις καταστάσεις του δικτύου με βάση τα δεδομένα αυτά. Επομένως, έχουν μια εικόνα σε πραγματικό χρόνο για τις πληροφορίες ραδιο-δικτύου.
5. **Επίγνωση τοποθεσίας:** Το MEC μπορεί να γνωρίζει την τοποθεσία των χρηστών, αναλύοντας τις πληροφορίες και τα δεδομένα που λαμβάνει από τις συσκευές των χρηστών, εντός του τοπικού δικτύου ραδιο-πρόσβασης.
6. **Υποστήριξη κινητικότητας:** Ένα κύριο χαρακτηριστικό των συσκευών των χρηστών είναι η κινητικότητα, η οποία υποστηρίζεται από το MEC. Ενώ οι χρήστες μετακινούνται, οι εργασίες μπορούν να μεταφορτωθούν σε διαφορετικούς MEC-διακομιστές, οι οποίοι συνεργάζονται μεταξύ τους.
7. **Ασφάλεια και προστασία ιδιωτικότητας:** Με το MEC, τα δεδομένα μπορούν να μεταδοθούν σε MEC-διακομιστές, αντί σε κεντρικούς διακομιστές, μειώνοντας τον κίνδυνο διαρροής/υποκλοπής δεδομένων στη διαδικασία της μετάδοσης.

7.2.2 Σύγκριση MEC με το Mobile Cloud Computing (MCC)

Το MEC μπορεί να θεωρηθεί ως εξέλιξη του MCC. Ωστόσο, υπάρχουν σημαντικές διαφορές μεταξύ MEC και MCC. Όπως φαίνεται στον Πίνακα 4, συγκρίνοντας τις διαφορές μεταξύ τους, το MEC φαίνεται να υπερισχύει του MCC, όσον αφορά τον λανθάνοντα χρόνο, την εξοικονόμηση ενέργειας, τον υπολογισμό με βάση την επίγνωση του γενικού πλαισίου, τη βελτίωση της ιδιωτικότητας και της ασφάλειας.

Aspects	MCC	MEC
Latency	όχι σύντομο, περίπου 30 - 100 ms	πολύ πιο σύντομο, περίπου 1 ms
Energy savings	δεν μπορεί ταυτόχρονα να μειώσει την κατανάλωση ενέργειας των συσκευών IoT και να ικανοποιήσει την απαίτηση καθυστέρησης	αυξάνει τη διάρκεια ζωής της μπαταρίας κατά 30% - 50%, ικανοποιώντας παράλληλα τις απαιτήσεις καθυστέρησης
Context awareness	καμία επίγνωση του πλαισίου	υψηλή επίγνωση του πλαισίου
Privacy and security	χαμηλό	υψηλό

Πίνακας 4 - Σύγκριση μεταξύ MEC και MCC

- Χαμηλή καθυστέρηση:** Συνήθως, η καθυστέρηση αποτελείται από την καθυστέρηση στην μετάδοση, την καθυστέρηση ουράς και την καθυστέρηση επεξεργασίας, οι οποίες εξαρτώνται αντίστοιχα από την απόσταση/μέσο μετάδοσης, το ρυθμό δεδομένων και την υπολογιστική ικανότητα. Πρώτον, η απόσταση μετάδοσης στο MEC είναι πολύ μικρότερη από αυτή στο MCC, οπότε και η αντίστοιχη καθυστέρηση είναι πολύ μικρότερη. Δεύτερον, στο περιβάλλον MCC, τα δεδομένα πληροφοριών πρέπει να περάσουν από πολλά διαφορετικά δίκτυα, όπως το RAN, το Backhaul δίκτυο και το Διαδίκτυο, όπου οι λειτουργίες διαχείρισης δικτύου - όπως η δρομολόγηση και ο έλεγχος κυκλοφορίας - προκαλούν υπερβολική καθυστέρηση. Αντίθετα, στο περιβάλλον MEC, η επικοινωνία περιορίζεται στο ακραίο δίκτυο. Τρίτον, για την καθυστέρηση επεξεργασίας, το MCC προσφέρει μεγάλες υπολογιστικές δυνατότητες, όπου συχνά είναι αρκετά υψηλότερες - σε τάξη μεγέθους - από τις ακραίες συσκευές. Ωστόσο, πρέπει να σημειωθεί ότι στο MCC υπάρχουν πολλοί διαφορετικοί χρήστες, οι οποίοι μοιράζονται τον κοινό υπολογιστικό πόρο, επομένως από αυτή την άποψη, το χάσμα της καθυστέρησης μπορεί να αντισταθμιστεί. Συνολικά, σύμφωνα με τις υπάρχουσες μελέτες όπως στην [30], η συνολική καθυστέρηση για το MCC κυμαίνεται περίπου από 30 έως 100 ms, κάτι που είναι μη-αποδεκτό στις χρονικά-κρίσιμες εφαρμογές 5G ή IoT (όπως πχ η αυτόνομη οδήγηση, το διαδικτυακό παιχνίδι σε πραγματικό χρόνο και υψηλής ποιότητας Virtual Reality / Augmented Reality), οι οποίες απαιτούν latency της τάξης του 1 ms.
- Εξοικονόμηση ενέργειας:** Οι περισσότερες IoT συσκευές έχουν περιορισμένη χωρητικότητα μπαταρίας, αλλά αναμένεται να εκτελούν εργασίες παρακολούθησης και ελέγχου (όπως πχ η παρακολούθηση της υγείας, η επιτήρηση πλήθους). Επί του παρόντος, η συχνή και γρήγορη επαναφόρτιση των μπαταριών των IoT συσκευών είναι αδύνατη. Ωστόσο, το MEC μπορεί να βοηθήσει στην εξοικονόμηση ενέργειας των συσκευών αυτών, εκφορτώνοντας τις εργασίες υπολογισμού από τις συσκευές στους MEC-διακομιστές, ικανοποιώντας παράλληλα τις αυστηρές απαιτήσεις καθυστέρησης και αξιοπιστίας. Σε συνέχεια των δοκιμών που πραγματοποιήθηκαν στο [31] και με βάση την εκφόρτωση υπολογισμών, παρατηρήθηκε αύξηση στην διάρκεια ζωής της μπαταρίας κατά 30% - 50%, σε IoT συσκευές που ήταν υπεύθυνες για Augmented Reality εφαρμογές. Αντίθετα, λόγω της μεγάλης απόστασης μεταξύ

των IoT συσκευών και των κεντρικών διακομιστών νέφους (ή και λόγω της μεγάλης πιθανότητας συμφόρησης στο Core δίκτυο), το MCC δεν είναι σε θέση να συμβάλει, ταυτόχρονα, στην εξοικονόμηση ενέργειας και να ικανοποιήσει την αυστηρή απαίτηση καθυστέρησης, εάν μεταφορτώσει τις εργασίες υπολογισμού στους κεντρικούς Cloud-διακομιστές.

3. **Επίγνωση του γενικού πλαισίου:** Χρησιμοποιώντας την εγγύτητα των ακραίων συσκευών στους τελικούς χρήστες, το MEC έχει τη δυνατότητα να παρακολουθεί τις πληροφορίες των χρηστών (π.χ. τοποθεσίες, ταχύτητες, συμπεριφορές κ.λπ.) σε πραγματικό χρόνο. Χρησιμοποιώντας τέτοιες πληροφορίες, μπορεί να παρέχει υπηρεσίες με επίγνωση του γενικού πλαισίου στους τελικούς χρήστες, το οποίο είναι επίσης ένα τυπικό χαρακτηριστικό του MEC σε σύγκριση με την MCC. Για παράδειγμα, οι έμποροι λιανικής μπορούν να εκμεταλλευτούν τους MEC-διακομιστές, ώστε να ανταποκρίνονται γρήγορα στις τάσεις της αγοράς και στις απαιτήσεις των πελατών τους, με βάση τα δεδομένα αγορών που συλλέγονται από τους χρήστες. Ένα άλλο παράδειγμα αποτελεί η έξυπνη γεωργία, η οποία μπορεί να επιτευχθεί με την εξόρυξη του μοτίβου του καιρού στους κοντινούς MEC-διακομιστές, με βάση τα δεδομένα που συλλέγονται για τις παραμέτρους ανάπτυξης των καλλιεργειών και τις καιρικές συνθήκες. Ένα τρίτο παράδειγμα μπορεί να αποτελέσει ο τουρισμός. Το MEC μπορεί να υποστηρίξει έξυπνα εξατομικευμένα συστήματα, με υπηρεσίες AR/VR, που θα μπορούν να προτείνουν νέες διαδρομές, με βάση τις πληροφορίες τοποθεσίας των χρηστών.
4. **Ενίσχυση Ιδιωτικότητας και Ασφάλειας:** Σε σύγκριση με το MCC, το MEC έχει ένα άλλο ελκυστικό χαρακτηριστικό, την ενίσχυση της Ιδιωτικότητας και της Ασφάλειας. Πρώτον, οι πλατφόρμες υπολογιστικού νέφους MCC, όπως το Microsoft Azure, είναι μεγάλα, δημόσια, κέντρα δεδομένων που είναι πιθανό να δεχτούν επίθεση, λόγω της υψηλής συγκέντρωσης χρηστών. Δεύτερον, στο MCC, η ιδιοκτησία και η διαχείριση των δεδομένων του χρήστη διαχωρίζονται, οδηγώντας σε διαρροή και απώλεια ιδιωτικών δεδομένων. Αντίθετα, οι MEC-διακομιστές, είναι κατανομημένοι και μικρής κλίμακας, στους οποίους τα δεδομένα των χρηστών είναι λιγότερο συγκεντρωμένα, έτσι ώστε να είναι πολύ λιγότερο πιθανό να δεχθούν επίθεση. Επιπλέον, οι MEC-διακομιστές μπορεί να είναι ιδιωτικά Cloudlets, οπότε διευκολύνεται το πρόβλημα διαρροής πληροφοριών. Επομένως, το MEC μπορεί να είναι επωφελές για εκείνες τις υπηρεσίες που απαιτούν ανταλλαγή ευαίσθητων πληροφοριών μεταξύ διακομιστών και τελικών χρηστών. Ένα παράδειγμα μπορεί να είναι η ανάπτυξη MEC σε επίπεδο επιχείρησης. Ο διαχειριστής της επιχείρησης είναι ο ίδιος υπεύθυνος για τις εξουσιοδοτήσεις, τον έλεγχο πρόσβασης και την ταξινόμηση των διαφορετικών αιτημάτων υπηρεσιών, καθώς επίσης δεν χρειάζεται να ανεβάζει ευαίσθητα δεδομένα σε απομακρυσμένους κεντρικούς Cloud διακομιστές (δεν απαιτεί η χρήση εξωτερικών μονάδων).

7.3 MEC για 5G και IoT: Τεχνολογίες Ενεργοποίησης

Αυτή η ενότητα παρουσιάζει τις βασικές τεχνολογίες που επιτρέπουν στο MEC να ενσωματωθεί στο 5G και το IoT, συμπεριλαμβανομένου του Cloud Computing, του SDN (Software Defined Network - Δίκτυο Οριζόμενο από το λογισμικό), NFV (Network Function

Virtualization - Εικονικοποίηση λειτουργιών δικτύου), VM (Virtual Machines - εικονικές μηχανές) και containers, έξυπνες συσκευές, τεμαχισμός δικτύου (Network Slicing) και εκφόρτωση υπολογισμών (computation offload) [35].

7.3.1 Υπολογιστική Νέφους – Cloud Computing (CC)

Η Υπολογιστική Νέφους είναι μια ώριμη και διαδεδομένη τεχνολογία, η οποία παρέχει υψηλή υπολογιστική ισχύ, άφθονους πόρους, σταθερή διαθεσιμότητα, εύκολη προσβασιμότητα και υψηλή απόδοση, ενώ μειώνει το κόστος διαχείρισης λογισμικού και υλικού. Επίσης, το CC έχει ενεργοποιήσει πολλά είδη εφαρμογών. Για παράδειγμα, η πλειονότητα των εφαρμογών για κινητά τηλέφωνα βασίζεται σε υπηρεσίες Νέφους. Επιπλέον, οι πιο καινοτόμες εφαρμογές λειτουργούν σε επίπεδο του Δικτύου Ραδιοπρόσβασης Νέφους (C-RAN=Cloud RAN. Η τεχνολογία του C-RAN συγκεντρώνει τους πόρους επεξεργασίας της βασικής ζώνης (baseband) σε μια δεξαμενή, και εικονικοποιεί τις BBU's κατ' απαίτηση. Μια σχετική τεχνολογία είναι το MCC, το οποίο παρέχει λύσεις στους χρήστες με περιορισμένους πόρους, για την εκτέλεση εργασιών εντατικών υπολογισμών. Αντίστοιχες ερευνητικές εργασίες έχουν προταθεί τα τελευταία χρόνια, όπως για παράδειγμα, στο [32], μελετάται το πρόβλημα κοινής κατανομής πόρων και ελαχιστοποίησης της ενέργειας στο C-RAN με το MCC, υπό τους χρονικούς περιορισμούς.

Το Cloud Computing είναι μια βασική τεχνολογία ενεργοποίησης του MEC. Το MCC μπορεί επίσης να θεωρηθεί ως επέκταση και εξέλιξη του CC. Με το CC, οι εικονικές μηχανές μπορούν να αναπτυχθούν σε διακομιστές μεγάλου όγκου σε σημεία όπως οι Gateways ή οι Σταθμοί Βάσης (BS's). Η χρήση της τεχνολογίας CC στην άκρη του δικτύου, δίνει τη δυνατότητα στο ακραίο δίκτυο να αποκτήσει αρκετούς πόρους για υπολογισμούς και αποθήκευση, επιτρέποντας έτσι πολλαπλές MEC-υπηρεσίες. Στο [33], με βάση την θεωρητική προσέγγιση παιγνίων (game theoretic approach), πραγματοποιείται αποτελεσματικά η εκφόρτωση υπολογισμών για CC κινητής τηλεφωνίας, με κατανομημένο τρόπο. Στο [34], το ακραίο νέφος έχει σχεδιαστεί ως μια δενδρική ιεραρχία γεω-διανεμημένων διακομιστών (με διακομιστές νέφους στο ακραίο δίκτυο), που εξυπηρετεί αποτελεσματικά τα μεγάλα φορτία των χρηστών, χρησιμοποιώντας τους πόρους του νέφους.

7.3.2 Δικτύωση Ορισμένη από το Λογισμικό - SDN

Η τεχνολογία SDN επιτρέπει στο δίκτυο να έχει δυνατότητα προγραμματισμού, να είναι «ευφυές» και «ανοιχτό». Η βασική έννοια του SDN είναι ο διαχωρισμός του επιπέδου δεδομένων (data plane) και το επίπεδο ελέγχου (control plane). Ένας SDN-ελεγκτής (SDN Controller) στο επίπεδο ελέγχου, έχει μια συνολική εικόνα ολόκληρου του δικτύου, έτσι ώστε να μπορεί να το ελέγχει και να το διαχειρίζεται.

Ως μία άλλη τεχνολογία ενεργοποίησης του MEC και του IoT, το SDN βοηθά στη βελτίωση της διαχείρισης που απαιτείται στις πλατφόρμες MEC. Όπως αναφέρθηκε παραπάνω, οι λειτουργίες του λογισμικού έχουν μεταφερθεί στους SDN-ελεγκτές, γεγονός το οποίο απαιτεί την συχνότερη επικοινωνία των ελεγκτών με τις συσκευές του data plane. Έτσι, οι ελεγκτές θα πρέπει να βρίσκονται δικτυακά κοντά (εγγύτητα) στις συσκευές του data plane, ώστε να ικανοποιούν τις απαιτήσεις του latency. Οι πόροι τοποθετούνται κοντά στις τελικές συσκευές, παρέχοντας έτσι υπηρεσίες χαμηλής καθυστέρησης. Επιπλέον, η ευρεία χρήση του SDN σε διάφορους τομείς, τροφοδοτεί την υιοθέτηση του MEC.

Η αξία της ενσωμάτωσης του SDN με το MEC σε συστήματα 5G και IoT, έχει αποτυπωθεί σε πολλές ερευνητικές εργασίες. Στο [38], παρουσιάζεται ένα συνολικό MEC-σύστημα που ενσωματώνει NFV (Network Function Virtualization - Εικονικοποίηση Λειτουργιών Δικτύου) και SDN. Στο [39], εφαρμόζεται ένα πλαίσιο MEC που βασίζεται σε SDN χαμηλής καθυστέρησης, καθιστώντας το data plane προγραμματιζόμενο τόσο για το MEC όσο και για το Core δίκτυο. Στο [40], προτείνεται μια αρχιτεκτονική τεσσάρων επιπέδων που ενεργοποιείται από MEC, SDN και 5G, διευκολύνοντας τη κοντινότερη σύνδεση μεταξύ των μονάδων κυκλοφορίας.

7.3.3 Εικονικοποίηση Λειτουργιών Δικτύου - Network function virtualization - NFV

Το NFV λειτουργεί ως συμπληρωματική τεχνολογία του SDN. Πιο συγκεκριμένα, αποσυνδέει τον φυσικό εξοπλισμό του δικτύου από τις εικονικοποιημένες λειτουργίες του δικτύου, μετατοπίζοντας τις λειτουργίες σε υπολογιστικές πλατφόρμες από εξειδικευμένο υλικό (specialized hardware) που βασίζεται σε τεχνολογίες λογισμικού. Με το NFV, μια δεδομένη υπηρεσία μπορεί να αποσυντεθεί σε ένα σύνολο λειτουργιών εικονικού δικτύου (Virtual Network Functions - VNF), οι οποίες μπορούν να υλοποιηθούν σε λογισμικό, που εκτελείται σε φυσικούς διακομιστές. Το NFV ανοίγει το δρόμο για την υλοποίηση διαφορετικών τρόπων παροχής υπηρεσιών δικτύου. Τα χαρακτηριστικά αυτών των διαφορετικών τρόπων περιλαμβάνουν (α) ευέλικτη ανάπτυξη λειτουργιών δικτύου, (β) αποσύνδεση λογισμικού από το υλικό και (γ) δυναμική λειτουργία.

Έχει αποδειχθεί ότι το NFV είναι ένας σημαντικός παράγοντας για την ενσωμάτωση του MEC στο IoT. Το MEC μπορεί να επαναχρησιμοποιήσει την υποδομή εικονικοποίησης της NFV, όσο γίνεται περισσότερο, μαζί με τη διαχείριση της υποδομής NFV. Επιπλέον, η αρχιτεκτονική MEC βασίζεται σε μια εικονική πλατφόρμα, παρόμοια με αυτή του NFV. Τέλος, το NFV μπορεί να κλιμακώσει δυναμικά τους πόρους του δικτύου κατ' απαίτηση, γεγονός που αυξάνει την επεκτασιμότητα των MEC-εφαρμογών.

Αντίστοιχες έρευνες έχουν πραγματοποιηθεί προσφάτως. Στο [36], αποδεικνύεται ότι το NFV μπορεί να βελτιώσει το MEC, αυξάνοντας την ευελιξία του, τοποθετώντας MEC-υπηρεσίες σε οποιονδήποτε κόμβο που είναι ικανός να εικονικοποιήσει τους πόρους του. Σχεδιάζεται ένα πλαίσιο προσομοίωσης MEC με δυνατότητα NFV, το οποίο μπορεί να πραγματοποιήσει εγκαίρως την κατανομή πόρων, και να πληροί τα απαιτούμενα επίπεδα καθυστέρησης.

7.3.4 Πληροφοριο-Κεντρική Δικτύωση - Information Centric Networking - ICN

Για να ικανοποιηθεί η τεράστια ζήτηση της κίνησης στις αναδυόμενες IoT υπηρεσίες (πχ AR/VR), έχουν αναπτυχθεί νέες τεχνολογίες δικτύου, όπως το ICN. Το ICN προτείνει ένα νέο μοντέλο Δημοσίευσης-Εγγραφής (Publish-Subscribe) για να αντικαταστήσει το παραδοσιακό μοντέλο Πελάτη-Διακομιστή. Το ICN είναι μια Αρχιτεκτονική Διαδικτύου, η οποία βάζει τις πληροφορίες στο «κέντρο», όπου πρέπει να βρίσκονται. Το ICN φέρνει πολλά πλεονεκτήματα, συμπεριλαμβανομένης της βελτιωμένης αξιοπιστίας, και της γρήγορης και αποτελεσματικής παράδοσης δεδομένων.

Το MEC και το ICN αν και μπορούν να αναπτυχθούν ανεξάρτητα, είναι ευεργετικά για το 5G και το IoT εφόσον λειτουργήσουν συνεργατικά. Η χρήση του ICN μπορεί να βελτιώσει την απόδοση του MEC, καθώς μπορεί να επιλύσει ορισμένα από τα θέματα που προκύπτουν στα

MEC συστήματα. Για παράδειγμα, η επαναδιαμόρφωση (reconfiguration) σε επίπεδο εφαρμογής χρειάζεται μια - εκ νέου - προετοιμασία της περιόδου λειτουργίας στο MEC σύστημα, η οποία αυξάνει την συνολική καθυστέρηση. Το ICN έχει τη δυνατότητα να απλοποιήσει τη ρύθμιση των παραμέτρων που σχετίζονται με το δίκτυο, για τις εφαρμογές αυτές, καταφέροντας να μειώσει την καθυστέρηση αναδιαμόρφωσης. Επιπλέον, το ICN θα μπορούσε να βελτιώσει τις δυνατότητες προσωρινής αποθήκευσης (caching storage) και αποθήκευσης στο άκρο (edge storage), σε MEC δίκτυα.

Παρακάτω αναφέρονται ορισμένες μελέτες που έχουν αναπτυχθεί και αποδεικνύουν τη σημασία της ενοποίησης του ICN με το MEC. Στο [37], περιγράφεται το όραμα για τον συνδυασμό MEC και ICN, στα σενάρια συνδεδεμένων οχημάτων. Στο [41], προτείνεται ένα ολοκληρωμένο πλαίσιο που ενσωματώνει το ICN με το MEC, με σκοπό να επιτραπεί η δυναμική ενορχήστρωση των υπολογιστικών πόρων, προσωρινής αποθήκευσης και δικτύωσης, μέσω των οποίων η απόδοση των δικτύων οχημάτων επόμενης γενιάς μπορεί να βελτιωθεί περαιτέρω. Για την αντιμετώπιση του προβλήματος βελτιστοποίησης της κατανομής πόρων χρησιμοποιείται η ενισχυτική μάθηση (reinforcement learning). Στο [42], προτείνεται ένα ετερογενές πλαίσιο δικτύου με επίκεντρο την πληροφορία, για τη βελτιστοποίηση της κατανομής εικονικών πόρων στην άκρη του δικτύου.

7.3.5 Εικονικές Μηχανές και Containers

Οι εικονικές μηχανές (Virtual Machines – VM's) χρησιμοποιούνται ευρέως για τη διαχείριση κέντρων δεδομένων. Υπάρχει δυνατότητα να δημιουργηθούν πολλαπλά VM's, σε έναν κοινόχρηστο διακομιστή, σύμφωνα με τις απαιτήσεις των διαφορετικών χρηστών (πχ για υπολογιστικούς πόρους, χώρο αποθήκευσης και bandwidth δικτύου) αξιοποιώντας τεχνικές που βασίζονται στην εικονικοποίηση. Έτσι, η χρήση των υπο-φορτωμένων διακομιστών θα μπορούσε να βελτιωθεί και η κατανάλωση ενέργειας θα μπορούσε να μειωθεί, καθώς πολλά VM's μπορούν να συνυπάρχουν σε έναν μόνο φυσικό διακομιστή.

Τα Containers είναι επίσης μια ευρέως χρησιμοποιούμενη τεχνική. Με τα Container, οι πόροι των φυσικών μηχανών μπορούν να χωριστούν, δημιουργώντας πολλούς, πολύ μικρότερους και απομονωμένους υπο-πόρους (instances) για την πραγματοποίηση λειτουργιών, από ότι στα VM's. Τα Container έχουν το πλεονέκτημα της εύκολης εγκατάστασης και της γρήγορης μετεγκατάστασης, αν και είναι λιγότερο ασφαλή από τα VM's, στα οποία μπορούν να εκτελεστούν πολλαπλές υπηρεσίες πιο αποτελεσματικά. Ο χρόνος δημιουργίας ενός container είναι αρκετά χιλιοστά του δευτερολέπτου (msec), ενώ ο χρόνος δημιουργίας ενός VM κυμαίνεται από δευτερόλεπτα έως λεπτά, ο οποίος εξαρτάται από το φυσικό υλικό, το λειτουργικό σύστημα και τον φόρτο εργασίας του συστήματος.

Τα containers είναι ένας βασικός ενεργοποιητής για το MEC, καθώς παρέχουν πολυάριθμες διασυνδεδεμένες MEC-πλατφόρμες με μηχανισμούς για γρήγορη ανάπτυξη. Σύμφωνα με το [7], τα containers προσφέρουν πέντε πλεονεκτήματα για το MEC έναντι των VM's:

1. Η επέκταση εικόνας (Image layering & extension) μπορεί να υλοποιηθεί από container, με στόχο τη δημιουργία εφαρμογών, οι οποίες στη συνέχεια αποθηκεύονται ως εικόνες.
2. Δικτύωση με Port Mapping, έτσι η σύνδεση των container μπορεί να διευκολυνθεί.

3. Οι - σε εξέλιξη - υπηρεσίες συνδέονται με πολλαπλά Container δεδομένων, επομένως μπορεί να προσφερθεί δυνατότητα αποθήκευσης.
4. Ολόκληρη η διαχείριση του κύκλου ζωής, συμπεριλαμβανομένου του καθορισμού (defining), της σύνθεσης (comprosing), της δημιουργίας (creating), της διανομής (distributing) και της λειτουργίας (running) των Container, μπορεί να υποστηριχθεί από Container APIs.
5. Η microservice αρχιτεκτονική μπορεί να υποστηριχθεί, διευκολύνοντας το Container στο παράδειγμα του PaaS (πλατφόρμα ως υπηρεσία / platform as a service).

Το Docker μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τη διευκόλυνση ενός περιβάλλοντος υπολογισμού στο άκρου. Επιπλέον, το Google Kubernetes και το Apache Mesos μπορούν να ενεργοποιήσουν ταχύτερη κλιμάκωση, παρέχοντας Container-Cluster διαχείριση εντός καταμεμημένων κόμβων.

Γενικά, τα Container είναι πιο ωφέλιμα κατά την κινητικότητα των χρηστών. Τα VM's έχουν τη δυνατότητα να ενεργοποιούν βαρύτερες εφαρμογές, ενώ ταυτόχρονα παρέχουν μεγαλύτερο επίπεδο ασφάλειας. Εάν μια υπηρεσία δεν απαιτεί κινητικότητα, η απόδοση των VM μπορεί να ωφελήσει σε περιπτώσεις όπως τα εταιρικά και οικιακά δίκτυα, το AR και το IoT. Τέλος τα container (ειδικά τα Docker Container) μπορούν άνετα να λειτουργήσουν μέσα σε μία VM, λόγω της φύσης της δυνατότητας εύκολης φορητότητας (μπορούν εύκολα να μεταφερθούν από μία VM σε μία άλλη, χωρίς να καταναλώνονται προσπάθειες για την υποβοήθηση της μετεγκατάστασής τους).

7.3.6 Έξυπνες Συσκευές

Ένας μεγάλος αριθμός συσκευών (πχ κάμερες παρακολούθησης, συσκευές υγειονομικής περίθαλψης, βιοτσίπ, έξυπνα αυτοκίνητα, έξυπνα τηλέφωνα) χρησιμοποιούνται για την υλοποίηση διαφόρων υπηρεσιών IoT (πχ έξυπνη πόλη, έξυπνο σπίτι, έξυπνη γεωργία, αυτόνομη οδήγηση, υγειονομική περίθαλψη, βιομηχανικό IoT). Καθώς οι κινητές συσκευές γίνονται πολύ πιο έξυπνες και ισχυρές, τείνουν να αξιοποιούν την ευφυΐα στο σχεδιασμό του συστήματός τους, γεγονός που κάνει τις συσκευές να έχουν μεγαλύτερη ευφυΐα και να παίζουν πιο ενεργό ρόλο.

Υπάρχουν δύο σημαντικές τεχνολογίες που χρησιμοποιούνται στις έξυπνες συσκευές.

1. Επικοινωνία συσκευής με συσκευή (Device-to-Device - D2D): Μια μεγάλη ποικιλία υπηρεσιών (π.χ. gaming, κοινωνική δικτύωση κ.λπ.) απαιτεί από τις συσκευές IoT που βρίσκονται σε κοντινή απόσταση να αλληλοεπιδρούν μεταξύ τους ή να μοιράζονται το περιεχόμενο. Χαρακτηριστικά για τα οποία απαιτούνται επικοινωνίες τύπου D2D. Με την επικοινωνία D2D, η αποτελεσματικότητα του δικτύου μπορεί να βελτιωθεί από πολλές απόψεις. Πρώτον, μπορεί να εξοικονομηθεί μεγάλη κατανάλωση ενέργειας σε σύγκριση με τη μετάδοση μέσω των σταθμών βάσης. Δεύτερον, θα μπορούσαν να εξοικονομηθούν πολλοί πόροι σηματοδοσίας, καθώς θα μπορούσε να μειωθεί και η καθυστέρηση μετάδοσης. Τρίτον, μπορεί να βελτιωθεί η φασματική απόδοση, λόγω της μείωσης των απωλειών διαδρομής (path losses) σε σύγκριση με τις επικοινωνίες από τον BS προς την συσκευή.

2. Προσωρινή αποθήκευση τοπικά (Local caching): Όλο και σε περισσότερες συσκευές έχουν εγκατασταθεί τοπικά μονάδες μνήμης, διευκολύνοντας την προσωρινή αποθήκευση τοπικά (στην συσκευή), γεγονός που καθιστά τις - ευαίσθητες σε χρόνο - εφαρμογές να εκτελούνται πιο αποτελεσματικά στις τοπικές συσκευές. Ο λόγος είναι ότι η προσωρινή αποθήκευση τοπικά μπορεί να εξισορροπήσει την αποθήκευση δεδομένων και τη μεταφορά δεδομένων, αποθηκεύοντας περιεχόμενο (όπως πχ αρχεία ήχου/βίντεο) στις συσκευές, έτσι ώστε οι εφαρμογές να μην χρειάζεται να λαμβάνουν συχνά περιεχόμενο από μακρινά κέντρα δεδομένων, γεγονός που μειώνει το latency της μετάδοσης. Για παράδειγμα, ένα έξυπνο τηλέφωνο με Local caching (στη συσκευή) μπορεί να αναπαράγει βίντεο στο διαδίκτυο με μεγαλύτερη ευχέρεια.

7.3.7 Τεμαχισμός δικτύου (Network Slicing)

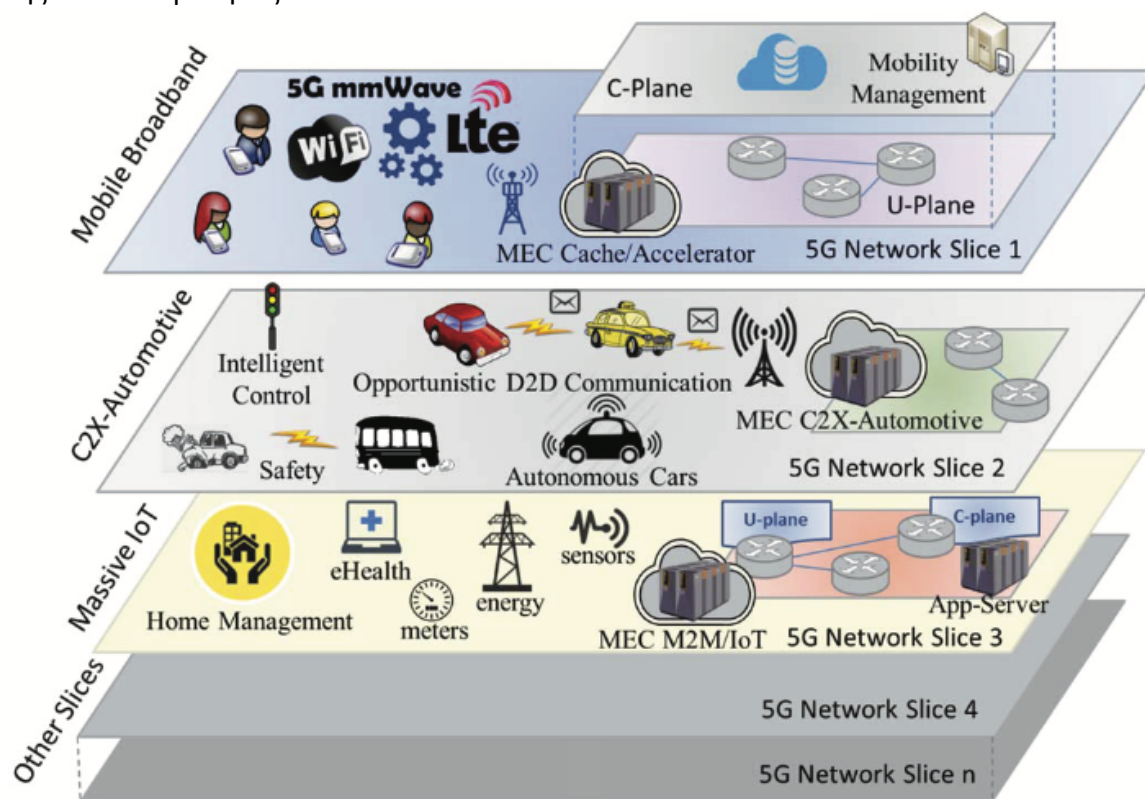
Το Network Slicing είναι μια βασική τεχνολογία που επιτρέπει να παρέχονται διάφορες προσαρμοσμένες υπηρεσίες, οι οποίες απαιτούν υψηλό βαθμό ευελιξίας και επεκτασιμότητας των 5G δικτύων. Με το Network Slicing, ένα φυσικό δίκτυο μπορεί να τεμαχιστεί σε πολλά λογικά δίκτυα, τα οποία υποστηρίζουν προσαρμοσμένες υπηρεσίες, κατ' απαίτηση, για διαφορετικά σενάρια εφαρμογών ταυτόχρονα, σε ένα κοινόχρηστο φυσικό δίκτυο. Επιπλέον, σύμφωνα με τις αντίστοιχες απαιτήσεις για QoS, ο τεμαχισμός του δικτύου μπορεί να κατανείμει δικτυακούς πόρους σε λογικά τμήματα του δικτύου, δυναμικά και αποτελεσματικά. Ο τεμαχισμός δικτύου συνδυάζει το νέφος και τους πόρους δικτύου (πχ αποθήκευση, επεξεργασία μεγάλου όγκου δεδομένων, πρόσβαση στο RAN, bandwidth), με σκοπό την αντιμετώπιση των απαιτήσεων υπηρεσίας.

Το Network Slicing έχει προσελκύσει την αρκετές έρευνες. Στο [43] διαχωρίζεται η έννοια του Network Slicing σε τρία επίπεδα, δηλαδή, επίπεδο πόρων δικτύου (resource layer), επίπεδο τμήματος δικτύου (slice instance layer) και επίπεδο υπηρεσίας (service instance layer). Μεταξύ αυτών των επιπέδων, στο επίπεδο υπηρεσίας περιέχονται οι υπηρεσίες (υπηρεσίες τελικού χρήστη) που πρέπει να υποστηρίζονται. Κάθε στιγμιότυπο υπηρεσίας (service instance) απαιτεί τα χαρακτηριστικά του δικτύου που παρέχονται σε ένα στιγμιότυπο του δικτύου (network instance), το οποίο μπορεί να χρησιμοποιείται από κοινού σε πολλά στιγμιότυπα (service instances).

Θα μπορούσε να αξιοποιηθεί ο τεμαχισμός του δικτύου με το MEC, για την ικανοποίηση απαιτήσεων όπως η επεκτασιμότητα και η ανάλυση του ακραίου δικτύου (edge analytics). Τέτοιες περιπτώσεις χρήσης περιλαμβάνουν κρίσιμες υπηρεσίες, όπως βιομηχανικό Διαδίκτυο, υγειονομική περίθαλψη και αυτόνομη οδήγηση. Για τέτοιες - κρίσιμες στην καθυστέρηση - εφαρμογές, η μείωση του latency και η ιεράρχηση της κυκλοφορίας είναι δύο απαιτήσεις που μπορούν να εξυπηρετηθούν από το MEC και το Network Slicing. Η ιεράρχηση της κυκλοφορίας μπορεί να υποστηριχθεί με το Network Slicing, ενώ η καθυστέρηση μπορεί να μειωθεί από το MEC. Ορισμένες από τις προκλήσεις του σχεδιασμού της ενσωμάτωσης του τεμαχισμού του δικτύου με το C-RAN και την MEC περιγράφονται στο [44].

Στο [45] περιγράφεται ένα παράδειγμα Network Slicing σε μια κοινή υποδομή δικτύου, όπως φαίνεται στο Σχήμα 28, λαμβάνοντας υπόψη τον ρόλο που διαδραματίζει το MEC α) στις IoT υπηρεσίες (massive IoT), β) στις υπηρεσίες Αυτοκίνητο-με-Χ (Car-to-X (C2X)), και γ) σε υπηρεσίες ευρυζωνικής σύνδεσης κινητής τηλεφωνίας (Mobile Broadband). Όσον αφορά το

τμήμα του δικτύου αυτοκινήτων C2X, απαιτείται αυστηρός λανθάνοντας χρόνος και επεκτασιμότητα. Και τα δύο μπορούν να υποστηριχθούν από το MEC. Για τις - massive - IoT υπηρεσίες, όπου απαιτείται επεκτασιμότητα για τη διαχείριση μεγάλου όγκου δεδομένων, το MEC παρέχει δυνατότητες αποθήκευσης και υπολογισμού, για την επεξεργασία και ανάλυση των δεδομένων, και διευκολύνει περαιτέρω το τμήμα δικτύου, για την υποστήριξη της επεκτασιμότητας.



Σχήμα 28 - Network slicing και ο ρόλος του MEC, πηγή: [45]

7.3.8 Εκφόρτωση Υπολογισμού (Computation Offloading)

Το Computation Offloading είναι μια άλλη βασική τεχνολογία που μπορεί να ενεργοποιήσει το MEC. Ως Computation Offloading αναφέρεται η μεταφόρτωση εργασιών υπολογισμού από ακραίες συσκευές σε διακομιστές νέφους (είτε κεντρικούς διακομιστές νέφους, είτε MEC-διακομιστές) ή άλλες συσκευές σε περιβάλλοντα D2D. Ο σκοπός της εκφόρτωσης είναι να εξοικονομηθεί ενέργεια στις τερματικές συσκευές των χρηστών, αλλά και να επιταχυνθεί η διαδικασία υπολογισμού (οι περισσότερες συσκευές έχουν περιορισμένους πόρους μπαταρίας και υπολογιστικές δυνατότητες).

Στη συνέχεια αναφέρονται ορισμένα από τα οφέλη του Computation Offloading. (α) Καταναλώνεται λιγότερη ενέργεια στις τερματικές συσκευές εάν η εκφόρτωση γίνεται στους ακραίους διακομιστές αντί στο νέφος [45]. (β) Παρατείνεται η διάρκεια ζωής της μπαταρίας των τερματικών συσκευών με περιορισμένους πόρους, επειδή αποφεύγεται η πολύπλοκη τοπική επεξεργασία στις συσκευές αυτές. (γ) Διαφορετικοί τύποι εφαρμογών εκτελούνται με επιτυχία στις τερματικές συσκευές (πχ VR/AR για φορητές συσκευές, παιχνίδια για κινητές συσκευές, φορητή υγειονομική περίθαλψη), καθώς οι εντατικοί υπολογισμοί των εφαρμογών αυτών μπορούν να μεταφορτωθούν σε κοντινούς διακομιστές.

7.4 Το MEC στο 5G και το IoT: Ρόλος, Εφαρμογές, Μελλοντικές Κατευθύνσεις

Το MEC παρέχει τις δυνατότητες του Cloud Computing στην άκρη των RAN's. Επίσης συμβάλει στον αποτελεσματικό τρόπο υλοποίησης και ανάπτυξης του 5G και του IoT, λόγω των χαρακτηριστικών του.

Αυτή η υποενότητα αρχικά παρουσιάζει τον ρόλο του MEC στο 5G, στη συνέχεια παρουσιάζει τις εφαρμογές 5G με δυνατότητα MEC. Τέλος, προτείνει ορισμένες υποσχόμενες μελλοντικές κατευθύνσεις για την ενσωμάτωση του MEC στο 5G.

7.4.1 Ο ρόλος του MEC στο 5G

Οι κύριοι στόχοι του 5G είναι η βελτίωση της αξιοπιστίας, της ενεργειακής απόδοσης και της χωρητικότητας, αυξάνοντας δραματικά την πυκνότητα σύνδεσης και μειώνοντας την καθυστέρηση. Λόγω των προαναφερθέντων καλών χαρακτηριστικών του 5G, πολλές χώρες αναπτύσσουν ενεργά την τεχνική 5G, καθώς επίσης ορισμένες χρησιμοποιούν ήδη το 5G εμπορικά. Για παράδειγμα, το 5G είναι ήδη επίσημα σε εμπορική χρήση στην Κίνα. Στις 6 Ιουνίου 2019, το Υπουργείο Βιομηχανίας και Πληροφορικής της Κίνας εξέδωσε επίσημα άδεια 5G, η οποία αποδεικνύει ότι η Κίνα εισήλθε επίσημα στο πρώτο έτος του 5G. Επιπλέον, ορισμένες άλλες χώρες κατασκευάζουν επίσης ενεργά το 5G, συνεργαζόμενες στενά με ορισμένες μεγάλες εταιρείες 5G όπως η Ericsson και η Huawei.

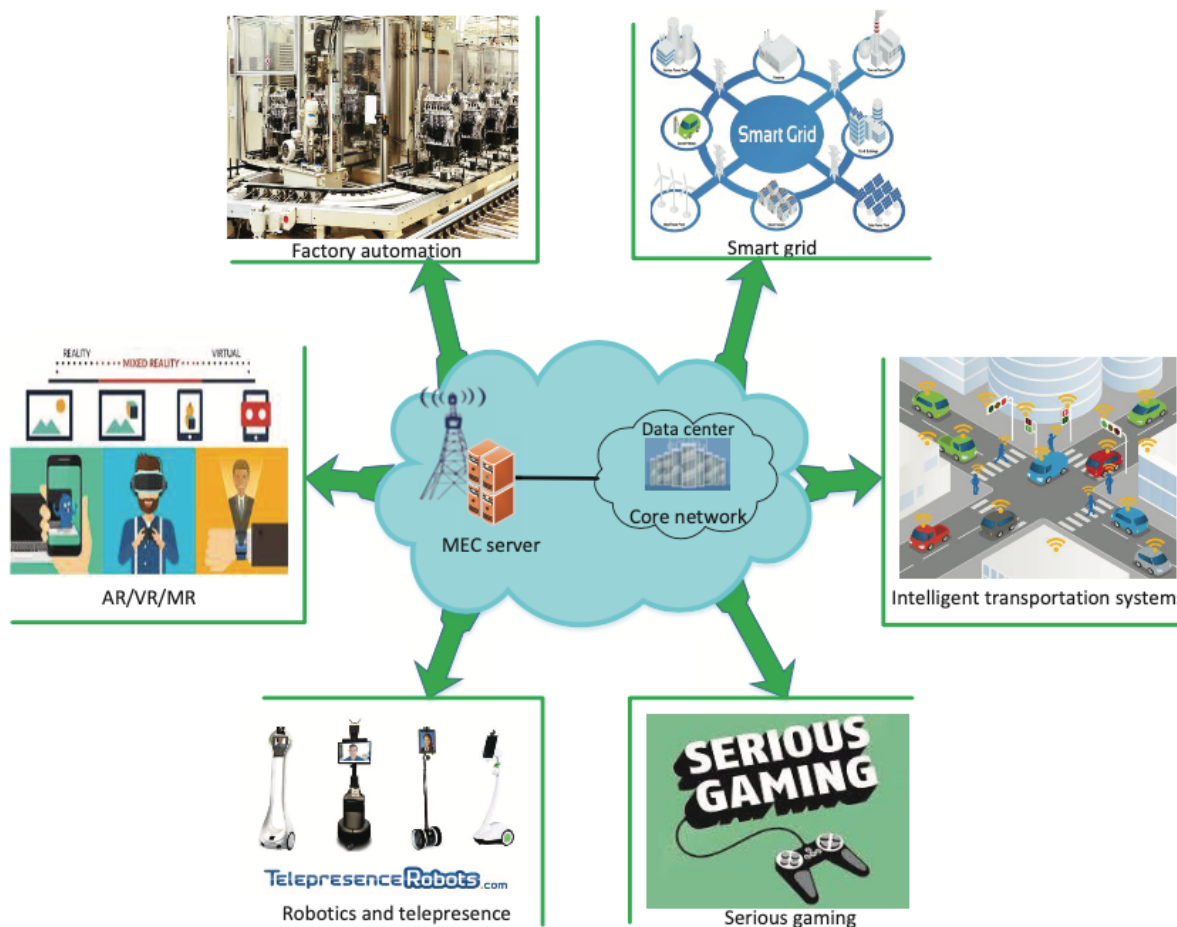
Το 5G έχει τη δυνατότητα να υποστηρίζει βελτιωμένη ευρυζωνική σύνδεση κινητής τηλεφωνίας (mobile broadband - MBB), με ρυθμούς δεδομένων τελικού χρήστη 100 Mbps στην ομοιόμορφη χωρική κατανομή, με μέγιστες ταχύτητες δεδομένων έως και 10-20 Gbps. Εκτός από τις προσωπικές υπηρεσίες κινητής τηλεφωνίας που θα παρέχονται από το 5G, θα παρέχονται και επικοινωνίες τύπου μηχανής μεγάλης κλίμακας (Machine Type Communications - MTC) και ειδικότερα, υπηρεσίες κρίσιμες σε αξιοπιστία και καθυστέρηση. Στις επικοινωνία uRLLC (ultra Reliable Low Latency Communications) & MCC (Mission Critical Communications), απαιτείται να ληφθούν υπόψη τόσο η αξιοπιστία όσο και ο λανθάνοντας χρόνος, τα οποία μπορούν να επιλυθούν με το 5G. Σε πολλές περιπτώσεις, η αντίστοιχη καθυστέρηση - από άκρο σε άκρο - θα πρέπει να αγγίζει το 1 ms, και η αξιοπιστία θα πρέπει να αγγίζει το 99,99%.

Ως βασικός ενεργοποιητής του 5G, το MEC μπορεί να διαδραματίσει σημαντικό ρόλο στο 5G. Το [46] παρουσιάζει τα τεχνικά σημεία και τις αρχιτεκτονικές αναπτύξεις του MEC στο 5G. Με την χρήση MEC-διακομιστών, οι οποίοι αναπτύσσονται απευθείας στην άκρη του RAN χρησιμοποιώντας μια γενική υπολογιστική πλατφόρμα, οι εφαρμογές επιτρέπεται να εκτελούνται κοντά σε τελικούς χρήστες. Από αυτή τη θέση, το MEC μπορεί να συμβάλει στην ικανοποίηση των αυστηρών απαιτήσεων χαμηλής καθυστέρησης και υψηλής αξιοπιστίας των δικτύων 5G.

7.4.2 Εφαρμογές 5G με δυνατότητα MEC (Use Cases)

Το MEC μπορεί να ενεργοποιήσει πολλές εφαρμογές που υποστηρίζονται από 5G, λόγω των χαρακτηριστικών χαμηλής καθυστέρησης και υψηλού εύρους ζώνης. Στη συνέχεια,

παρουσιάζουμε εν συντομία αρκετές εφαρμογές 5G με δυνατότητα MEC, όπως φαίνεται στην Σχήμα 29.



Σχήμα 29 - MEC 5G Εφαρμογές

- **Εργοστασιακός αυτοματισμός (Factory Automation):** Ως μία από τις δύσκολες περιπτώσεις χρήσης, ο αυτοματισμός εργοστασίων υποτίθεται ότι υποστηρίζεται από δίκτυα 5G. Ο εργοστασιακός αυτοματισμός αναφέρεται ως ο αυτόματος έλεγχος των μηχανών και των συστημάτων σε πραγματικό χρόνο, για την υλοποίηση γρήγορων γραμμών παραγωγής, με μικρή ανθρώπινη συμμετοχή, γεγονός που θέτει υψηλές προκλήσεις όσον αφορά την καθυστέρηση και την αξιοπιστία. Απαιτεί κρίσιμες D2D επικοινωνίες, με αυστηρές απαιτήσεις αξιοπιστίας και χαμηλής καθυστέρησης επικοινωνίας. Η end-to-end καθυστέρηση που απαιτείται σε μια εφαρμογή εργοστασιακού αυτοματισμού, θα πρέπει να είναι μεταξύ 0,25 ms και 10 ms σύμφωνα με το [47]. Σε αυτήν την περίπτωση, το MEC μπορεί να διαδραματίσει σημαντικό ρόλο στην υλοποίηση του εργοστασιακού αυτοματισμού, τοποθετώντας εργασίες εντατικού υπολογισμού σε κοντινούς MEC-διακομιστές, παρέχοντας χαμηλό λανθάνοντα χρόνο για τον αυτοματισμό του εργοστασίου.
- **Έξυπνο δίκτυο (Smart Grid):** Μια υποδομή έξυπνου δικτύου είναι ένας συνδυασμός του ηλεκτρικού δικτύου και της υποδομής ενέργειας, που αποτελείται από πολλά στοιχεία όπως έξυπνες συσκευές, ενεργειακά αποδοτικούς πόρους και ανανεώσιμες πηγές ενέργειας. Το έξυπνο δίκτυο έχει αυστηρές απαιτήσεις όσον αφορά την αξιοπιστία και την καθυστέρηση. Λέγεται ότι η καθυστέρηση μεγαλύτερη από 1 ms

μπορεί να έχει σοβαρές συνέπειες στο έξυπνο δίκτυο. Ως εκ τούτου, το MEC μπορεί να διαδραματίσει ζωτικό ρόλο στην υποστήριξη του έξυπνου δικτύου. Επιπλέον, με το MEC, η ανάλυση κατανάλωσης ενέργειας μπορεί να διευκολυνθεί, καθώς τα δεδομένα κατανάλωσης ενέργειας μπορούν να αποθηκευτούν και να επεξεργαστούν σε MEC-διακομιστές, πχ έξυπνοι μετρητές και μικροδίκτυα, εξισορροπώντας τον φόρτο εργασίας των κεντρικών κέντρων-δεδομένων.

- **Έξυπνα συστήματα μεταφορών (Intelligent transportation systems):** Τα έξυπνα συστήματα μεταφορών (Intelligent transportation systems - ITS) περιλαμβάνουν διάφορες περιπτώσεις, όπως υπηρεσίες που σχετίζονται με την οδική ασφάλεια, την αυτόνομη οδήγηση, τις υπηρεσίες αποδοτικής κυκλοφορίας, την βελτιστοποίηση της οδικής κυκλοφορίας, οι οποίες έχουν διαφορετικές απαιτήσεις. Παρόλα αυτά συνολικά, απαιτούν εξαιρετικά αξιόπιστες, και χαμηλού χρόνου, επικοινωνίες. Λέγεται ότι η μέγιστη επιτρεπόμενη καθυστέρηση - από άκρο σε άκρο - δεν πρέπει να είναι μεγαλύτερη από 10 ms, για την ανταλλαγή μηνυμάτων, σε μία αυτοματοποιημένη προσπέραση οχήματος. Η τεχνική 5G μπορεί να υποστηρίξει τέτοιου είδους έξυπνα συστήματα μεταφορών, παρέχοντας υψηλότερο επίπεδο ευελιξίας και χαμηλότερο latency. Ως βασική τεχνολογία για το 5G, το MEC μπορεί να διαδραματίσει βασικό ρόλο στα έξυπνα συστήματα μεταφορών.
- **Serious Gaming:** Το σοβαρό gaming (Serious gaming) όχι μόνο παρέχει στους χρήστες την ευκαιρία να απολαύσουν τον ελεύθερο χρόνο, αλλά είναι επίσης μια εφαρμογή προσανατολισμένη να παρέχει κάποιου είδους επίλυση προβλημάτων. Επομένως, το Serious Gaming μπορεί να βρει εφαρμογή στην ψυχαγωγία, την υγεία, την προσομοίωση και την εκπαίδευση. Η απαίτηση καθυστέρησης είναι κρίσιμη για τέτοιου είδους εφαρμογές, καθώς θα προκληθεί σημαντική υποβάθμιση στην ποιότητα του παιχνιδιού, εάν η καθυστέρηση δικτύου είναι μεγαλύτερη από 30-50 ms. Συνιστάται ο χρόνος μετ' επιστροφής (Round Trip Time - RTT) να είναι της τάξης του 1 ms, για την παροχή υψηλής ποιότητας εμπειρίας χρήστη. Αυτή η απαίτηση καθυστέρησης μπορεί να ικανοποιηθεί με την MEC σε 5G.
- **Ρομποτική και τηλεπαρουσία (Robotics and Telepresence):** Η ρομποτική και η τηλεπαρουσία θα έχουν μεγάλη εφαρμογή σε διάφορες περιπτώσεις, στο εγγύς μέλλον, όπως η ανακούφιση από σεισμό και η έκτακτη διάσωση. Ο χρόνος απόκρισης του συστήματος υποτίθεται ότι είναι της τάξης των χιλιοστών του δευτερολέπτου, συμπεριλαμβανομένων των καθυστερήσεων δικτύου, με σκοπό την πραγματοποίηση του ελέγχου των ρομπότ σε πραγματικό χρόνο. Ευτυχώς, το 5G υποτίθεται ότι είναι ικανό να υποστηρίξει αυτό το επίπεδο υψηλής κινητικότητας και απόδοσης σε πραγματικό χρόνο. Καθώς το MEC αποτελεί σοβαρό πειστήριο όσον αφορά την επίγνωση της κινητικότητας και την χαμηλή καθυστέρηση, δημιουργεί έναν αποτελεσματικό τρόπο υλοποίησης τέτοιου είδους δικτύων 5G.
- **Επαυξημένη Πραγματικότητα / Εικονική Πραγματικότητα / Μικτή Πραγματικότητα (Augmented Reality / Virtual Reality / Mixed Reality - AR/VR/MR):** Οι υπηρεσίες επαυξημένης, εικονικής ή μικτής πραγματικότητας μπορούν επίσης να αποκομίσουν πολλαπλά κέρδη από τη εκφόρτωση υπολογισμών (Computation Offloading) στο MEC, λόγω του χαρακτηριστικού χαμηλής καθυστέρησης του MEC. Πρόσφατα,

ερευνητική προσοχή έχει δοθεί στα συστήματα Επαυξημένης Πραγματικότητας με δυνατότητες MEC [48], [49], [50]. Μερικές ακόμη εφαρμογές 5G μπορούν να βρεθούν στα [51].

7.4.3 Μελλοντικές κατευθύνσεις του MEC ενσωματωμένες με 5G

Συνδυασμός του MEC με το TSN - Time-Sensitive Networking (Ευαίσθητη-στο-Χρόνο Δικτύωση): Η βελτίωση του Bandwidth του δικτύου και η ταχεία μείωση του κόστους υπολογισμού και αποθήκευσης, έχουν διευκολύνει την ανάπτυξη των 5G τεχνολογιών, του Big-Data και της τεχνητής νοημοσύνης (AI). Οι τεχνολογίες αυτές δεν επιφέρουν μόνο την ενοποίηση των Information Technology (IT) και Operational Technology (OT)****, αλλά προβάλλουν επίσης υψηλότερες απαιτήσεις για την ενοποίηση του MEC με το TSN. Από τη μία πλευρά, το TSN παρέχει υποστήριξη στο MEC, καθώς ενισχύει την ικανότητα των υπολογισμού στα άκρα, ως προς τις ακόλουθες τέσσερις πτυχές: α) Ετερογενής Υπολογισμός, β) Αποθήκευση, γ) Συνεργασία Edge Cloud και δ) Ασφάλεια. Από την άλλη πλευρά, σε κάποιο βαθμό, ο υπολογισμός στο άκρο βασίζεται στο TSN, καθώς η ανάπτυξή του διευκολύνει την ανάπτυξη του MEC, κάνοντας τα τερματικά στα άκρα πιο έξυπνα. Ωστόσο, οι έρευνες για την διερεύνηση της ενοποίησης του MEC με το TSN [52], [53] είναι σχετικά πρόσφατες, επομένως υπάρχει ένα ευρύ φάσμα μελέτης του θέματος.

*****Το IT ασχολείται με τις πληροφορίες, ενώ το OT ασχολείται με τις μηχανές. Το IT διαχειρίζεται τη ροή ψηφιακών πληροφοριών (δεδομένα), ενώ το OT διαχειρίζεται τη λειτουργία των φυσικών διεργασιών και των μηχανημάτων που χρησιμοποιούνται για την εκτέλεσή τους.*

Συνδυασμός MEC με δορυφορική επικοινωνία: Οι δορυφόροι υποστηρίζουν την επικοινωνία με επίγειες συσκευές σε ορισμένα σκληρά περιβάλλοντα, γεγονός που τους καθιστά ως συμπλήρωμα του επίγειου δικτύου. Η ενσωμάτωση του MEC με τη δορυφορική επικοινωνία, γνωστή ως δορυφορικό-Satellite MEC (SMEC), είναι μια αναδυόμενη τάση στα δίκτυα 5G. Ωστόσο, αν και εκτεταμένες εργασίες έχουν προτείνει διάφορα σχήματα εκφόρτωσης υπολογισμών στο άκρο των επίγειων δικτύων, υπάρχουν μελέτες που ασχολούνται με τον συνδυασμό του υπολογισμού στο άκρο με την υβριδική δορυφορική-επίγεια επικοινωνία. Για παράδειγμα, στο [54] προτείνεται το SMEC (Satellite Mobile Edge Computing) για την εφαρμογή της τεχνικής MEC για τη βελτίωση QoS σε δορυφορικό-επίγειο δίκτυο. Στο [55] προτείνεται μια game-theoretic προσέγγιση για τη βελτιστοποίηση της υπολογιστικής στρατηγικής εκφόρτωσης στο SMEC. Όπως προαναφέρθηκε, υπάρχει ακόμη μεγάλος χώρος εξερεύνησης για τη μελέτη του SMEC.

Συνδυασμός MEC με mMIMO (massive Multiple-Input Multiple-Output): Τα προηγμένα συστήματα MEC-MIMO έχουν τη δυνατότητα να μειώνουν την κατανάλωση ενέργειας, σε σύγκριση με τα MEC-συστήματα με δυνατότητα SISO (Single-Input Single Output) ή MISO (Multiple-Input Single-output). Αν και έχουν διεξαχθεί πολυάριθμες έρευνες, ο τομέας του συνδυασμού του MEC με το MIMO εξακολουθεί να έχει πολλά περιθώρια περαιτέρω διερεύνησης. Όπως προτείνεται στο [56], μια πιθανή τάση στα συστήματα MEC-MIMO, είναι η εφαρμογή του MIMO για την εξισορρόπηση της ελαχιστοποίησης της καθυστέρησης και της μεγιστοποίησης του ρυθμού εκφόρτωσης δεδομένων. Μια άλλη κατεύθυνση, όσον

αφορά το συνδυασμό MEC-MIMO είναι τα MEC-συστήματα που βασίζονται στο mMIMO, τα οποία συμβάλουν στην εξοικονόμηση ενέργειας. Ως εκ τούτου, εγείρει ένα πιθανό ερευνητικό θέμα για την ανάπτυξη αλγορίθμων διαμόρφωσης, χαμηλής πολυπλοκότητας, στα συστήματα αυτά, για το 5G.

Συνδυασμός MEC με τεχνολογία mmWave (Millimeter Wave): Το mmWave έχει θεωρηθεί ως μια πολλά υποσχόμενη τεχνολογία στο 5G, λόγω των χαρακτηριστικών της ζώνης υψηλής συχνότητας (30 GHz έως 300 GHz). Παρέχοντας υψηλή μετάδοση ρυθμού δεδομένων (gigabit/s), μπορεί να ικανοποιήσει τις ταχέως αυξανόμενες απαιτήσεις του ρυθμού δεδομένων στο 5G. Η ενσωμάτωση του mmWave με το MEC μπορεί να αποφέρει πολλαπλά οφέλη στο 5G. Για παράδειγμα, οι εφαρμογές που χρειάζονται υποστήριξη υψηλής κινητικότητας, χαμηλή καθυστέρηση και εκφόρτωση υψηλού ρυθμού δεδομένων, μπορούν να υποστηριχθούν από αυτή την ενοποίηση. Επομένως, αυτά τα οφέλη παρακινούν τους ερευνητές να διεξάγουν έρευνες σχετικά με το συνδυασμό MEC με mmWave. Για παράδειγμα, το [57] προτείνει ένα σύστημα που ενσωματώνει mmWave και MEC στην αρχιτεκτονική δικτύου 5G. Υπάρχουν πολλές πιθανές μελλοντικές κατευθύνσεις για τα συστήματα MEC που βασίζονται στα mmWave, όπως ο - από κοινού - υπολογισμός και η κατανομή των πόρων επικοινωνίας, το ακριβές μοντέλο καναλιού mmWave και ο σχεδιασμός διαμόρφωσης δέσμης του ραδιο-συστήματος (antenna beamforming).

Συνδυασμός MEC με τεχνολογίες τεχνητής νοημοσύνης (AI): Οι τεχνολογίες τεχνητής νοημοσύνης είναι χρήσιμα εργαλεία που μπορούν να βελτιστοποιήσουν διάφορα προβλήματα όπως η ανάλυση δεδομένων (big data), η εκφόρτωση υπολογισμών και η προσωρινή αποθήκευση. Ένας αριθμός μελετών έχει διεξαχθεί σχετικά με τα προβλήματα βελτιστοποίησης από κοινού του 4C (Communication, Computation, Control, and Caching - Επικοινωνία, Υπολογισμός, Έλεγχος και Προσωρινή αποθήκευση), η κατανόηση / αίσθηση κινούμενου πλήθους (mobile crowd sensing), οι κοινές αναλύσεις Big Data, η προσωρινή αποθήκευση και το computation offloading. Ενώ υπάρχουν ήδη πολυάριθμες εργασίες που βασίζονται στην τεχνητή νοημοσύνη για το MEC, πολλά άλλα ανοιχτά προβλήματα μπορούν εξίσου να ερευνηθούν στο μέλλον, όπως για παράδειγμα α) ομοσπονδιακή μάθηση (federated learning) και εφαρμογές στο MEC, β) κατανομή και συνεργατική εφαρμογή τεχνητής νοημοσύνης σε ιεραρχικά και ετερογενή MEC και γ) πλαίσια που βασίζονται στη μηχανική μάθηση για εξαιρετικά πυκνά συστήματα MEC.

Ενότητα 8 – Βελτιώσεις MEC μέσω NOMA, EH, WPT, UAVs, C-RAN & H-RAN

8.1 MEC με Μη-Ορθογώνια Πολλαπλή Πρόσβαση (Non-Orthogonal Multiple Access - NOMA)

8.1.1 Βασικές αρχές της NOMA

Η πολυπλεξία με μη-ορθογώνια διαίρεση συχνότητας (**Non-orthogonal frequency-division multiplexing, N-OFDM**) είναι μια μέθοδος κωδικοποίησης ψηφιακών δεδομένων σε πολλαπλές συχνότητες φορέα, με μη-ορθογώνια διαστήματα μεταξύ της συχνότητας των υποφορέων.

Η NOMA (Non-Orthogonal Multiple Access) έχει προταθεί πρόσφατα ως μια τεχνική για την αύξηση της απόδοσης του δικτύου και την υποστήριξη μαζικής συνδεσιμότητας, που αποτελούν βασικές απαιτήσεις στα συστήματα επικοινωνίας πέμπτης γενιάς (5G). Η NOMA μπορεί να πραγματοποιηθεί μέσω δύο διαφορετικών προσεγγίσεων, α) στον τομέα ισχύος (power-domain) και β) στον τομέα κώδικα (code-domain).

Στο Power-Domain NOMA (**PD-NOMA**), εκχωρούνται σε πολλούς χρήστες διαφορετικά επίπεδα ισχύος – με βάση τις πληροφορίες ποιότητας των ατομικών καναλιών τους - στους ίδιους ορθογώνιους πόρους. Η λειτουργικότητα του PD-NOMA αποτελείται από δύο κύριες τεχνικές, 1) την κωδικοποίηση υπέρ-θέσης (superposition coding) στον πομπό και 2) την διαδοχική ακύρωση παρεμβολών (**successive interference cancellation - SIC**) στον δέκτη. Μια αποτελεσματική εφαρμογή του SIC θα διευκόλυνε την εξάλειψη των παρεμβολών μεταξύ των χρηστών. Το SIC πραγματοποιείται σε χρήστες με τις καλύτερες συνθήκες καναλιού και εκτελείται με φθίνουσα σειρά του καναλιού.

Από την άλλη πλευρά, στο Code-Domain NOMA (**CD-NOMA**), η πολυπλεξία πραγματοποιείται χρησιμοποιώντας ακολουθίες διασποράς χαμηλής πυκνότητας για κάθε χρήστη, παρόμοια με την τεχνολογία πολλαπλής πρόσβασης διαίρεσης κώδικα (**Code Division Multiple Access - CDMA**).

	Πλεονεκτήματα	Μειονεκτήματα
OMA	Απλούστερη ανίχνευση δέκτη	Χαμηλότερη φασματική απόδοση Περιορισμένος αριθμός χρηστών Unfairness για τους χρήστες
NOMA	Υψηλότερη φασματική απόδοση Υψηλότερη πυκνότητα σύνδεσης Βελτιωμένη δικαιοσύνη (fairness) χρήστη Χαμηλότερη καθυστέρηση Υποστήριξη διαφορετικών QoS	Αυξημένη πολυπλοκότητα των δεκτών Υψηλότερη ευαισθησία στην αβεβαιότητα των καναλιών

Πίνακας 5 - Σύγκριση OMA με NOMA

Αν και η NOMA είναι σε θέση να υποστηρίξει μεγάλο αριθμό χρηστών ταυτόχρονα και ξεπερνά την Ορθογώνια Πολλαπλή Πρόσβαση (**Orthogonal Multiple Access - OMA**) σε πολλές απόψεις, πρέπει να αντιμετωπιστούν διάφορες προκλήσεις / προβλήματα που

σχετίζονται με την NOMA, προτού αυτή η τεχνολογία αυτή χρησιμοποιηθεί σε πραγματικά δίκτυα. Για παράδειγμα, ο Islam στο [58] και ο Dai στο [59] παρέχουν ορισμένες ερευνητικές οδηγίες στην έρευνά τους για τη NOMA, όπως τη δυναμική σύζευξη χρηστών, τον αντίκτυπο της παραμόρφωσης μετάδοσης, την εκτίμηση καναλιών και παρεμβολών. Η NOMA μπορεί να συνδυαστεί ευέλικτα με πολλές υπάρχουσες ασύρματες τεχνολογίες όπως το MIMO, το mMIMO, τις mmWave επικοινωνίες, τις γνωστικές και συνεργατικές επικοινωνίες*, τις επικοινωνίες ορατού φωτός (Visible light communication - VLC), την ασφάλεια φυσικού επιπέδου, την συλλογή ενέργειας, την ασύρματη προσωρινή αποθήκευση και ούτω καθεξής.

**Η γνωστική επικοινωνία (Cognitive Communication) είναι μια μορφή ασύρματης επικοινωνίας στην οποία ένας πομποδέκτης μπορεί να ανιχνεύσει, έξυπνα, ποια κανάλια επικοινωνίας χρησιμοποιούνται και ποια όχι. Μετακινείται αμέσως σε κενά κανάλια, αποφεύγοντας τα κατειλημμένα. Δεν προκαλεί παρεμβολές στον αδειοδοτημένο χρήστη.*

8.1.2 Κίνητρο για συνδυασμό NOMA και MEC

Τόσο η NOMA όσο και το MEC θεωρούνται οι βασικές τεχνολογίες ενεργοποίησης στο 5G, λόγω των τεράστιων δυνατοτήτων και των εφαρμογών μεγάλου εύρους. Υπάρχουν πολλά πλεονεκτήματα του MEC και της NOMA, συμπεριλαμβανομένης της αύξησης του αριθμού των συνδεδεμένων χρηστών, της μείωσης του λανθάνοντος χρόνου μετάδοσης, της κατανάλωσης ενέργειας των τελικών χρηστών και της παροχής υψηλής απόδοσης για πιο σύνθετα σενάρια δικτύου, όπως για παράδειγμα τα mMIMO & mmWave.

- Ο συνδυασμός NOMA και MEC μπορεί να βελτιώσει σημαντικά την ικανοποίηση των χρηστών και την απόδοση του δικτύου μέσω της παροχής ευκαιριών. Ενώ η NOMA προσφέρει πολλά πλεονεκτήματα στη βελτίωση της φασματικής απόδοσης και της απόδοσης της ακραίας κυψέλης, χαλαρώνοντας τις απαιτήσεις ανάδρασης καναλιού (channel feedback requirements) και μειώνοντας τον λανθάνον χρόνο μετάδοσης, το MEC φέρνει σημαντικά οφέλη όχι μόνο στους χρήστες, αλλά και στους χειριστές του δικτύου (operators), δίνοντας τη δυνατότητα για **βελτίωση στη συνολική απόδοση του δικτύου**.
- Ο συνδυασμός MEC και NOMA μπορεί να ενισχύσει τις υπηρεσίες και τις εφαρμογές που υποστηρίζονται από το δίκτυο 5G. Από τη μία πλευρά, η NOMA αναμένεται να αυξήσει κατά πολύ τον αριθμό των χρηστών σε διάφορα σενάρια όπου μπορεί να εμφανιστεί ανεπάρκεια κατάταξης (rank deficiency). Από την άλλη πλευρά, ο υπολογισμός άκρου στο MEC υποδεικνύει ότι οι υπολογιστικοί πόροι παρέχονται στους τελικούς χρήστες σε κοντινή απόσταση, στο άκρο των RAN's. Ως εκ τούτου, το MEC είναι σε θέση να διανέμει ευρέως τους υπολογιστικούς πόρους από το κεντρικό νέφος στην άκρη του δικτύου και να εξυπηρετεί αμέσως μεγάλο αριθμό χρηστών. Επομένως, το MEC έχει τη δυνατότητα να υποστηρίζει **μαζική συνδεσιμότητα και κατανεμημένους υπολογισμούς**.
- Ο συνδυασμός MEC και NOMA μπορεί να παρέχει μετάδοση χαμηλής καθυστέρησης. Επειδή το δίκτυο 5G δεν θα βασίζεται πλήρως σε μία τεχνολογία, το δίκτυο θα πρέπει να βελτιστοποιηθεί σε πολλαπλά σημεία του, όπως για παράδειγμα η διεπαφή του

αέρα, η αρχιτεκτονική του δικτύου και οι τεχνολογίες ενεργοποίησης (enabling technologies). Το MEC μετακινεί τις υπηρεσίες και τις λειτουργίες νέφους στην άκρη του δικτύου, όπου τα δεδομένα - ως επί το πλείστον - παράγονται και χειρίζονται. Ως εκ τούτου, το MEC εξουσιοδοτεί τις υπηρεσίες που λειτουργούν στο άκρο να ανταποκρίνονται καλύτερα στις απαιτήσεις των χρηστών για χαμηλότερο latency, σε σύγκριση με το Cloud Computing. Ως παρόμοια έννοια, ο ευέλικτος χρονοπρογραμματισμός (flexible scheduling) και η πρόσβαση χωρίς άδεια (grant-free access) στην NOMA, επιτρέπει **χαμηλότερο λανθάνοντα χρόνο μετάδοσης** για τους χρήστες.

- Η NOMA και το MEC μπορούν να συνδυαστούν ευέλικτα με πολλές υπάρχουσες ασύρματες τεχνολογίες, όπως για παράδειγμα το MIMO, το mMIMO, το mmWave, ώστε να αυξηθεί περαιτέρω η συνδεσιμότητα, η φασματική απόδοση, η ενεργειακή απόδοση και η υπολογιστική ικανότητα. Για παράδειγμα, το mMIMO μπορεί να αυξήσει δραστικά τη φασματική απόδοση των ασύρματων δικτύων, μέσω της υπέρμετρης χωρικής πολυπλεξίας (excessive spatial multiplexing), επομένως το Massive MIMO-NOMA μπορεί να υποστηρίξει **τεράστια συνδεσιμότητα και υψηλή φασματική απόδοση**. Επίσης οι ζώνες (bands) των mmWaves μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την υποστήριξη ρυθμών δεδομένων σε GBps, για ασύρματες επικοινωνίες. Οι μεγάλες απώλειες διαδρομής (path-losses) που προκαλούνται από το mmWave, μπορούν να αντισταθμιστούν από τα πολλαπλά οφέλη, που αποκομίζονται από το mMIMO. Ως αποτέλεσμα, το MEC και η NOMA μπορούν να αναπτυχθούν από κοινού, καθώς τα mMIMO & mmWave, μπορούν να επιτρέψουν σε πολλές φορητές συσκευές, να εκφορτώνουν εργασίες ταυτόχρονα, με πολύ υψηλούς ρυθμούς μεταφόρτωσης & λήψης δεδομένων.

Τόσο οι ακαδημαϊκές όσο και οι βιομηχανικές κοινότητες έχουν πραγματοποιήσει εκτεταμένες έρευνες για να σχεδιάσουν το δίκτυο 5G με τα MEC και NOMA [60], [61], [62]. Ωστόσο, οι έρευνες για το MEC δεν έχουν ακόμη διερευνήσει τα πλήρη πιθανά οφέλη της NOMA. MEC & NOMA προσφέρονται - και οι δύο - για την κάλυψη του κενού μεταξύ των συσκευών IoT και των εφαρμογών και υπηρεσιών IoT. Από τη μία πλευρά, το MEC εξουσιοδοτεί συσκευές IoT, οι οποίες έχουν περιορισμένους πόρους, με σημαντικές πρόσθετες υπολογιστικές δυνατότητες, μέσω της εκφόρτωσης υπολογισμού (computation offloading), φέρνοντας έτσι νέες εφαρμογές και υπηρεσίες. Ομοίως, με το IoT, το εύρος των υπηρεσιών και των εφαρμογών του MEC, εφαρμόζεται όχι μόνο σε κινητά τηλέφωνα, αλλά και σε ένα ευρύ φάσμα έξυπνων αντικειμένων που κυμαίνονται από αισθητήρες και ενεργοποιητές, έως έξυπνα οχήματα. Από την άλλη πλευρά, η NOMA μπορεί να βελτιώσει ουσιαστικά την ικανότητα του συστήματος, καθώς επιτρέπει σε πολλούς χρήστες να εκπέμπουν, χρησιμοποιώντας έναν αποκλειστικό πόρο ορθογώνιου καναλιού.

Επομένως, η NOMA μπορεί να αξιοποιηθεί για την αύξηση της αποδοτικότητας και της απόδοσης συστημάτων MEC πολλαπλών χρηστών.

8.1.3 Τεχνολογία Αιχμής / Υπάρχουσες Μελέτες

Ενώ οι περιπτώσεις χρήσης της NOMA ή του MEC έχουν μελετηθεί ευρέως, υπάρχουν μόνο λίγες μελέτες για τα σενάρια NOMA-MEC. Τα πλεονεκτήματα της NOMA και της MEC έχουν παρακινήσει αρκετές μελέτες που υποστηρίζουν την εφαρμογή της NOMA στο MEC. Όταν εφαρμόζεται NOMA στην uplink μετάδοση στο σύστημα MEC, πολλοί χρήστες μπορούν να εκφορτώσουν τις εργασίες τους στον διακομιστή MEC ταυτόχρονα, μέσω της ίδιας ζώνης συχνότητας. Εφαρμόζοντας την τεχνολογία διαδοχικής ακύρωσης παρεμβολών (successive interference cancellation - SIC), ο διακομιστής MEC μπορεί να αφαιρέσει την παρεμβολή από τον χρήστη, του οποίου τα δεδομένα έχουν αποκωδικοποιηθεί προηγουμένως στην ίδια ζώνη συχνότητας. Όταν εφαρμόζεται NOMA στην downlink μετάδοση στο σύστημα MEC, ένας χρήστης μπορεί να χρησιμοποιήσει την NOMA για να μεταφορτώσει πολλαπλές εργασίες, σε πολλούς διακομιστές MEC, ταυτόχρονα μέσω της ίδιας ζώνης συχνότητας. Η σύγκριση των επιδόσεων των συστημάτων NOMA-MEC και OMA-MEC πραγματοποιήθηκε στο [63], το οποίο αποκαλύπτει ότι το σύστημα NOMA-MEC μπορεί να επιτύχει ανώτερη απόδοση στη μείωση της καθυστέρησης και της κατανάλωσης ενέργειας.

Οι περισσότερες υπάρχουσες ερευνητικές εργασίες επικεντρώνονται στην κατανομή πόρων, δηλαδή στους υπολογιστικούς πόρους και στους πόρους επικοινωνίας. Συγκεκριμένα, στο [64], η ανάθεση μερικής εκφόρτωσης (για παράδειγμα, κάθε χρήστης μπορεί να χωρίσει την εργασία υπολογισμού σε δύο μέρη, για τοπικό υπολογισμό και εκφόρτωση) και η κατανομή ισχύος διερευνήθηκαν για να ελαχιστοποιηθεί το σταθμισμένο άθροισμα της κατανάλωσης ενέργειας, σε ένα σύστημα NOMA-MEC πολλών χρηστών. Σε αυτή την εργασία, προτάθηκε ένας αποτελεσματικός αλγόριθμος για την κατανομή εργασιών του χρήστη, τη συχνότητα της CPU για τον τοπικό υπολογισμό και την κατανομή ισχύος μετάδοσης, για την επίτευξη της ελάχιστης κατανάλωσης ενέργειας. Σε αντίθεση με τα συστήματα OMA-MEC και τα καθαρά συστήματα NOMA-MEC (για παράδειγμα, και οι δύο χρήστες εκφορτώνουν όλες τις εργασίες τους ταυτόχρονα) που προτείνεται στο [63], [64], στο [65] προτάθηκε μια υβριδική στρατηγική NOMA (δηλαδή, ένας χρήστης μπορεί πρώτα να εκφορτώσει μέρη της εργασίας του εντός χρονικής θυρίδας που εκχωρείται σε άλλο χρήστη, και στη συνέχεια εκφορτώνει το υπόλοιπο της εργασίας του κατά τη διάρκεια μιας χρονοθυρίδας που καταλαμβάνει αποκλειστικά ο ίδιος), στην οποία η κατανομή ισχύος και η κατανομή χρόνου βελτιστοποιήθηκαν, για να ελαχιστοποιηθεί η κατανάλωση ενέργειας. Στη συνέχεια, διερευνήθηκε η ελαχιστοποίηση της καθυστέρησης για το υβριδικό σύστημα NOMA-MEC [66]. Διαφορετικά από τις εργασίες μερικής εκφόρτωσης (partial offloading tasks), οι συγγραφείς στο [67] θεώρησαν ότι οι εργασίες εκφόρτωσης είναι ανεξάρτητες και μη-ξεχωριστές. Στη συνέχεια, οι πόροι επικοινωνίας (ζώνες συχνότητας & ισχύς μετάδοσης) και οι πόροι υπολογισμών (μπλοκ υπολογιστικών πόρων) βελτιστοποιήθηκαν από κοινού, για να ελαχιστοποιηθεί η κατανάλωση ενέργειας για το σύστημα NOMA-MEC [67], στο οποίο προτάθηκε ένας αποτελεσματικός ευρετικός αλγόριθμος (heuristic algorithm) της ομαδοποίησης χρηστών και της κατανομής μπλοκ συχνότητας και πόρων, για την αντιμετώπιση του προβλήματος ελαχιστοποίησης της κατανάλωσης ενέργειας ανά NOMA-συστοιχία.

Στο [68], το υπολογιστικό σχήμα εκφόρτωσης διερευνήθηκε στο σύστημα NOMA-MEC όπου προτάθηκε ένας κατανομημένος αλγόριθμος βασισμένος στη θεωρία παιγνίων, για τη βελτίωση της απόδοσης του συστήματος. Επιπλέον, το πρόβλημα ελαχιστοποίησης της

καθυστέρησης διερευνήθηκε στο [69], [70]. Στο [70] προτάθηκε ένας αποτελεσματικός αλγόριθμος για την εκφόρτωση των εργασιών, της βελτιστοποίησης της διάρκειας εκφόρτωσης & λήψης, για την ελαχιστοποίηση της συνολικής καθυστέρησης των εργασιών υπολογισμού. Η ενεργειακά αποδοτική κατανομή ισχύος, η κατανομή χρόνου και η ανάθεση εργασιών, προτάθηκαν για την ελαχιστοποίηση της κατανάλωσης ενέργειας για τα δίκτυα MEC [71]. Εκτός από τους υπολογιστικούς πόρους, βελτιστοποιήθηκε η σειρά αποκωδικοποίησης SIC (Successive interference cancellation), ώστε να μειωθεί η καθυστέρηση εργασιών, για IoT συστήματα στενής ζώνης (Narrowband Internet of Things, NB-IoT) με δυνατότητα NOMA [72].

8.1.4 Συμπεράσματα και Μελλοντικές Έρευνες

Υπάρχουν πολλά βασικά ανοιχτά προβλήματα που πρέπει να διερευνηθούν, λόγω των περιορισμένων ερευνών που υποστηρίζονται για σενάρια με την συνύπαρξη MEC-NOMA. Πιθανά μελλοντικά έργα των NOMA και MEC μπορούν να περιλαμβάνουν τις ακόλουθες πτυχές: 1) Βελτιστοποίηση συνδυαζόμενων πόρων, 2) Ασφαλείς επικοινωνίες, 3) Συνεργασία NOMA-MEC, 4) Συνύπαρξη NOMA-MEC και mmWave-mMIMO.

1. **Βελτιστοποίηση συνδυαζόμενων πόρων:** Η κατανομή πόρων παίζει σημαντικό ρόλο στη βελτίωση της απόδοσης των ασύρματων δικτύων. Έτσι, στα δίκτυα MEC-NOMA, οι πόροι επικοινωνίας και υπολογισμών μπορούν να βελτιστοποιηθούν από κοινού, ώστε να βελτιώσουν την απόδοση του συστήματος, δηλαδή τον συνολικό ρυθμό και την ενεργειακή απόδοσή του. Με άλλα λόγια, ο προγραμματιστής (scheduler) μπορεί να χρειαστεί να αποφασίσει τον υπολογιστικό φόρτο που μπορεί να μεταφορτώσει ο χρήστης στον MEC-διακομιστή, και το υπόλοιπο μπορεί να υπολογιστεί τοπικά, ώστε να ελαχιστοποιηθεί η καθυστέρηση. Επιπλέον, η υπολογιστική ικανότητα (δηλαδή η ταχύτητα επεξεργασίας MEC-διακομιστών ή κινητών συσκευών) και οι πόροι επικοινωνίας (δηλαδή η ισχύς μετάδοσης) είναι, επίσης, σημαντικοί παράγοντες για τη μείωση της καθυστέρησης υπολογισμού. Η κοινή βελτιστοποίηση αυτών των παραγόντων, παρουσιάζει ένα ανοιχτό ερευνητικό πρόβλημα. Όταν εφαρμόζεται NOMA στην uplink μετάδοση στο σύστημα MEC, πολλοί χρήστες μπορούν να εκφορτώσουν τις εργασίες τους στον MEC-διακομιστή, ταυτόχρονα. Επομένως, μπορεί να διερευνηθεί το συνολικό latency που βιώνουν πολλαπλοί χρήστες. Μπορούν δηλαδή, να αναπτυχθούν οι βέλτιστες και μη-βέλτιστες στρατηγικές για την ελαχιστοποίηση της συνολικής καθυστέρησης του συστήματος, ελέγχοντας τον εκφορτωμένο (offloaded) υπολογιστικό φόρτο και την ισχύ μετάδοσης κάθε χρήστη, λαμβάνοντας υπόψη τη συνολική κατανάλωση ενέργειας. Η προτεινόμενη λύση μπορεί να επεκταθεί και στην downlink μετάδοση. Επιπλέον, η ομαδοποίηση χρηστών ή η συσχέτιση χρηστών μπορεί να είναι μια άλλη τάση στη βελτιστοποίηση πόρων των συστημάτων MEC-NOMA, όπου η θεωρία αντιστοίχισης (matching theory) ή η θεωρία παιγνίων (game theory) μπορεί να αξιοποιηθεί για να ομαδοποιηθούν οι χρήστες σε διαφορετικές ομάδες, που χρησιμοποιούν διαφορετικά υποκανάλια για να εκφορτώσουν τις εργασίες τους. Επιπλέον, η απόδοτικότητα της Διαδοχικής Ακύρωσης Παρεμβολών (successive interference cancellation - SIC) είναι ευαίσθητη όσον αφορά την διαθεσιμότητα της Πληροφορίας Κατάστασης Καναλιού (channel state information - CSI). Επομένως, μια άλλη πιθανή κατεύθυνση για την

αντιμετώπιση αυτού του ζητήματος είναι να βασιστούμε στην μερική Πληροφορία Κατάστασης Καναλιού (partial CSI).

2. **Ασφαλείς επικοινωνίες:** Η ασφάλεια και η επικοινωνία που διαφυλάσσει το απόρρητο (privacy-preserving communication), μπορεί να προσελκύσει την ερευνητική προσοχή, ειδικά όταν η NOMA εφαρμόζεται στο MEC-σύστημα. Για παράδειγμα, δύο χρήστες εκφορτώνουν εργασίες σε έναν MEC-διακομιστή ταυτόχρονα, χρησιμοποιώντας την αρχή NOMA. Όταν εκτελείται η Διαδοχική Ακύρωση Παρεμβολών (SIC), ένας χρήστης μπορεί να αποκωδικοποιήσει το μήνυμα του άλλου χρήστη. Κατά τη διάρκεια αυτής της περιόδου, ένας υποκλοπέας ή ένας εισβολέας μπορεί να επιχειρήσει να αποκωδικοποιήσει το μήνυμα του χρήστη του κινητού. Η ασφάλεια φυσικού επιπέδου μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την αντιμετώπιση αυτής της εξωτερικής υποκλοπής.
3. **Συνεργασία NOMA-MEC:** Το συνεργατικό MEC μπορεί να επιτρέψει τη μεταφόρτωση των υπολογισμών στον κύριο MEC-διακομιστή, για την βελτίωση της συνδεσιμότητας του δικτύου NOMA-MEC. Σε αυτό το σενάριο, η κινητή συσκευή μεταδίδει τα υπερτιθέμενα σήματα (superimposed signals) στον κύριο MEC-διακομιστή και στον βοηθητικό MEC-διακομιστή, ο οποίος λειτουργεί ως βοηθητικός διακομιστής αναμετάδοσης. Λαμβάνοντας υπόψη την τοπική υπολογιστική ικανότητα των κινητών χρηστών και τον περιορισμό της κατανάλωσης ενέργειας, η ανάθεση εργασιών και η κατανομή ισχύος μετάδοσης μπορούν να βελτιστοποιηθούν, για τη βελτίωση της συνολικής απόδοσης του συστήματος.
4. **Συνύπαρξη NOMA-MEC και mmWave-mMIMO:** Η συνύπαρξη mMIMO-NOMA είναι ένα ακόμα σενάριο για την υποστήριξη της μαζικής συνδεσιμότητας και της υψηλής φασματικής απόδοσης. Οι mmWave ζώνες (30 GHz έως 300 GHz) έχουν προταθεί για περαιτέρω βελτίωση του ρυθμού μετάδοσης δεδομένων, ακόμα και σε GBps. Επομένως, η ενσωμάτωση των NOMA-MEC σε ασύρματα δίκτυα που βασίζονται σε mmWave-MIMO, μπορεί να βελτιώσει α) την υπολογιστική ικανότητα, β) την αποτελεσματικότητα του φάσματος και γ) να μειώσει την καθυστέρηση των εργασιών, καθώς πολλές φορητές συσκευές θα μπορούν να μεταδίδουν εργασίες, ταυτόχρονα, μέσω των mmWave ζωνών. Μια σημαντική πρόκληση που πρέπει να αντιμετωπιστεί μπορεί να είναι επίσης, η αποτελεσματική προσέγγιση σχεδιασμού της κοινής διαμόρφωσης δέσμης (joint beamforming), και της κατανομής των πόρων επικοινωνίας και υπολογισμών.

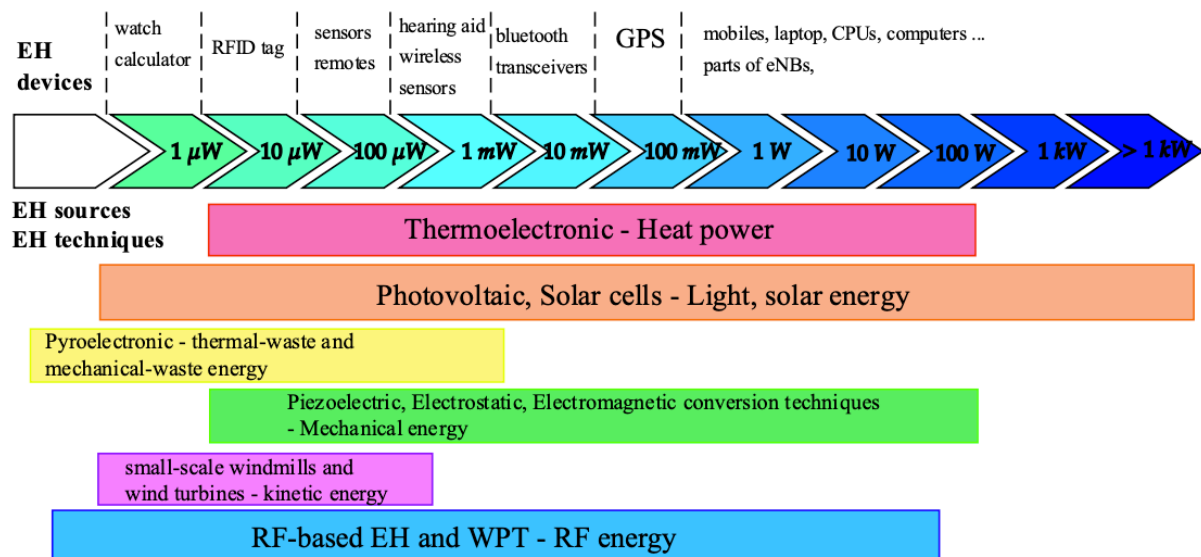
8.2 MEC με Συγκομιδή Ενέργειας (Energy Harvesting - EH) και Ασύρματη Μεταφορά Ενέργειας (Wireless Power Transfer - WPT)

8.2.1 Βασικές αρχές Energy Harvesting (EH) και Wireless Power Transfer (WPT)

Στο βιομηχανικό τοπίο, έχει πλέον δημιουργηθεί η ανάγκη βελτιστοποίησης της χρήσης και της διαχείρισης της ενέργειας για όλους τους τομείς, συμπεριλαμβανομένων των τηλεπικοινωνιών. Μεταξύ άλλων, η συγκομιδή ενέργειας (EH), είναι μια πολλά υποσχόμενη τεχνική για συστήματα 5G, καθώς είναι μια εναλλακτική λύση, σε σχέση με τις παραδοσιακές πηγές παροχής ενέργειας. Η βασική ιδέα του EH είναι η συλλογή της διαθέσιμης ενέργειας, από διαφορετικές πηγές, για την τροφοδοσία των συσκευών περιορισμένης ενέργειας, ώστε να μεγαλώσει η διάρκεια ζωής τους. Μαζί με το παραδοσιακό ενεργειακό δίκτυο, το EH μπορεί να συμβάλει στην επίτευξη των ενεργειακών απαιτήσεων, των διαφορετικών επιπέδων των 5G δικτύων, συμπεριλαμβανομένων των αισθητήρων στα IoT, των φορητών συσκευών, των eNodeB's στα ετερογενή δίκτυα, στα συστήματα device-to-device και των διάφορων διακομιστών. Επιπλέον, η πρόσφατη εξέλιξη σε προηγμένα υλικά, βοηθά στην υλοποίηση των κυκλωμάτων EH για μικρές φορητές ηλεκτρονικές συσκευές, ευρείας κατανάλωσης, που επιταχύνουν την υιοθέτηση του EH στο IoT.

Το EH είναι απλό στην ιδέα, αλλά πιο περίπλοκο στην εφαρμογή του, το οποίο εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από τον τύπο των πηγών ενέργειας. Η ενέργεια μπορεί να συλλεχθεί από φυσικές ή ανθρωπογενείς πηγές που είναι ελεγχόμενες ή μη-ελεγχόμενες. Όπως απεικονίζεται στο Σχήμα 30, διάφορες τεχνικές EH μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την αξιοποίηση των αντίστοιχων ενεργειών. Σε σύγκριση με τις παραδοσιακές φυσικές πηγές ενέργειας, τα σήματα ραδιοσυχνότητας (Radio Frequency - RF) επηρεάζονται λιγότερο από τις καιρικές συνθήκες ή άλλες εξωτερικές περιβαλλοντικές συνθήκες. Ως αποτέλεσμα, αυτά τα σήματα μπορούν να ελέγχονται και να σχεδιάζονται αποτελεσματικά, ώστε το EH που βασίζεται σε RF, να έχει μεγάλες δυνατότητες να παρέχει σταθερή ενέργεια σε δίκτυα χαμηλής κατανάλωσης / περιορισμένης ενέργειας, συμπεριλαμβανομένων των ασύρματων δικτύων αισθητήρων (WSNs), των IoTs, των επικοινωνιών σε εξαιρετικά απομακρυσμένες περιοχές (extremely Remote Area Communication - eRAC). Συγκεκριμένα, το RF-EH μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε εσωτερικά ή εχθρικά και σκληρά περιβάλλοντα, όπως για παράδειγμα, οι αισθητήρες μέσα σε ένα κτίριο ή στο ανθρώπινο σώμα ή σε κάποιο τοξικό περιβάλλον. Το RF-EH μπορεί να συλλέξει ασύρματη ενέργεια από 1) πηγές περιβάλλοντος που μπορεί να είναι προβλέψιμες ή απρόβλεπτες (πχ WiFi, AM και FM) ή 2) πηγές που αναπτύσσονται αποκλειστικά για την παροχή ενέργειας, για την κάλυψη των απαιτήσεων των κινητών ή των ακραίων κόμβων. Για την εκμετάλλευση των πηγών του περιβάλλοντος, απαιτείται μια έξυπνη διαδικασία, για την παρακολούθηση των ζωνών συχνοτήτων επικοινωνίας και των κατάλληλων χρονικών περιόδων για συλλογή (harvest). Το RF-EH, μπορεί να θεωρηθεί και ως Ασύρματη Μεταφορά Ενέργειας (WPT), με τη σωστή διαχείριση των αποκλειστικών πηγών ενέργειας μεταξύ των πομπών ενέργειας και των μηχανισμών συλλογής της.

Κινητή Υπολογιστική Άκρου Σε Περιβάλλοντα 5G



Σχήμα 30 - Τεχνολογίες EH με παραγόμενη διακοπτόμενη ισχύ και κατανάλωση ενέργειας, για διάφορες συσκευές

Το WPT προτάθηκε για πρώτη φορά από τον Νικόλα Τέσλα το 1899, και μελετήθηκε στη συνέχεια τόσο από τη βιομηχανία, όσο και από ακαδημαϊκές κοινότητες. Οι υπάρχουσες τεχνολογίες WPT μπορούν να χωριστούν σε τρεις κατηγορίες: α) επαγωγική σύζευξη (inductive coupling), β) σύζευξη μαγνητικού συντονισμού (magnetic resonant coupling) και γ) στο WPT που βασίζεται σε RF. Οι δύο πρώτες τεχνολογίες βασίζονται σε ηλεκτρομαγνητικά κύματα κοντινού-πεδίου (Electromagnetic (EM) Spectrum), τα οποία δεν μπορούν να υποστηρίξουν την κινητικότητα των ασύρματων συσκευών περιορισμένης ενέργειας, λόγω των περιορισμένων αποστάσεων ασύρματης φόρτισης (λίγα μέτρα) και της απαιτούμενης ευθυγράμμισης του ηλεκτρομαγνητικού πεδίου με το κυκλώμα EH. Αντίθετα, το WPT, το οποίο βασίζεται στο RF, εκμεταλλεύεται τις ιδιότητες μακρινού-πεδίου των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων σε μεγάλες αποστάσεις (εκατοντάδες μέτρα). Σε αυτά τα συστήματα, η ενσωμάτωση των διαμορφωμένων πληροφοριών (πχ ενσωματωμένες πληροφορίες φάσης - phase-embedded information) στα σήματα WPT, διαμορφώνει την έννοια της ταυτόχρονης ασύρματης επικοινωνίας και μεταφοράς ισχύος (simultaneous wireless communication and power transfer - SWIPT), το οποίο προτάθηκε και μελετήθηκε στο [73], σε θεωρητικό επίπεδο.

Πρόσφατα, οι εργασίες [74], [75] έδειξαν ότι η ενσωμάτωση EH/WPT σε τυπικά συστήματα 5G, συμπεριλαμβανομένων του IoT, των δικτύων συσκευής με συσκευή (D2D) και των ετερογενών δικτύων, μπορεί να αποφέρει οφέλη στη βελτίωση της ενεργειακής και φασματικής απόδοσης. Ωστόσο, η ενσωμάτωση του EH/WPT στην αρχιτεκτονική 5G, εγείρει επίσης ορισμένες τεχνικές προκλήσεις ως εξής:

- Ο **τρόπος κάλυψης** των ασταθών και διακοπτόμενων χαρακτηριστικών των περιβαλλοντικών πόρων, δηλαδή ισχύς, φάσμα, περίοδοι, αποτελεί ένα δύσκολο πρόβλημα που θα πρέπει να ληφθεί υπόψη κατά το σχεδιασμό συστημάτων EH.
- Ένα ζήτημα επίσης, είναι ο **τρόπος κατανομής** των πόρων του δικτύου, για την εξισορρόπηση της συλλεγόμενης ενέργειας και της καταναλισκόμενης ενέργειας. Προς το σκοπό αυτό, πρέπει κανείς να κατανοήσει καλά το περιβάλλον παραγωγής και τα χαρακτηριστικά της πηγής ενέργειας, τις ιδιότητες κατανάλωσης ενέργειας

διαφορετικών στοιχείων του συστήματος, την περιοχή κάλυψης, την απόσταση επικοινωνίας, τον ρυθμό δεδομένων και τις υποκείμενες ιδιαιτερότητες της εφαρμογής.

- Θα πρέπει τέλος να διερευνηθεί η **κοινή κατανομή πόρων** για το EH και τη μετάδοση των δεδομένων, για τη βελτίωση της απόδοσης του δικτύου, λαμβάνοντας σοβαρά υπόψη ότι η διαδικασία συλλογής ενέργειας μπορεί να επηρεάσει τις διαμορφωμένες πληροφορίες.

Απαιτείται μια - εις βάθος - μελέτη αυτών των προκλήσεων, προκειμένου να σχεδιαστεί ένα αποτελεσματικό ασύρματο δίκτυο, το οποίο θα λαμβάνει υπόψη διαφορετικούς παράγοντες, όπως τα χαρακτηριστικά των γεννητριών της ενέργειας, τους μετατροπείς (transducers), την αποθήκευση της ενέργειας, τις μεθόδους διαχείρισης και εφαρμογής της συλλεγόμενης ενέργειας.

8.2.2 Κίνητρα

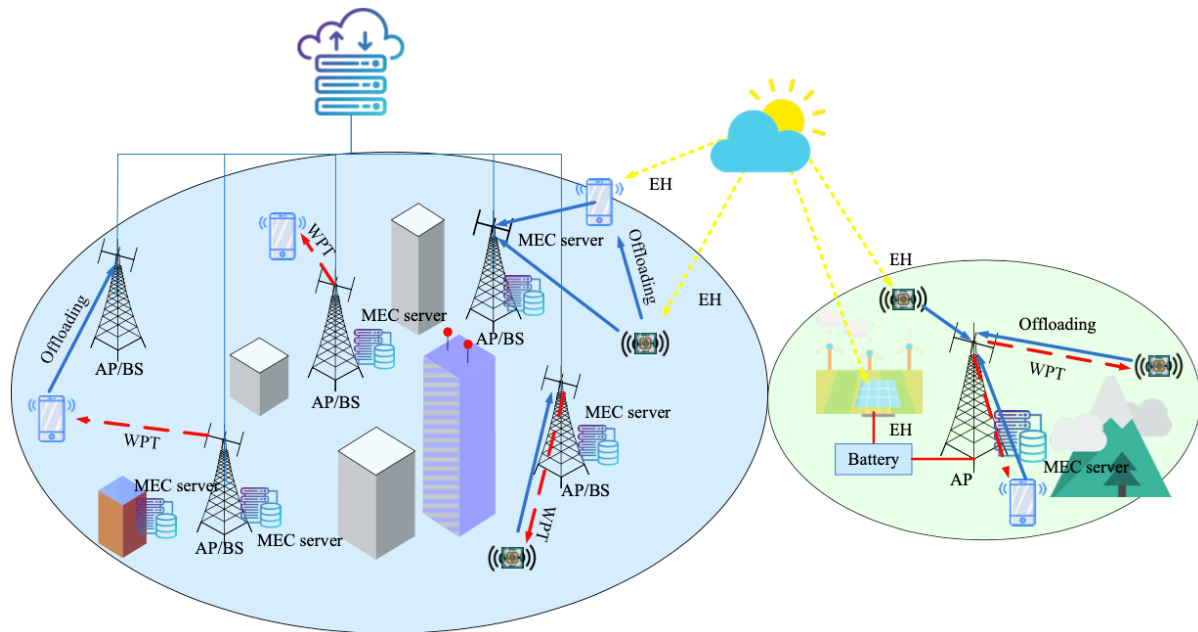
Τόσο το EH και το WPT, όσο και το MEC, έχουν θεωρηθεί ως πολλά υποσχόμενες τεχνολογίες για τα δίκτυα 5G, οι οποίες μπορούν να βελτιώσουν την ενεργειακή απόδοση των κινητών/ακραίων συσκευών και να παρατείνουν τη διάρκεια ζωής της μπαταρίας των κόμβων επικοινωνίας, σε απομακρυσμένες περιοχές. Ενώ το MEC επιτρέπει την εκφόρτωση των τερματικών συσκευών από τον μεγάλο όγκο των εργασιών υπολογισμού, για την εξοικονόμηση ενέργειας, οι τεχνικές EH/WPT τους επιτρέπουν να εκμεταλλεύονται την ενέργεια στο περιβάλλον τους, ώστε να επαναφορτίσουν τις μπαταρίες τους. Ως εκ τούτου, η ενσωμάτωση αυτών των δύο τεχνολογιών, στα μελλοντικά συστήματα ασύρματης επικοινωνίας, μπορεί να βελτιώσει σημαντικά την απόδοση του δικτύου αξιοποιώντας τα δυνατά σημεία και των δύο υποκείμενων τεχνολογιών. Οι τεχνολογίες αυτές θα οδηγήσουν στα ακόλουθα οφέλη:

- Οι τεχνικές EH/WPT μπορούν να τροφοδοτήσουν τις ακραίες συσκευές των συστημάτων MEC, ώστε να διευρύνουν το σύνολο των επιλογών τους για την εκφόρτωση των υπολογισμών, που θα έχει ως αποτέλεσμα τη βελτίωση της απόδοσης του δικτύου. Σε σημαντικές περιπτώσεις χρήσης δικτύων 5G με δυνατότητα MEC, όπως στο IoT, η συλλογή από το περιβάλλον και η χρήση του WPT παρέχουν πολλά υποσχόμενες λύσεις για τη διαρκή υποστήριξη του τεράστιου αριθμού ηλεκτρονικών αισθητήρων. Επιπλέον, οι μονάδες EH/WPT μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την τροφοδοσία MEC-διακομιστών, αξιοποιώντας την πράσινη ενέργεια (ηλιακή, αιολική ενέργεια). Το EH/WPT παρέχει λύση για τις περιπτώσεις χρήσης σε εξαιρετικά απομακρυσμένες περιοχές (eRAC) με 5G, όπου οι MEC-διακομιστές και οι κινητές ακραίες συσκευές ενδεχομένως να βρίσκονται εκτός της κάλυψης του ηλεκτρικού δικτύου, για λόγους όπως περιορισμοί ανάπτυξης, απαιτήσεις αξιοπιστίας, καιρικές συνθήκες, καταστροφές και έξοδα συντήρησης.
- Η κατανεμημένη υπολογιστική ισχύς των συστημάτων MEC, μπορεί να αξιοποιηθεί για την εκμάθηση των χρονικά μεταβαλλόμενων ιδιοτήτων της πηγής ενέργειας, για τη βελτιστοποίηση της απόδοσης του δικτύου.

- Ένας MEC-διακομιστής μπορεί να αναπτυχθεί για να υποστηρίξει ένα σύμπλεγμα κινητών κόμβων και αισθητήρων, σε ασύρματα δίκτυα με δυνατότητα EH. Σε επίπεδο κόμβου, το MEC μπορεί να βοηθήσει κάθε συσκευή EH να μειώσει τον χρόνο επεξεργασίας και να κρατήσει περισσότερο χρόνο για την συλλογή της ενέργειας, μεταφορτώνοντας τον μεγαλύτερο όγκο εργασιών της σε fog-διακομιστές. Σε επίπεδο δικτύου, μπορεί να αναπτυχθεί μια κεντρική στρατηγική EH, για τον συντονισμό των λειτουργιών όλων των συσκευών, για μεγαλύτερη απόδοση.

Ένα απλό σύστημα MEC με δυνατότητα EH και ασύρματη τροφοδοσία, απεικονίζεται στο Σχήμα 31, στο οποίο το EH και το WPT χρησιμοποιούνται σε MEC-διακομιστές και κινητές συσκευές. Ενώ το EH και το WPT αποφέρουν πολλαπλά οφέλη, όπως συζητήθηκε παραπάνω, το σύστημα MEC αντιμετωπίζει πολλές προκλήσεις, όπως α) η κατανομή πόρων επικοινωνίας, β) η κατανομή πόρων υπολογισμού, γ) η ελαχιστοποίηση του latency, καθώς και δ) προβλήματα ασφάλειας. Στη συνέχεια, περιγράφουμε ορισμένες σημαντικές προκλήσεις που πρέπει να αντιμετωπιστούν, για την αποτελεσματική ενσωμάτωση του EH/WPT στο σύστημα MEC.

- Γενικά, οι φορητές συσκευές έχουν περιορισμένο μέγεθος μπαταρίας και υπολογιστική ικανότητα. Η ενσωμάτωση EH/WPT σε ασύρματα δίκτυα που βασίζονται στο MEC, διευκολύνει τις κινητές συσκευές, με εξωτερική πηγή ενέργειας, στην επεξεργασία μεγάλου φόρτου εργασίας, αλλά αυτό απαιτεί πρόσθετο φόρτο εργασίας και επεξεργασίας για τον έλεγχο της λειτουργίας στο EH. Έτσι, ένα τέτοιο ολοκληρωμένο σύστημα πρέπει να αντιμετωπίσει ένα πιο περίπλοκο πρόβλημα κατανομής πόρων. Τα κύρια ερευνητικά ζητήματα σε αυτή τη γραμμή, περιλαμβάνουν την κατανομή πόρων και τον σχεδιασμό εκφόρτωσης, για την καλή ισορροπία μεταξύ της συλλεγόμενης ενέργειας και της κατανάλωσης ενέργειας. Συγκεκριμένα, ο τρόπος εκτέλεσης της "ενεργειακά αποδοτικής" εκφόρτωσης υπολογισμών στο σύστημα EH/WPT-MEC, παραμένει ένα ζήτημα, λαμβάνοντας υπόψη πρακτικούς περιορισμούς στη διαδικασία συγκομιδής.
- Στα σενάρια όπου οι MEC-διακομιστές τροφοδοτούνται κυρίως από ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, η διαθεσιμότητα της πηγής ενέργειας στους τομείς του χώρου και του χρόνου, θα ακολουθούσε μια ασταθή και μη ομοιόμορφη κατανομή. Επιπλέον, τα επίπεδα ενέργειας που συλλέγονται μπορεί να διαφέρουν στο χώρο, γεγονός που οδηγεί σε άνιση κατανομή ισχύος μεταξύ των διακομιστών. Ως εκ τούτου, η εξισορρόπηση της κατανομής μεταξύ όλων των ακραίων διακομιστών, είναι επίσης ένα ενδιαφέρον ερευνητικό πρόβλημα.



Σχήμα 31 - Δίκτυα πρόσβασης MEC με δυνατότητα EH/WPT

8.2.3 Τεχνολογία Αιχμής / Υπάρχουσες Μελέτες

Οι υπάρχουσες εργασίες για το συνδυασμό EH/WPT και MEC εξετάζουν κυρίως τρία σχήματα. Στα δύο πρώτα σχήματα, οι τεχνικές EH και WPT εφαρμόζονται σε κινητές συσκευές, σε ασύρματα δίκτυα επικοινωνίας, με δυνατότητα MEC. Αυτά τα σχήματα μπορούν να εφαρμοστούν σε συστήματα WSN, IoT, eRAC και D2D στο δίκτυο 5G, όπου υποστηρίζουν έναν τεράστιο αριθμό μικρών συσκευών που λειτουργούν με μπαταρία, και συνδέονται ασύρματα με διακομιστές MEC, για την εκφόρτωση και την επεξεργασία δεδομένων. Επειδή αυτές οι συσκευές έχουν συνήθως περιορισμένη μπαταρία για την παροχή ενέργειας για την επικοινωνία τους, οι τεχνολογίες EH και WPT μπορούν να χρησιμοποιηθούν για να παρέχουν πρόσθετη ισχύ για τις μακροπρόθεσμες λειτουργίες τους, όπως η ανίχνευση, η αναφορά δεδομένων ή η εκφόρτωση μεγάλου υπολογιστικού φορτίου. Για να γίνει αυτό, οι ακραίες συσκευές πρέπει να εκτιμήσουν την ισχύ και τον χρόνο που καταναλώνεται από τη λειτουργία τους. Το τρίτο σχήμα εστιάζει σε σενάρια στα οποία η σύνδεση των MEC-διακομιστών στο ηλεκτρικό δίκτυο είναι δαπανηρή ή ακόμη και αδύνατη (πχ φυσικές καταστροφές, απομακρυσμένες τοποθεσίες). Ως συνέπεια, οι τοπικές ανανεώσιμες πηγές ενέργειας μπορούν να θεωρηθούν ως η κύρια ή ακόμα και η μοναδική πηγή τροφοδοσίας για αυτούς τους διακομιστές. Σε αυτές τις περιπτώσεις, ο αποτελεσματικός σχεδιασμός κατανομής ισχύος / φόρτου μεταξύ όλων των MEC-διακομιστών, υπό την απρόβλεπτη και ασταθή συλλεγόμενη ενέργεια, αποτελεί πρόκληση.

1. **Εκφόρτωση και κατανομή πόρων για MEC-συστήματα χρησιμοποιώντας τεχνική EH:** Πρόσφατα, στο [76] εξετάστηκε το πρόβλημα εκφόρτωσης υπολογισμού πολλαπλών-εργασιών πολλών-χρηστών, που στοχεύει στη μεγιστοποίηση των συνολικών εσόδων των ασύρματων συσκευών με EH. Σε αυτή την εργασία υιοθετήθηκε η προσέγγιση βελτιστοποίησης Lyapunov, για να αναπτυχθεί η πολιτική συλλογής ενέργειας και το χρονοδιάγραμμα εκφόρτωσης των εργασιών. Η αντιστάθμιση μεταξύ κατανάλωσης ενέργειας και καθυστέρησης εκτέλεσης για ένα

MEC-σύστημα με δυνατότητα EH, μελετήθηκε στο [77]. Προτάθηκε ένας διαδικτυακός δυναμικός προγραμματισμός εργασιών, με σκοπό την ελαχιστοποίηση της μέσης κατανάλωσης ενέργειας και της καθυστέρησης εκτέλεσης, βάσει των περιορισμών που συναντήθηκαν (σταθερότητα των ουρών προσωρινής αποθήκευσης (buffer queues), επίπεδο μπαταρίας). Χρησιμοποιώντας την προσέγγιση Βαθιάς Εκμάθησης (Deep Learning - DL), στο [78] προτείνεται επίσης ένα σχήμα εκφόρτωσης με βάση την ενίσχυση της μάθησης, όπου κάθε συσκευή IoT (που βασίζεται στο EH) επιλέγει τον MEC-διακομιστή και τον ρυθμό εκφόρτωσης, χωρίς γνώση του MEC-μοντέλου, αλλά με βάση το τρέχον επίπεδο μπαταρίας, το προηγούμενο ρυθμό ραδιο-μετάδοσης σε κάθε διακομιστή, και την προβλεπόμενη συλλεγόμενη ενέργεια.

2. **Εκφόρτωση και κατανομή πόρων για MEC-συστήματα χρησιμοποιώντας τεχνική WPT:** Λαμβάνοντας υπόψη τα συστήματα MEC με δυνατότητα WPT, το [79] στοχεύει στη μεγιστοποίηση του (σταθμισμένου) αθροίσματος του ρυθμού υπολογισμού όλων των ασύρματων συσκευών στο δίκτυο, βελτιστοποιώντας - από κοινού - την μεμονωμένη απόφαση εκφόρτωσης και την κατανομή χρόνου για μετάδοση. Ομοίως, στο [80] εξετάζεται η στρατηγική διαίρεσης χρόνου, για την αμφίδρομη ανταλλαγή δεδομένων μεταξύ του fog-κόμβου και του κινητού χρήστη, σε αυτά τα συστήματα. Η συνεργασία μεταξύ των ακραίων χρηστών μελετήθηκε στα [81], [82]. Συγκεκριμένα, το [81] στοχεύει στη μεγιστοποίηση της ενεργειακής απόδοσης, για τη διασφάλιση της αμεροληψίας (fairness) μεταξύ των χρηστών, «ενθαρρύνοντας» τον κοντινό χρήστη (Near User) να προωθήσει τις εργασίες των μακρινών χρηστών (Far User) στο ακραίο νέφος. Ενώ το [82] επιτρέπει στις περιφερειακές συσκευές που βρίσκονται σε αδράνεια, να λειτουργούν ως βοηθοί, χρησιμοποιώντας την ευκαιριακά συλλεγμένη ασύρματη ενέργειά τους, για να βοηθήσουν στην - εξ αποστάσεως - εκτέλεση υπολογιστικών εργασιών των ενεργών χρηστών. Στην [83] περιγράφεται ένα σύστημα MEC που βασίζεται σε Μη-Επανδρωμένα Εναέρια Οχήματα (UAVs), στο οποίο ένα όχημα (αέρος) λειτουργεί ως σταθμός βάσης, με δυνατότητα MEC, το οποίο προσφέρει WPT και εκφορτώνει υπηρεσίες σε έναν αριθμό επίγειων φορητών συσκευών με δυνατότητα EH. Η εργασία αυτή, στοχεύει στη μεγιστοποίηση του ρυθμού υπολογισμού του συστήματος. Σε μια άλλη προσέγγιση, στο [84] διερευνάται το πρόβλημα του διαχωρισμού της ισχύος για τη μετάδοση πληροφοριών από την ισχύ για την μεταφορά ενέργειας, σε SWIPT* MEC-συστήματα (*ταυτόχρονη ασύρματη επικοινωνία και μεταφορά ισχύος - simultaneous wireless communication and power transfer). Συγκεκριμένα, προτείνεται ένας νέος αλγόριθμος για την ελαχιστοποίηση της απαιτούμενης ενέργειας, υπό τους περιορισμούς στις απαιτούμενες μεταδόσεις πληροφοριών και τους ρυθμούς επεξεργασίας.
3. **Σχεδιασμός εξισορρόπησης φορτίου για πολλαπλούς MEC-διακομιστές, που βασίζονται στο EH:** Στα αυτά τα συστήματα, όπου οι διακομιστές υπολογισμού τροφοδοτούνται κυρίως από ανεξέλεγκτες και απρόβλεπτες πηγές ενέργειας (πχ ηλιακή, αιολική), μεμονωμένοι MEC-διακομιστές ενδέχεται να υπερφορτωθούν ανά πάσα στιγμή, λόγω των περιορισμένων δυνατοτήτων τους στην συλλογή ενέργειας, αλλά και στην περιορισμένη υπολογιστική τους ικανότητα. Ως εκ τούτου, η πρόβλεψη ενέργειας και η εξισορρόπηση του φορτίου μεταξύ όλων των MEC-διακομιστών που βασίζονται στο EH, είναι σημαντικά ερευνητικά ζητήματα.

Ειδικότερα, στο [85] εξετάζεται η εξισορρόπηση φορτίου με βάση τη γεωγραφική θέση, και στοχεύει στην ελαχιστοποίηση του μακροπρόθεσμου κόστους του συστήματος. Για την αντιμετώπιση αυτού του προβλήματος, αναπτύχθηκε ένας αλγόριθμος, που ονομάζεται GLOBE, αξιοποιώντας την τεχνική στοχαστικής βελτιστοποίησης Lyapunov. Συγκεκριμένα, ο αλγόριθμος επιτρέπει σε MEC-σταθμούς βάσης, να λαμβάνουν αποφάσεις για την γεωγραφική εξισορρόπηση φορτίου, χωρίς να απαιτούν μελλοντικές πληροφορίες του συστήματος. Ενσωματώνοντας το EH σε MEC-Ετερογενή δίκτυα, στο [86] ερευνάται το πρόβλημα κοινής διαχείρισης φορτίου και κατανομής πόρων, το οποίο μεγιστοποιεί τον αριθμό των χρηστών που χρησιμοποιούν περιορισμένους πόρους ενέργειας και υπολογισμών. Για την επίλυση του προβλήματος, προτείνεται ένας κατανεμημένος επαναληπτικός αλγόριθμος τριών σταδίων. Στο πρώτο στάδιο, η εξισορρόπηση φορτίου μεταξύ όλων των σταθμών βάσης διεξάγεται για ένα δεδομένο σχήμα κατανομής καναλιού και κατανομής πόρων υπολογισμού. Στα υπόλοιπα δύο στάδια, η κατανομή καναλιού και η κατανομή πόρων υπολογισμού βελτιστοποιήθηκαν με τη σειρά τους, με βάση την κίνηση φορτίου που επιτεύχθηκε στο πρώτο στάδιο. Τέλος, αναπτύσσεται ένας επαναληπτικός αλγόριθμος για την απόκτηση της κοινής λύσης εξισορρόπησης φορτίου και κατανομής πόρων.

8.2.4 Συμπεράσματα και Μελλοντικές Έρευνες

Ο συνδυασμός MEC και EH/WPT αναμένεται να είναι ευεργετικός στο άμεσο μέλλον, λόγω των μεγάλων πλεονεκτημάτων που προσφέρουν, καθώς και λόγω των συμπληρωματικών ιδιοτήτων τους. Εξακολουθούν να υπάρχουν αρκετές προκλήσεις, παρότι διάφορα προβλήματα και ζητήματα στα συστήματα EH/WPT-MEC έχουν μελετηθεί εντατικά. Στη συνέχεια, παρουσιάζονται ορισμένες από αυτές και περιγράφονται οι κατευθύνσεις για μελλοντική έρευνα.

- **Πρόβλεψη ενέργειας:** Οι περισσότερες από τις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας είναι απρόβλεπτες. Για παράδειγμα, μπορεί να εμφανιστούν ή να εξαφανιστούν σύννεφα, κάτι που μπορεί να επηρεάσει τη διαδικασία συλλογής ηλιακής ενέργειας. Άλλα είδη πηγών ενέργειας (πχ άνεμος, θερμότητα, δονήσεις) ποικίλλουν με την πάροδο του χρόνου. Στα συστήματα WPT, τα χαρακτηριστικά του καναλιού πρακτικά εξαρτώνται από το περιβάλλον, στο οποίο το επίπεδο παρεμβολής και ο αριθμός των διαδρομών δεν μπορούν να είναι γνωστά εκ των προτέρων. Έτσι, η κατανόηση της συμπεριφοράς του περιβάλλοντος είναι κρίσιμη για την αποτελεσματική εφαρμογή των τεχνικών EH & WPT. Πρόσφατα, προηγμένες μέθοδοι ML και DL έχουν χρησιμοποιηθεί για την πρόβλεψη της ενέργειας με βάση τα ιστορικά και γεωγραφικά δεδομένα. Παρά τα σημαντικά οφέλη, οι μηχανισμοί μηχανικής και η ανάλυση μεγάλου όγκου δεδομένων, εγείρουν ορισμένα απαιτητικά ζητήματα για την υλοποίησή τους, όπως η συλλογή δεδομένων ή οι μεγάλοι υπολογιστικοί πόροι που απαιτούνται για την επεξεργασία τους. Τα θέματα αυτά μπορούν να ξεπεραστούν χρησιμοποιώντας την έννοια του MEC. Η εκμετάλλευση της μάθησης σε MEC-διακομιστές για την εξαγωγή χρήσιμων πληροφοριών που συλλέγονται από όλες τις EH-συσκευές, μπορεί να μειώσει τον χρόνο που προκαλείται από την αποστολή των δεδομένων σε έναν απομακρυσμένο Cloud-διακομιστή. Ως εκ τούτου, οι προβλεπόμενες πληροφορίες

μπορούν να επιτευχθούν εγκαίρως για ΕΗ υψηλής απόδοσης, γεγονός που μπορεί να επεκτείνει την ικανότητα των ΕΗ-συσκευών.

- **MEC βασισμένο σε ΕΗ/WPT, για ΙοΤ / πυκνά δίκτυα:** Ένα δίκτυο ΙοΤ στοχεύει στην υποστήριξη ενός τεράστιου αριθμού συνδέσεων από συσκευές τύπου-μηχανής που είναι μικρές, έχουν κατασκευαστεί με πολύ χαμηλό κόστος και αναμένεται να λειτουργούν σε αυτόνομο τρόπο, για μεγάλο χρονικό διάστημα. Ο μεγάλος αριθμός συνδεδεμένων συσκευών και η λειτουργία τους σε χαμηλή ισχύ, απαιτούν προηγμένα ασύρματα δίκτυα πρόσβασης, όπως πυκνά σημεία πρόσβασης ή μετάδοση δεδομένων πολλαπλών βημάτων. Τα συστήματα MEC μπορούν να διαδραματίσουν σχετικό ρόλο σε ένα τέτοιο σενάριο, στη διαχείριση της λειτουργικότητας των μεμονωμένων κόμβων όσον αφορά: α) το συγχρονισμό, β) την αξιοπιστία, γ) την εκμετάλλευση της διαθέσιμης συλλεγόμενης πηγής ενέργειας, δ) τη συνεργασία με άλλους για το WPT, ε) μετάδοση δεδομένων και εκφόρτωση. Μία άλλη πρόκληση όσον αφορά την επιτυχημένη ανάπτυξη συσκευών σε μια υποδομή ΙοΤ, είναι η ελαχιστοποίηση των επιπτώσεών τους στον άνθρωπο σώμα και στο περιβάλλον.

8.3 MEC για Μη Επανδρωμένα Εναέρια Οχήματα (UAVs)

8.3.1 Βασικές Αρχές

Ιστορικά, τα UAVs έχουν θεωρηθεί ως ενεργοποιητές διαφόρων εφαρμογών, συμπεριλαμβανομένων των στρατιωτικών, της επιτήρησης και παρακολούθησης, των τηλεπικοινωνιών, της παράδοσης ιατρικών προμηθειών και των επιχειρήσεων διάσωσης, λόγω της αυτονομίας, της ευελιξίας και του ευρέος φάσματος κάλυψης. Ωστόσο, σε αυτές τις εφαρμογές, τα UAVs επικεντρώθηκαν κυρίως στην πλοήγηση, τον έλεγχο και την αυτονομία. Ως αποτέλεσμα, οι επικοινωνιακές προκλήσεις των UAVs έχουν συνήθως είτε παραμεληθεί, είτε θεωρηθεί ως μέρος των στοιχείων ελέγχου και αυτονομίας. Τα UAVs είναι κοινώς γνωστά ως drones ή τηλεκατευθυνόμενα αεροσκάφη, και έχουν πολλές βασικές πιθανές εφαρμογές σε συστήματα ασύρματων επικοινωνιών, λόγω της υψηλής κινητικότητας, της ευελιξίας, του προσαρμοστικού ύψους και του χαμηλού κόστους. Συγκεκριμένα, τα μικρά UAVs είναι πιο εύκολα προσβάσιμα στο κοινό, λόγω της συνεχούς μείωσης του κόστους και της σμίκρυνσης της συσκευής. Μπορούν να χρησιμοποιηθούν στην παρακολούθηση καιρού, την ανίχνευση δασικών πυρκαγιών, τον έλεγχο κυκλοφορίας, την έρευνα και διάσωση έκτακτης ανάγκης, τη μεταφορά φορτίου κ.ο.κ. Πρόσφατα, τα ασύρματα συστήματα επικοινωνίας που βασίζονται σε UAVs προσελκύουν την προσοχή, χάρη στην οικονομικά-αποδοτική ασύρματη συνδεσιμότητα τους σε σενάρια χωρίς κάλυψη υποδομής. Μεταξύ των UAV-εφαρμογών σε συστήματα ασύρματων επικοινωνιών, το UAV χρησιμοποιείται είτε ως α) εναέριος σταθμός βάσης, είτε ως β) εναέριο κινητό τερματικό. Στο πρώτο σενάριο, μπορεί να παρέχει επικοινωνίες σε καταστάσεις έκτακτης ανάγκης και δημόσιας ασφάλειας, για να βελτιώσει την κάλυψη, τη χωρητικότητα, την αξιοπιστία και την ενεργειακή απόδοση των ασύρματων δικτύων. Στο δεύτερο σενάριο, το UAV μπορεί να χρησιμεύσει ως εναέριο κινητό τερματικό εντός των κυψελοειδών δικτύων, για την παροχή ροής βίντεο σε πραγματικό χρόνο.

Για την κατηγοριοποίηση των UAV, πρέπει να ληφθούν υπόψη ορισμένοι παράγοντες, όπως η προοπτική και οι στόχοι εφαρμογής. Οι διαφορετικοί τύποι UAV εξαρτώνται από τις λειτουργίες και τις δυνατότητές τους. Με βάση τα χαρακτηριστικά προοπτικής, τα UAV μπορούν να κατηγοριοποιηθούν σε δύο κατηγορίες: α) UAV σταθερής πτέρυγας και β) UAV με περιστροφικές πτέρυγες. Με βάση τις εφαρμογές που στοχεύουν τα UAV, μπορεί να γίνει μια εναλλακτική κατηγοριοποίηση, για την κάλυψη διαφόρων απαιτήσεων QoS, τη φύση του περιβάλλοντος λειτουργίας και τους γενικούς κανονισμούς. Για τη σωστή κατηγοριοποίηση των εφαρμογών και της χρήσης των UAV, μπορούν να ληφθούν υπόψη το ύψος και οι δυνατότητες πτήσης τους, όπως για παράδειγμα: πλατφόρμες υψηλού υψομέτρου (high altitude platforms - HAPs) και πλατφόρμες χαμηλού υψομέτρου (low altitude platforms - LAPs) [125]. Οι HAPs για παράδειγμα, λειτουργούν συνήθως στη στρατόσφαιρα που βρίσκονται 17 km πάνω από την επιφάνεια της Γης. Αντίθετα, οι LAPs, πετούν σε υψόμετρα που δεν υπερβαίνουν τα πολλά χιλιόμετρα, έχουν αρκετά σημαντικά πλεονεκτήματα: γρήγορη κίνηση και μεγαλύτερη ευελιξία σε σύγκριση με τα HAPs. Μια εφαρμογή των LAPs είναι η συλλογή δεδομένων από αισθητήρες εδάφους. Σε σύγκριση με τα HAPs, τα οποία είναι σχεδιασμένα να έχουν μεγαλύτερη αντοχή στην πτήση (έως και λίγους μήνες), τα LAPs έχουν χαμηλό κόστος και μπορούν εύκολα να επαναφορτιστούν ή να αντικατασταθούν, εάν χρειαστεί, κατά τη διάρκεια του χρόνου πτήσης. Τα οφέλη της εφαρμογής UAV στις ασύρματες επικοινωνίες μπορούν να συνοψιστούν ως εξής:

Οικονομική, γρήγορη, ευέλικτη και αποδοτική ανάπτυξη: Τα UAVs μπορούν να παρέχουν οικονομικά-αποδοτικές ασύρματες επικοινωνίες και μπορούν να αναπτυχθούν πιο ευέλικτα για απροσδόκητες ή περιορισμένης-διάρκειας αποστολές. Μία από τις κύριες εφαρμογές είναι ότι τα UAVs μπορούν να χρησιμεύσουν ως εναέριος σταθμός βάσης. Είναι γνωστό ότι η κατασκευή ενός συμβατικού επίγειου σταθμού βάσης, συμπεριλαμβανομένου του πυλώνα και της υπόλοιπης υποδομής, είναι πολύ δαπανηρό. Σε αυτήν την περίπτωση, ο UAV σταθμός βάσης μπορεί να παρέχει επικοινωνίες εν κινήσει, με χαμηλό κόστος, καθώς τα δεν θα απαιτούνται πολύ ακριβές υποδομές.

Σύνδεσμος οπτικής επαφής (Line-of-Site - LoS): Σε σύγκριση με τους συμβατικούς επίγειους σταθμούς βάσης, ένας εναέριος σταθμός βάσης, με τη βοήθεια των UAVs, είναι σε θέση να προσφέρει - εν κινήσει - επικοινωνίες και να δημιουργεί συνδέσεις επικοινωνίας οπτικής-επαφής, με χρήστες στο έδαφος. Ειδικά στα UAV χαμηλού υψομέτρου, οι καθιερωμένες ζεύξεις επικοινωνίας οπτικής-επαφής μπορούν να βελτιώσουν σημαντικά την απόδοση του δικτύου. Η επικοινωνία οπτικής-επαφής μπορεί να διευκολύνει την υψηλή συχνότητα (π.χ. mmWave). Σε συνδυασμό με άλλες τεχνολογίες του 5G, όπως για παράδειγμα τις mmWave επικοινωνίες, το MIMO, οι UAV-σταθμοί βάσης μπορούν να δημιουργήσουν συνδέσεις επικοινωνίας οπτικής-επαφής, για να επιτύχουν υψηλούς ρυθμούς δεδομένων.

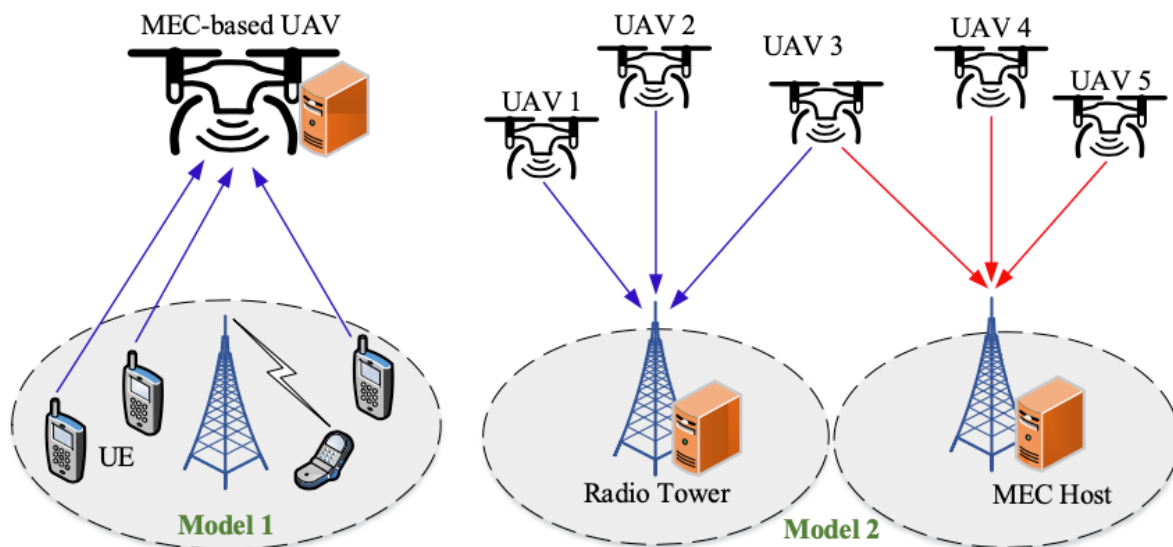
Κάλυψη και βελτίωση χωρητικότητας: Στις downlink επικοινωνίες, οι εναέριοι σταθμοί βάσης, με τη βοήθεια των UAV, μπορούν να επαναδιαμορφώσουν γρήγορα τις συνδέσεις UAV-προς-έδαφος που χρησιμοποιούν οι χρήστες, μέσω της ικανότητας τους να πραγματοποιούν ελιγμούς, για να παρέχουν μεγαλύτερη κάλυψη δικτύου, ανά πάσα στιγμή. Στις uplink επικοινωνίες, ο UAV-σταθμός βάσης μπορεί επίσης να συλλέγει πληροφορίες ανοχής καθυστέρησης (delay-tolerant information), από τις κατανεμημένες ασύρματες συσκευές εντός της κάλυψης. Δεδομένου ότι τα UAV έχουν καλά κανάλια, πχ Σύνδεσμος

οπτικής-επαφής, μπορούν να παρέχουν υψηλότερους ρυθμούς μετάδοσης δεδομένων. Επιπλέον, η ταχύτητα των UAV μπορεί να ρυθμιστεί χειροκίνητα, για να υποστηρίξει ασύρματη συνδεσιμότητα με τα τερματικά στο έδαφος. Τα πλεονεκτήματα της μεγάλης κάλυψης και της βελτίωσης χωρητικότητας καθιστούν την ασύρματη επικοινωνία, με τη βοήθεια των UAV, ένα πολλά υποσχόμενο αναπόσπαστο στοιχείο των ασύρματων συστημάτων 5G, και όχι μόνο.

Συμπληρωματικό δίκτυο για καταστάσεις έκτακτης ανάγκης (καταστροφές, έρευνες, διασώσεις): Σε σύγκριση με τα παραδοσιακά σενάρια δικτύου (4G, WiFi), το ασύρματο δίκτυο επικοινωνίας, με τη βοήθεια των UAVs, μπορεί να παρέχει ένα συμπληρωματικό δίκτυο στα υπάρχοντα δίκτυα, σε καταστάσεις έκτακτης ανάγκης. Για παράδειγμα, τα UAVs μπορούν να λειτουργήσουν ως hotspots για ένα εξαιρετικά πυκνό δίκτυο, όπου ο επίγειος σταθμός βάσης είναι υπερφορτωμένος ή όταν ο επίγειος σταθμός βάσης έχει καταστραφεί ολοσχερώς, από φυσικές καταστροφές.

8.3.2 Κίνητρο για συνδυασμό MEC και UAV

Λόγω των χαρακτηριστικών τους, όπως η κινητικότητα, η ικανότητα ελιγμών και η ευέλικτη ανάπτυξη, τα UAV μπορούν να ενσωματωθούν σε συστήματα ασύρματης επικοινωνίας για να παρέχουν απρόσκοπτη, αξιόπιστη, με χαμηλή καθυστέρηση και οικονομικά-αποδοτική επικοινωνία. Έχουν γίνει οι αντίστοιχες μελέτες συνδυάζοντας MEC και UAV, για περαιτέρω βελτίωση της υπολογιστικής ικανότητας. Υπάρχουν δύο τυπικά σενάρια όπως φαίνεται στο Σχήμα 32.



Σχήμα 32 - Αρχιτεκτονική δικτύων UAV με δυνατότητα MEC

Στη λειτουργία 1 του Σχήματος 32 τα UAV χρησιμεύουν ως εναέριοι σταθμοί βάσης. Σε αυτό το σενάριο, το UAV μπορεί να εξοπλιστεί με έναν MEC-διακομιστή. Έτσι, οι UAV / MEC-διακομιστές δίνουν την δυνατότητα στους κινητούς χρήστες στο έδαφος, να εκφορτώνουν μεγάλο υπολογιστικό φόρτο. Μετά τους υπολογισμούς, οι χρήστες κινητών μπορούν να κατεβάσουν τα αποτελέσματά τους από τους UAV / MEC-διακομιστές μέσω αξιόπιστων και αποδοτικών συνδέσεων ασύρματης επικοινωνίας. Στη λειτουργία 2 του Σχήματος 32, τα UAV χρησιμεύουν ως νέοι εναέριοι κινητοί χρήστες του συνδεδεμένου δικτύου κινητής

τηλεφωνίας, όπου ο σταθμός βάσης, που βασίζεται στον MEC-διακομιστή, είναι σε θέση να παρέχει την απρόσκοπτη και αξιόπιστη ασύρματη επικοινωνία στα UAV, για τη βελτίωση της απόδοσης υπολογισμού. Το MEC έχει ισχυρή υπολογιστική ικανότητα που μπορεί να είναι συμπληρωματική με τα ασύρματα συστήματα επικοινωνιών των UAV. Ο συνδυασμός των τεχνολογιών UAV και MEC θα οδηγήσει στα ακόλουθα οφέλη:

- **MEC-Διακομιστής που βασίζεται σε UAV:** Σε αυτό το σενάριο, τα UAV μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως φορητά συστήματα υπολογιστικού νέφους, στα οποία ο MEC-διακομιστής παρέχει την δυνατότητα εκφόρτωσης εργασιών στους κινητούς χρήστες στο έδαφος. Λόγω της ευελιξίας και της κινητικότητάς τους, τα UAV μπορούν να λάβουν και να επεξεργαστούν τις εργασίες αυτές, ειδικά στις περιπτώσεις που οι περιφερειακοί MEC-διακομιστές δεν είναι διαθέσιμοι (πχ σε περιπτώσεις έκτακτης ανάγκης, φυσικών καταστροφών). Η ικανότητα εκφόρτωσης και λήψης μπορεί να βελτιωθεί σε μεγάλο βαθμό, χάρη στις συνδέσεις οπτικού-συνδέσμου (LoS), μεταξύ των UAV και των χρηστών στο έδαφος. Επιπλέον, μπορεί να βελτιωθεί η κάλυψη του δικτύου.
- **Σύστημα UAV-Χρήστης με MEC:** Σε αντίθεση με το παραδοσιακό σενάριο, όπου ο χρήστης κινητής τηλεφωνίας συνδέεται με ένα σταθερό επίγειο σταθμό βάσης εδάφους (BS), μέσω του πολύπλοκου καναλιού εξασθένισης, το σύστημα UAV-Χρήστης με MEC επιτρέπει στους UAV-χρήστες, υψηλής κινητικότητας, να εκφορτώνουν τις υπολογιστικές τους εργασίες σε έναν αριθμό από BSs, αξιοποιώντας ταυτόχρονα πιο αξιόπιστες συνδέσεις οπτικής-σύνδεσης (LoS). Υπάρχουν δύο πλεονεκτήματα αυτού του σεναρίου. Από τη μία πλευρά, η τροχιά του UAV μπορεί να σχεδιαστεί από κοινού με την κατανομή πόρων (προγραμματισμός εργασιών εκφόρτωσης), καθώς έχει ελεγχόμενη κινητικότητα στον εναέριο χώρο. Από την άλλη πλευρά, τα UAV συνδέονται με μια ομάδα από BS, ταυτόχρονα, μέσω συνδέσεων οπτικών-συνδέσεων (LoS), για να εκμεταλλευτούν τους κατανεμημένους υπολογιστικούς πόρους τους.

Παρά τα πολλά υποσχόμενα οφέλη από τον συνδυασμό UAV και MEC, υπάρχουν αρκετές τεχνικές προκλήσεις στα συστήματα UAV με δυνατότητα MEC. Από τη μία πλευρά, οι κύριες προκλήσεις στο σενάριο UAV-BS περιλαμβάνουν τη βέλτιστη τρισδιάστατη ανάπτυξη των UAV, τη βελτιστοποίηση του χρόνου πτήσης και τη βελτιστοποίηση της τροχιάς. Από την άλλη πλευρά, πρέπει να αντιμετωπιστούν οι προκλήσεις που αντιμετωπίζει το MEC, συμπεριλαμβανομένης της κατανομής πόρων επικοινωνίας, της κατανομής υπολογιστικών πόρων και του προβλήματος ασφάλειας. Επομένως, ο συνδυασμός των UAV με συστήματα MEC μπορεί να δημιουργήσει τις ακόλουθες προκλήσεις:

- **Έλεγχος κινητικότητας και βελτιστοποίηση τροχιάς:** Δεδομένου ότι τα UAV έχουν περιορισμένο χρόνο πτήσης, ο βέλτιστος σχεδιασμός διαδρομής για το σύστημα MEC των UAV είναι ένα σημαντικό ερευνητικό ζήτημα. Για τον MEC-διακομιστή, που βασίζεται σε UAV, η τοποθεσία και η διαδρομή πτήσης πρέπει να βελτιστοποιηθούν, ώστε να παρέχουν καλύτερες ευκαιρίες εκφόρτωσης για τις κινητές συσκευές. Παρόμοια με το σενάριο UAV-Χρήστης, η τοποθεσία και η διαδρομή πτήσης πρέπει να βελτιστοποιηθούν για καλύτερη μεταφόρτωση εργασιών υπολογισμού σε μια ομάδα BS, για την παροχή απρόσκοπτης επικοινωνίας με άλλα UAV. Και στα δύο

σενάρια, ο έλεγχος κινητικότητας έχει σημαντικό αντίκτυπο στην ποιότητα του δικτύου. Ωστόσο, είναι δύσκολο να βελτιστοποιηθεί η τροχιά των UAV. Η διακύμανση του καναλιού, η κατανάλωση ενέργειας και η μέγιστη ταχύτητα πτήσης απαιτούνται σε αυτόν τον σχεδιασμό. Επιπλέον, σε συνδυασμό με άλλους παράγοντες βελτιστοποίησης, όπως η μέτρηση του QoS, η βελτιστοποίηση τροχιάς είναι δύσκολο να επιτευχθεί.

- **Επικοινωνία και Βελτιστοποίηση πόρων υπολογισμού:** Στο σύστημα επικοινωνίας MEC-διακομιστών, που βασίζονται στα UAV, τα UAV λειτουργούν ως εναέριοι BS, εξοπλισμένοι με διακομιστές MEC. Ο πόρος επικοινωνίας (δηλαδή, η ισχύς εκφόρτωσης) και ο πόρος υπολογισμού (δηλαδή, ο βαθμός εκφόρτωσης εργασιών) πρέπει να βελτιστοποιηθούν από κοινού, λαμβάνοντας υπόψη δυνητικά διαφορετικούς στόχους (πχ ελαχιστοποίηση κατανάλωσης ενέργειας). Στο σύστημα UAV-Χρήστης - MEC, τα UAV λειτουργούν ως χρήστες αναμετάδοσης, υψηλής κινητικότητας, για να εκφορτώνουν τις εργασίες που απαιτούν υπολογισμό στον MEC-διακομιστή, ο οποίος έχει αναπτυχθεί στους απομακρυσμένους GBS's (Ground Base Stations). Σε αυτή την περίπτωση, η τροχιά των UAV μπορεί να βελτιστοποιηθεί, από κοινού με την κατανομή πόρων επικοινωνίας και υπολογισμού, γεγονός δυσκολότερο, σε σύγκριση με τις περιπτώσεις σταθερών χρηστών και σταθμών βάσης.

8.3.3 Τεχνολογία Αιχμής / Υπάρχουσες Μελέτες

Υπάρχουν δύο σενάρια, στα τα οποία τα UAV μπορούν να συνδυαστούν με το MEC σε συστήματα επικοινωνίας:

Στο πρώτο σενάριο, τα UAV λειτουργούν ως εναέριοι σταθμοί βάσης, εξοπλισμένοι με MEC-διακομιστές, οι οποίοι προσφέρουν ευκαιρίες εκφόρτωσης στους χρήστες στο έδαφος. Αυτό το σενάριο είναι αρκετά συνηθισμένο στην πράξη. Για παράδειγμα, το κινούμενο UAV, με δυνατότητα MEC, παίζει σημαντικό ρόλο στην αντιμετώπιση καταστροφών, στο οποίο ο GBS δεν μπορεί να παρέχει καμία υπηρεσία λόγω των ζημιών που προκαλούνται από μια ξαφνική καταστροφή, πχ σεισμός. Οι φορητές συσκευές, οι οποίες έχουν περιορισμένες δυνατότητες επεξεργασίας, μπορούν να επωφεληθούν από τον UAV MEC-διακομιστή. Στο σενάριο του UAV MEC-διακομιστή, το UAV μπορεί να λειτουργήσει ως ένας κινούμενος MEC-διακομιστής στον ουρανό, για να βοηθήσει στην εκτέλεση των εργασιών υπολογισμού που εκφορτώνονται από πολλούς χρήστες εδάφους. Αυτή η εργασία είχε ως στόχο να ελαχιστοποιήσει τη συνολική κατανάλωση ενέργειας, λαμβάνοντας υπόψη την απαίτηση QoS. Μέσω μεθόδων διαδοχικής κυρτής προσέγγισης (successive convex approximation - SCA), μελετήθηκε η κατανομή των bit για να ελαχιστοποιηθεί η ενέργεια κίνησης στο uplink της OMA και στο downlink της NOMA, στο σύστημα MEC - UAV. Στο [87] μελετήθηκε ένα πρόβλημα ελαχιστοποίησης της κατανάλωσης ενέργειας, σε σύστημα MEC - UAV. Για την αντιμετώπιση της περιορισμένης υπολογιστικής χωρητικότητας και της πεπερασμένης διάρκειας ζωής της μπαταρίας της συσκευής, προτάθηκε ο UAV MEC-διακομιστής, για να παρέχει ευκαιρίες εκφόρτωσης στην συσκευή. Προτάθηκε ένας εναλλακτικός αλγόριθμος για την ελαχιστοποίηση της κατανάλωσης ενέργειας του UAV, βελτιστοποιώντας τα εκφορτωμένα bits υπολογισμού, τη συχνότητα της CPU των χρηστών και την τροχιά του UAV,

με τον περιορισμό μέγιστης ταχύτητας. Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης σε αυτήν την εργασία, έδειξαν ότι το προτεινόμενο σχήμα υπερτερεί των σχημάτων αναφοράς. Στο [88], βελτιστοποιήθηκε η κατανομή των υπολογιστικών πόρων και ο χρόνος πτήσης του UAV, ώστε να ελαχιστοποιηθεί η συνολική κατανάλωση ενέργειας του UAV. Επιπλέον στο [89], για την ελαχιστοποίηση της κατανάλωσης ενέργειας, ελήφθη υπόψη η υπολογιστική ταχύτητα της CPU για την βελτιστοποίηση της τροχιάς του UAV και την ανάθεση εργασιών. Η ελαχιστοποίηση της καθυστέρησης είναι επίσης ένα σημαντικό ζήτημα για την επικοινωνία UAV-MEC. Στο [90], μελετήθηκε η ελαχιστοποίηση της καθυστέρησης μεταξύ όλων των χρηστών, βελτιστοποιώντας από κοινού την τροχιά των UAV, την αναλογία των εργασιών εκφόρτωσης και τον χρονο-προγραμματισμό του χρήστη.

Στο δεύτερο σενάριο, ένα cellular-συνδεδεμένο UAV εξυπηρετείται από πολλαπλούς GBS's, οι οποίοι είναι εξοπλισμένοι με MEC-διακομιστές. Σε αυτό το σενάριο, το UAV πρέπει να ολοκληρώσει ορισμένες εργασίες υπολογισμού, κατά τη διάρκεια του χρόνου πτήσης του, σε ορισμένες δεδομένες τοποθεσίες. Έτσι οι εργασίες μπορούν να εκφορτωθούν σε κάποιο επιλεγμένο GBS. Στόχος στο [91] είναι η ελαχιστοποίηση του χρόνου της αποστολής (mission completion time) του UAV, βελτιστοποιώντας την τροχιά και τον χρονο-προγραμματισμό των εργασιών υπολογισμού, λαμβάνοντας υπόψη τον περιορισμό ταχύτητας του UAV και την υπολογιστική ικανότητα των GBS's. Αποδεικνύεται ότι το διατυπωμένο πρόβλημα είναι μη-κυρτό (non-convex), επομένως είναι δύσκολο να βρεθεί η συνολική βέλτιστη λύση σε πολυωνυμικό χρόνο. Ως εκ τούτου, η Εναλλασσόμενη Βελτιστοποίηση (Alternating Optimization) και Μεθόδων Διαδοχικής Κυρτής Προσέγγισης (successive convex approximation - SCA) αξιοποιήθηκαν, για την επίτευξη μιας - υψηλής ποιότητας - υποβέλτιστης λύσης. Στο [93], η συνολική απόσταση ταξιδιού του UAV ελαχιστοποιήθηκε, και προτάθηκαν δύο διαφορετικές λύσεις, 1) ο Σχεδιασμός Διαδρομής του MEC-UAV (MEC-ware UAV Path Planning - MAUP), βάσει του Ακέραιου Γραμμικού Προγραμματισμού και 2) ο Επιταχυνόμενος Σχεδιασμός Διαδρομής (Accelerated MAUP). Στο [92] διερευνήθηκε η ασφάλεια του φυσικού επιπέδου, όπου δόθηκαν οι βέλτιστες λύσεις, βασισμένες α) στην συνθήκη/κατάσταση τριών επιλογών εκφόρτωσης και β) του συμβάντος υπολογιστικής υπερφόρτωσης (computational overload event), από την οπτική του φυσικού επιπέδου.

8.3.4 Συμπεράσματα και Μελλοντικές Έρευνες

Το MEC-UAV μπορεί να θεωρηθεί ως μια αναπόφευκτη τάση στα μελλοντικά συστήματα ασύρματης επικοινωνίας, χάρη στα μεγάλα οφέλη από τον συνδυασμό τους, αλλά και στους περιορισμένους πόρους που απαιτούν. Ωστόσο, υπάρχουν ακόμη αρκετές προκλήσεις που πρέπει να αντιμετωπιστούν. Στη συνέχεια, συζητάμε βασικά ανοιχτά προβλήματα στα συστήματα MEC-UAV:

Ανάλυση απόδοσης συστημάτων UAV-MEC: Απαιτείται βασική ανάλυση απόδοσης για το σύστημα UAV-MEC. Συγκεκριμένα, η δυνατότητα κάλυψης, η καθυστέρηση και η αξιοπιστία, μπορούν να διερευνηθούν, ώστε να αξιολογηθεί ο αντίκτυπος κάθε παραμέτρου σχεδιασμού, στη συνολική απόδοση του συστήματος. Λόγω της τρισδιάστατης ανάπτυξης, της μικρής διάρκειας πτήσης των UAV, και των απαιτήσεων καθυστέρησης του MEC, η ανάλυση απόδοσης για το σύστημα UAV-MEC αποτελεί πρόκληση.

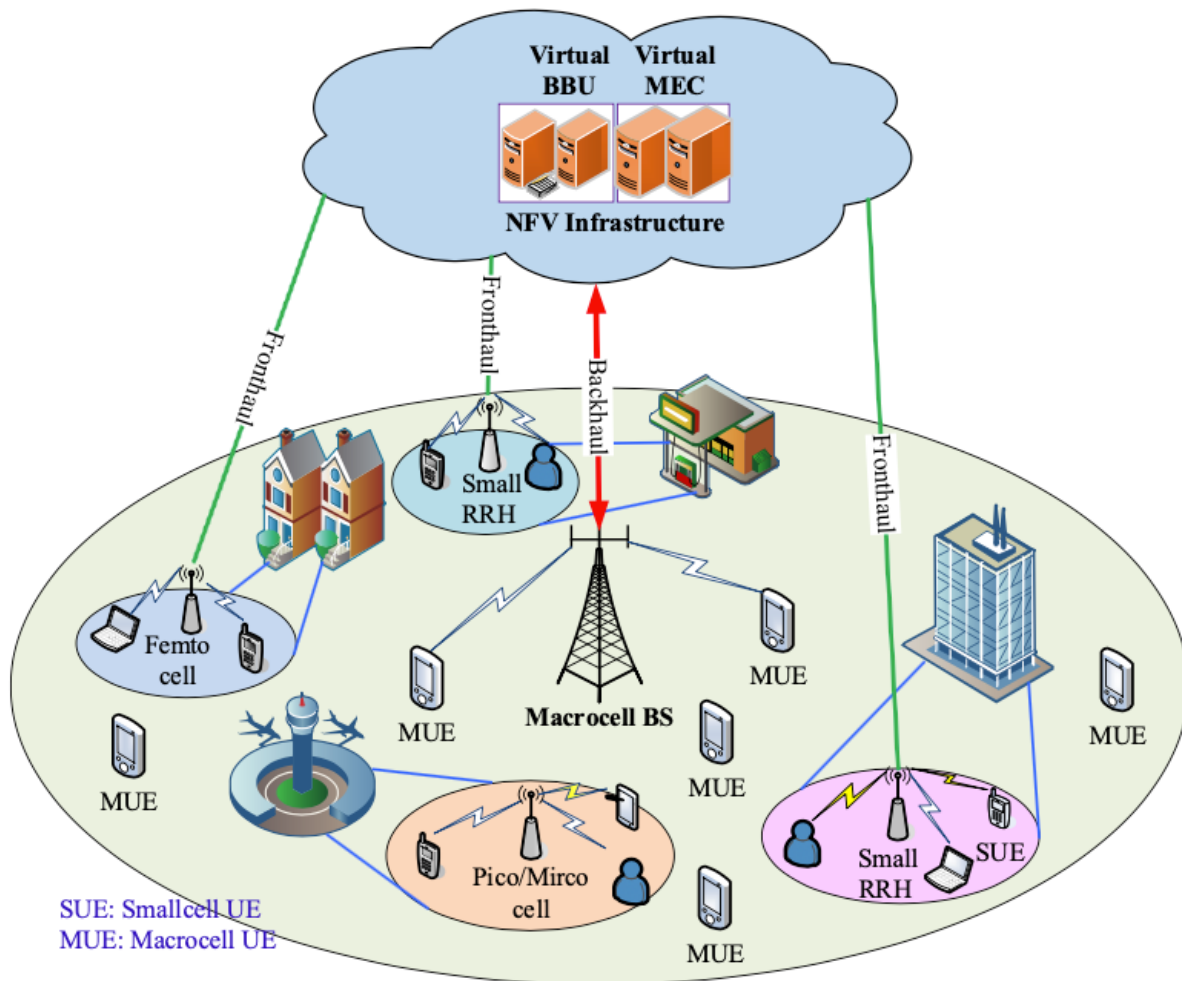
- **Κατανομή πόρων με βάση την ενέργεια:** Ο χρόνος πτήσης και οι πόροι των UAV είναι περιορισμένοι, επειδή τα UAV έχουν συνήθως μικρό μέγεθος, βάρος και περιορισμένη ισχύ. Επομένως, η τροχιά και η κατανομή πόρων (δηλαδή, πόρος επικοινωνίας και υπολογιστικός πόρος) πρέπει να σχεδιαστούν βέλτιστα, ώστε να μειωθεί η κατανάλωση ενέργειας. Ωστόσο, οι περισσότερες μελέτες έχουν εξετάσει τον σχεδιασμό της τροχιάς και τη βελτιστοποίηση της κατανομής πόρων ξεχωριστά και μεμονωμένα. Με το τρόπο αυτό, δεν θα επιτευχθεί η υψηλότερη απόδοση δικτύου. Ως εκ τούτου, η από κοινού βελτιστοποίηση των παραγόντων αυτών, για το σύστημα UAV-MEC, παραμένει ένα ανοιχτό πρόβλημα. Γίνεται ακόμη δυσκολότερο όταν επιπλέον παράγοντες βελτιστοποίησης πρέπει να ληφθούν υπόψη σε ένα τέτοιο σχεδιασμό (όπως πχ α) η απαίτηση QoS, β) η κατανομής ισχύος εκφόρτωσης, γ) η ανάθεση εργασιών μαζί με τη διακύμανση του καναλιού, δ) ο περιορισμός καθυστέρησης και μέγιστης ταχύτητας πτήσης).
- **Ομαδοποίηση χρηστών και συνεργασία των UAV:** Στο σύστημα επικοινωνίας UAV MEC-διακομιστή, κάθε UAV λειτουργεί ως ένας εναέριος σταθμός βάσης, με δυνατότητα MEC. Οι χρήστες στο εδάφους πρέπει να εκφορτώνουν τις εργασίες τους σε ένα UAV ή σε πολλαπλά UAV ταυτόχρονα. Επομένως, το πρόβλημα της ομαδοποίησης των χρηστών πρέπει να λυθεί, χρησιμοποιώντας κατάλληλες προσεγγίσεις (πχ θεωρία αντιστοίχισης (matching theory), θεωρία παιγνίων (game theory) και μέθοδοι κυρτής βελτιστοποίησης (convex optimization methods)). Αντίθετα, στα συστήματα UAV-MEC, τα UAV πρέπει να εκφορτώνουν εργασίες στους GBS's, για απομακρυσμένους υπολογισμούς. Η κατανομή του υπο-καναλιού και η συνεργασία των UAV, μπορούν να διερευνηθούν.

8.4 MEC με Ετερογενές C-RAN

8.4.1 Βασικές αρχές των ετερογενών C-RANs Cloud Radio Access (H-RANs)

Η πυκνότητα του δικτύου έχει γίνει ο ακρογωνιαίος λίθος των δικτύων 5G, για να αντιμετωπιστεί η «άνευ προηγούμενου» αύξηση του όγκου της κίνησης στο δίκτυο και ο τεράστιος αριθμός συνδεδεμένων συσκευών. Για το σκοπό αυτό, προστίθενται περισσότεροι σταθμοί βάσης και σημεία πρόσβασης, και αξιοποιείται η επαναχρησιμοποίηση του χωρικού φάσματος. Ως ετερογενές δίκτυο (HetNet) ορίζεται η ενοποίηση μακροκυψελών υψηλότερης-βαθμίδας (higher-tier macrocells) και μικρών κυψελών χαμηλότερης-βαθμίδας (lower-tier small cells), για παράδειγμα, picocells, femtocells**** και κόμβων αναμετάδοσης (relay nodes). Τα HetNet's έχουν αναπτυχθεί λόγω των ακόλουθων πλεονεκτημάτων τους: 1) καλύτερη κάλυψη και χωρητικότητα, 2) βελτιωμένη αξιοπιστία μακροκυψελών και 3) μειωμένο κόστος και κύκλος εργασιών συνδρομητών. Ωστόσο, η ανάπτυξη πυκνών HetNet's παρουσιάζει πληθώρα προκλήσεων: 1) σοβαρές παρεμβολές, 2) μη ικανοποιητική ενεργειακή απόδοση και 3) μη-ευελιξία και μη-κλιμάκωση. Για να ξεπεραστούν αυτές οι προκλήσεις, μια νέα και πολλά υποσχόμενη δικτυακή υποδομή, το C-RAN (Cloud Radio Access Network), προτείνεται να παρέχει υψηλό ρυθμό μετάδοσης δεδομένων και υψηλή ενεργειακή απόδοση. Στο [94], μελετήθηκαν οι προκλήσεις και οι απαιτήσεις του C-RAN, ώστε να καταστεί δυνατή η πυκνοποίηση (densification) του δικτύου,

και η κεντροποιημένη λειτουργία του δικτύου ραδιοπρόσβασης, πάνω από HetNet Backhaul.



Σχήμα 33 - Αρχιτεκτονική H-CRAN MEC

Στα C-RAN's, που φαίνονται στο Σχήμα 33, ένας μεγάλος αριθμός από RRUs (Remote Radio Unit) - χαμηλής κατανάλωσης και χαμηλού κόστους - οι οποίες συνδέονται στην BBU (Baseband Unit) μέσω των fronthaul συνδέσεων, αναπτύσσονται τυχαία για να ενισχύσουν την ασύρματη χωρητικότητα στα σημεία πρόσβασης. Οι RRUs λειτουργούν ως αναμεταδότες, συμπιέζοντας και προωθώντας τα λαμβανόμενα σήματα από τους χρήστες προς την BBU, μέσω ενσύρματων/ασύρματων fronthaul συνδέσεων. Ως αποτέλεσμα, ο συνδυασμός των HetNet's και των C-RANs, γνωστό και ως ετερογενές C-RAN (H-CRAN), προτείνεται ως πιθανή λύση για την παροχή υψηλής φασματικής και ενεργειακής απόδοσης. Παρόλο που τα C-RANs και το MEC μπορούν να συνδυαστούν τέλεια για να παρέχουν χαμηλό λανθάνον χρόνο στις IoT εφαρμογές, η συνύπαρξη του MEC και των C-RANs τα Hetnet's οδηγεί σε ορισμένες προκλήσεις (π.χ. διαχείριση δικτύου).

***** Το Femtocell είναι ένας μικρός κυψελοειδής σταθμός βάσης χαμηλής κατανάλωσης, που έχει σχεδιαστεί συνήθως για χρήση σε οικιακή ή μικρή επιχείρηση.

8.4.2 Κινητρα Πλεονεκτήματα και Προκλήσεις

Τα H-CRAN μπορούν να παρέχουν μεγάλη κάλυψη και υψηλή ενεργειακή απόδοση, ενώ το MEC μπορεί να παρέχει σημαντική υπολογιστική ικανότητα, για εφαρμογές χαμηλής καθυστέρησης. Ο συνδυασμός αυτών των δύο βασικών τεχνολογιών μπορεί να βοηθήσει στην υποστήριξη περισσότερων εφαρμογών στο 5G. Το H-CRAN μπορεί επίσης να συνδυαστεί με το MEC, για να διευκολύνει την υλοποίηση του MEC-συστήματος, λαμβάνοντας υπόψη τους υπολογιστικούς πόρους και τους πόρους αποθήκευσης στη BBU, και τη διανομή των RRUs. Ο συνδυασμός MEC & H-CRAN μπορεί να αποφέρει τα ακόλουθα οφέλη:

- Η επένδυση της ανάπτυξης MEC, μπορεί να μειωθεί σημαντικά με τη συνεγκατάσταση MEC και H-CRAN. Ένας τρόπος για να μετριαστεί το κόστος επένδυσης, είναι η ανάπτυξη του MEC πάνω στην ανάπτυξη C-RAN. Σε αυτήν την περίπτωση, θα μειωθεί το κόστος παροχής πρόσθετου υπολογισμού εργασιών, στις υπάρχουσες BBU και RRUs.
- Ο συνδυασμός MEC και H-CRAN μπορεί α) να προσφέρει λειτουργική ευελιξία και β) δίνει την δυνατότητα επαναδιαμόρφωσης του δικτύου, η οποία μπορεί να επιτευχθεί με την εικονικοποίηση του H-CRAN. Στο H-CRAN, μία radio υλοποίηση μπορεί να αναπτυχθεί ταχύτερα, μειώνοντας τον χρόνο που απαιτείται στις συμβατικές αναπτύξεις. Δεδομένου ότι το C-RAN εικονικοποιεί πολλές από τις λειτουργίες του RAN, έτσι και το MEC μπορεί να επωφεληθεί από την μεγάλη κάλυψη, την εξοικονόμηση ενέργειας, την απλότητα του δικτύου και την υψηλή ασφάλεια, από το H-CRAN.
- Το MEC στο H-CRAN μπορεί να αναπτυχθεί με ευελιξία, σε διαφορετικές τοποθεσίες. Δεδομένου ότι η ανάπτυξη του H-CRAN απαιτεί μια σημαντική ποσότητα επεξεργαστικής ισχύος, μπορεί να γίνει αυτόματα MEC-διακομιστής για τον υπολογισμό των εργασιών από τους χρήστες κινητών τηλεφώνων.

Εκτός από τα παραπάνω πλεονεκτήματα, υπάρχουν αρκετές προκλήσεις στα συστήματα H-CRAN MEC, που μπορούν να δημιουργηθούν από την συνεγκατάστασή τους, όπως πχ ο σχεδιασμός σεναρίων ανάπτυξης. Στη συνέχεια, συζητούνται οι κύριες προκλήσεις των συστημάτων H-CRAN MEC.

- Οι περισσότερες μέθοδοι διαχείρισης πόρων για την MEC, λαμβάνουν υπόψη τους υπολογιστικούς πόρους σε MEC-διακομιστές και έτσι μπορούν να εφαρμοστούν απευθείας στο H-CRAN/MEC. Ωστόσο, εξακολουθεί να αποτελεί πρόκληση η - από κοινού - βελτιστοποίηση των υπολογιστικών πόρων και των πόρων χρονο-προγραμματισμού του δικτύου στο H-CRAN. Ειδικά στα HetNet's, πρέπει να ληφθούν υπόψη οι παρεμβολές μεταξύ των επιπέδων και των κυψελών (cross-layer & inter-cell interference). Επιπλέον, με βάση το NFV του C-RAN, ίσως χρειαστεί να επανασχεδιαστεί το σχήμα δυναμικής διαχείρισης πόρων, ώστε να χρονο-προγραμματίσει, ελαστικά, τους εικονικούς υπολογιστικούς πόρους, ανάλογα με το μέγεθος του δικτύου και τον ρυθμό άφιξης εργασιών.
- Ένα ακόμα ζήτημα που πρέπει να αντιμετωπιστεί στα συστήματα H-CRAN/MEC είναι η ασφάλεια. Η MEC-υπηρεσία υποστηρίζει διάφορα είδη εφαρμογών, όπως

εφαρμογές τρίτων, οι οποίες δεν ελέγχονται απευθείας από τον πάροχο κινητής τηλεφωνίας. Ενδέχεται να δημιουργηθούν κίνδυνοι, καθώς οι εφαρμογές αυτές μπορεί να εξαντλήσουν τους πόρους ή να επιτρέψουν σε χάκερς να επηρεάσουν τις λειτουργίες του δικτύου. Επομένως, θα πρέπει να λαμβάνεται υπόψη, κατά την εγκατάσταση ή την αναβάθμιση, η υπηρεσία διεξαγωγής ελέγχων διασφάλισης ακεραιότητας στις εφαρμογές.

- Το πρόβλημα κατανομής πόρων στα δίκτυα H-CRAN/MEC είναι πολύ δυσκολότερο, σε σχέση με τα παραδοσιακά συστήματα MEC, λόγω της ύπαρξης παρεμβολών μεταξύ των φορέων (inter-carrier interference). Για να μετριαστεί αυτή η επίδραση, ο πόρος του φάσματος σε κάθε κελί μπορεί να χωριστεί σε ορθογώνια υπο-κανάλια, τα οποία θα πρέπει να εκχωρούνται αποτελεσματικά στους χρήστες (δηλαδή, ποιο υπο-κανάλι πρέπει να χρησιμοποιήσει ένας χρήστης, για να μεταφορτώσει την υπολογιστική του εργασία στον MEC-διακομιστή). Στα δίκτυα H-CRAN/MEC, πρέπει να ληφθούν υπόψη διάφοροι τύποι πόρων για τη μείωση του ICI (inter-carrier interference), συμπεριλαμβανομένων, όχι μόνο των συμβατικών ασύρματων πόρων (π.χ. υπο-κανάλι, ισχύς μετάδοσης, χρόνος και χώρος), αλλά και τα αντίθετα κόστη (contra costs) (πχ φάσμα backhaul, συλλογή ενέργειας, υπολογιστικές δυνατότητες και αποθήκευση κρυφής μνήμης). Κύριες προκλήσεις των πυκνών συστημάτων H-CRAN/MEC αποτελούν α) η συνεργασία χρηστών, β) η εκφόρτωση υπολογισμών, γ) η διαχείριση παρεμβολών και δ) η κατανομή πόρων. Τα προβλήματα αυτά είναι στενά συνδεδεμένα, και πρέπει να επιλυθούν από κοινού.
- Από τη μία πλευρά, είναι προβλέψιμο ότι ένας τεράστιος αριθμός MEC-διακομιστών θα αναπτυχθεί ευρέως στο εγγύς μέλλον, οι οποίοι μπορεί να διαφέρουν σαφώς σε μέγεθος (υπολογιστικές μονάδες) και χαρακτηριστικά (υπολογιστικές ταχύτητες). Από την άλλη πλευρά, η συνεργασία μεταξύ χρηστών και MEC-διακομιστών, εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από τις τοποθεσίες ανάπτυξης των MEC-διακομιστών (BBUs). Η κινητικότητα των χρηστών μπορεί να αγνοηθεί κάθε φορά που το τερματικό του χρήστη μετακινείται εντός της γεωγραφικής περιοχής που καλύπτεται από τα κεντρικές BBUs. Ο τύπος της κεντροποίησης των BBUs, καθορίζει την αποδοτικότητα του συστήματος και την εμπειρία χρήστη.

8.4.3 Τεχνολογία Αιχμής / Υπάρχουσες Μελέτες

Η πλειονότητα των υφιστάμενων μελετών έχει επικεντρωθεί στο MEC Ετερογενών Δικτύων και στο MEC των C-RANs. Για το MEC-HetNet, υπάρχουν αρκετές εργασίες για τη διαχείριση παρεμβολών σε πυκνά συστήματα. Στο [95], ερευνάται ένα κοινό πρόβλημα των πόρων των ραδιοσυχνοτήτων και των υπολογιστικών πόρων, για να ελαχιστοποιηθεί τη συνολική κατανάλωση ενέργειας όλων των κινητών χρηστών, υπό τους περιορισμούς της ισχύς εκπομπής, της καθυστέρησης και της μέγιστης υπολογιστικής ικανότητας. Ομοίως, στο [96] εξετάζονται διάφορα ζητήματα σε συστήματα MEC-HetNet, πολλαπλών-κυψελών (multi-cells), ενός μεμονωμένου διακομιστή, όπως: 1) η διαχείριση παρεμβολών στο Uplink και στο Downlink, 2) η κατανομή της χωρητικότητας, στο backhaul, για την εκφόρτωση εργασιών και 3) η κατανομή υπολογιστικών δυνατοτήτων στο νέφος, για την εκφόρτωση χρηστών (offloading users). Επιπλέον, έχει διερευνηθεί η - από κοινού - βελτιστοποίηση των

αποφάσεων εκφόρτωσης και της κατανομής πόρων, για τη βελτίωση της απόδοσης του δικτύου, στα [97], [98]. Μια νέα τεχνική πρόκληση είναι η διαχείριση της κινητικότητας, με σκοπό να κατανοηθούν τα πιθανά οφέλη των πυκνών δικτύων MEC-HetNet. Σύμφωνα με τα [99], [101], υπάρχουν αρκετά βασικά ζητήματα για τη διαχείριση της κινητικότητας στα συστήματα αυτά. Πρώτον, οι χρήστες ενδέχεται να αντιμετωπίζουν συχνά το φαινόμενο της μεταπομπής (handover) όταν μετακινούνται σε διαφορετικούς MEC-smallcells-διακομιστές, μικρού-μεγέθους και μικρής-κάλυψης, αυξάνοντας έτσι τα overhead και διακόπτοντας τις MEC-υπηρεσίες. Δεύτερον, η συνεχής εκτέλεση μετρήσεων και επεξεργασίας του handover, η οποία είναι απαραίτητη για την εύρεση των νέων MEC-διακομιστών σε πυκνά συστήματα MEC-HetNet, καταναλώνει ενέργεια και πόρους ραδιοσυχνότητας, ειδικά για χρήστες με περιορισμένη μπαταρία. Τρίτον, στα παραδοσιακά πυκνά HetNet, η απόφαση του handover βασίζεται κυρίως στην ποιότητα των ραδιο-σημάτων μεταξύ των χρηστών και των πιθανών eNodeBs. Επί πρόσθετα, πρόκληση αποτελεί η έλλειψη μελλοντικών πληροφοριών, όπως πχ οι συνθήκες του καναλιού, οι διαθέσιμοι υπολογιστικοί πόροι, οι αφίξεις εργασιών, οι αποφάσεις εκφόρτωσης και μεταπομπής, οι οποίες θα πρέπει να είναι γνωστές, χωρίς προηγούμενη ενημέρωση, και να βελτιστοποιούνται με μακροπρόθεσμο τρόπο. Για παράδειγμα, στο [99] προτάθηκαν δύο τοπικά σχήματα διαχείρισης κινητικότητας για πυκνά HetNet's, ένα πλαίσιο διαχείρισης κινητικότητας με δυνατότητα cache σε mmWave-μικροκυματικά HetNet's μελετήθηκε στο [101], στο [102] παρουσιάστηκαν διάφορες ενεργειακά-αποδοτικές τεχνικές ανακάλυψης κυψελών και στο [103] παρουσιάστηκε μια ολοκληρωμένη ανασκόπηση της διαχείρισης κινητικότητας. Το σύνολο των μελετών [99]–[106] επικεντρώθηκε αποκλειστικά στη διαχείριση κινητικότητας στα HetNet's. Η προσομοίωση στο [100] έδειξε ότι ο προτεινόμενος αλγόριθμος για ενεργειακά-αποδοτική διαχείριση της κινητικότητας, μπορεί να επιτύχει σχεδόν βέλτιστη απόδοση, χωρίς τις πλήρεις μελλοντικές πληροφορίες, ενώ εγγυάται τον μακροπρόθεσμο περιορισμό του ενεργειακής κατανάλωσης.

Υπάρχουν αρκετές ερευνητικές μελέτες σχετικά με το συνδυασμό συστημάτων C-RAN και του MEC. Στο [107], δίνεται βάση στην ελαχιστοποίηση της ενέργειας που καταναλώνουν τα C-RAN / MEC συστήματα, με χρήση των προτεινόμενων δύο αλγορίθμων, α) τον αλγόριθμο αποκεντρωμένης τοπικής απόφασης (decentralized local decision algorithm) και β) τον αλγόριθμο κεντρικής απόφασης και κατανομής πόρων (centralized decision and resource allocation algorithm). Στο [108], το C-RAN συνδυάστηκε με το MEC (προτάθηκε ένα κοινό σύστημα κατανομής υπολογιστικών πόρων και ισχύος μετάδοσης, για να ελαχιστοποιηθεί η κατανάλωση ενέργειας, υπό τους περιορισμούς του λανθάνοντος χρόνου εργασιών και της χωρητικότητας του fronthaul), ώστε να παρέχει υψηλή ενεργειακή απόδοση. Στο [109] προτάθηκε η συνεργασία του C-RAN με το MEC, για την περαιτέρω ενίσχυση των δυνατοτήτων των κινητών συσκευών. Συγκεκριμένα, προτάθηκε ένα - από κοινού - πλαίσιο πόρων δικτύου για την αντιστάθμιση ισχύος-απόδοσης του παρόχου υπηρεσιών. Στην εργασία αυτή αξιοποιήθηκε η τεχνική Lyapunov, για τη δυναμική λήψη διαδικτυακών αποφάσεων, σε διαδοχικές χρονοθυρίδες, για αιτήματα εργασιών. Ο προτεινόμενος αλγόριθμος μπορεί να επιτύχει σχεδόν βέλτιστη απόδοση.

8.4.4 Συμπεράσματα και Μελλοντικές Έρευνες

Λόγω των μεγάλων πλεονεκτημάτων που προσφέρουν το MEC και τα H-CRAN's, ο συνδυασμός τους θα είναι αναπόφευκτος στο μέλλον. Παρότι έχουν μελετηθεί εντατικά διάφορα προβλήματα και ζητήματα, εξακολουθούν να υπάρχουν αρκετές προκλήσεις. Στη συνέχεια, παρουσιάζονται ορισμένες από τις προκλήσεις αυτές και περιγράφονται κατευθύνσεις για νέες έρευνες [110].

- **Υπολογιστική πολυπλοκότητα και overhead:** Είναι προφανές ότι η κεντροποιημένη βελτιστοποίηση είναι συνήθως εύκολη στην εφαρμογή, σε σύγκριση με κατανεμημένες προσεγγίσεις, και μπορεί να παρέχει τη σχεδόν-βέλτιστη λύση, με την επιθυμητή απόδοση. Ωστόσο, τέτοιες κεντροποιημένες προσεγγίσεις στα συστήματα H-CRAN / MEC, δεν θα είναι εύκολα επεκτάσιμες, όπως αυτό απαιτείται λόγω της εκρηκτικής αύξησης του αριθμού των κινητών χρηστών, των eNodeBs και των MEC-διακομιστών. Για το λόγο αυτό, έχει δημιουργηθεί η ανάγκη για την ανάπτυξη μικρών, ευέλικτων και αποτελεσματικών αλγορίθμων. Στα σχήματα κατανεμημένης προσέγγισης υπάρχουν πολλά πλεονεκτήματα, καθώς δεν απαιτείται κάποια κεντρική οντότητα, οι αλγόριθμοι τους βασίζονται μόνο σε τοπικές πληροφορίες και καλούνται να διαχειριστούν μικρή ποσότητα overhead. Ωστόσο, είναι δύσκολο να εγγραφεί κανείς τη βέλτιστη λύση, λόγω της έλλειψης πλήρους πληροφόρησης. Ως εκ τούτου, πρέπει να γίνει αντιστάθμιση μεταξύ της υπολογιστικής πολυπλοκότητας και της βέλτιστης λύσης. Ένας αποτελεσματικός τρόπος είναι η κατάτμηση του δικτύου σε πολλές περιοχές, και η ανάθεση της ευθύνης για την εκτέλεση του αλγορίθμου στους κατανεμημένους MEC-διακομιστές. Έτσι, το υποκείμενο πρόβλημα αποσυντίθεται σε υπο-προβλήματα, τα οποία εκτελούνται κατανεμημένα σε διαφορετικούς MEC-διακομιστές. Αυτό θα μειώνει σημαντικά τον όγκο των πληροφοριών που πρέπει να ανταλλάσσονται μεταξύ της κεντρικής οντότητας και όλων των χρηστών. Ως εκ τούτου, μπορεί επίσης να μειωθεί και επιβάρυνση του δικτύου.
- **Διαχείριση κινητικότητας:** Οι περισσότερες υπάρχουσες μελέτες σε συστήματα MEC (σε HetNet και σε C-RAN) αγνοούν την επίδραση της κινητικότητας των χρηστών, λόγω της δυσκολίας και της διαδραστικότητάς της. Στα προτεινόμενα συστήματα H-CRAN / MEC, οι χρήστες μπορούν να αλλάξουν τις θέσεις τους, ενώ χρησιμοποιούν MEC-υπηρεσίες, για παράδειγμα μπορούν να απομακρυνθούν από την περιοχή κάλυψης των MEC-διακομιστών που αρχικά τους εξυπηρέτησαν, και να βρίσκονται στην κάλυψη εξυπηρέτησης άλλων. Συνεπώς ο χρονο-προγραμματιστής (scheduler) (στην προκειμένη περίπτωση τον ρόλο αυτό παίζει το σύνολο (pool) των BBU's που εμπλέκονται) πρέπει έχει καλή γνώση της κινητικότητας των χρηστών, προκειμένου να διατηρήσει τη συνέχεια της υπηρεσίας. Έτσι, η δυναμική συσχέτιση χρηστών και η κατανομή πόρων μπορούν να μελετηθούν μελλοντικά. Για παράδειγμα, ορισμένοι αλγόριθμοι Μηχανικής Εκμάθησης, μπορούν να αξιοποιηθούν για την αντιμετώπιση του ζητήματος κινητικότητας στα συστήματα H-CRAN / MEC. Μια άλλη πιθανή λύση, είναι η δυνατότητα στους MEC-διακομιστές να ενημερώνουν συνεχώς το περιβάλλον του χρήστη και στη συνέχεια να σχεδιάζουν αλγόριθμους με επίγνωση του περιβάλλοντος.

- **Διαχείριση παρεμβολών και κοινή κατανομή πόρων:** Η επαναχρησιμοποίηση του φάσματος μεταξύ των κυψελών, προκαλεί σοβαρή αμοιβαία παρεμβολή, η οποία μπορεί να μειώσει σημαντικά το αναμενόμενο φάσμα του συστήματος και την ενεργειακή του απόδοση. Επομένως, οι προκλήσεις για τη διαχείριση παρεμβολών στα συστήματα H-CRAN / MEC παραμένουν προς επίλυση, για πολλούς λόγους. Η ετερογένεια των χρηστών και του BBU-roof με τον MEC-διακομιστή, καθιστά το πρόβλημα παρεμβολών δυσκολότερο, λόγω της διαφορετικού μπάτζετ της ισχύος μετάδοσης των χρηστών στο Uplink. Επιπλέον, ο πόρος χρονο-προγραμματισμού του δικτύου, ο πόρος επικοινωνίας και ο υπολογιστικός πόρος στο BBU roof, συνδέονται μεταξύ τους, γεγονός που καθιστά την κατανομή πόρων μία ακόμη πρόκληση. Τέλος, η διαχείριση παρεμβολών συνδέεται σε μεγάλο βαθμό με άλλους τομείς, όπως η κατανομή πόρων και ο σχεδιασμός δικτύου, οπότε απαιτείται η ανάπτυξη πιο εξελιγμένων σχημάτων για την διαχείρισή τους.
- **Περιορισμός ασύρματου backhaul:** Στα σενάρια H-CRAN / MEC, η χωρητικότητα του backhaul και του fronthaul είναι ένα σημαντικό ζήτημα. Για παράδειγμα, σε περίπτωση που το backhaul είναι περιορισμένο, θα πρέπει να λαμβάνεται υπόψη ο χρόνος μετάδοσης μέσω των συνδέσμων του, επηρεάζοντας έτσι τις αποφάσεις εκφόρτωσης των χρηστών. Στις περισσότερες ερευνητικές εργασίες γίνεται η υπόθεση ότι τα small cells συνδέονται με την κεντρική τοποθεσία μέσω ενσύρματων συνδέσεων υψηλής ταχύτητας (δίκτυο Οπτικών Ινών). Ως αποτέλεσμα, το σενάριο με ενσύρματο backhaul/fronthaul μπορεί να είναι απλό, αλλά περιορισμένο στην εφαρμογή του όσον αφορά τα H-CRAN / MEC δίκτυα. Τα ασύρματα backhaul / fronthaul μπορούν να διερευνηθούν περαιτέρω για τη βελτίωση της απόδοσης του δικτύου. Για παράδειγμα, το [109] εστιάζει στο MEC με ασύρματο backhaul.
- **Ασφάλεια:** Στα δίκτυα H-CRAN / MEC, η ασφάλεια θα είναι σημαντικό ζήτημα, καθώς οι εφαρμογές MEC θα εκτελούνται στις ίδιες φυσικές πλατφόρμες με ορισμένες λειτουργίες του δικτύου. Επομένως, μπορεί να μελετηθεί περαιτέρω η ασφάλεια φυσικού επιπέδου για συστήματα H-CRAN / MEC, ώστε να μειωθεί ο κίνδυνος να επηρεαστούν οι λειτουργίες του δικτύου από εξωτερικούς υποκλοπείς / χάκερς.

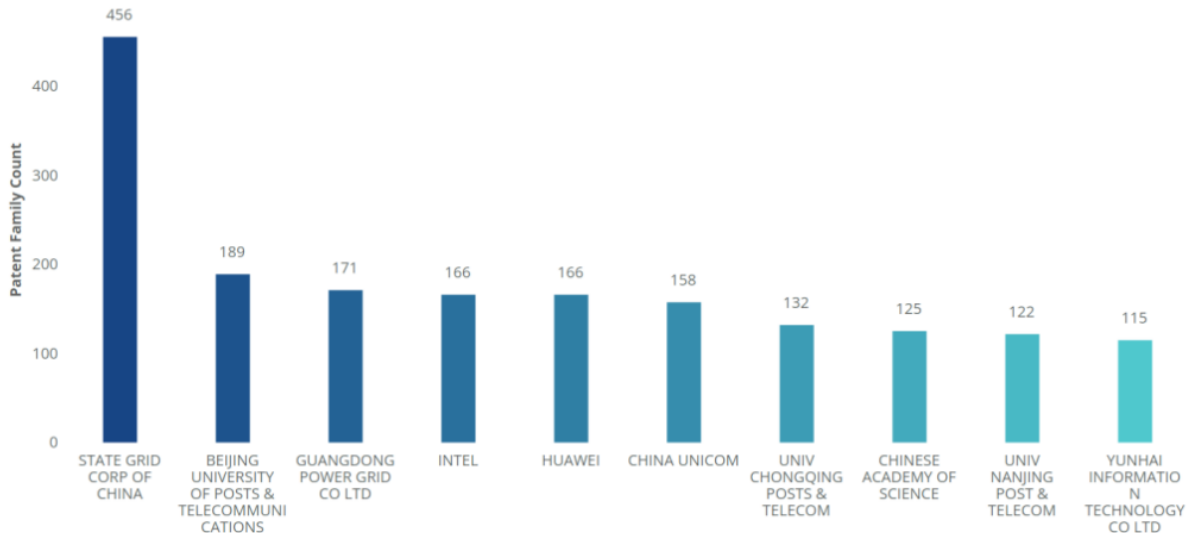
Ενότητα 9 – Κορυφαίες Εταιρείες και Οργανισμοί στο MEC

Οι 10 κορυφαίες εταιρείες που ηγούνται της έρευνας στο Edge Computing

Ενώ ο τομέας είναι ακόμα στην απαρχή του, γίνεται πολλή δουλειά στον τομέα του edge computing, τόσο από μεγάλες εταιρείες όσο και από νεοφυείς επιχειρήσεις. Υπάρχουν αρκετοί "παίκτες" στην παγκόσμια αγορά του στον τομέα του edge computing, οι οποίοι εργάζονται εντατικά πάνω στις νέες τεχνολογίες. Παρακάτω παρουσιάζονται οι 10 κορυφαίες εταιρείες σε αυτόν τον τομέα [111], μαζί με πληροφορίες από το χαρτοφυλάκιο των νέων ερευνών τους. Χρησιμοποιήθηκε ένας συνδυασμός των δεδομένων από τα διπλώματα ευρεσιτεχνίας (patents) και των δεδομένων της αγοράς, ώστε να καταλήξουμε στις παρακάτω εταιρείες.

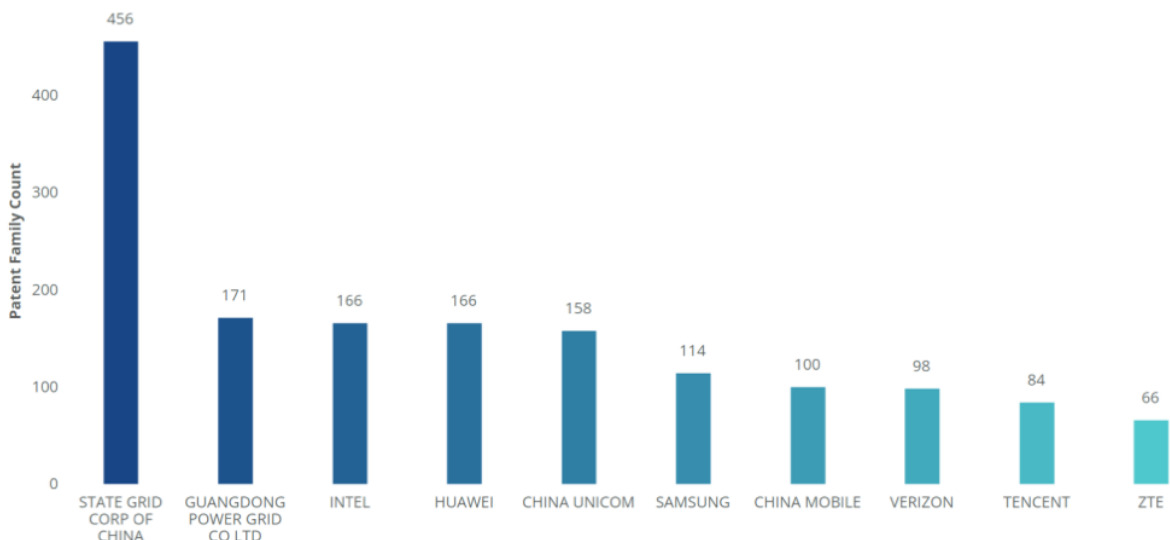
Κινητή Υπολογιστική Άκρου Σε Περιβάλλοντα 5G

Από την ανάλυση των διπλωμάτων ευρεσιτεχνίας, η State Grid Corporation of China είναι η κορυφαία εταιρεία με 456 οικογένειες διπλωμάτων ευρεσιτεχνίας, στον τομέα του Edge Computing. Το Πανεπιστήμιο του Πεκίνου (Beijing University) βρίσκεται στη δεύτερη θέση με 189 οικογένειες διπλωμάτων ευρεσιτεχνίας, ενώ η Guangdong Power Grid βρίσκεται στην τρίτη θέση με 171 οικογένειες διπλωμάτων ευρεσιτεχνίας.



Σχήμα 34 - Κορυφαίοι οργανισμοί με τις περισσότερες πατέντες Edge Computing (συμπεριλαμβάνονται Πανεπιστήμια και Ερευνητικά Κέντρα), Πηγή GrayB

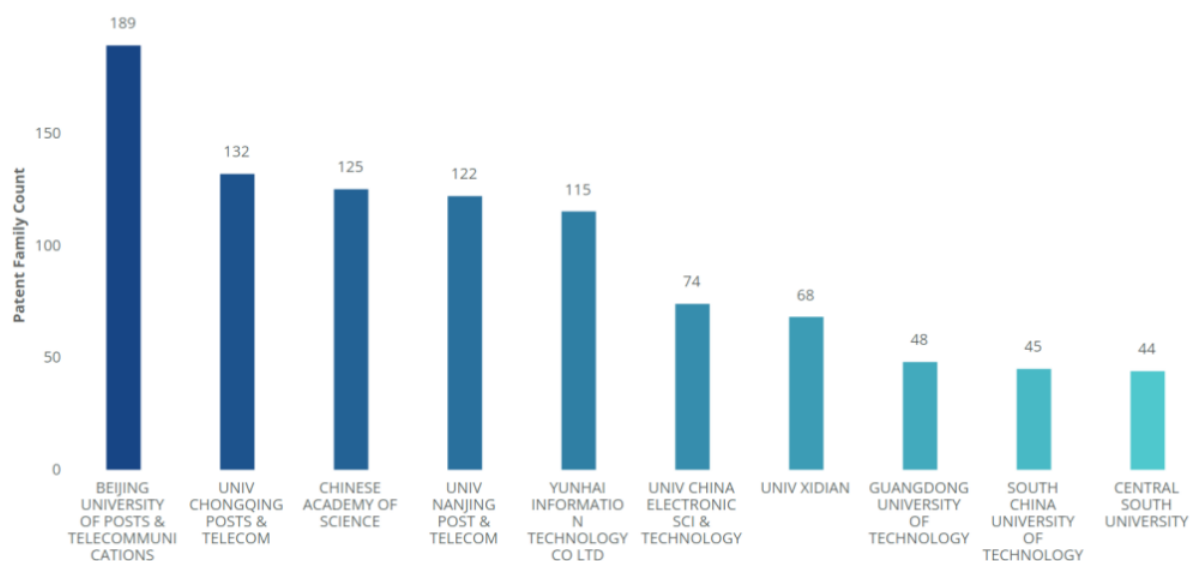
Η λίστα περιλαμβάνει τέσσερα ερευνητικά ινστιτούτα, τα οποία ανήκουν όλα στην Κίνα, στο σύνολο των 10 κορυφαίων. Και με 9 κινεζικούς οργανισμούς στη λίστα, η Κίνα φαίνεται να προηγείται όσον αφορά τα διπλώματα ευρεσιτεχνίας.



Σχήμα 35 - Κορυφαίοι οργανισμοί με τις περισσότερες πατέντες Edge Computing (δεν συμπεριλαμβάνονται Πανεπιστήμια και Ερευνητικά Κέντρα), Πηγή GrayB

Αν εξαιρέσουμε τα ερευνητικά ινστιτούτα στη λίστα των 10 κορυφαίων, η Samsung και η Verizon καταλαμβάνουν θέση στη λίστα.

Εκτός των εταιριών, κινεζικά ερευνητικά ινστιτούτα υποβάλλουν εξίσου, σε μεγάλο βαθμό, διπλώματα ευρεσιτεχνίας στο Edge computing και στις εφαρμογές του. Εδώ είναι τα 10 κορυφαία ερευνητικά ινστιτούτα.



Σχήμα 36 - Κορυφαία Πανεπιστήμια και Ερευνητικά Κέντρα με τις περισσότερες πατέντες Edge Computing (δεν συμπεριλαμβάνονται Εταιρίες)

Αυτά είναι τα 10 κορυφαία πανεπιστήμια, με τις περισσότερες πατέντες Edge computing, και όλα είναι κινέζικα.

Συμπεραίνουμε λοιπόν ότι όσον αφορά τα διπλώματα ευρεσιτεχνίας, οι εταιρείες και τα πανεπιστήμια της Κίνας είναι αρκετά μπροστά στην συγκεκριμένη τεχνολογία.

Μέσω της έρευνας αγοράς και σε συνδυασμό με τη γνώση των διπλωμάτων ευρεσιτεχνίας, εντοπίστηκαν και παρουσιάζονται οι μεγαλύτερες εταιρείες στην παροχή edge computing λύσεων.

Οι 10 κορυφαίες δίνονται παρακάτω:

9.1 IBM

Η IBM εργάζεται στον τομέα του Edge Analytics τα τελευταία χρόνια, στα οποία ασχολείται κυρίως με την ανάπτυξη μοντέλων Μηχανικής Μάθησης, Νευρωνικών Δικτύων και Data Analytics στο Άκρο. Έχει επίσης αναπτύξει το IBM Watson Studio, το οποίο είναι ένα εργαλείο για τον οπτικό σχεδιασμό των νευρωνικών τους δικτύων και να πειραματιστούν με τα δεδομένα εκπαίδευσης, χρησιμοποιώντας την GPU "NVIDIA Tesla V100" με ένα προτιμώμενο πλαίσιο βαθιάς μάθησης, το οποίο στη συνέχεια μπορεί εύκολα να αναπτυχθεί στο cloud ή στο Άκρο.

Ορισμένες από τις πατέντες που κατατέθηκαν από την IBM, συζητούν λύσεις για ιδιαίτερες προκλήσεις που αντιμετωπίζει στο Edge Computing.

Για παράδειγμα, η IBM κατέθεσε ένα δίπλωμα ευρεσιτεχνίας (US20200293914A1) το οποίο επιλύει την πρόκληση του καθορισμού του συνόλου των οδηγιών για δίκτυα edge computing, σε περίπτωση απουσίας σύνδεσης δικτύου με τον διακομιστή cloud. Η εφεύρεση προτείνει τη χρήση ενός τοπικού νευρωνικού δικτύου για την πρόβλεψη μιας ενέργειας για την edge-συσκευή, κάτω από ένα ορισμένο όριο εμπιστοσύνης. Αυτή η έξοδος μετατρέπεται περαιτέρω σε οδηγίες, χρησιμοποιώντας επεξεργασία φυσικής γλώσσας.

Προϊόντα και Τεχνολογίες

IBM Edge Application Manager: Είναι μια αυτοματοποιημένη πλατφόρμα που παρέχει έρευνα, σε πραγματικό χρόνο, για λειτουργίες τεχνητής νοημοσύνης, ανάλυσης και IoT, οι οποίες τοποθετούνται και διαχειρίζονται σε απομακρυσμένες περιοχές. Είναι μια προηγμένη, σταθερή και προσαρμόσιμη πλατφόρμα που διαχειρίζεται από μόνη της τον edge computing.

IBM Maximo Visual Inspection: Κάνει την τεχνητή νοημοσύνη πιο προσιτή στους επιχειρηματικούς χρήστες μέσω της βαθιάς μάθησης. Αναλύει δεδομένα στην άκρη, επιτρέποντας ταχύτερο χρόνο απόκρισης σε προηγμένα αναλυτικά στοιχεία. Το λογισμικό μπορεί εύκολα να ενσωματωθεί στις ακραίες συσκευές και μπορεί να λειτουργήσει με υψηλή απόδοση.

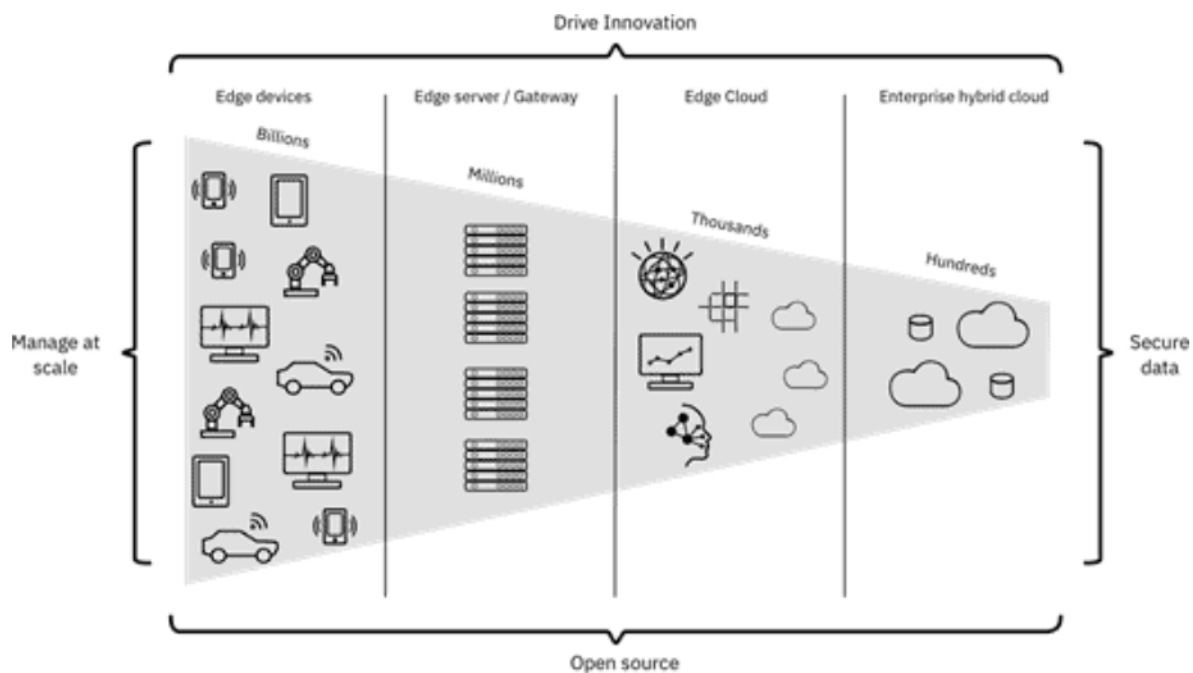
IBM Maximo Visual Inspection Mobile: Είναι μια υπολογιστική edge συσκευή η οποία βοηθά στην παροχή προσαρμοσμένων πληροφοριών για τα δεδομένα μηχανικής εκμάθησης στο άκρο.

IBM Cloud Pak for Network Automation: Είναι μια cloud πλατφόρμα cloud τεχνητής νοημοσύνης η οποία επιτρέπει την αυτοματοποίηση των λειτουργιών δικτύου, έτσι ώστε οι πάροχοι υπηρεσιών να μπορούν να μεταμορφώσουν τα δίκτυά τους, να ελαχιστοποιήσουν τα έξοδα και να παρέχουν ταχύτερες υπηρεσίες.

IBM Cloud Pak for Data: Το Edge Analytics του Cloud Pak συντηρεί τα δεδομένα κοντά στις συσκευές όπου παράγονται, αντί να αποθηκεύονται μακριά από μια κεντρική τοποθεσία.

IBM Storage: Συστήματα αποθήκευσης που έχουν σχεδιαστεί για να λειτουργούν τα συστήματα τεχνητής νοημοσύνης στην άκρη και να επιτρέπουν πληροφορίες αγοράς για όλες τις μορφές δεδομένων, συμπεριλαμβανομένης της εισροής ζωντανών οπτικών πληροφοριών που παράγονται στο άκρο.

IBM Edge Architecture: Η αρχιτεκτονική του edge computing βοηθά στην ασφαλή διαχείριση όλων των συνδεδεμένων υπολογιστικών συσκευών στο άκρο.



Σχήμα 37 - IBM Edge Computing Αρχιτεκτονική

Το IBM Edge Computing Architecture ακολουθεί τέσσερις βασικές αρχές:

- Ασφάλεια δεδομένων χρήστη: Οι edge συσκευές IBM προστατεύουν τα δεδομένα που παράγονται από τις βιομηχανίες, ενώ μειώνουν τους παράγοντες κινδύνου, διατηρώντας τα δεδομένα στο άκρο του δικτύου.
- Καινοτόμες λύσεις: Η IBM καινοτομεί συνεχώς νέα προϊόντα. Το Edge Application Manager προσφέρει ένα ευρύ φάσμα υπηρεσιών όπως Watson AI, IVC και IoT. Επιτρέπει επίσης στους χρήστες να εφαρμόζουν μηχανική και βαθιά μάθηση, στο άκρο.
- Φορητή λύση με τεχνολογία ανοιχτού κώδικα: Η IBM δημιούργησε μια τεχνολογία ανοιχτού κώδικα για να βοηθήσει τις εφαρμογές να εκτελούνται στο άκρο του δικτύου και να επιτρέπουν σε αυτές τις εφαρμογές να μετακινούνται εύκολα από το ένα σύστημα στο άλλο.
- Διαχείριση ενός ευρέος φάσματος συσκευών: Τα προϊόντα IBM edge computing βοηθούν στη διαχείριση του φόρτου εργασίας σε ευρεία κλίμακα.

9.2 Intel

Η Intel εργάζεται υπό το πρίσμα του edge computing, και μέσω μιας σειράς στρατηγικών κινήσεων, έχει γίνει ένας σημαντικός παίκτης του τομέα. Εκτός από την κυκλοφορία πολλών SoC (System-on-chip), η Intel πραγματοποίησε ορισμένες στρατηγικές εξαγορές που βοήθησαν την εταιρεία να αποκτήσει ένα πλεονέκτημα στην τεχνολογία αιχμής.

Το 2019, η Intel απέκτησε την πλατφόρμα Smart Edge από την Pivot Technology Solutions, οι οποία είναι μία επεκτάσιμη και ασφαλής cloud πλατφόρμα, για το Multi-Access Edge Computing (MEC). Η επέκταση των υπολογισμών στο Άκρο είναι μια σημαντική ευκαιρία

ανάπτυξης για την Intel - καθώς εκτιμάται ότι συνολική δύναμη της αγοράς θα φτάνει τα 65 δισεκατομμύρια δολάρια, έως το 2023.

Όσον αφορά τα διπλώματα ευρεσιτεχνίας, η Intel έχει τον μεγαλύτερο αριθμό διπλωμάτων ευρεσιτεχνίας στο edge computing, στην αμερικάνικη αγορά. Δεδομένης της δραστηριότητας των chipset, οι περισσότερες από αυτές τις πατέντες σχετίζονται ιδιαίτερα με λύσεις υλικού Edge computing (hardware). Ένα από αυτά τα διπλώματα, είναι το EP3734453A1 που προτείνει μεθόδους για τον εντοπισμό, την απόκτηση και τη σύνθεση του απαιτούμενου υλικού για πλατφόρμες Edge computing. Η πατέντα περιγράφει τον τρόπο σχεδίασης και ενσωμάτωσης ενός διαχωρισμένου (disaggregated) chipset για αρθρωτά (modular) Input-Output, στο Edge Computing.

Προϊόντα και Τεχνολογίες

Movidius Neural Compute Stick: Είναι η πρώτη, στον κόσμο, USB-based συσκευή πρόβλεψης μηχανικής μάθησης και επιταχυντής τεχνητής νοημοσύνης (AI), η οποία προσφέρει μια μεγάλη ποικιλία host edge συσκευών, με εξειδίκευση στα βαθιά νευρωνικά δίκτυα.

Intel Xeon Processors: Μπορούν να διαχειριστούν αναλυτικά στοιχεία σε πραγματικό χρόνο, τεχνητή νοημοσύνη και άλλους απαιτητικούς φόρτους εργασίας. Το 2018, η Intel κυκλοφόρησε τους επεξεργαστές Xeon D-2100, οι οποίοι έχουν σχεδιαστεί ειδικά για ανάγκες του edge computing.

Intel Core and Intel Atom Processors: Αυτοί οι επεξεργαστές έχουν ένα ευρύ φάσμα επιλογών, που συνδυάζει αποτελεσματικότητα και απόδοση, ενώ υποστηρίζουν τεχνητή νοημοσύνη και Edge Analytics, σε πραγματικό χρόνο. Το 2020, η Intel κυκλοφόρησε τους επεξεργαστές Intel Core 11ης γενιάς και τη σειρά Intel Atom x6000E που προσφέρουν τεχνητή νοημοσύνη, εξαγωγή συμπερασμάτων σε πραγματικό χρόνο και ασφάλεια στους edge χρήστες.

Intel Movidius VPU: Προσφέρει απίστευτες δυνατότητες αφαίρεσης (deduction capabilities) σε έξυπνες κάμερες, drones και άλλες συσκευές αιχμής με μηχανική μάθηση και τεχνητή νοημοσύνη. Το Intel Movidius Myriad X VPU είναι ένας αποκλειστικός επιταχυντής υλικού για εξαγωγή συμπερασμάτων σε βαθιά νευρωνικά δίκτυα.

Intel FPGAs: Η Intel προσφέρει δυνατότητες ευρείας εμβέλειας σε θέματα ασφάλειας, I/O και δικτύωσης, προσφέροντας αξία σε εφαρμογές υψηλής απόδοσης και χαμηλής καθυστέρησης. Μερικοί από τους επεξεργαστές σε αυτό το τμήμα είναι οι Intel Agilex FPGA, Intel Stratix Series, Intel Arria Series.

Intel Optane Solid State Drive (SSD): Βοηθά στη μείωση της αναποτελεσματικότητας στην αποθήκευση του κέντρου δεδομένων και διευκολύνει μια μεγαλύτερη, πιο προσιτή συλλογή δεδομένων. Αυξάνει τη συνολική απόδοση του κέντρου δεδομένων επιταχύνοντας τις διαδικασίες, μειώνοντας το κόστος επεξεργασίας, για εργασίες ευαίσθητες σε καθυστέρηση και επιταχύνοντας τις εφαρμογές.

Intel OpenVINO: Είναι μια δωρεάν εργαλειοθήκη που επιτρέπει τη βαθιά εκμάθηση συμπερασμάτων, από το edge σε cloud. Επιταχύνονται οι εργασίες τεχνητής νοημοσύνης όπως η μηχανική όραση, ο ήχος, η ομιλία, η γλώσσα και τα συστήματα προτάσεων.

OpenNESS: Είναι μια εργαλειοθήκη λογισμικού Multi-Access Edge Computing (MEC) που βελτιστοποιεί τη δυναμική διαχείριση edge υπηρεσιών, μέσω μιας σειράς πλατφορμών δικτύου και εφαρμογών δικτύου.

Intel Smart Edge: Είναι μια MEC πλατφόρμα που προσφέρει χαμηλό λανθάνοντα χρόνο, καλύτερη και εμπορευματοποιημένη ασφάλεια για περιπτώσεις χρήσης στον επιχειρηματικό τομέα.

Intel DevCloud for the Edge: Είναι ένα εικονικό εργαλείο δημιουργίας πρωτοτύπων AI, το οποίο επιτρέπει στους χρήστες να εκτελούν και να δοκιμάζουν edge workloads σε υλικό Intel.

Intel Deep Insight Network Analytics Software: Είναι το πρώτο σύστημα παρακολούθησης στον κόσμο που προσφέρει πλήρη πρόσβαση σε κάθε πακέτο του δικτύου και του διακομιστή, προσφέροντας τη δυνατότητα εντοπισμού και αναφοράς προβλημάτων σε πραγματικό χρόνο με υψηλή ακρίβεια.

9.3 Huawei

Η Huawei είναι μια κορυφαία εταιρεία 5G που κατέχει τα περισσότερα Core 5G SEPs (Standard Essential Patents), σύμφωνα με αναφορά του GreyB Services.

Αυτό δίνει στην εταιρεία ένα πλεονέκτημα, έναντι του ανταγωνισμού. Η εταιρεία κατέχει τα περισσότερα διπλώματα ευρεσιτεχνίας, καθώς επίσης ενισχύεται περαιτέρω από την εσωτερική της τεχνογνωσία και τις συνεργασίες με άλλους παίκτες.

Το 2017, η Huawei κυκλοφόρησε τη λύση Edge-Computing-IoT (EC-IoT) που επιτρέπει στους edge κόμβους να παρέχουν έξυπνες υπηρεσίες κοντά και να εφαρμόζει τη διαχείριση δικτύου στο cloud. Η λύση αυτή έχει εφαρμοστεί, έως τώρα, σε δίκτυα ανελκυστήρων, στο power IoT, στο IoT πόλης και φωτισμού, στην έξυπνη ενέργεια, στην έξυπνη κατασκευή και στο Internet of Vehicle (IOV).

Προϊόντα και Τεχνολογίες

Huawei Edge Computing – IoT (EC– IoT): Η λύση επέτρεψε στους edge κόμβους να στέλνουν τις έξυπνες εφαρμογές στις κοντινές συσκευές, και την διαχείριση του δικτύου στο cloud, με τον SDN-based "Agile Controller" της Huawei και τα edge computing IoT gateways (σειρά AR500). Η λύση βοήθησε επίσης να προστεθούν πλατφόρμες edge computing και διαχείρισης cloud, σε συσκευές που βασίζονται στο IoT.

Huawei Atlas 500 Pro AI Edge Server: Είναι μια συσκευή που χρησιμοποιείται για edge εφαρμογές. Αυτός ο διακομιστής προσφέρει συνεργασία μεταξύ cloud & edge, ανώτερη υπολογιστική απόδοση και εξαιρετικές προσαρμοστικές δυνατότητες. Μπορεί να εφαρμοστεί στην άκρη του δικτύου για να καλύψει τις απαιτήσεις σε διάφορες καταστάσεις, όπως καταστήματα λιανικής, εμπορικές περιοχές, μεταφορές κ.λπ.

Huawei AR502H Series: Αυτή η συσκευή είναι μια Edge Computing – IoT gateway (EC–IoT). Προσφέρει ανώτερες υπολογιστικές εμπειρίες, κιτ ανάπτυξης υπολογιστών, καθώς και δωρεάν software και εργαλεία hardware, για ένα πιο ευέλικτο περιβάλλον υπολογιστών, αποθήκευσης και δικτύωσης.

Huawei 5G MEC: Η εταιρεία κυκλοφόρησε την επόμενη γενιά λύσης για MEC, το Clover. Φέρνει τους πόρους και το περιεχόμενο της εφαρμογής πιο κοντά στους πελάτες και επιτρέπει την ενσωμάτωση δικτύου, διασφαλίζοντας στους χρήστες συνεπή και εξαιρετική εμπειρία.

Huawei iMaster MAE -CN: Σε περιπτώσεις που περιλαμβάνουν MEC, συνδυάζει διαχείριση και παρακολούθηση, ομαδική εργασία στο cloud και οργανωτική αυτονομία με επεξεργασία big data, έξυπνη λήψη αποφάσεων και αυτοματοποιημένο έλεγχο.

9.4 Amazon (AWS - Amazon Web Services)

Ως ένας από τους κορυφαίους παρόχους υπολογιστικού νέφους, δεν προκαλεί έκπληξη το γεγονός ότι η Amazon είναι επίσης κορυφαία στον τομέα του Edge computing, παρόλο που έχει λιγότερα διπλώματα ευρεσιτεχνίας που σχετίζονται με την τεχνολογία. Ωστόσο, η Amazon διαθέτει αρκετή τεχνογνωσία και πηγές για να αναπτύξει ένα χαρτοφυλάκιο για την παροχή λύσεων Edge computing «Α έως Ω». Παρακάτω αναφέρονται μερικά από αυτά.

Προϊόντα και Τεχνολογίες

AWS wavelength: Είναι ένα πλαίσιο AWS που επιτρέπει στους δημιουργούς να αναπτύσσουν εφαρμογές με πολύ χαμηλό λανθάνοντα χρόνο, για συσκευές κινητής τηλεφωνίας. Η πλατφόρμα edge computing χρησιμοποιεί εγκαταστάσεις AWS υπολογιστών και AWS αποθήκευσης στην άκρη των δικτύων 5G, για φορείς τηλεπικοινωνιών.

AWS Snowcone: Είναι μια φορητή - edge computing - συσκευή μεταφοράς δεδομένων. Το Snowcone χρησιμοποιείται για την ενεργοποίηση εφαρμογών στο άκρο, τη συλλογή και επεξεργασία των δεδομένων, και τη μεταφορά αυτών των δεδομένων στο AWS χωρίς να απαιτείται η παραμονή στο διαδίκτυο.

AWS Outposts: Το AWS Outposts είναι μια πλήρως διαχειριζόμενη λύση η οποία προσφέρει μια απρόσκοπτη υβριδική εμπειρία, σχεδόν σε κάθε κέντρο δεδομένων, χώρο συνεγκατάστασης ή on-site εγκατάστασης. Το AWS Outpost είναι κατάλληλο για εργασίες που περιλαμβάνουν συνδέσεις με on-site συστήματα, τοπική επεξεργασία δεδομένων ή τοπική αποθήκευση δεδομένων, με χαμηλή καθυστέρηση.

AWS Local Zones: Είναι μια edge computing υπηρεσία, με την οποία οι προγραμματιστές μπορούν να εκτελούν εφαρμογές με εξαιρετικά χαμηλή καθυστέρηση, κοντά στους τελικούς χρήστες. Οι AWS Local Zones είναι κατάλληλες για περιπτώσεις χρήσης όπως παραγωγή περιεχομένου πολυμέσων και ψυχαγωγίας, παιχνίδια σε πραγματικό χρόνο, ζωντανή ροή βίντεο και συμπεράσματα από τη μηχανική εκμάθηση.

AWS Storage Gateway: Είναι υβριδικός χώρος αποθήκευσης που προσφέρει απεριόριστο χώρο αποθήκευσης στο cloud. Οι καταναλωτές χρησιμοποιούν το Storage Gateway για να διευκολύνουν τη διαχείριση της αποθήκευσης και να μειώσουν το κόστος. Αυτό περιλαμβάνει τη μεταφορά αντιγράφων ασφαλείας στο cloud, με τη χρήση κοινόχρηστων αρχείων και την προσφορά χαμηλής καθυστέρησης πρόσβασης σε δεδομένα AWS για on-site εφαρμογές.

Amazon CloudFront: Είναι μια παγκόσμια πλατφόρμα δικτύου παράδοσης περιεχομένου (content delivery network - CDN) που παρέχει στους πελάτες χαμηλή καθυστέρηση και γρήγορους ρυθμούς μετάδοσης - απρόσκοπτα - μέσω αρχείων, εικόνων, παιχνιδιών και APIs.

AWS Snowball: Είναι μια edge computing συσκευή, μεταφοράς δεδομένων και αποθήκευσης στο Άκρο. Αυτή η συσκευή μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τη συλλογή, επεξεργασία και αποθήκευση δεδομένων για διαφορετικούς κλάδους ή σε απομακρυσμένες τοποθεσίες.

AWS RoboMaker: Μια εφαρμογή για προγραμματιστές ρομποτικής για τη δημιουργία πρωτοτύπων και τη μοντελοποίηση εφαρμογών ρομποτικής, προτού τις λανσάρουν στο Άκρο.

Amazon SageMaker Neo: Με το Amazon SageMaker Neo οι προγραμματιστές μπορούν να προετοιμάσουν μοντέλα μηχανικής εκμάθησης και να τα εκτελέσουν οπουδήποτε στο cloud ή στο άκρο. Συμβάλει στην βελτίωση των πρωτοτύπων, ώστε να λειτουργούν με υψηλή ταχύτητα και με ακρίβεια.

Amazon SageMaker Edge Manager: Είναι ένας agent λογισμικού που εκτελείται σε συσκευές edge. Βοηθά τους χρήστες να βελτιστοποιούν, να ασφαλίζουν, να παρακολουθούν και να διατηρούν μοντέλα ML σε συσκευές edge.

Amazon Monitron: Είναι μια ενσωματωμένη συσκευή που χρησιμοποιεί μηχανική εκμάθηση (ML) για τον εντοπισμό ακανόνιστης δραστηριότητας, σε βιομηχανικά μηχανήματα, επιτρέποντας στον χρήστη να εκτελεί προληπτική ανάλυση (proactive analytics) και να εξαλείφει τις μη προγραμματισμένες διακοπές λειτουργίας.

AWS Panorama: Είναι ένα σύστημα μηχανικής εκμάθησης και ένα κιτ ανάπτυξης λογισμικού που επιτρέπει στις επιχειρήσεις να εισάγουν την όραση υπολογιστή (CV - computer vision) στις κάμερες εσωτερικού χώρου και να κάνουν προβλέψεις με υψηλή ακρίβεια και χαμηλό λανθάνοντα χρόνο.

AWS IoT Greengrass: Είναι μια edge πλατφόρμα, ανοιχτού κώδικα, και μια υπηρεσία cloud για το IoT η οποία βοηθά στην υλοποίηση, την ανάπτυξη και την διαχείριση εφαρμογών συστήματος.

FreeRTOS: Είναι web-based λογισμικό, πραγματικού χρόνου, για μικροελεγκτές, το οποίο διευκολύνει τον προγραμματισμό, την ανάπτυξη, τη σταθερότητα, τη σύνδεση και τον έλεγχο ελαφριών, χαμηλής κατανάλωσης edge συσκευών.

AWS IoT Core: Επιτρέπει στους χρήστες να συνδέουν συσκευές IoT στο AWS cloud χωρίς την ανάγκη διαχείρισης διακομιστών. Το AWS IoT Core επιτρέπει στους χρήστες να παρακολουθούν όλες τις συσκευές ακόμα και όταν είναι αποσυνδεδεμένες.

AWS IoT SiteWise: Είναι μια ρυθμιζόμενη πλατφόρμα που συλλέγει, αποθηκεύει, οργανώνει και παρακολουθεί τα δεδομένα από βιομηχανικό εξοπλισμό, σε μεγάλους όγκους, και βοηθά στη λήψη καλύτερων data-driven αποφάσεων.

9.5 Google

Ακριβώς όπως και η Amazon, η Google πραγματοποίησε κι εκείνη το εγχείρημα από το cloud στο edge, και θεωρείται πλέον ένας από τους κορυφαίους παίκτες στην τεχνολογία. Η Google, δεν βρίσκεται στην κορυφαία λίστα με τα διπλώματα ευρεσιτεχνίας, ωστόσο, το υπάρχον χαρτοφυλάκιο της θα μπορούσε να προσφέρει μια ολοκληρωμένη λύση στο edge computing, καθώς η εταιρεία συμμετέχει ενεργά στις τεχνολογίες 5G και IoT, μέσω αρκετών συνεργασιών με διάφορες εταιρείες.

Παρακάτω παρουσιάζονται ορισμένα από τα προϊόντα της, στον τομέα.

Προϊόντα και Τεχνολογίες

Google Edge TPU: Είναι ένα νέο τσιπ το οποίο επιτρέπει την τεχνητή νοημοσύνη (AI) να τρέχει στα άκρα με ακρίβεια. Αυτό το προϊόν χρησιμοποιεί το edge computing, ώστε να

ικανοποιήσει τις αυξανόμενες ανάγκες, όπως το απόρρητο των καταναλωτών, τον εξαιρετικά χαμηλό λανθάνοντα χρόνο και την αύξηση των συνδεδεμένων συσκευών. Το Edge TPU μπορεί να εφαρμοστεί σε ένα ευρύ φάσμα χρήσεων όπως η προληπτική συντήρηση, η ανίχνευση ανωμαλιών, η μηχανική όραση, η ρομποτική και η αναγνώριση φωνής, για διαφορετικές βιομηχανίες.

Google Cloud IoT Edge: Είναι λογισμικό που χρησιμοποιεί το edge computing για να επεκτείνει τις δυνατότητες μηχανικής εκμάθησης και επεξεργασίας δεδομένων του Google cloud, και να επιτρέπει τις χρήσεις του σε gateways, κάμερες και τερματικές συσκευές, κάνοντας τις εφαρμογές πιο γρήγορες, ασφαλείς και αξιόπιστες.

Google Anthos: Είναι μια υβριδική multi-cloud πλατφόρμα για την ανάπτυξη εφαρμογών στο δίκτυο. Το Anthos στο Άκρο βοηθά στην προσέγγιση των εφαρμογών στους χρήστες, προσφέροντας υψηλή απόδοση με χαμηλό λανθάνοντα χρόνο, διασφαλίζοντας ότι οι επιχειρήσεις είναι συμβατές σε διαφορετικές τοποθεσίες, με πρόσβαση παγκοσμίως.

Google Coral: Είναι μια πλατφόρμα μηχανικής εκμάθησης για εφαρμογές edge. Βοηθά τους χρήστες να αναπτύξουν τις δικές τους συσκευές χρησιμοποιώντας το τοπικό AI. Αυτή η πλατφόρμα βοηθά επίσης στην παροχή επιτάχυνσης υλικού (hardware acceleration) σε edge συσκευές.

9.6 Microsoft

Η Microsoft είναι μια κορυφαία εταιρεία υπολογιστικού νέφους, αλλά σε αντίθεση με την Amazon και την Google, κατέχει αρκετά διπλώματα ευρεσιτεχνίας edge computing στο χαρτοφυλάκιό της. Τα περισσότερα από αυτά προτείνουν λύσεις στις προκλήσεις που αντιμετωπίζει ο κλάδος (πχ WO2020214409A1).

Η Microsoft διαθέτει επίσης μια σειρά προϊόντων τα οποία αφορούν edge computing. Το Azure IoT Edge, για παράδειγμα, είναι μια πλήρως διαχειριζόμενη υπηρεσία, που έχει δημιουργηθεί από τη Microsoft, για την ανάπτυξη φόρτου εργασιών στο cloud, μοντέλων τεχνητής νοημοσύνης, επιχειρηματικής λογικής και Internet of Things (IoT) σε edge συσκευές, μέσω (standard) containers. Εργαλεία, όπως το Azure Defender, σχεδιάζονται αποκλειστικά και αναβαθμίζονται από καιρό σε καιρό, για να διασφαλίζουν προστασία από απειλές, από άκρο-σε-άκρο στους διακομιστές edge.

Προϊόντα και Τεχνολογίες

Azure SQL Edge: Είναι μια μηχανή βάσης δεδομένων SQL, βελτιστοποιημένη για το Edge, με προεγκατεστημένο AI. Αυτό το προϊόν επιτρέπει στον χρήστη να επιλέξει μια πλατφόρμα, να διαχειριστεί την ανάλυση δεδομένων σε πραγματικό χρόνο στο άκρο και να πραγματοποιήσει αφαίρεση δεδομένων (deduction) σε πραγματικό χρόνο στο Άκρο, χρησιμοποιώντας το πλαίσιο Open Neural Network Exchange (ONNX).

Vision AI DevKit: Είχε ρυθμιστεί για να εκτελεί τοπικά containerized πόρους του Azure και να μεταφέρει εργασίες στην άκρη του δικτύου. Η συσκευή αναπτύχθηκε χρησιμοποιώντας μια πλατφόρμα οπτικής νοημοσύνης Qualcomm (Qualcomm Visual Intelligence Platform) για την επιτάχυνση του υλικού της τεχνητής νοημοσύνης μαζί με τα eInfochips, έναν κορυφαίο

πάροχο υπηρεσιών σχεδιασμού AI, ο οποίος βασίζεται στο όραμα και στις υπηρεσίες Edge to Cloud.

Microsoft HoloLens 2: Είναι μια ευέλικτη edge computing συσκευή, καθώς μπορεί να λειτουργήσει εκτός σύνδεσης και να συνδεθεί σε οποιοδήποτε cloud. Όταν είναι συνδεδεμένο στο Microsoft Azure, είναι προσβάσιμο από οποιαδήποτε συσκευή ή πλατφόρμα.

Microsoft Azure Stack edge: Είναι μια edge computing συσκευή με δυνατότητα διαχείρισης cloud, με δυνατότητα AI, με δυνατότητες αποθήκευσης και μεταφοράς δεδομένων στο Microsoft Azure. Βοηθά τις επιχειρήσεις να εκτελούν φόρτους εργασίας κοντά στην πηγή των δεδομένων, βελτιώνοντας τους χρόνους επεξεργασίας, μειώνοντας την καθυστέρηση και διατηρώντας το bandwidth.

Microsoft Azure Edge Zones: Είναι μια επέκταση του Azure, περιορισμένου εύρους, η οποία βρίσκεται σε κατοικημένες περιοχές. Οι ζώνες των Άκρων Azure βοηθούν τους προγραμματιστές να εκτελούν εφαρμογές κοντά στους τελικούς χρήστες, προσφέροντας χαμηλή καθυστέρηση και υψηλή απόδοση. Αυτές οι ζώνες άκρων είναι χρήσιμες για τη ροή παιχνιδιών, την παράδοση περιεχομένου και την ανάλυση στοιχείων σε πραγματικό χρόνο.

Azure IoT Edge: Το Azure IoT Edge είναι μια IoT υπηρεσία, η οποία επεκτείνει το IoT Hub και επιτρέπει στους χρήστες να πραγματοποιούν edge computing. Προσφέρει λήψη αποφάσεων με χαμηλό λανθάνοντα χρόνο, εγκαταστάσεις λειτουργίας εκτός σύνδεσης και αποτελέσματα σε πραγματικό χρόνο.

Azure Spher: Είναι ένας μικροελεγκτής που χρησιμοποιείται στους edge computing κόμβους. Κατασκευάστηκε με τη δυνατότητα να επεξεργάζεται δεδομένα σε πραγματικό χρόνο, και να τρέχει - υψηλού επιπέδου - λειτουργικά συστήματα. Βοηθά επίσης στην ασφάλεια των δεδομένων χρήστη με πολλαπλά επίπεδα προστασίας.

9.7 Ericsson

Η Ericsson είναι μια κορυφαία εταιρεία 5G, που μπορεί να ανταγωνιστεί άμεσα εταιρίες όπως η Huawei και η ZTE. Η Ericsson έχει συγκεντρώσει ένα ισχυρό χαρτοφυλάκιο διπλωμάτων ευρεσιτεχνίας, για να βρεθεί στη λίστα με τους κορυφαίους παίκτες στον τομέα του edge computing.

Προϊόντα και Τεχνολογίες

Ericsson Edge NFVI (Network Functions Virtualization Infrastructure): Η πλατφόρμα σχεδιάστηκε για να μεταφέρει κίνηση σε ένα καταναμημένο δίκτυο, στην άκρη του δικτύου, παρέχοντας περιπτώσεις χρήσης 5G χαμηλής καθυστέρησης, χαμηλού κόστους και υψηλής απόδοσης. Έχει συμπαγή σχεδιασμό που του επιτρέπει να εκτελεί εφαρμογές cloud και λειτουργίες εικονικού δικτύου. Αυτό κάνει επίσης την πλατφόρμα πολύ ευέλικτη.

Edge Gravity: Το Edge Gravity Unified Delivery Network ήταν μια edge-cloud πλατφόρμα η οποία αναπτύχθηκε σε συνεργασία με άλλες εταιρίες ευρυζωνικών υπηρεσιών, ώστε να προσφέρει την επόμενη γενιά edge εφαρμογών σε συγκεκριμένους κλάδους επιχειρήσεων. Κυκλοφόρησε το 2018, αλλά το 2020 η Ericsson έκλεισε αυτή τη μονάδα, καθώς δεν εκπλήρωσε τους βασικούς στόχους που είχε θέσει η εταιρεία.

9.8 Cisco

Η Cisco είναι μια εξέχουσα εταιρεία, ασύρματου υλικού, με εξειδίκευση στην τεχνολογία 5G. Χρησιμοποιώντας την τεχνογνωσία και την εμπειρία της, η Cisco κατάφερε να δημιουργήσει ένα μεγάλο χαρτοφυλάκιο για να παρέχει edge computing λύσεις.

Προϊόντα και Τεχνολογίες

CISCO IOx: Αυτή η πλατφόρμα δημιουργήθηκε για να βοηθήσει τους προγραμματιστές να αναπτύξουν επιχειρηματικό λογισμικό στο άκρο του δικτύου. Βοηθά στη διαχείριση edge εφαρμογών και επιτρέπει την παρακολούθηση και την αντιμετώπιση προβλημάτων των edge εφαρμογών στην πλατφόρμα CISCO IOx, όπως FND, GMM και DNA-C από απομακρυσμένα μέρη.

HyperFlex Edge: Παρέχει στους χρήστες ευέλικτες επιλογές για την ενσωμάτωση υπολογισμών και αποθήκευσης σε edge περιβάλλοντα.

Catalyst 8000V Edge Software: Είναι μια πλατφόρμα εικονικών άκρων που προσφέρει στους χρήστες ευελιξία, προστασία και ορατότητα, τα οποία απαιτούνται στο σύγχρονο περιβάλλον πολλαπλών cloud, επιτρέποντας τη δυνατότητα προσαρμογής εφαρμογών για την καλύτερη δυνατή εμπειρία χρήστη.

Catalyst 8200 Series Edge: Πρόκειται για μια πλατφόρμα cloud-edge 5G που έχει σχεδιαστεί για ασφαλή πρόσβαση στην υπηρεσία Edge (SASE) που παρέχει ασφαλή, ευέλικτη και κλιμακούμενη συνδεσιμότητα στην αρχιτεκτονική πολλαπλών cloud των χρηστών.

Catalyst 8200 Series Edge uCPE: Είναι μια ευέλικτη πλατφόρμα δικτύωσης που προσφέρει τεχνολογίες πολλαπλών cloud, κορυφαία στον κλάδο εικονικοποίηση λειτουργιών δικτύου (NFV - network functions virtualization) και σταθερές συνδέσεις άκρων.

Catalyst 8300 Series: Είναι μια edge computing πλατφόρμα που βοηθά τους χρήστες να επωφεληθούν από τις επιταχυνόμενες υπηρεσίες, την κρυπτογράφηση πολλαπλών επιπέδων, την ευελιξία στο cloud και την ευφυΐα στο Άκρο, που επιταχύνει την πορεία τους προς το cloud.

Catalyst 8500 Series: Είναι μια cloud-edge πλατφόρμα, υψηλής απόδοσης, με πληροφορίες άκρων, σταθερότητα πολλαπλών επιπέδων και εγγενή ευελιξία στο cloud.

CISCO Edge Intelligence: Είναι μια εφαρμογή που βοηθά στην εξαγωγή, μετατροπή και αποστολή δεδομένων από συσκευές edge IoT σε διαφορετικές εφαρμογές. Επιτρέπει επίσης στους χρήστες να συνδέουν συσκευές με διαφορετικές μορφές δικτύων, καθιστώντας εύκολη τη διαχείριση και τον ασφαλή χειρισμό της εξαγωγής δεδομένων.

Catalyst IE3x00 Rugged Switches: Αυτή η πλατφόρμα προσφέρει ενσωματωμένα δεδομένα σε πραγματικό χρόνο, σε υψηλές ταχύτητες και βελτιστοποιημένη αρχιτεκτονική. Τα Cisco Rugged Switches παρέχουν απλότητα, αξιοπιστία και προστασία.

IR1101 Integrated Services Router: Έχει μια εξαιρετικά φορητή, ελαφριά, αρθρωτή αρχιτεκτονική, η οποία είναι ιδανική για κρίσιμες εφαρμογές. Με την τεχνολογία SD-WAN, το edge computing και το IOS XE, παρέχει προηγμένη ασφάλεια και διαχείριση στους δρομολογητές.

9.9 Tencent

Η είσοδος της Tencent στον τομέα του edge computing προκάλεσε έκπληξη. Ακόμη πιο εκπληκτικό είναι το γεγονός ότι κατέχουν σημαντικό αριθμό διπλωμάτων ευρεσιτεχνίας. Τον

Οκτώβριο του 2020, η Tencent άνοιξε το πρώτο της Edge computing Center για το κοινό, στη περιοχή Binhai στην Κίνα, για να αναδείξει τα νέα προϊόντα αιχμής της Tencent Cloud, στους τομείς του υλικού, του δικτύου, πλατφόρμας και πολλαπλών επιπέδων εφαρμογών.

Προϊόντα ή Τεχνολογίες

Tencent Smart Edge Connector (TSEC): Βοηθά στην ανάπτυξη δικτύων κινητής τηλεφωνίας 5G. Λειτουργεί ως η γέφυρα μεταξύ των χρηστών κινητής τηλεφωνίας και των παρόχων υπηρεσιών, με μια edge computing υπηρεσία Διαδικτύου, υψηλής ποιότητας, η οποία θα συνεργάζεται με τις εφαρμογές στο cloud, στο edge και στις συσκευές τελικού χρήστη. Οι κύριες αρμοδιότητες του Tencent Smart Edge Connector (TSEC) είναι η εκφόρτωση της mobile κίνησης, η επιτάχυνση του δικτύου κινητής τηλεφωνίας, η προώθηση κίνησης στα άκρα, το tunneling στο δίκτυο κινητής και ο έλεγχος πρόσβασης IoT.

Tencent Edge Computing Machine (ECM): Το Edge Computing Machine (ECM) μεταφέρει την υπολογιστική ισχύ από τον κεντρικό κόμβο, στους ακραίους κόμβους, κοντά στους πελάτες. Σύμφωνα με τις επιχειρηματικές ανάγκες, ο πελάτης μπορεί α) να προσαρμόσει την περιοχή εξυπηρέτησης και το μέγεθος των ακραίων μονάδων, β) να αντιδρά γρήγορα και ευέλικτα στις προσαρμογές της αγοράς και γ) να έχει ταχύτερη απόκριση με χαμηλότερο κόστος.

IoT Edge Computing Platform IECP: Είναι μια Edge Computing πλατφόρμα η οποία προσφέρει χαμηλή καθυστέρηση, φορητότητα, σταθερές και ευέλικτες Edge Computing υπηρεσίες για τους χρήστες των IoT επιχειρήσεων, μειώνοντας το κόστος λειτουργίας, συντήρησης, ανάπτυξης και bandwidth.

Edge Availability Zone TEZ: Είναι μια τοπική επέκταση του Tencent Cloud που μπορεί να συμβάλει σε προβλήματα επεξεργασίας, αποθήκευσης και συμβατότητας συστήματος. Βοηθά τους προγραμματιστές να εκτελούν εφαρμογές ευαίσθητες στην καθυστέρηση, κοντά στους χρήστες.

9.10 ZTE

Η ZTE είναι μια κορυφαία εταιρεία 5G που κατέχει σημαντικό αριθμό διπλωμάτων ευρεσιτεχνίας 5G. Οι πατέντες της ZTE για το Edge computing, η τεχνογνωσία της και η συνεργασία με άλλους οργανισμούς την καθιστούν έναν από τους κορυφαίους παίκτες του edge computing.

Το 2020, η ZTE Corporation συνεργάστηκε με την China Mobile για να λανσάρει την πρώτη cloud πλατφόρμα ιατρικών Άκρων 5G. Εκτός από αυτό, τα τελευταία 3 χρόνια, η ZTE εργάζεται στο 5G edge computing, με σκοπό να διαθέτει ένα ευρύ φάσμα υπηρεσιών, συμπεριλαμβανομένων AR/VR, IoT, βιομηχανικού αυτοματισμού και αυτόνομης οδήγησης.

Τα διπλώματα ευρεσιτεχνίας της ZTE συζητούν τη λύση για την ενσωμάτωση ή τη μετάβαση άλλων τεχνολογιών σε edge εφαρμογές. Για παράδειγμα, ένα από τα διπλώματα ευρεσιτεχνίας ZTE (CN110535896A) συζητά τη μετεγκατάσταση μιας edge computing εφαρμογής για την επεξεργασία εικόνας υψηλής ευκρίνειας, εικονικής πραγματικότητας (VR) ή επαυξημένης πραγματικότητας (AR), με την εφαρμογή μιας συσκευής χρήστη σε ένα δίκτυο οχημάτων (πχ με το κυψελοειδές δίκτυο third-generation partnership project - 3GPP).

Προϊόντα και Τεχνολογίες

ZTE Common Edge MEC (Multi-Access Edge Computing): Το Multi-Access Edge Computing (MEC) βοηθά στον υπολογισμό και την αποθήκευση πόρων, κοντά στους τελικούς χρήστες. Η ZTE προσφέρει λύσεις αναγνώρισης βίντεο, ροής βίντεο χαμηλής καθυστέρησης και υποστηρίζει υπηρεσίες από τρίτα μέρη.

E5430 G4: Είναι ένας διακομιστής που καλύπτει τις ανάγκες των edge computing δωματίων (edge equipment rooms). Ικανοποιεί τις ανάγκες 5G, IoT, AI και άλλων σεναρίων συσκευών για συλλογή, ανάλυση και επεξεργασία δεδομένων αιχμής.

ZTE MEC Integrated Cabinet: Είναι ένα plug-and-play cloud σύστημα, προσανατολισμένο στον βιομηχανικό κλάδο, το οποίο ικανοποιεί τις περίπλοκες συνθήκες αγοράς των σεναρίων 5G και επιτρέπει την ψηφιακή μετάβαση στους operators και στις κάθετες βιομηχανίες (vertical industries).

Lightweight Dual Engine Edge Cloud: Είναι πλατφόρμες υποδομής, συνδυάζοντας τα container και τις εικονικές μηχανές, για την υποστήριξη edge εφαρμογών ICT, για ταχύτερη διανομή, υλοποίηση, ανθεκτικότητα και cloud migration.

9.11 Συγχωνεύσεις και Εξαγορές (M & A - Mergers and Acquisitions)

Έχοντας εξετάσει τις δραστηριότητες όλων των κορυφαίων εταιρειών στον τομέα του Edge Computing, παρακάτω αναφέρονται οι 3 μεγαλύτερες συγχωνεύσεις και εξαγορές στον τομέα.

Οι 3 μεγαλύτερες συγχωνεύσεις και εξαγορές στον κλάδο του Edge Computing

Το 2020, η Microsoft εξαγόρασε την Affirmed Networks, μια εταιρεία που παρείχε τη λύση Affirmed Cloud Edge (ACE) για το Mobile Edge Computing (MEC), προσφέροντας στους παρόχους υπηρεσιών (Communication Service Providers - CSPs) τη δυνατότητα να φιλοξενούν εφαρμογές και να αποθηκεύουν πληροφορίες κοντά στους πελάτες, με σκοπό τη μείωση του λανθάνοντος χρόνου και την αύξηση της απόδοσης. Η Microsoft αποτίμησε την Affirmed Technologies σε περίπου 1,35 δισεκατομμύρια δολάρια. Η Microsoft χρησιμοποίησε το λογισμικό για να βοηθήσει τους παρόχους κινητής τηλεφωνίας να αναπτύξουν NFV-based εφαρμογές, οι οποίες μπορούν να διαχειριστούν συμβατικές υπηρεσίες δικτύου και να παρέχουν edge computing υπηρεσίες σε επιχειρήσεις και κυβερνητικούς οργανισμούς.

Το 2019, η IBM ανακοίνωσε την εξαγορά της Red Hat για περίπου 34 δισεκατομμύρια δολάρια. Η IBM και η Red Hat συνδυάστηκαν για να συμπεριλάβουν μια υβριδική διεπαφή πολλαπλών cloud επόμενης-γενιάς, η οποία είχε στόχο να επιταχύνει την καινοτομία. Η εξαγορά της IBM επέτρεψε στον τεχνολογικό γίγαντα να χρησιμοποιήσει τα εργαλεία της Red Hat, επιτρέποντάς της να αποκτήσει την ισχυρότερη βάση στον κλάδο. Με υβριδικές multi-cloud προσφορές που συνδυάζουν το Red Hat OpenShift, καθώς και με την εμπειρία της IBM στον κλάδο, η εταιρεία βοηθά τους πελάτες της να επωφεληθούν πλήρως από το edge computing και το 5G.

Το 2019, η Intel απέκτησε την επιχείρηση edge computing λογισμικού, Smart Edge από την Pivot Technology. Η τιμή της εξαγοράς ήταν περίπου 27 εκατομμύρια δολάρια. Η εφαρμογή, που τρέχει σε επεξεργαστές Intel, επιταχύνει τις μηχανές επεξεργασίας, διαχωρίζοντας τα δεδομένα, και φέρνοντάς τα πιο κοντά στους χρήστες. Η Intel σκοπεύει να το χρησιμοποιήσει σε συσκευές για το νέο ασύρματο δίκτυο 5G, το οποίο έχει ήδη αρχίσει να καταργείται σταδιακά.

Εταιρείες με τις μεγαλύτερες εξαγορές στον τομέα του Edge Computing

Μεταξύ των κορυφαίων εταιρειών που αναπτύσσουν Edge Computing λύσεις, οι εταιρείες με τις μέγιστες εξαγορές είναι οι εξής:

NVIDIA

- Το 2020, η NVIDIA εξαγόρασε τον Arm για 40 δισεκατομμύρια δολάρια για να επιταχύνει την ανάπτυξη της στο Edge Computing.
- Το 2020, η NVIDIA εξαγόρασε το Mellanox για 7 δισεκατομμύρια δολάρια, καθώς τα κέντρα δεδομένων επόμενης-γενιάς αυξάνονται, με την ταχεία αύξηση των απαιτήσεων του Edge Computing.
- Το 2020, η NVIDIA εξαγόρασε την Cumulus Networks, μια εταιρεία που ανέπτυξε λύσεις στο Άκρο του δικτύου, μέσω της συνεργασίας της με τη Mellanox.

Intel

- Το 2019, η Intel απέκτησε την πλατφόρμα Smart Edge από την Pivot Technologies για περίπου 27 εκατομμύρια δολάρια.
- Το 2016, η Intel εξαγόρασε τη Movidius, μια εταιρεία σχεδιασμού τσιπ, για περίπου 400 εκατομμύρια δολάρια, για την ανάπτυξη Edge Computing προϊόντων.

Apple

- Το 2020, η Apple είχε ανακοινώσει την αγορά της εταιρείας Xnor.ai (AI), με έδρα το Σιάτλ, για 200 εκατομμύρια δολάρια.
- Το 2018, η Apple εξαγόρασε την Silk Labs ωθώντας την τεχνητή νοημοσύνη / μηχανική νοημοσύνη στο Άκρο.

Microsoft

- Το 2020, η Microsoft εξαγόρασε την Affirmed Networks για να επιταχύνει την ώθησή της προς την ανάπτυξη Edge Computing λύσεων.

IBM

- Η IBM εξαγόρασε τη Red Hat για περίπου 34 δισεκατομμύρια δολάρια, για την κατασκευή καινοτόμων τεχνολογιών.

Μελλοντικές προοπτικές

Οι εταιρείες που συζητήθηκαν παραπάνω είναι οι διεκδικητές για στην λίστα των κορυφαίων παικτών. Οι τεχνολογικοί γίγαντες, όπως η Google, η Amazon, η IBM και η Microsoft διαθέτουν ήδη τεχνογνωσία στο cloud και στην τεχνητή νοημοσύνη. Από την άλλη πλευρά, η Huawei, η ZTE, η Cisco και η Ericsson διαθέτουν τεχνογνωσία στο 5G, οι οποίες έχουν τη δυνατότητα να μεταμορφώσουν το Edge computing. Επιπλέον, η Intel έχει δυνατότητες chipset.

Κάθε μία από αυτές τις εταιρεία διαθέτει στο οπλοστάσιό της κάτι που θα τη βοηθήσει να παραμείνει μπροστά στον ανταγωνισμό.

Ενότητα 10 – Συμπεράσματα

Το «Νέφος» είναι μια λέξη που χρησιμοποιείται συχνά για να αναφέρεται στο διαδίκτυο. Το cloud computing αναφέρεται στην ικανότητα του Διαδικτύου να παρέχει υπολογιστικές υπηρεσίες υψηλής ζήτησης, όπως αποθήκευση και επεξεργαστική ισχύ. Αν έχετε αναρωτηθεί ποτέ πού φυλάσσονται οι αναρτήσεις ή τα email σας στο Facebook, η απάντηση είναι "στο νέφος". Το cloud computing έχει σημαντικό αντίκτυπο στη ζωή μας με πολλούς τρόπους που δεν γνωρίζουμε. Είχε μια βαθιά επίδραση όχι μόνο στην προσωπική μας ζωή, αλλά και στον τρόπο με τον οποίο οι εταιρείες διαχειρίζονται τα δεδομένα τους, και τους καταναλωτές.

Το μειονέκτημα είναι ότι οι επιλογές προσαρμογής είναι περιορισμένες. Το cloud computing είναι λιγότερο δαπανηρό λόγω των οικονομιών κλίμακας και - όπως συμβαίνει με κάθε δραστηριότητα που ανατίθεται σε εξωτερικούς συνεργάτες - συχνά λαμβάνεται αυτό που πληρώνεται. Μειωμένη επιλογή σε σημαντικά μειωμένη τιμή: αυτό είναι το κύριο χαρακτηριστικό, και όχι κάποιο σφάλμα. Ένας πάροχος cloud μπορεί να μην ανταποκρίνεται σε κάθε νομική ανάγκη που προκύπτει, καθώς επίσης οι εταιρείες πρέπει να λάβουν υπόψη - εκτός από τα οφέλη - και τους κινδύνους του Cloud Computing. Συχνά, οι cloud-πάροχοι καθορίζουν πολιτικές διαχείρισης οι οποίες περιορίζουν το τι μπορούν να κάνουν οι cloud-χρήστες με τις ρυθμίσεις τους. Η ιδιοκτησία και η διαχείριση των προγραμμάτων, των δεδομένων και των υπηρεσιών των χρηστών του cloud είναι επίσης περιορισμένες. Αυτό λαμβάνει υπόψη τα όρια δεδομένων, τα οποία επιβάλλονται στους cloud-χρήστες από τους cloud-προμηθευτές, όταν εκχωρούν ένα ποσοστό bandwidth σε κάθε πελάτη. Αυτές οι εκχωρήσεις μοιράζονται συχνά και με άλλους cloud-πελάτες.

Ως συνέχεις του Cloud Computing, το Edge Computing προσφέρει ξεκάθαρα πολλά οφέλη. Οι βασικές απαιτήσεις του edge computing είναι να παρέχει αλληλεπίδραση σε πραγματικό χρόνο, τοπική επεξεργασία (local processing), υψηλό ρυθμό δεδομένων (high data rate) και υψηλή διαθεσιμότητα (high availability). Επίσης, βελτιώνει την απόδοση του δικτύου και βοηθά στην υποστήριξη και ανάπτυξη διαφορετικών σεναρίων. Ορισμένα ανοιχτά ζητήματα για την επιτυχή ανάπτυξη του edge computing στο 5G είναι η βελτίωση της υπηρεσίας, της

τυποποίησης, καθώς και της αντιμετώπισης της ετερογένειας και των τρωτών σημείων ασφαλείας [5].

Ταυτόχρονα όμως, αντιμετωπίζει επίσης πολλές τεχνικές και μη-τεχνικές προκλήσεις.

Από τεχνικής πλευράς, υπάρχουν πολλά άγνωστα πεδία που σχετίζονται με τους μηχανισμούς λογισμικού και τους αλγόριθμους που απαιτούνται για τον συλλογικό έλεγχο και την κοινή χρήση των Cloudlets στον κατανεμημένο υπολογισμό. Υπάρχουν επίσης σημαντικά εμπόδια στη διαχείριση της υποδομής των διάσπαρτων Cloudlet. Όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, μία από τις κινητήριες δυνάμεις του υπολογιστικού νέφους είναι το χαμηλότερο κόστος διαχείρισης της κεντρικής υποδομής. Η διασπορά που είναι εγγενής στην υπολογιστική άκρου, αυξάνει σημαντικά την πολυπλοκότητα της διαχείρισης. Η ανάπτυξη καινοτόμων τεχνικών λύσεων για τη μείωση αυτής της πολυπλοκότητας αποτελεί ερευνητική προτεραιότητα για την υπολογιστική άκρου. Ένας άλλος σημαντικός τομέας μελέτης θα είναι η ανάπτυξη μηχανισμών για την αντιστάθμιση της ασθενέστερης περιμετρικής ασφάλειας των Cloudlets, σε σχέση με τα κέντρα δεδομένων του Νέφους. Σημαντικοί τομείς που θα μπορούσαν να συμβάλουν στην άμβλυση αυτού του προβλήματος είναι α) η ανάπτυξη περιβλημάτων ανθεκτικών στην παραβίαση, β) η απομακρυσμένη επιτήρηση και γ) η πιστοποίηση/επικύρωση βάσει μονάδων "αξιόπιστης πλατφόρμας".

Από μη-τεχνικής πλευράς, το μεγαλύτερο άγνωστο μέρος ανάπτυξης σχετίζεται με τα βιώσιμα επιχειρηματικά μοντέλα για την ανάπτυξη των Cloudlets. Η επιτυχία θα απαιτήσει τη συμμετοχή και την υποστήριξη ενός πολύπλοκου συνόλου βιομηχανιών, κοινοτήτων και οργανισμών τυποποίησης. Αυτό παρουσιάζει ένα κλασικό πρόβλημα εκκίνησης. Δεν θα υπάρχει κίνητρο για την ανάπτυξη των Cloudlets, χωρίς τις μοναδικές εφαρμογές και τις υπηρεσίες που αξιοποιούν την Υπολογιστική Άκρου. Ωστόσο, χωρίς αρκετά μεγάλες αναπτύξεις Cloudlet, υπάρχει μικρό κίνητρο για τους προγραμματιστές να δημιουργήσουν αυτές τις νέες εφαρμογές και υπηρεσίες. Πώς μπορούμε να ξεπεράσουμε αυτό το αδιέξοδο;

Αυτή η κατάσταση είναι παρόμοια με εκείνη στην "αυγή" του Διαδικτύου, στα τέλη της δεκαετίας του 1970 έως τις αρχές της δεκαετίας του 1980. Ένα ανοιχτό οικοσύστημα προσέλκυσε επενδύσεις σε υποδομές και εφαρμογές, χωρίς κάποιος μεμονωμένος οργανισμός να αναπτυχθεί υπό μεγάλο κίνδυνο ή να κυριαρχεί στην αγορά. Με την πάροδο του χρόνου, αυτό οδήγησε στην εμφάνιση τεράστιων υποδομών και εφαρμογών Διαδικτύου (όπως το email) που θα μπορούσαν να επωφεληθούν μοναδικά από αυτή την υποδομή. Αυτό είχε ως συνέπεια να αναπτυχθεί επαρκής υποδομή, με συνέπεια την ραγδαία ανάπτυξή του Διαδικτύου, μέχρι τις αρχές της δεκαετίας του 1990.

Το Edge Computing μπορεί να ακολουθήσει έναν παρόμοιο, αλλά ταχύτερο, δρόμο προς την επιτυχία, καλλιεργώντας τη δημιουργία ενός ανοιχτού οικοσυστήματος Cloudlet. Αυτός είναι ο στόχος του OpenStack++ του OEC, ενός παραγώγου της δημοφιλούς πλατφόρμας υπολογιστικού νέφους OpenStack. Το "++" αναφέρεται στις μοναδικές επεκτάσεις που είναι απαραίτητες για περιβάλλοντα Cloudlet, συμπεριλαμβανομένης της ανακάλυψης Cloudlet, της άμεσης παροχής και της παράδοσης VM. Καθώς το Edge Computing μεγαλώνει, το OpenStack++ στοχεύει να γίνει μια ευρέως χρησιμοποιούμενη πλατφόρμα που θα

λειτουργεί καταλυτικά σε πολλές ιδιότητες και μη-ιδιότητες καινοτομίες α) σε υλικό, β) σε λογισμικό και γ) σε υπηρεσίες.

Η εμφάνιση της Υπολογιστικής Άκρου συμπίπτει με τρεις σημαντικές τάσεις στο τοπίο των υπολογιστών και των επικοινωνιών που, παρόλο που οδηγούνται από διακριτές δυνάμεις, συγκλίνουν. Μια τάση είναι η δικτύωση που ορίζεται από λογισμικό (Software-Defined Networking - SDN) και η αντίστοιχη έννοια της εικονικοποίησης λειτουργιών δικτύου (Network Function Virtualization - NFV), η οποία πρέπει να υποστηρίζεται από την ίδια εικονική υποδομή με την Υπολογιστική Άκρου. Μια δεύτερη τάση είναι το αυξανόμενο ενδιαφέρον για ασύρματα δίκτυα εξαιρετικά χαμηλής καθυστέρησης (ULL), για μια νέα κατηγορία απτών εφαρμογών. Η εξαιρετικά χαμηλή καθυστέρηση είναι ένα από τα προτεινόμενα χαρακτηριστικά για τα δίκτυα 5G. Το Edge Computing είναι ένας φυσικός συνεργάτης των 5G δικτύων, καθώς διασφαλίζει ότι η εξαιρετικά χαμηλή καθυστέρηση με το πρώτο hop δεν "πνίγεται" από την πολύ μεγαλύτερη καθυστέρηση των υπολοίπων hop έως στο cloud. Μια τρίτη τάση είναι η συνεχιζόμενη βελτίωση των υπολογιστικών δυνατοτήτων των φορητών συσκευών (smartphones κ.α.). Αν και αυτές οι συσκευές πράγματι αυξάνονται σε υπολογιστική ισχύ, οι βελτιώσεις τους μειώνονται από τις θεμελιώδεις προκλήσεις της κινητικότητας όπως το βάρος, το μέγεθος και η διάρκεια ζωής της μπαταρίας. Το σημείο αναφοράς για την Υπολογιστική Άκρου βρίσκεται επομένως στην υποδομή, όπου μπορεί να ενισχύσει τις δυνατότητες των κοντινών κινητών συσκευών και των αισθητήρων.

Είναι χρήσιμο, επίσης, να αναλογιστούμε την Υπολογιστική Άκρου, από ιστορικής άποψης. Από τη δεκαετία του 1960, η Πληροφορική εναλλάσσεται μεταξύ κεντροποίησης και αποκεντροποίησης (centralization & decentralization). Οι συγκεντρωτικές προσεγγίσεις της επεξεργασίας και του χρονο-καταμερισμού επικράτησαν τις δεκαετίες του 1960 και του 1970. Οι δεκαετίες του 1980 και του 1990, παρουσιάστηκε η απο-κεντροποίηση μέσω της αύξησης των προσωπικών υπολογιστών. Στα μέσα της δεκαετίας του 2000, η κεντροποιημένη προσέγγιση του υπολογιστικού νέφους άρχισε να ανέρχεται στην εξέχουσα θέση που κατέχει σήμερα. Η Υπολογιστική Άκρου αντιπροσωπεύει την τελευταία φάση αυτής της συνεχιζόμενης εξέλιξης.

Βιβλιογραφία

- [1] NSN (2012). "Signaling is Growing 50% Faster than Data Traffic," White Paper.
- [2] Patrick Kwadwo Agyapong, Mikio Iwamura, Dirk Staehle, Wolfgang Kiess, and Anass Benjebbour (2014). "Design Considerations for a 5G Network Architecture", *IEEE Communications Magazine*, pp 65-75.
- [3] E. Ternon (2014). "Database-Aided Energy Savings in Next Generation Dual Connectivity Heterogeneous Networks," *IEEE WCNC, Istanbul, Turkey*.
- [4] Najmul Hassan, Celimuge Wu and Kok-Lim Alvin Yau (2016). "Edge Computing in 5G: A Review", *IEEE Access*, volume 4, pp 1-16
- [5] Yaqiong Liu, Member, IEEE, Mugen Peng, Fellow, IEEE, Guochu Shou, Yudong Chen, and Siyu Chen (2020). "Towards Edge Intelligence: Multi-Access Edge Computing for 5G and Internet of Things", *IEEE Internet of Things Journal*, pp 1-21.
- [6] Z. Zhao, L. Guardalben, M. Karimzadeh, J. Silva, T. Braun, and S. Sargento, (2018). "Mobility prediction-assisted over-the-top edge prefetching for hierarchical VANETs," *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol. 36, no. 8, pp. 1786–1801.
- [7] Y. Mao, C. You, J. Zhang, K. Huang, and K. B. Letaief, (2017). "A survey on mobile edge computing: The communication perspective," *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, vol. 19, no. 4, pp. 2322–2358.
- [8] Popovski, P., Trillingsgaard, K.F., Simeone, O., Durisi, G. (2018). "5G Wireless Network Slicing for eMBB, URLLC, and mMTC: A Communication-Theoretic View.", *IEEE Access*, 6, 55765–55779.
- [9] Murtaza Ahmed Siddiqi, Heejung Yu and Jingon Joung (2019). "5G Ultra-Reliable Low-Latency Communication Implementation Challenges and Operational Issues with IoT Devices", *Electronics*, pp 1-18.
- [10] Hoymann, C.; Astely, D.; Stattin, M.; Wikström, G.; Cheng, J.F.; Höglund, A.; Frenne, M.; Blasco, R.; Huschke, J.; Gunnarsson, F. (2016). "LTE release 14 outlook.", *IEEE Commun. Mag.*, 54, 44–49.
- [11] Haseeb, M.; Hussain, H.I.; Slusarczyk, B.; Jermisittiparsert, K. (2019). "Industry 4.0: A Solution towards Technology Challenges of Sustainable Business Performance." *MDPI Soc. Sci.*, 8, 154.
- [12] Björnson, E.; Larsson, E.G.; Debbah, M. (2016). "Massive MIMO for maximal spectral efficiency: How many users and pilots should be allocated?", *IEEE Trans. Wirel. Commun.*, 15, 1293–1308.
- [13] Björnson, E.; Larsson, E.G.; Marzetta, T.L. (2016). "Massive MIMO: Ten myths and one critical question." *IEEE Commun. Mag.*, 54, 114–123.
- [14] Hassan, N.; Fernando, X. (2017). "Massive MIMO Wireless Networks: An Overview." *MDPI Electron.*, 6, 63.
- [15] M. A. Vouk, "Cloud computing — Issues, research and implementations," in *ITI 2008 - 30th International Conference on Information Technology Interfaces*, 2008.
- [16] Ola Hussein Abd Ali Alzuabidi, Ban M. Alameri, "Review of cloud computing in science, technology, and real life", Vol. 3, No. 2, October 2021, pp.139-147
- [17] D. Catteddu, "Cloud computing: Benefits, risks and recommendations for information security," in *Web Application Security*, Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2010, pp. 17–17.
- [18] Mahadev Satyanarayanan, Carnegie Mellon University, "The Emergence of Edge Computing", January 2017, pp. 30-38
- [19] M. Satyanarayanan, "Pervasive Computing: Vision and Challenges," *IEEE Personal Comm.*, vol. 8, no. 4, 2001, pp. 10–17.
- [20] M. Satyanarayanan et al., "The Case for VM-Based Cloudlets in Mobile Computing," *IEEE Pervasive Computing*, vol. 8, no. 4, 2009, 7. pp. 14–23.
- [21] K. Ha et al., "The Impact of Mobile Multimedia Applications on Data Center Consolidation," *Proc. 2013 IEEE Int'l Conf. Cloud Eng. (IC2E 13)*, 2013, pp. 166–176.
- [22] N. Davies et al., "Privacy Mediators: Helping IoT Cross the Chasm," *Proc. 17th Int'l Workshop Mobile Computing Systems and Applications (HotMobile 16)*, 2016, pp. 39–44.
- [23] Inés Sittón-Candanedo, Ricardo S. Alonso, Óscar García, Lilia Muñoz and Sara Rodríguez-González. "Edge Computing, IoT and Social Computing in Smart Energy Scenarios", July 2019. pp 1-4
- [24] García, Ó.; Alonso, R.S.; Prieto, J.; Corchado, J.M. Energy Efficiency in Public Buildings through Context-Aware Social Computing. *Sensors* 2017, 17, 826.
- [25] Sam Ingalls, "Edge Network: How to Build an Edge Computing Network", January 2022, "<https://www.serverwatch.com/guides/build-edge-network/>"
- [26] Win Systems, "Edge Computing: Know Your xPUs", January 2021, <https://www.winsystems.com/edge-computing-know-your-xpus/>
- [27] Hui Cai, "Time Sensitive Network Applied in 5G Edge Computing", *IEEE 802.1 China Mobile*, 2019.11

- [28] Ratish Kumar Mani, "The automation revolution: Drivers for precision network timing", January 2022, https://www.calnexsol.com/en/article-display/125-timing-and-sync/1616-industry-4-0-and-the-automation-revolution-drivers-for-precision-network-timing?qclid=Cj0KCQjw1ZeUBhDyARIsAOzAqQKXTBP1KQoCb7H56YsLTNSMEIFZo4cEglofnMuVVRWizq7Hb9jQIX0aAqigEALw_wcB
- [29] Dalia Adib, "Edge computing: Changing the balance of energy in networks", December 2017, <https://stlpartners.com/articles/edge-computing/edge-computing-changing-the-balance-of-energy-in-networks/>
- [30] M. Satyanarayanan, V. Bahl, R. Caceres, and N. Davies, "The case for vm-based Cloudlets in mobile computing," *IEEE pervasive Computing*, 2009.
- [31] B. Shi, J. Yang, Z. Huang, and P. Hui, "Offloading guidelines for augmented reality applications on wearable devices," in *Proceedings of the 23rd ACM international conference on Multimedia*. ACM, 2015, pp. 1271–1274.
- [32] K. Wang, K. Yang, and C. S. Magurawalage, "Joint energy minimization and resource allocation in c-ran with mobile cloud," *IEEE Transactions on Cloud Computing*, vol. 6, no. 3, pp. 760–770, 2016.
- [33] X. Chen, L. Jiao, W. Li, and X. Fu, "Efficient multi-user computation offloading for mobile-edge cloud computing," *IEEE/ACM Transactions on Networking*, vol. 24, no. 5, pp. 2795–2808, October 2016.
- [34] L. Tong, Y. Li, and W. Gao, "A hierarchical edge cloud architecture for mobile computing," in *IEEE INFOCOM 2016-The 35th Annual IEEE International Conference on Computer Communications*. IEEE, 2016, pp. 1–9.
- [35] Yaqiong Liu, Mugen Peng, Guochu Shou, Yudong Chen, and Siyu Chen, "Towards Edge Intelligence: Multi-Access Edge Computing for 5G and Internet of Things" p1-21 Aug. 2020
- [36] B. Yang, W. K. Chai, G. Pavlou, and K. V. Katsaros, "Seamless support of low latency mobile applications with nfv-enabled mobile edge-cloud," in *2016 5th IEEE International Conference on Cloud Networking (Cloudnet)*. IEEE, 2016, pp. 136–141.
- [37] D. Grewe, M. Wagner, M. Arumaithurai, I. Psaras, and D. Kutscher, "Information-centric mobile edge computing for connected vehicle environments: Challenges and research directions," in *Proceedings of the Workshop on Mobile Edge Communications*. ACM, 2017, pp. 7–12.
- [38] S. Peng, J. O. Fajardo, P. S. Khodashenas, B. Blanco, F. Liberal, C. Ruiz, C. Turyagyenda, M. Wilson, and S. Vadgama, "Qoe-oriented mobile edge service management leveraging sdn and nfv," *Mobile Information Systems*, vol. 2017, 2017.
- [39] A. Huang, N. Nikaiein, T. Stenbock, A. Ksentini, and C. Bonnet, "Low latency mec framework for sdn-based lte/lte-a networks," in *2017 IEEE International Conference on Communications (ICC)*. IEEE, 2017, pp. 1–6.
- [40] J. Liu, J. Wan, D. Jia, B. Zeng, D. Li, C.-H. Hsu, and H. Chen, "High- efficiency urban traffic management in context-aware computing and 5g communication," *IEEE Communications Magazine*, vol. 55, no. 1, pp. 34–40, 2017.
- [41] Y. He, C. Liang, Z. Zhang, F. R. Yu, N. Zhao, H. Yin, and Y. Zhang, "Resource allocation in software-defined and information-centric vehicular networks with mobile edge computing," in *2017 IEEE 86th Vehicular Technology Conference (VTC-Fall)*. IEEE, 2017, pp. 1–5.
- [42] Y. Zhou, F. R. Yu, J. Chen, and Y. Kuo, "Resource allocation for information-centric virtualized heterogeneous networks with in-network caching and mobile edge computing," *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 66, no. 12, pp. 11 339–11 351, 2017.
- [43] N. Alliance, "Description of network slicing concept," *NGMN 5G P*, vol. 1, p. 1, 2016.
- [44] K. Katsalis, N. Nikaiein, E. Schiller, A. Ksentini, and T. Braun, "Network slices toward 5g communications: Slicing the lte network," *IEEE Communications Magazine*, vol. 55, no. 8, pp. 146–154, 2017.
- [45] T. Taleb, K. Samdanis, B. Mada, H. Flinck, S. Dutta, and D. Sabella, "On multi-access edge computing: A survey of the emerging 5g network edge cloud architecture & orchestration," *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, vol. 19, no. 3, pp. 1657–1681, thirdquarter 2017.
- [46] S. Nunna, A. Kousaridas, M. Ibrahim, M. Dillinger, C. Thuemmler, H. Feussner, and A. Schneider, "Enabling real-time context-aware collaboration through 5g and mobile edge computing," in *International Conference on Information Technology New Generations*, 2015, pp. 601–605.
- [47] P. Schulz, M. Matthe, H. Klessig, M. Simsek, G. Fettweis, J. Ansari, S. A. Ashraf, B. Almeroth, J. Voigt, I. Riedel et al., "Latency critical iot applications in 5g: Perspective on the design of radio interface and network architecture," *IEEE Commun. Mag.*, vol. 55, no. 2, pp. 70–78, Feb. 2017.
- [48] A. Alshuwaili and O. Simeone, "Optimal resource allocation for mobile edge computing-based augmented reality applications," *IEEE Wireless Communication Letters*, vol. PP, no. 99, 2016.
- [49] A. Al-Shuwaili and O. Simeone, "Energy-efficient resource allocation for mobile edge computing-based augmented reality applications," *IEEE Wireless Communications Letters*, vol. PP, no. 99, pp. 1–1, 2017.

- [50] J. Dolezal, Z. Becvar, and T. Zeman, "Performance evaluation of computation offloading from mobile device to the edge of mobile network," in *2016 IEEE Conference on Standards for Communications and Networking (CSCN)*, Oct 2016, pp. 1–7.
- [51] I. Parvez, A. Rahmati, I. Guvenc, A. I. Sarwat, and H. Dai, "A survey on low latency towards 5g: Ran, core network and caching solutions," *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, pp. 1–1, 2018.
- [52] M. L. Raagaard, P. Pop, M. Gutiérrez, and W. Steiner, "Runtime reconfiguration of time-sensitive networking (tsn) schedules for fog computing," in *2017 IEEE Fog World Congress (FWC)*, 2017, pp. 1–6.
- [53] P. Pop, M. L. Raagaard, M. Gutiérrez, and W. Steiner, "Enabling fog computing for industrial automation through time-sensitive networking (tsn)," *IEEE Communications Standards Magazine*, vol. 2, no. 2, pp. 55–61, 2018.
- [54] Z. Zhang, W. Zhang, and F. Tseng, "Satellite mobile edge computing: Improving qos of high-speed satellite-terrestrial networks using edge computing techniques," *IEEE Network*, vol. 33, no. 1, pp. 70–76, 2019.
- [55] Y. Wang, J. Yang, X. Guo, and Z. Qu, "A game-theoretic approach to computation offloading in satellite edge computing," *IEEE Access*, vol. 8, pp. 12 510–12 520, 2020.
- [56] "Mobile edge computing: A survey on architecture and computation offloading," *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, vol. 19, no. 3, pp. 1628–1656, Third Quarter 2017.
- [57] V. Frascolla, F. Miatton, G. K. Tran, K. Takinami, A. D. Domenico, E. C. Strinati, K. Koslowski, T. Haustein, K. Sakaguchi, S. Barbarossa, and S. Barberis, "5g-miedge: Design, standardization and deployment of 5g phase ii technologies: Mec and mmwaves joint development for tokyo 2020 olympic games," in *2017 IEEE Conference on Standards for Communications and Networking (CSCN)*, Sep. 2017.
- [58] S. M. R. Islam, N. Avazov, O. A. Dobre, and K. Kwak, "Power-domain non-orthogonal multiple access (NOMA) in 5G systems: Potentials and challenges," *IEEE Communications Surveys Tutorials*, vol. 19, no. 2, pp. 721–742, Second Quarter 2017.
- [59] L. Dai, B. Wang, Z. Ding, Z. Wang, S. Chen, and L. Hanzo, "A survey of non-orthogonal multiple access for 5G," *IEEE Communications Surveys Tutorials*, vol. 20, no. 3, pp. 2294–2323, Third Quarter 2018.
- [60] Z. Ding, X. Lei, G. K. Karagiannidis, R. Schober, J. Yuan, and V. K. Bhargava, "A survey on non-orthogonal multiple access for 5G networks: Research challenges and future trends," *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol. 35, no. 10, pp. 2181–2195, Oct. 2017.
- [61] Z. Ding, P. Fan, and H. V. Poor, "Impact of non-orthogonal multiple access on the offloading of mobile edge computing," *IEEE Transactions on Communications*, vol. 67, no. 1, pp. 375–390, Jan. 2019.
- [62] T. X. Tran, A. Hajisami, P. Pandey, and D. Pompili, "Collaborative mobile edge computing in 5G networks: New paradigms, scenarios, and challenges," *IEEE Communications Magazine*, vol. 55, no. 4, pp. 54–61, Apr. 2017.
- [63] Z. Ding, P. Fan, and H. V. Poor, "Impact of non-orthogonal multiple access on the offloading of mobile edge computing," *IEEE Transactions on Communications*, vol. 67, no. 1, pp. 375–390, Jan. 2019.
- [64] F. Wang, J. Xu, and Z. Ding, "Optimized multiuser computation offloading with multi-antenna NOMA," in *2017 IEEE Globecom Work-shops (GC Wkshps)*, Singapore, Dec. 2017.
- [65] Z. Ding, J. Xu, O. A. Dobre, and H. V. Poor, "Joint power and time allocation for NOMAMEC offloading," *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 68, no. 6, pp. 6207–6211, Jun. 2019.
- [66] Z. Ding, D. W. K. Ng, R. Schober, and H. V. Poor, "Delay minimization for NOMA-MEC offloading," *IEEE Signal Processing Letters*, vol. 25, no. 12, pp. 1875–1879, Dec. 2018.
- [67] A. Kiani and N. Ansari, "Edge computing aware NOMA for 5G networks," *IEEE Internet of Things Journal*, vol. 5, no. 2, pp. 1299–1306, Apr. 2018.
- [68] Q.-V. Pham, T. H. Nguyen, Z. Han, and W.-J. Hwang, "Coalitional games for computation offloading in NOMA-enabled multi-access edge computing," *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2019, in press.
- [69] F. Fang, Y. Xu, Z. Ding, C. Shen, M. Peng, and G. K. Karagiannidis, "Optimal task partition and power allocation for NOMA enabled multiuser mobile edge computing," in *IEEE Globecom 2019, Hawaii, USA, Dec. 2019*, accepted.
- [70] Y. Wu, L. P. Qian, K. Ni, C. Zhang, and X. Shen, "Delay-minimization nonorthogonal multiple access enabled multi-user mobile edge computation offloading," *IEEE Journal of Selected Topics in Signal Processing*, vol. 13, no. 3, pp. 392–407, Jun. 2019.
- [71] X. Cao, F. Wang, J. Xu, R. Zhang, and S. Cui, "Joint computation and communication cooperation for energy-efficient mobile edge computing," *IEEE Internet of Things Journal*, vol. 6, no. 3, pp. 4188–4200, Jun. 2019.
- [72] L. P. Qian, A. Feng, Y. Huang, Y. Wu, B. Ji, and Z. Shi, "Optimal SIC ordering and computation resource allocation in MEC-aware NOMA NB-IoT networks," *IEEE Internet Things*, vol. 6, no. 2, pp. 2806–2816, Apr. 2019.
- [73] X. Zhou, R. Zhang, and C. K. Ho, "Wireless information and power transfer: Architecture design and rate-energy tradeoff," *IEEE Transactions on Communications*, vol. 61, no. 11, pp. 4754–4767, Nov. 2013.

- [74] Y. Liu, Y. Zhang, R. Yu, and S. Xie, "Integrated energy and spectrum harvesting for 5G wireless communications," *IEEE Network*, vol. 29, no. 3, pp. 75–81, May 2015.
- [75] M. Imran, L. U. Khan, I. Yaqoob, E. Ahmed, M. A. Qureshi, and A. Ahmed, "Energy harvesting in 5G networks: Taxonomy, requirements, challenges, and future directions," *ArXiv*, vol. abs/1910.00785, 2019.
- [76] W. Chen, D. Wang, and K. Li, "Multi-user multi-task computation offloading in green mobile edge cloud computing," *IEEE Transactions on Services Computing*, vol. 12, no. 5, pp. 726–738, Sep. 2019.
- [77] G. Zhang, W. Zhang, Y. Cao, D. Li, and L. Wang, "Energy-delay tradeoff for dynamic offloading in mobile-edge computing system with energy harvesting devices," *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, vol. 14, no. 10, pp. 4642–4655, Oct. 2018.
- [78] M. Min, L. Xiao, Y. Chen, P. Cheng, D. Wu, and W. Zhuang, "Learning-based computation offloading for IoT devices with energy harvesting," *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 68, no. 2, pp. 1930–1941, Feb. 2019.
- [79] S. Bi and Y. J. Zhang, "Computation rate maximization for wireless powered mobile-edge computing with binary computation offloading," *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol. 17, no. 6, pp. 4177–4190, Jun. 2018.
- [80] Y. Dong, Z. Chen, and P. Fan, "Timely two-way data exchanging in unilaterally powered fog computing systems," *IEEE Access*, vol. 7, pp. 21 103–21 117, Feb. 2019.
- [81] L. Ji and S. Guo, "Energy-efficient cooperative resource allocation in wireless powered mobile edge computing," *IEEE Internet of Things Journal*, vol. 6, no. 3, pp. 4744–4754, Jun. 2019.
- [82] D. Wu, F. Wang, X. Cao, and J. Xu, "Wireless powered user cooperative computation in mobile edge computing systems," in *2018 IEEE Globecom Workshops (GC Wkshps)*, Abu Dhabi, United Arab Emirates, Dec. 2018.
- [83] F. Zhou, Y. Wu, R. Q. Hu, and Y. Qian, "Computation rate maximization in UAV-enabled wireless-powered mobile-edge computing systems," *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol. 36, no. 9, pp. 1927–1941, Sep. 2018.
- [84] H. Zheng, K. Xiong, P. Fan, Z. Zhong, and K. B. Letaief, "Fog-assisted multiuser SWIPT networks: Local computing or offloading," *IEEE Internet of Things Journal*, vol. 6, no. 3, pp. 5246–5264, Jun. 2019.
- [85] H. Wu, L. Chen, C. Shen, W. Wen, and J. Xu, "Online geographical load balancing for energy-harvesting mobile edge computing," in *2018 IEEE International Conference on Communications (ICC)*, Kansas City, MO, USA, May 2018.
- [86] F. Guo, L. Ma, H. Zhang, H. Ji, and X. Li, "Joint load management and resource allocation in the energy harvesting powered small cell networks with mobile edge computing," in *2018 IEEE Conference on Computer Communications Workshops (INFOCOM WKSHPS)*, Honolulu, HI, USA, Apr. 2018.
- [119] N. Janatian, I. Stupia, and L. Vandendorpe, "Optimal resource allocation in ultra-low power fog-computing SWIPT-based networks," in *2018 IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC)*, Barcelona, Spain, Apr. 2018.
- [120] L. Liu, Z. Chang, and X. Guo, "Socially aware dynamic computation offloading scheme for fog computing system with energy harvesting devices," *IEEE Internet of Things Journal*, vol. 5, no. 3, pp. 1869–1879, Jun. 2018.
- [87] F. Zhou, Y. Wu, H. Sun, and Z. Chu, "Uav-enabled mobile edge computing: Offloading optimization and trajectory design," in *2018 IEEE International Conference on Communications (ICC)*, Kansas City, MO, USA, May 2018.
- [88] Y. Du, K. Yang, K. Wang, G. Zhang, Y. Zhao, and D. Chen, "Joint resources and workflow scheduling in UAV-enabled wirelessly-powered mec for IoT systems," *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 68, no. 10, pp. 10 187–10 200, Oct. 2019.
- [89] L. Fan, W. Yan, X. Chen, Z. Chen, and Q. Shi, "An energy efficient design for UAV communication with mobile edge computing," *China Communications*, vol. 16, no. 1, pp. 26–36, Jan. 2019.
- [90] Q. Hu, Y. Cai, G. Yu, Z. Qin, M. Zhao, and G. Y. Li, "Joint offloading and trajectory design for UAV-enabled mobile edge computing systems," *IEEE Internet of Things Journal*, vol. 6, no. 2, pp. 1879–1892, Apr. 2019.
- [91] X. Cao, J. Xu, and R. Zhang, "Mobile edge computing for cellular-connected UAV: Computation offloading and trajectory optimization," in *2018 IEEE 19th International Workshop on Signal Processing Advances in Wireless Communications (SPAWC)*, Kalamata, Greece, Jun. 2018.
- [92] T. Bai, J. Wang, Y. Ren, and L. Hanzo, "Energy-efficient computation offloading for secure UAV-edge-computing systems," *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 68, no. 6, pp. 6074–6087, Jun. 2019.
- [93] O. Bakkouche, T. Taleb, M. Bagaa, and K. Samdanis, "Edge cloud resource-aware flight planning for unmanned aerial vehicles," in *2019 IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC)*, Apr. 2019, pp. 1–7.

- [94] P. Rost, C. J. Bernardos, A. D. Domenico, M. D. Girolamo, M. Lalam, A. Maeder, D. Sabella, and D. Wbben, "Cloud technologies for flexible 5G radio access networks," *IEEE Communications Magazine*, vol. 52, no. 5, pp. 68–76, May 2014.
- [109] X. Wang, K. Wang, S. Wu, S. Di, H. Jin, K. Yang, and S. Ou, "Dynamic resource scheduling in mobile edge cloud with cloud radio access network," *IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems*, vol. 29, no. 11, pp. 2429–2445, Nov. 2018.
- [95] S. Sardellitti, G. Scutari, and S. Barbarossa, "Joint optimization of radio and computational resources for multicell mobile-edge computing," *IEEE Transactions on Signal and Information Processing over Networks*, vol. 1, no. 2, pp. 89–103, Jun. 2015.
- [96] A. Al-Shuwaili, O. Simeone, A. Bagheri, and G. Scutari, "Joint uplink/downlink optimization for backhaul-limited mobile cloud computing with user scheduling," *IEEE Transactions on Signal and Information Processing over Networks*, vol. 3, no. 4, pp. 787–802, Dec. 2017.
- [97] K. Zhang, Y. Mao, S. Leng, Q. Zhao, L. Li, X. Peng, L. Pan, S. Maharjan, and Y. Zhang, "Energy-efficient offloading for mobile edge computing in 5G heterogeneous networks," *IEEE Access*, vol. 4, pp. 5896–5907, Aug. 2016.
- [98] J. Zhang, W. Xia, F. Yan, and L. Shen, "Joint computation offloading and resource allocation optimization in heterogeneous networks with mobile edge computing," *IEEE Access*, vol. 6, pp. 19 324–19 337, Mar. 2018.
- [99] H. Wang, S. Chen, M. Ai, and H. Xu, "Localized mobility management for 5G ultra dense network," *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 66, no. 9, pp. 8535–8552, Sep. 2017.
- [100] Y. Sun, S. Zhou, and J. Xu, "Emm: Energy-aware mobility management for mobile edge computing in ultra dense networks," *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol. 35, no. 11, pp. 2637–2646, Nov. 2017.
- [101] O. Semiari, W. Saad, M. Bennis, and B. Maham, "Caching meets millimeter wave communications for enhanced mobility management in 5G networks," *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol. 17, no. 2, pp. 779–793, Feb. 2018.
- [102] A. Prasad, O. Tirkkonen, P. Lundn, O. N. C. Yilmaz, L. Dalsgaard, and C. Wijting, "Energy-efficient inter-frequency small cell discovery techniques for LTE-advanced heterogeneous network deployments," *IEEE Communications Magazine*, vol. 51, no. 5, pp. 72–81, May 2013.
- [103] D. Xenakis, N. Passas, L. Merakos, and C. Verikoukis, "Mobility management for femtocells in LTE-advanced: Key aspects and survey of handover decision algorithms," *IEEE Communications Surveys Tutorials*, vol. 16, no. 1, pp. 64–91, First Quarter 2014.
- [104] F. Giust, L. Cominardi, and C. J. Bernardos, "Distributed mobility management for future 5G networks: overview and analysis of existing approaches," *IEEE Communications Magazine*, vol. 53, no. 1, pp. 142–149, Jan. 2015.
- [105] H. Zhang, N. Liu, X. Chu, K. Long, A. Aghvami, and V. C. M. Leung, "Network slicing based 5G and future mobile networks: Mobility, resource management, and challenges," *IEEE Communications Magazine*, vol. 55, no. 8, pp. 138–145, Aug. 2017.
- [106] G. Qiao, S. Leng, K. Zhang, and K. Yang, "Joint deployment and mobility management of energy harvesting small cells in heterogeneous networks," *IEEE Access*, vol. 5, pp. 183–196, Feb. 2017.
- [107] K. Wang, P. Huang, K. Yang, C. Pan, and J. Wang, "Unified offloading decision making and resource allocation in ME-RAN," *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 68, no. 8, pp. 8159–8172, Aug. 2019.
- [108] D. Lopez-Perez, I. Guvenc, and X. Chu, "Mobility management challenges in 3GPP heterogeneous networks," *IEEE Communications Magazine*, vol. 50, no. 12, pp. 70–78, Dec. 2012.
- [109] Q.-V. Pham, L. B. Le, S.-H. Chung, and W.-J. Hwang, "Mobile edge computing with wireless backhaul: Joint task offloading and resource allocation," *IEEE Access*, vol. 7, pp. 16 444–16 459, Jan. 2019.
- [110] Quoc-Viet Pham, Fang Fang, Vu Nguyen Ha, Md. Jalil Piran, Mai Le, Long Bao Le, Won-Joo Hwang, and Zhiguo Ding, "A Survey of Multi-Access Edge Computing in 5G and Beyond: Fundamentals, Technology Integration, and State-of-the-Art", January 2020, pp 1-35
- [111] GreyB Services, "Top 10 Companies Leading the Research in Edge Computing", May 2022, "<https://www.greyb.com/edge-computing-companies/>"