



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΑΤΤΙΚΗΣ
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ ΚΑΙ
ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Η Χρήση Τεχνολογιών Οπτικού Fronthaul για Εφαρμογές
Υπολογιστικής Άκρου Εστιάζοντας στα Δίκτυα 5g

Ελένη Παραμπάτη
A.M. 161190

Εισηγητής: Αντώνιος Μπόγρης, Καθηγητής

Η Χρήση Τεχνολογιών Οπτικού Fronthaul για Εφαρμογές Υπολογιστικής Άκρου Εστιάζοντας στα Δίκτυα 5G

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**Η ΧΡΗΣΗ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΩΝ ΟΠΤΙΚΟΥ FRONTHAUL ΓΙΑ ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ
ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΗΣ ΆΚΡΟΥ ΕΣΤΙΑΖΟΝΤΑΣ ΣΤΑ ΔΙΚΤΥΑ 5G**

**Ελένη Παραμπάτη
Α.Μ. 161190**

Εισηγητής:

Αντώνιος Μπόγρης, Καθηγητής

Εξεταστική Επιτροπή:

Νικόλαος Μυριδάκης, Επίκουρος Καθηγητής
Παναγιώτης Καρκαζής, Αναπληρωτής Καθηγητής

Ημερομηνία εξέτασης: 21/03/2024

ΔΗΛΩΣΗ ΣΥΓΓΡΑΦΕΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

«Βεβαιώνω ότι είμαι συγγραφέας αυτής της Διπλωματικής εργασίας και 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».

Ο/Η Δηλών/ούσα

Παραμπάτη Ελένη

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Η παρούσα διπλωματική εργασία ολοκληρώθηκε μετά από επίμονες προσπάθειες, σε ένα ενδιαφέρον γνωστικό αντικείμενο, όπως αυτό του οπτικού fronthaul. Την προσπάθειά μου αυτή υποστήριξε ο επιβλέπων καθηγητής μου κύριος Αντώνης Μπόγρη, τον οποίο θα ήθελα να ευχαριστήσω για τις πολύτιμες γνώσεις που μου μετέδωσε καθ' όλη τη διάρκεια των προπτυχιακών μου σπουδών.

Ακόμα θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένειά μου για τη συμπαράσταση κατά τη διάρκεια των σπουδών μου καθώς και την Ζινίσα Μαρία φίλη και συμφοιτήτρια μου.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η παρούσα διπλωματική εργασία ασχολείται με τη χρήση τεχνολογιών οπτικού fronthaul για εφαρμογές υπολογιστικής άκρου, εστιάζοντας στα δίκτυα 5G και των εφαρμογών τους στην τέταρτη βιομηχανική επανάσταση. Στο πλαίσιο της εργασίας θα πραγματοποιηθεί βιβλιογραφική μελέτη των σύγχρονων τάσεων στο δίκτυο 5G αλλά και στα δίκτυα οπτικών επικοινωνιών που το υποστηρίζουν. Έπειτα θα αναλυθεί η αρχιτεκτονική c-RAN, συγκεκριμένα τα στοιχεία, η δομή αλλά και τα πλεονεκτήματα της, αναφέροντας τις σύγχρονες τάσεις εξέλιξής της. Τέλος θα μελετηθεί το πώς το mobile EC μπορεί να εξυπηρετηθεί από τεχνολογίες optical front-hauling σε περιβάλλοντα όπου το C-RAN μετασχηματίζεται σε edge-cloud υποδομή.

ABSTRACT

This thesis deals with the use of optical fronthaul technologies for EC applications, focusing on 5G networks and their applications in the fourth industrial revolution. As part of the work, a bibliographic study of the current trends in the 5G network as well as the optical communications networks that support it will be carried out. Then the c-RAN architecture will be analyzed, specifically its components, structure and advantages, mentioning its modern development trends. Finally, it will be studied how mobile EC can be served by optical front-hauling technologies in environments where C-RAN is transformed into an edge-cloud infrastructure.

Η Χρήση Τεχνολογιών Οπτικού Fronthaul για Εφαρμογές Υπολογιστικής Άκρου Εστιάζοντας στα Δίκτυα 5G

ΕΠΙΣΤΗΜΟΝΙΚΗ ΠΕΡΙΟΧΗ: Αρχιτεκτονική Ηλεκτρονικών Υπολογιστών
ΛΕΞΕΙΣ ΚΛΕΙΔΙΑ: επεξεργαστής, λανθάνουσα μνήμη, διακοπές, assembly, DMA

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΠΕΡΙΛΗΨΗ	8
ABSTRACT	9
ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΣΧΗΜΑΤΩΝ	12
ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ	13
ΣΥΝΤΟΜΟΓΡΑΦΙΕΣ	14
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 ΤΑ ΔΙΚΤΥΑ 5G ΚΑΙ ΟΙ ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΤΟΥΣ	16
1.1 Η Έννοια των Έξυπνων Πόλεων	16
1.2 Ευφυή Συστήματα Μεταφορών Αναδρομή.....	18
1.3 Έξυπνα Ενεργειακά Δίκτυα	20
1.4 Υπηρεσίες Δημόσιας Ασφάλειας και Έκτακτης Ανάγκης.....	22
1.5 Φροντίδα Υγείας	25
1.6 Περιβαλλοντική Παρακολούθηση και Διαχείριση.....	27
1.7 Έξυπνα Κτίρια και Υποδομές	30
1.8 5G Σύμπραξη Δημόσιου και Ιδιωτικού Τομέα	33
1.9 Verticals.....	35
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΗ ΑΚΡΟΥ ΚΑΙ ΝΕΦΟΥΣ	37
2.1 Υπολογιστική άκρου και η Σημασία της στα Δίκτυα 5G	37
2.2 Υπολογιστική νέφους και η Σημασία της στα Δίκτυα 5G	39
2.3 Ομοιότητες και Διαφορές.....	41
2.4 Ανάγκες από Πλευρά Δικτύωσης	43
2.4.1. Διασυνδέσεις για Edge και Cloud Computing	44
2.4.2. Μετάδοση υψηλής ταχύτητας για Edge και Cloud Computing.....	47
2.4.3. Επίτευξη μετάδοσης υψηλής ταχύτητας για Edge και Cloud Computing.....	49
2.5. Other Networking Needs for Edge and Cloud Computing.....	50
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 OPTICAL FRONTHAUL ΓΙΑ 5G	54
3.1. Optical Fronthaul για 5G	54
3.1.1. Βασικά χαρακτηριστικά και πλεονεκτήματα του Optical Fronthaul	54
3.1.2. Αρχιτεκτονικές του Optical Fronthaul	56
3.1.3. Τεχνολογίες για Optical Fronthaul	60
3.1.4. Centralized RAN (CRAN)	63
3.1.5. Distributed Radio over Fiber (D-ROF)	65
3.1.6. Analog Radio over Fiber (A-ROF)	67

3.2. CPRI και eCPRI	69
3.2.1. Εισαγωγή στο CPRI και eCPRI	69
3.2.2. Διεπαφή και λειτουργία CPRI	71
3.2.3. Διεπαφή και λειτουργία eCPRI	74
3.2.4. Comparison between CPRI and eCPRI.....	76
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4. ΕΜΠΕΙΡΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΣΧΕΤΙΚΩΝ ΕΡΕΥΝΩΝ	78
4.1. Ενσωμάτωση Παθητικών Οπτικών Δικτύων και Mobile EC σε δίκτυα 5G και Πέραν Αυτού.....	78
4.2. Κριτική εξέταση του σχεδιασμού διάταξης χαμηλής καθυστέρησης σε οπτικά δίκτυα Fronthaul 5G	86
4.3. Δίκτυο ραδιοπρόσβασης με τεχνολογία υπολογιστικής ακρο και FSO Fronthaul και Backhaul σε UAV	90
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ	95
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	98

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΣΧΗΜΑΤΩΝ

Σχήμα 1: Αρχιτεκτονική δικτύου 5G σε edge computing. Πηγή: (Li & Ye, 2021)	37
Σχήμα 2: Αρχιτεκτονική δικτύου 5G που εφαρμόζει Cloud/ Mobile Edge Computing (MEC) Πηγή: (Ruiz et al., 2018)	40
Σχήμα 3: Συνεργατικό πλαίσιο cloud-edge computing. Πηγή: (Xu et al., 2020).....	44
Σχήμα 4: Αρχιτεκτονική C-RAN.Πηγή: (Ha et al., 2015)	57
Σχήμα 5: Αρχιτεκτονική συστήματος Radio-over-fiber (RoF). Πηγή: (He et al., 2020).....	59
Σχήμα 6: Αρχιτεκτονική Centralized-RAN. Πηγή: (Ha et al., 2015).....	63
Σχήμα 7: Αρχιτεκτονική Digital - Radio-over-Fiber (D-RoF) σήματος. Πηγή: (Ha et al., 2015)	65
Σχήμα 8: Διάγραμμα του τρόπου μετάδοσης του Digital - Radio-over-Fiber (D-RoF) σήματος.Πηγή: (Ha et al., 2015).....	66
Σχήμα 9: Διάγραμμα του τρόπου μετάδοσης του Analog - Radio-over-Fiber (D-RoF) σήματος.Πηγή: (Ha et al., 2015).....	68
Σχήμα 10: Διεπαφή Common Public Radio Interface (CPRI. Πηγή: (Cai et al., 2018).....	72
Σχήμα 11: Αρχιτεκτονική υπολογιστικής άκρου πολλαπλής πρόσβασης (MEC).....	80
Σχήμα 12: Περιπτώσεις χρήσης PON-MEC.....	82
Σχήμα 13: Πλαίσιο FedRL πάνω από ομοσπονδιακά PON-MEC για υποστήριξη επικοινωνιών H2M/R χαμηλής καθυστέρησης.....	83
Σχήμα 14: Απεικόνιση EC-RAN με συνδέσμους FSO-FnB σε UAV.....	92

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ

Πίνακας 1: Πίνακας συνοπτικής σύγκρισης μεταξύ CPRI και eCPRI	77
--	----

ΣΥΝΤΟΜΟΓΡΑΦΙΕΣ

5G-PPP	5G Public-Private Partnership
AAU	Active antenna units
AR/VR	Augmented reality/virtual reality
A-ROF	Analog Radio Over Fiber
BBU	Baseband unit
BBUs	Baseband Processing Units
CPRI	Common Public Radio Interface
CPU	Central processing unit
CRAN	Centralized RAN
CWDM	Coarse Wavelength Division Multiplexing
DAS	Dual Attachment Station
D-ROF	Distributed Radio Over Fiber
DU	Distributed units
DWDM	Dense Wavelength Division Multiplexing
ECPRI	Enhanced Common Public Radio Interface
EC-RAN	Edge cloud radio access network
eMBB	Enhanced mobile broadband
ETSI	European Telecommunications Standards Institute
EV	Electrical Vehicle
FedRL	Federated reinforcement learning
FnB	Fiber-optic backhaul
FSO	Free-space optical
FTTH	Fiber-to-the-home
GCS	Ground control station
GPS	Global Positioning System
H2M/R	Human-to-machine/robot
HVAC	Heating, ventilation, and air conditioning
IoT	Internet of Things
ITS	Intelligent Transport Systems
JTAG	Joint Test Action Group
MEC	Mobile EC
MIMO	Multiple-input and multiple-output

mMTC	Massive machine type communication
NFV	Network function virtualization
NFV	Network functions virtualization
NL-wPSO	Nonlinear decreasing inertia weight particle swarm optimization
OFDM	Orthogonal frequency division multiplexing
PON	Passive optical networks
PSO	Particle swarm optimization
QoS	Quality of service
RAN	Radio Access Networks
RAT	Multi-radio access technology
RNC	Radio network controller
RoE	Radio Over Ethernet
RRU	Remote Radio Units
SDN	Software-defined networking
SDN	Software-defined networking
TDM	Time Division Multiplexing
TWDM	Time and Wavelength Division Multiplexing
UAV	Unmanned aerial vehicles
UE	User equipment
uRLLC	Ultra reliable & low latency communication
V2X	Vehicle-to-everything
WDM	Wavelength division multiplexing

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

ΤΑ ΔΙΚΤΥΑ 5G ΚΑΙ ΟΙ ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΤΟΥΣ

Η ταχεία ανάπτυξη της τεχνολογίας ασύρματων επικοινωνιών άνοιξε το δρόμο για την εισαγωγή των δικτύων 5G, της πέμπτης γενιάς τεχνολογίας κυψελοειδών δικτύων (Agyarong et al., 2018). Το 5G διακρίνεται για τους σημαντικά υψηλότερους ρυθμούς μετάδοσης δεδομένων, τη χαμηλή καθυστέρηση και τη βελτιωμένη χωρητικότητα σε σύγκριση με τους προκατόχους του. Σε αυτήν την εποχή των έξυπνων πόλεων, όπου η απρόσκοπτη ενσωμάτωση της τεχνολογίας φέρνει επανάσταση στην αστική ζωή, τα δίκτυα 5G διαδραματίζουν κρίσιμο ρόλο στη βελτίωση της συνολικής αποτελεσματικότητας και λειτουργίας αυτών των διασυνδεδεμένων περιβαλλόντων (Gurta & Jha, 2015). Αυτή η εκτεταμένη ανάλυση εμβαθύνει στην έννοια των έξυπνων πόλεων, στα χαρακτηριστικά των δικτύων 5G που τα καθιστούν ιδανικά για τέτοιες εφαρμογές και σε ορισμένες από τις κύριες εφαρμογές των δικτύων 5G σε έξυπνες πόλεις (Minoli & Occhiogrosso, 2019)..

1.1 Η Έννοια των Έξυπνων Πόλεων

Μια έξυπνη πόλη (Yin et al., 2015) είναι μια έννοια που περιλαμβάνει τη χρήση προηγμένης τεχνολογίας, ανάλυσης δεδομένων και καινοτόμων λύσεων για τη βελτίωση της ποιότητας ζωής των πολιτών της, την προώθηση της βιώσιμης ανάπτυξης και τη βελτίωση της αποτελεσματικότητας των αστικών υπηρεσιών. Αυτό επιτυγχάνεται μέσω της ενοποίησης συσκευών, αισθητήρων και δικτύων του Διαδικτύου των Πραγμάτων (IoT), τα οποία συλλέγουν και αναλύουν δεδομένα από διάφορες πηγές, συμπεριλαμβανομένων συστημάτων μεταφορών, ενεργειακών δικτύων και δημόσιων υπηρεσιών (Ereimia et al., 2017). Αυτά τα δεδομένα χρησιμοποιούνται στη συνέχεια για τη λήψη τεκμηριωμένων αποφάσεων σχετικά με τις υποδομές, τις δημόσιες υπηρεσίες και την περιβαλλοντική διαχείριση της πόλης, με αποτέλεσμα ένα πιο αποτελεσματικό και ανταποκρινόμενο αστικό περιβάλλον (Panwar et al., 2016).

Τα δίκτυα 5G είναι καθοριστικής σημασίας για την αξιοποίηση του πλήρους δυναμικού των έξυπνων πόλεων, καθώς προσφέρουν πολλά πλεονεκτήματα σε σχέση με τους προκατόχους τους. Μερικά από αυτά τα πλεονεκτήματα περιλαμβάνουν:

1. Αυξημένοι ρυθμοί μετάδοσης δεδομένων: Τα δίκτυα 5G προσφέρουν ταχύτητες μετάδοσης δεδομένων που είναι έως και 100 φορές μεγαλύτερες από τα δίκτυα 4G (Agyarong et al., 2014). Αυτό το αυξημένο εύρος ζώνης επιτρέπει τη μετάδοση μεγαλύτερου όγκου δεδομένων, κάτι που είναι ζωτικής σημασίας για την επεξεργασία και την ανάλυση των τεράστιων ποσοτήτων πληροφοριών που παράγονται από συσκευές και αισθητήρες IoT σε έξυπνες πόλεις (Bangerter et al., 2014).
2. Χαμηλή καθυστέρηση: Η καθυστέρηση των δικτύων 5G είναι σημαντικά χαμηλότερη από αυτή των δικτύων 4G (Xiang et al., 2016). Αυτή η μειωμένη καθυστέρηση στη μετάδοση δεδομένων επιτρέπει την επικοινωνία και τον έλεγχο σε πραγματικό χρόνο μεταξύ διαφόρων συστημάτων και συσκευών σε μια έξυπνη πόλη, βελτιώνοντας τη συνολική αποτελεσματικότητα και ανταπόκριση της υποδομής της πόλης (Alnoman & Anpalagan, 2017).
3. Βελτιωμένη χωρητικότητα: Τα δίκτυα 5G μπορούν να υποστηρίξουν μεγαλύτερο αριθμό συσκευών και συνδέσεων από τις προηγούμενες γενιές (Li et al., 2014). Αυτό είναι ιδιαίτερα σημαντικό για τις έξυπνες πόλεις, όπου μια τεράστια γκάμα συσκευών, αισθητήρων και δικτύων IoT πρέπει να διασυνδέονται και να επικοινωνούν μεταξύ τους ταυτόχρονα (Wong et al., 2017).
4. Βελτιωμένη αξιοπιστία δικτύου: Η αξιοπιστία των δικτύων 5G είναι σημαντικά υψηλότερη από αυτή των προηγούμενων γενεών. Αυτό εξασφαλίζει συνεπή και αδιάλειπτη επικοινωνία μεταξύ συσκευών και συστημάτων σε μια έξυπνη πόλη, η οποία είναι ζωτικής σημασίας για τη σωστή λειτουργία διαφόρων υπηρεσιών και υποδομών (Panwar et al., 2016).
5. Ενεργειακή απόδοση: Τα δίκτυα 5G έχουν σχεδιαστεί για να είναι πιο ενεργειακά αποδοτικά από τους προκατόχους τους (Buzzi et al., 2016). Αυτό είναι ιδιαίτερα σημαντικό για τις έξυπνες πόλεις, καθώς η μειωμένη κατανάλωση ενέργειας συμβάλλει στη συνολική βιωσιμότητα και φιλικότητα προς το περιβάλλον της πόλης (Yu et al., 2017).

Τα χαρακτηριστικά των δικτύων 5G τα καθιστούν ιδανικά για ένα ευρύ φάσμα εφαρμογών σε έξυπνες πόλεις (Minoli & Occhiogrosso, 2019). Μερικές από τις κύριες εφαρμογές αναλύονται στις επόμενες ενότητες..

1.2 Ευφυή Συστήματα Μεταφορών

Τα δίκτυα 5G επιτρέπουν την επικοινωνία σε πραγματικό χρόνο μεταξύ οχημάτων, συστημάτων διαχείρισης της κυκλοφορίας και υποδομών, με αποτέλεσμα τη βελτίωση της ροής της κυκλοφορίας και τη μείωση της συμφόρησης (Gohar & Nencioni, 2021). Αυτό μπορεί να επιτευχθεί μέσω της “Επικοινωνίας Οχήματος προς τα Πάντα (Vehicle-to-Everything - V2X)”, η οποία επιτρέπει στα οχήματα να μοιράζονται πληροφορίες σχετικά με την ταχύτητα, τη θέση τους και άλλους παράγοντες, με αποτέλεσμα πιο αποτελεσματική πλοήγηση και ασφαλέστερες συνθήκες οδήγησης (Minoli & Occhiogrosso, 2019). Τα “Ευφυή Συστήματα Μεταφορών (Intelligent Transport Systems - ITS)” έχουν αναδειχθεί ως βασική εφαρμογή της τεχνολογίας 5G σε έξυπνες πόλεις, με στόχο την αντιμετώπιση των προκλήσεων της αστικής μετακίνησης και την επανάσταση στον τρόπο με τον οποίο μετακινούνται άνθρωποι και αγαθά. Η τεχνολογία 5G παρέχει ταχύτερη και πιο αξιόπιστη συνδεσιμότητα, εξαιρετικά χαμηλό λανθάνοντα χρόνο και τη δυνατότητα χειρισμού τεράστιων όγκων δεδομένων, που είναι απαραίτητα για την επιτυχή εφαρμογή του ITS (Guevara & Auat Cheein, 2020).

Η ενσωμάτωση του 5G στο ITS ενισχύει διάφορες πτυχές των μεταφορών σε έξυπνες πόλεις, συμπεριλαμβανομένων:

- Διαχείριση κυκλοφορίας σε πραγματικό χρόνο: Το 5G επιτρέπει καλύτερη συλλογή και επεξεργασία δεδομένων από αισθητήρες και κάμερες που είναι εγκατεστημένες στην υποδομή της πόλης (Zhou et al., 2022). Αυτό βοηθά τις αρχές και τις υπηρεσίες μεταφορών να αναλύσουν τα μοτίβα κυκλοφορίας και να λάβουν αποφάσεις βάσει δεδομένων για τη μείωση της συμφόρησης, τη βελτιστοποίηση του χρονισμού των φωτεινών σηματοδοτών και την παροχή ενημερώσεων σε πραγματικό χρόνο στους οδηγούς (Usman et al., 2018).
- Συνδεδεμένα και αυτόνομα οχήματα: Με τη χαμηλή καθυστέρηση και το υψηλό εύρος ζώνης του 5G, τα συνδεδεμένα οχήματα μπορούν να ανταλλάσσουν πληροφορίες με άλλα οχήματα, υποδομές και συσκευές. Αυτό διευκολύνει την καλύτερη πλοήγηση, αυξημένη ασφάλεια και βελτιστοποιημένη κατανάλωση καυσίμου (Mustakim, 2020). Επιπλέον, η αξιόπιστη και γρήγορη συνδεσιμότητα που παρέχει το 5G είναι ζωτικής σημασίας για την ανάπτυξη αυτόνομων οχημάτων, καθώς απαιτούν

επικοινωνία σε πραγματικό χρόνο με το περιβάλλον τους για να λειτουργούν με ασφάλεια και αποτελεσματικότητα (Pawłowicz et al., 2019).

- Βελτιώσεις στις δημόσιες συγκοινωνίες: Το 5G μπορεί να βελτιώσει τα συστήματα δημόσιων μεταφορών παρέχοντας πληροφορίες τοποθεσίας και προγραμματισμού σε πραγματικό χρόνο στους επιβάτες. Αυτό οδηγεί σε βελτιωμένο σχεδιασμό διαδρομής και μειωμένο χρόνο αναμονής (Mustakim, 2020). Επιπλέον, το 5G μπορεί να υποστηρίξει την επικοινωνία από όχημα σε υποδομή, επιτρέποντας τον καλύτερο συντονισμό μεταξύ των διαφορετικών τρόπων μεταφοράς και καταλήγοντας σε μια πιο απρόσκοπτη ταξιδιωτική εμπειρία για τους χρήστες (Minoli & Occhiogrosso, 2019).
- Υπηρεσίες έκτακτης ανάγκης: Η συνδεσιμότητα υψηλής ταχύτητας που προσφέρει το 5G επιτρέπει στις υπηρεσίες έκτακτης ανάγκης να ανταποκρίνονται πιο γρήγορα και αποτελεσματικά σε περιστατικά (Guevara & Auat Cheein, 2020). Η επικοινωνία σε πραγματικό χρόνο μεταξύ οχημάτων έκτακτης ανάγκης, κέντρων ελέγχου κυκλοφορίας και έξυπνης υποδομής μπορεί να βοηθήσει στην αλλαγή δρομολόγησης της κυκλοφορίας, στην ιεράρχηση της πρόσβασης των οχημάτων έκτακτης ανάγκης και στην παροχή ακριβών πληροφοριών στους πρώτους ανταποκριτές (Alfa et al., 2018).
- Περιβαλλοντικά οφέλη: Επιτρέποντας καλύτερη διαχείριση της κυκλοφορίας, μειώνοντας τη συμφόρηση και προωθώντας αποτελεσματικά συστήματα μεταφορών, η τεχνολογία 5G μπορεί να συμβάλει στη μείωση των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου και στη βελτίωση της ποιότητας του αέρα στις αστικές περιοχές (Camacho et al., 2018). Επιπλέον, το 5G μπορεί να υποστηρίξει την ανάπτυξη και την ενσωμάτωση ηλεκτρικών και άλλων οχημάτων χαμηλών εκπομπών στα δίκτυα μεταφορών (Zhou et al., 2022).
- Βελτιωμένη εμπειρία χρήστη: Η τεχνολογία 5G μπορεί να βελτιώσει τη συνολική εμπειρία χρήστη παρέχοντας εξατομικευμένες υπηρεσίες και υπηρεσίες που βασίζονται στην τοποθεσία, όπως βοήθεια στάθμευσης, βελτιστοποιημένη δρομολόγηση και ενημερώσεις κυκλοφορίας σε πραγματικό χρόνο (Pawłowicz et al., 2019). Επιπλέον, η συνδεσιμότητα υψηλής ταχύτητας μπορεί να επιτρέψει την ψυχαγωγία εντός του οχήματος, συμπεριλαμβανομένης της υψηλής ποιότητας ροής βίντεο και παιχνιδιών,

τόσο για τους επιβάτες όσο και για τους χρήστες των μέσων μαζικής μεταφοράς (Usman et al., 2018).

Συμπερασματικά, η τεχνολογία 5G έχει τη δυνατότητα να μεταμορφώσει σημαντικά τα συστήματα μεταφορών σε έξυπνες πόλεις. Η αυξημένη ταχύτητα, αξιοπιστία και χαμηλή καθυστέρηση που προσφέρει το 5G μπορεί να οδηγήσει σε πιο αποτελεσματικά, ασφαλέστερα και φιλικά προς το περιβάλλον δίκτυα μεταφορών (Zhou et al., 2022). Αξιοποιώντας τις δυνατότητες της τεχνολογίας 5G, οι πόλεις μπορούν να βελτιώσουν τη διαχείριση της κυκλοφορίας, να ενεργοποιήσουν συνδεδεμένα και αυτόνομα οχήματα, να βελτιώσουν τις δημόσιες συγκοινωνίες και να προσφέρουν καλύτερη εμπειρία χρήστη για τους κατοίκους και τους επισκέπτες (Guevara & Auat Cheein, 2020).

1.3 Έξυπνα Ενεργειακά Δίκτυα

Η ενσωμάτωση των δικτύων 5G σε έξυπνα ενεργειακά δίκτυα επιτρέπει την αποτελεσματική διαχείριση των ενεργειακών πόρων, τη μείωση της σπατάλης ενέργειας και την προώθηση βιώσιμων πρακτικών (Dragičević et al., 2019). Αυτό επιτυγχάνεται επιτρέποντας την επικοινωνία σε πραγματικό χρόνο μεταξύ διαφόρων στοιχείων του δικτύου, συμπεριλαμβανομένων των παραγωγών ενέργειας, των διανομέων και των καταναλωτών, και διευκολύνοντας συστήματα ανταπόκρισης στη ζήτηση που προσαρμόζουν την κατανάλωση ενέργειας ανάλογα με τις διακυμάνσεις της προσφοράς και της ζήτησης σε πραγματικό χρόνο (Hui et al., 2020). Επιπλέον, τα δίκτυα 5G μπορούν να υποστηρίξουν τη μεγάλης κλίμακας ανάπτυξη ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, όπως ηλιακά πάνελ και ανεμογεννήτριες, επιτρέποντας την αποτελεσματική παρακολούθηση και έλεγχο αυτών των κατανεμημένων ενεργειακών πόρων. Τα έξυπνα ενεργειακά δίκτυα αποτελούν βασικό συστατικό των σύγχρονων έξυπνων πόλεων και η ενσωμάτωση της τεχνολογίας 5G σε αυτά τα δίκτυα προσφέρει πολλά πλεονεκτήματα (Matinkhah & Shafik, 2019). Το δίκτυο 5G παρέχει βελτιωμένη συνδεσιμότητα, εξαιρετικά χαμηλή καθυστέρηση και τη δυνατότητα διαχείρισης μεγάλου αριθμού συνδεδεμένων συσκευών, καθιστώντας το ιδανική λύση για την τροφοδοσία έξυπνων ενεργειακών δικτύων.

Μία από τις βασικές πτυχές των έξυπνων ενεργειακών δικτύων είναι η ικανότητά τους να παρακολουθούν και να διαχειρίζονται την παραγωγή, τη διανομή και την κατανάλωση ενέργειας σε πραγματικό χρόνο (Shen et al., 2020). Η ενσωμάτωση της

τεχνολογίας 5G σε αυτή τη διαδικασία μπορεί να οδηγήσει σε πολλές βελτιώσεις, όπως:

- Αποτελεσματική κατανομή ενέργειας: Με τον τεράστιο όγκο δεδομένων που παράγονται από αισθητήρες, μετρητές και άλλες συνδεδεμένες συσκευές, το 5G επιτρέπει την παρακολούθηση και την ανάλυση των προτύπων κατανάλωσης ενέργειας σε πραγματικό χρόνο (Matinkhah & Shafik, 2019). Αυτό επιτρέπει στις εταιρείες κοινής ωφέλειας να βελτιστοποιούν τη διανομή ενέργειας προσαρμόζοντας δυναμικά την προσφορά ώστε να ταιριάζει με τη ζήτηση. Κατά συνέπεια, αυτό βοηθά στη μείωση της σπατάλης ενέργειας, στη μείωση του κόστους για τους καταναλωτές και στη διασφάλιση ενός πιο σταθερού και αξιόπιστου ενεργειακού εφοδιασμού (De Dutta & Prasad, 2019).
- Ενσωμάτωση ανανεώσιμων πηγών ενέργειας: Η συνδεσιμότητα υψηλής ταχύτητας και χαμηλής καθυστέρησης που προσφέρει η τεχνολογία 5G διευκολύνει την απρόσκοπτη ενσωμάτωση ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, όπως ηλιακά πάνελ και ανεμογεννήτριες, σε έξυπνα ενεργειακά δίκτυα (Hui et al., 2020). Αυτό επιτρέπει την καλύτερη εξισορρόπηση του φορτίου και τη σταθερότητα του δικτύου, επιτρέποντας στις πόλεις να βασίζονται περισσότερο σε βιώσιμες πηγές ενέργειας και να μειώνουν το αποτύπωμα άνθρακα (Kumari et al., 2019).
- Διαχείριση απόκρισης ζήτησης: Η τεχνολογία 5G μπορεί να υποστηρίξει την εφαρμογή προγραμμάτων ανταπόκρισης στη ζήτηση, όπου οι καταναλωτές μπορούν να προσαρμόσουν την κατανάλωση ενέργειας βάσει πληροφοριών σε πραγματικό χρόνο σχετικά με τις τιμές ενέργειας και τις συνθήκες του δικτύου (Garau et al., 2017). Αυτό βοηθά στη μείωση της ζήτησης αιχμής και ενθαρρύνει την εξοικονόμηση ενέργειας, οδηγώντας τελικά σε πιο βιώσιμη και οικονομικά αποδοτική χρήση ενέργειας (Dragičević et al., 2019).
- Έξυπνα σπίτια και κτίρια: Η συνδεσιμότητα υψηλής ταχύτητας που παρέχεται από το 5G επιτρέπει την ανάπτυξη έξυπνων σπιτιών και κτιρίων, τα οποία μπορούν να παρακολουθούν και να ελέγχουν αυτόνομα την κατανάλωση ενέργειας μέσω συνδεδεμένων συσκευών και αισθητήρων. Αυτό επιτρέπει πιο αποτελεσματική διαχείριση ενέργειας, χαμηλότερους λογαριασμούς κοινής ωφέλειας και ένα πιο άνετο περιβάλλον διαβίωσης για τους ενοίκους (Skouby & Lynggaard, 2014).

- Υποδομή φόρτισης “Ηλεκτρικών Οχημάτων (Electrical Vehicle - EV)”: Καθώς αυξάνεται η υιοθέτηση ηλεκτρικών οχημάτων, αυξάνεται και η ανάγκη για μια ισχυρή και αποτελεσματική υποδομή φόρτισης (Zhang et al., 2018). Η τεχνολογία 5G μπορεί να βοηθήσει στη διαχείριση και τη βελτιστοποίηση της διαδικασίας φόρτισης διευκολύνοντας την επικοινωνία σε πραγματικό χρόνο μεταξύ σταθμών φόρτισης, οχημάτων και του ενεργειακού δικτύου. Αυτό επιτρέπει την εξισορρόπηση φορτίου, τη δυναμική τιμολόγηση και την απρόσκοπτη ενσωμάτωση των EV στο έξυπνο ενεργειακό δίκτυο (Shen et al., 2020).
- Ανθεκτικότητα και ασφάλεια: Οι βελτιωμένες δυνατότητες επικοινωνίας των δικτύων 5G επιτρέπουν ταχύτερο εντοπισμό και απόκριση σε πιθανές απειλές ή αστοχίες εντός του ενεργειακού δικτύου. Αυτό ενισχύει τη συνολική ανθεκτικότητα του δικτύου, διασφαλίζοντας έναν πιο αξιόπιστο και ασφαλή ενεργειακό εφοδιασμό για έξυπνες πόλεις (Matinkhah & Shafik, 2019).

Συμπερασματικά, η ενσωμάτωση της τεχνολογίας 5G σε έξυπνα ενεργειακά δίκτυα έχει τη δυνατότητα να φέρει επανάσταση στον τρόπο παραγωγής, διανομής και κατανάλωσης ενέργειας στις έξυπνες πόλεις (Dragičević et al., 2019). Αξιοποιώντας τις δυνατότητες υψηλής ταχύτητας και χαμηλής καθυστέρησης του 5G, οι πόλεις μπορούν να δημιουργήσουν πιο αποτελεσματικά, ανθεκτικά και βιώσιμα ενεργειακά συστήματα που ωφελούν τόσο το περιβάλλον όσο και τους πολίτες τους (Hui et al., 2020).

1.4 Υπηρεσίες Δημόσιας Ασφάλειας και Έκτακτης Ανάγκης

Τα δίκτυα 5G μπορούν να βελτιώσουν σημαντικά την αποτελεσματικότητα της δημόσιας ασφάλειας και των υπηρεσιών έκτακτης ανάγκης σε έξυπνες πόλεις (Nizzi et al., 2018). Για παράδειγμα, η χαμηλή καθυστέρηση και οι υψηλοί ρυθμοί μετάδοσης δεδομένων των δικτύων 5G επιτρέπουν τη ροή βίντεο σε πραγματικό χρόνο και την κοινή χρήση δεδομένων μεταξύ των πρώτων ανταποκριτών, των κέντρων ελέγχου και άλλων σχετικών μερών κατά τη διάρκεια έκτακτης ανάγκης (Beard, 2016). Αυτό επιτρέπει ταχύτερη και ακριβέστερη λήψη αποφάσεων, σώζοντας δυνητικά ζωές και ελαχιστοποιώντας τις ζημιές σε κρίσιμες καταστάσεις. Η δημόσια ασφάλεια και οι υπηρεσίες έκτακτης ανάγκης είναι κρίσιμες πτυχές των έξυπνων πόλεων και η ενσωμάτωση της τεχνολογίας 5G μπορεί να βελτιώσει σημαντικά την αποτελεσματικότητά τους (Rao & Prasad, 2018). Με τη

συνδεσιμότητα υψηλής ταχύτητας, τον εξαιρετικά χαμηλό λανθάνοντα χρόνο και την ικανότητα να υποστηρίζει έναν τεράστιο αριθμό συσκευών ταυτόχρονα, το 5G διαδραματίζει κρίσιμο ρόλο στη βελτίωση της απόκρισης έκτακτης ανάγκης και της συνολικής δημόσιας ασφάλειας (Shamsuddin & Srinivasan, 2021).

Η εφαρμογή της τεχνολογίας 5G στη δημόσια ασφάλεια και τις υπηρεσίες έκτακτης ανάγκης μπορεί να οδηγήσει σε πολλές βελτιώσεις, όπως:

- **Επικοινωνία σε πραγματικό χρόνο:** Η γρήγορη και αξιόπιστη συνδεσιμότητα που παρέχεται από τα δίκτυα 5G επιτρέπει την απρόσκοπτη επικοινωνία μεταξύ ανταποκριτών έκτακτης ανάγκης, κέντρων ελέγχου και ατόμων που επηρεάζονται κατά τη διάρκεια κρίσεων (Arfaoui et al., 2018). Αυτό ενισχύει την επίγνωση της κατάστασης, τον συντονισμό και τη λήψη αποφάσεων, καταλήγοντας τελικά σε πιο αποτελεσματικές απαντήσεις σε καταστάσεις έκτακτης ανάγκης (Ishkineeva et al., 2015).
- **Απομακρυσμένη παρακολούθηση και επιτήρηση:** Με τη δυνατότητα χειρισμού μεγάλων ποσοτήτων δεδομένων, το 5G επιτρέπει τη συλλογή και ανάλυση πληροφοριών από διάφορες πηγές, όπως κάμερες παρακολούθησης, αισθητήρες και drones (Rao & Prasad, 2018). Αυτή η παρακολούθηση σε πραγματικό χρόνο μπορεί να βοηθήσει στην ανίχνευση πιθανών κινδύνων, στον εντοπισμό και την παρακολούθηση εγκληματιών και στην αξιολόγηση των ζημιών κατά τη διάρκεια φυσικών καταστροφών, επιτρέποντας στις αρχές να λάβουν άμεσα μέτρα για τη διασφάλιση της δημόσιας ασφάλειας (Nizzi et al., 2018).
- **Βελτιωμένες υπηρεσίες τοποθεσίας:** Η τεχνολογία 5G μπορεί να βελτιώσει την ακρίβεια των υπηρεσιών εντοπισμού θέσης, κάτι που είναι απαραίτητο για τους ανταποκριτές έκτακτης ανάγκης να εντοπίζουν γρήγορα άτομα που χρειάζονται βοήθεια. Αυτό μπορεί να είναι ιδιαίτερα ωφέλιμο σε πυκνά αστικά περιβάλλοντα, όπου τα συμβατικά “Παγκόσμια Σύστημα Στιγματοθέτησης (Global Positioning System – GPS)” μπορεί να δυσκολεύονται να παρέχουν ακριβή δεδομένα τοποθεσίας (Jordaan et al., 2019).
- **Έξυπνα συστήματα απόκρισης έκτακτης ανάγκης:** Η ενοποίηση της τεχνολογίας 5G με συσκευές IoT, αισθητήρες και τεχνητή νοημοσύνη μπορεί να οδηγήσει στην ανάπτυξη έξυπνων συστημάτων απόκρισης έκτακτης ανάγκης. Αυτά τα συστήματα μπορούν να ανιχνεύουν αυτόματα συμβάντα,

όπως πυρκαγιές ή διαρροές αερίου, και να ειδοποιούν τις υπηρεσίες έκτακτης ανάγκης να ανταποκριθούν άμεσα, μετριάζοντας πιθανές ζημιές και σώζοντας ζωές (Rao & Prasad, 2018).

- Υποστήριξη για αυτόνομα οχήματα: Η εξαιρετικά χαμηλή καθυστέρηση και η συνδεσιμότητα υψηλής ταχύτητας που προσφέρουν τα δίκτυα 5G είναι ζωτικής σημασίας για τη λειτουργία αυτόνομων οχημάτων, συμπεριλαμβανομένων αυτών που χρησιμοποιούνται σε υπηρεσίες έκτακτης ανάγκης (Rusti et al., 2018). Αυτόνομα ασθενοφόρα και drones μπορούν να αναπτυχθούν για την παροχή ιατρικής βοήθειας, τη μεταφορά προμηθειών ή την εκτέλεση επιχειρήσεων έρευνας και διάσωσης, βελτιώνοντας σημαντικά την αποτελεσματικότητα και την εμβέλεια των υπηρεσιών έκτακτης ανάγκης (Condoluci et al., 2016).
- Προστασία υποδομών ζωτικής σημασίας: Η ανθεκτικότητα και η αξιοπιστία των δικτύων 5G μπορεί να ενισχύσει την προστασία κρίσιμων υποδομών, όπως σταθμούς ηλεκτροπαραγωγής, συστήματα μεταφορών και δίκτυα επικοινωνίας (Arfaoui et al., 2018). Επιτρέποντας την παρακολούθηση σε πραγματικό χρόνο και την ταχεία απόκριση σε πιθανές απειλές ή αστοχίες, η τεχνολογία 5G συμβάλλει στη διατήρηση της συνεχούς λειτουργίας αυτών των ζωτικών υπηρεσιών (Orprou et al., 2017).
- Ανάκαμψη από καταστροφές: Στον απόηχο φυσικών καταστροφών ή άλλων έκτακτων καταστάσεων μεγάλης κλίμακας, τα δίκτυα 5G μπορούν να παρέχουν βασική υποδομή επικοινωνίας για την υποστήριξη των προσπάθειών ανακούφισης (Higashino et al., 2017). Η ταχεία ανάπτυξη των προσωρινών δικτύων 5G μπορεί να διευκολύνει την επικοινωνία μεταξύ των ανταποκριτών έκτακτης ανάγκης, των κυβερνητικών υπηρεσιών και των πληγέντων πληθυσμών, επιταχύνοντας τη διαδικασία ανάκαμψης (Qadir et al., 2021).

Συμπερασματικά, η εφαρμογή της τεχνολογίας 5G στη δημόσια ασφάλεια και τις υπηρεσίες έκτακτης ανάγκης μπορεί να οδηγήσει σε σημαντικές βελτιώσεις στην αποδοτικότητα, την αποτελεσματικότητα και τη συνολική ανθεκτικότητα των έξυπνων πόλεων (Condoluci et al., 2016). Αξιοποιώντας τις δυνατότητες υψηλής ταχύτητας και χαμηλής καθυστέρησης του 5G, οι πόλεις μπορούν να βελτιώσουν τον συντονισμό και την απόκριση των υπηρεσιών έκτακτης ανάγκης, να προστατεύσουν

ζωτικής σημασίας υποδομές και να εξασφαλίσουν ένα ασφαλέστερο περιβάλλον για τους πολίτες τους (Rusti et al., 2018).

1.5 Φροντίδα Υγείας

Η ενσωμάτωση των δικτύων 5G στα συστήματα υγειονομικής περίθαλψης μπορεί να οδηγήσει σε βελτιωμένη φροντίδα των ασθενών και πιο αποτελεσματικές υπηρεσίες υγείας (Zhang et al., 2015). Η τηλεϊατρική, η απομακρυσμένη παρακολούθηση και η χρήση συσκευών IoT μπορούν να επιτρέψουν στους παρόχους υγειονομικής περίθαλψης να έχουν πρόσβαση σε δεδομένα ασθενών σε πραγματικό χρόνο, επιτρέποντας την άμεση διάγνωση και θεραπεία. Επιπλέον, τα δίκτυα 5G μπορούν να διευκολύνουν τη χρήση προηγμένων ιατρικών τεχνολογιών, όπως η απομακρυσμένη χειρουργική και τα διαγνωστικά με τεχνητή νοημοσύνη, τα οποία μπορούν να φέρουν επανάσταση στην παροχή υγειονομικής περίθαλψης και να βελτιώσουν τα αποτελέσματα των ασθενών (Latif et al., 2017). Η υγειονομική περίθαλψη είναι μια ζωτική πτυχή των έξυπνων πόλεων και η ενσωμάτωση της τεχνολογίας 5G μπορεί να βελτιώσει σημαντικά την ποιότητα, την προσβασιμότητα και την αποτελεσματικότητα των υπηρεσιών υγειονομικής περίθαλψης. Με τη συνδεσιμότητα υψηλής ταχύτητας, τον εξαιρετικά χαμηλό λανθάνοντα χρόνο και την ικανότητα να υποστηρίζει έναν τεράστιο αριθμό συσκευών ταυτόχρονα, το 5G έχει τη δυνατότητα να φέρει επανάσταση σε διάφορες πτυχές της υγειονομικής περίθαλψης σε αστικά περιβάλλοντα (Chen et al., 2017).

Η εφαρμογή της τεχνολογίας 5G στην υγειονομική περίθαλψη μπορεί να οδηγήσει σε πολλές προόδους, όπως:

- Τηλεϊατρική και απομακρυσμένες διαβουλεύσεις: Η υψηλής ταχύτητας, αξιόπιστη συνδεσιμότητα που παρέχεται από τα δίκτυα 5G επιτρέπει τη λήψη βίντεο σε πραγματικό χρόνο μεταξύ ασθενών και παρόχων υγειονομικής περίθαλψης, ανεξάρτητα από την τοποθεσία τους (Anwar & Prasad, 2018). Αυτό βοηθά στη βελτίωση της πρόσβασης σε υπηρεσίες υγειονομικής περίθαλψης, ιδιαίτερα για όσους ζουν σε απομακρυσμένες περιοχές ή αντιμετωπίζουν προκλήσεις κινητικότητας, και μειώνει την ανάγκη των ασθενών να ταξιδεύουν σε ιατρικές εγκαταστάσεις (Lin et al., 2021).
- Απομακρυσμένη παρακολούθηση ασθενών: Η ενσωμάτωση της τεχνολογίας 5G με φορητές συσκευές και αισθητήρες επιτρέπει στους παρόχους

υγειονομικής περίθαλψης να παρακολουθούν συνεχώς τα ζωτικά σημεία και τις συνθήκες υγείας των ασθενών από απόσταση (Oleshchuk & Fensli, 2011). Αυτό μπορεί να οδηγήσει σε πιο εξατομικευμένη φροντίδα, έγκαιρη ανίχνευση πιθανών προβλημάτων υγείας και καλύτερη διαχείριση των χρόνιων παθήσεων, βελτιώνοντας τελικά τα αποτελέσματα των ασθενών και μειώνοντας το κόστος υγειονομικής περίθαλψης (Li, 2019).

- Συνδεδεμένα ασθενοφόρα και υπηρεσίες έκτακτης ανάγκης: Η συνδεσιμότητα εξαιρετικά χαμηλής καθυστέρησης και υψηλής ταχύτητας που προσφέρουν τα δίκτυα 5G μπορούν να υποστηρίξουν την επικοινωνία σε πραγματικό χρόνο μεταξύ ασθενοφόρων, νοσοκομείων και άλλων υπηρεσιών έκτακτης ανάγκης (Dananjayan & Raj, 2021). Αυτό επιτρέπει την κοινή χρήση ζωτικών πληροφοριών για τους ασθενείς, όπως ιατρικά αρχεία και διαγνωστικά δεδομένα, επιτρέποντας στους παρόχους υγειονομικής περίθαλψης να προετοιμαστούν για την άφιξη του ασθενούς και να παρέχουν την κατάλληλη φροντίδα πιο αποτελεσματικά (Padmashree & Nayak, 2020).
- Εικονική και επαυξημένη πραγματικότητα στην ιατρική εκπαίδευση: Η συνδεσιμότητα υψηλής ταχύτητας που παρέχεται από τα δίκτυα 5G επιτρέπει τη χρήση εικονικής και επαυξημένης πραγματικότητας στην ιατρική εκπαίδευση. Αυτό μπορεί να βοηθήσει τους επαγγελματίες υγείας να αποκτήσουν πρακτική εμπειρία σε ένα ελεγχόμενο περιβάλλον, ενισχύοντας τις δεξιότητές τους και βελτιώνοντας τη φροντίδα των ασθενών (Ma et al., 2020).
- Ρομποτική και αυτοματισμός στην υγειονομική περίθαλψη: Η εξαιρετικά χαμηλή καθυστέρηση και η συνδεσιμότητα υψηλής ταχύτητας των δικτύων 5G είναι ζωτικής σημασίας για τη λειτουργία ρομποτικών και αυτοματοποιημένων συστημάτων σε περιβάλλοντα υγειονομικής περίθαλψης (Pandav et al., 2022). Αυτό περιλαμβάνει χειρουργικά ρομπότ, τα οποία μπορούν να εκτελούν πολύπλοκες διαδικασίες με μεγαλύτερη ακρίβεια, καθώς και αυτοματοποιημένα συστήματα για τη χορήγηση φαρμάκων και τη φροντίδα των ασθενών, τα οποία μπορούν να μειώσουν τον κίνδυνο ανθρώπινου λάθους και να βελτιώσουν την αποτελεσματικότητα (Wu et al., 2020).
- Ιατρική έρευνα και ανάλυση δεδομένων: Οι τεράστιοι όγκοι δεδομένων που παράγονται από ιατρικές συσκευές, αισθητήρες και ηλεκτρονικά αρχεία υγείας

μπορούν να συλλεχθούν, να μεταδοθούν και να αναλυθούν χρησιμοποιώντας δίκτυα 5G (Li, 2019). Αυτό δίνει τη δυνατότητα στους παρόχους υγειονομικής περίθαλψης και τους ερευνητές να αποκτήσουν πολύτιμες γνώσεις για τα πρότυπα της νόσου, την αποτελεσματικότητα της θεραπείας και τα αποτελέσματα των ασθενών, οδηγώντας τελικά σε πιο ενημερωμένη λήψη αποφάσεων και βελτιωμένες υπηρεσίες υγειονομικής περίθαλψης (Ghazal, 2022).

Συμπερασματικά, η ενσωμάτωση της τεχνολογίας 5G στην υγειονομική περίθαλψη έχει τη δυνατότητα να μεταμορφώσει τον τρόπο παροχής υπηρεσιών υγειονομικής περίθαλψης σε έξυπνες πόλεις (West, 2016). Αξιοποιώντας τις δυνατότητες υψηλής ταχύτητας και χαμηλής καθυστέρησης του 5G, οι πόλεις μπορούν να βελτιώσουν την προσβασιμότητα, την ποιότητα και την αποτελεσματικότητα των υπηρεσιών υγειονομικής περίθαλψης, ωφελώντας τελικά τόσο τους ασθενείς όσο και τους παρόχους υγειονομικής περίθαλψης (Tebe et al., 2022). Οι εξελίξεις στην τηλεϊατρική, την απομακρυσμένη παρακολούθηση ασθενών, τις συνδεδεμένες υπηρεσίες έκτακτης ανάγκης, την ιατρική εκπαίδευση, τη ρομποτική και την ανάλυση δεδομένων που ενεργοποιούνται από την τεχνολογία 5G μπορούν να οδηγήσουν σε καλύτερα αποτελέσματα για τους ασθενείς, πιο εξατομικευμένη φροντίδα και ένα πιο βιώσιμο σύστημα υγειονομικής περίθαλψης (Chen et al., 2017).

1.6 Περιβαλλοντική Παρακολούθηση και Διαχείριση

Η εφαρμογή δικτύων 5G μπορεί να ενισχύσει σημαντικά τις δυνατότητες των συστημάτων περιβαλλοντικής παρακολούθησης και διαχείρισης σε έξυπνες πόλεις (Han et al., 2015). Οι τεράστιες ποσότητες δεδομένων που παράγονται από αισθητήρες και συσκευές IoT μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την παρακολούθηση της ποιότητας του αέρα, των επιπέδων του νερού και άλλων περιβαλλοντικών παραγόντων σε πραγματικό χρόνο. Αυτές οι πληροφορίες μπορούν στη συνέχεια να αναλυθούν για την ενημέρωση των αποφάσεων πολιτικής, τη βελτιστοποίηση της χρήσης των πόρων και τον μετριασμό των επιπτώσεων των φυσικών καταστροφών και άλλων περιβαλλοντικών απειλών (West, 2016). Η παρακολούθηση και η διαχείριση του περιβάλλοντος αποτελούν βασικά στοιχεία των έξυπνων πόλεων και η ενσωμάτωση της τεχνολογίας 5G μπορεί να διαδραματίσει σημαντικό ρόλο στην αντιμετώπιση των αστικών περιβαλλοντικών προκλήσεων. Με τη συνδεσιμότητα υψηλής ταχύτητας, τον εξαιρετικά χαμηλό λανθάνοντα χρόνο και την ικανότητα να

υποστηρίζει έναν τεράστιο αριθμό συσκευών ταυτόχρονα, το 5G έχει τη δυνατότητα να βελτιώσει διάφορες πτυχές της περιβαλλοντικής παρακολούθησης και διαχείρισης σε αστικά περιβάλλοντα (Al-Turjman, 2020).

Η εφαρμογή της τεχνολογίας 5G στην περιβαλλοντική παρακολούθηση και διαχείριση μπορεί να οδηγήσει σε πολλές βελτιώσεις, όπως:

- Παρακολούθηση ποιότητας αέρα: Η τεχνολογία 5G επιτρέπει τη συλλογή και μετάδοση δεδομένων σε πραγματικό χρόνο από ένα δίκτυο αισθητήρων που αναπτύσσονται σε όλη την πόλη για τη μέτρηση των επιπέδων ατμοσφαιρικής ρύπανσης (Su et al., 2021). Αυτά τα δεδομένα μπορούν να αναλυθούν για τον εντοπισμό των πηγών ρύπανσης, την αξιολόγηση της αποτελεσματικότητας των μέτρων μείωσης των εκπομπών και την ενημέρωση του κοινού σχετικά με την ποιότητα του αέρα. Με τη σειρά τους, αυτές οι πληροφορίες μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την ανάπτυξη στοχευμένων παρεμβάσεων και πολιτικών για τη βελτίωση της ποιότητας του αέρα στις αστικές περιοχές (Das et al., 2020).
- Διαχείριση νερού: Η υψηλής ταχύτητας, αξιόπιστη συνδεσιμότητα που παρέχεται από τα δίκτυα 5G υποστηρίζει την παρακολούθηση της ποιότητας, της κατανάλωσης και της διανομής του νερού σε πραγματικό χρόνο (Liu et al., 2020). Αυτό δίνει τη δυνατότητα στις εταιρείες κοινής ωφέλειας να εντοπίζουν και να αντιμετωπίζουν διαρροές ή άλλα ζητήματα στην υποδομή νερού πιο αποτελεσματικά, εξοικονομώντας πόρους και μειώνοντας το κόστος. Επιπλέον, τα δεδομένα σε πραγματικό χρόνο για την ποιότητα του νερού μπορούν να βοηθήσουν στην προστασία της δημόσιας υγείας ειδοποιώντας τις αρχές για πιθανά συμβάντα μόλυνσης (Li et al., 2022).
- Διαχείριση απορριμμάτων: Η ενσωμάτωση της τεχνολογίας 5G με συσκευές και αισθητήρες IoT επιτρέπει την πιο αποτελεσματική συλλογή και διάθεση απορριμμάτων (Poongodi et al., 2020). Οι έξυπνοι κάδοι απορριμμάτων μπορούν να μεταδώσουν δεδομένα σχετικά με τα επίπεδα πλήρωσής τους, επιτρέποντας στις υπηρεσίες συλλογής απορριμμάτων να βελτιστοποιήσουν τις διαδρομές και τα χρονοδιαγράμματα συλλογής τους. Αυτό μπορεί να οδηγήσει σε μειωμένη κατανάλωση καυσίμου, χαμηλότερες εκπομπές ρύπων και καθαρότερο αστικό περιβάλλον (van Hilten & Wolfert, 2022).

- Έξυπνη γεωργία και αστική γεωργία: Η τεχνολογία 5G μπορεί να υποστηρίξει πρωτοβουλίες γεωργίας ακριβείας και αστικής γεωργίας, επιτρέποντας την παρακολούθηση σε πραγματικό χρόνο των συνθηκών του εδάφους, της χρήσης του νερού και της υγείας των καλλιεργειών (Tang et al., 2021). Αυτές οι πληροφορίες μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τη βελτιστοποίηση της άρδευσης, της εφαρμογής λιπασμάτων και της διαχείρισης παρασίτων, οδηγώντας σε αυξημένες αποδόσεις των καλλιεργειών και πιο βιώσιμες γεωργικές πρακτικές (Yang et al., 2021).
- Διαχείριση ενέργειας: Η συνδεσιμότητα υψηλής ταχύτητας που παρέχεται από τα δίκτυα 5G διευκολύνει τη συλλογή και ανάλυση δεδομένων κατανάλωσης ενέργειας από κτίρια, συστήματα μεταφορών και άλλες αστικές υποδομές (Huseien & Shah, 2022). Αυτό δίνει τη δυνατότητα στις αρχές της πόλης και στις εταιρείες κοινής ωφέλειας να εντοπίσουν τομείς αναποτελεσματικότητας και να εφαρμόσουν στοχευμένα μέτρα για τη μείωση της κατανάλωσης ενέργειας και των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου (Mazhar et al., 2022).
- Ανθεκτικότητα στην κλιματική αλλαγή: Οι δυνατότητες παρακολούθησης και ανάλυσης δεδομένων σε πραγματικό χρόνο της τεχνολογίας 5G μπορούν να βοηθήσουν τις πόλεις να κατανοήσουν καλύτερα και να ανταποκριθούν στις επιπτώσεις της κλιματικής αλλαγής (Huseien & Shah, 2021). Παρακολουθώντας και αναλύοντας τα καιρικά μοτίβα, τη στάθμη της θάλασσας και άλλους περιβαλλοντικούς παράγοντες, οι πολεοδόμοι μπορούν να αναπτύξουν στρατηγικές για τον μετριασμό των κινδύνων που σχετίζονται με την κλιματική αλλαγή, όπως πλημμύρες, καύσωνες και ακραία καιρικά φαινόμενα (Gnanasekaran et al., 2021).
- Παρακολούθηση άγριας ζωής και οικοτόπων: Η ενσωμάτωση της τεχνολογίας 5G με συσκευές και αισθητήρες IoT μπορεί να επιτρέψει τη συνεχή παρακολούθηση των πληθυσμών της άγριας ζωής και των οικοτόπων τους εντός και γύρω από τις αστικές περιοχές. Αυτές οι πληροφορίες μπορούν να βοηθήσουν στην ενημέρωση των προσπαθειών διατήρησης, να καθοδηγήσουν τις αποφάσεις πολεοδομικού σχεδιασμού και να βελτιώσουν τη συνολική υγεία και βιωσιμότητα του αστικού οικοσυστήματος (Thomas et al., 2011).

Συμπερασματικά, η ενσωμάτωση της τεχνολογίας 5G στην περιβαλλοντική παρακολούθηση και διαχείριση έχει τη δυνατότητα να μεταμορφώσει τον τρόπο με τον οποίο οι πόλεις αντιμετωπίζουν τις περιβαλλοντικές προκλήσεις. Αξιοποιώντας τις δυνατότητες υψηλής ταχύτητας και χαμηλής καθυστέρησης του 5G, οι πόλεις μπορούν να βελτιώσουν την κατανόηση των περιβαλλοντικών ζητημάτων, να αναπτύξουν στοχευμένες παρεμβάσεις και να ενισχύσουν τη συνολική βιωσιμότητα και ανθεκτικότητα των αστικών περιβαλλόντων (Gong et al., 2022). Οι εξελίξεις στην παρακολούθηση της ποιότητας του αέρα, τη διαχείριση υδάτων και αποβλήτων, την έξυπνη γεωργία, τη διαχείριση ενέργειας, την ανθεκτικότητα στην κλιματική αλλαγή και την παρακολούθηση της άγριας ζωής που επιτρέπονται από την τεχνολογία 5G μπορούν να συμβάλουν σε πιο υγιείς και πιο βιώσιμες πόλεις για τους κατοίκους τους (Li et al., 2022).

1.7 Έξυπνα Κτίρια και Υποδομές

Τα δίκτυα 5G μπορούν να επιτρέψουν την ανάπτυξη έξυπνων κτιρίων και υποδομών, τα οποία χρησιμοποιούν συσκευές IoT, αισθητήρες και προηγμένα αναλυτικά στοιχεία για τη βελτιστοποίηση της κατανάλωσης ενέργειας, της συντήρησης και της συνολικής απόδοσης (Mazhar et al., 2022). Για παράδειγμα, τα έξυπνα συστήματα φωτισμού μπορούν να προσαρμόσουν τα επίπεδα φωτεινότητας με βάση την πληρότητα και το φυσικό φως, ενώ τα συστήματα πρόβλεψης συντήρησης μπορούν να εντοπίσουν πιθανά προβλήματα προτού κλιμακωθούν, μειώνοντας το χρόνο διακοπής λειτουργίας και το κόστος επισκευής (Raveendran & Tabet Aoul, 2021). Τα έξυπνα κτίρια και οι υποδομές αποτελούν αναπόσπαστα στοιχεία των έξυπνων πόλεων και η ενσωμάτωση της τεχνολογίας 5G μπορεί να βελτιώσει σημαντικά την αποτελεσματικότητά τους, τη βιωσιμότητα και τη συνολική τους απόδοση. Με τη συνδεσιμότητα υψηλής ταχύτητας, τον εξαιρετικά χαμηλό λανθάνοντα χρόνο και την ικανότητα να υποστηρίζει έναν τεράστιο αριθμό συσκευών ταυτόχρονα, το 5G έχει τη δυνατότητα να φέρει επανάσταση σε διάφορες πτυχές των έξυπνων κτιρίων και των αστικών υποδομών (Zhou & Li, 2020).

Η εφαρμογή της τεχνολογίας 5G σε έξυπνα κτίρια και υποδομές μπορεί να οδηγήσει σε πολλές βελτιώσεις, όπως:

- **Ενεργειακή απόδοση:** Η ενσωμάτωση της τεχνολογίας 5G με συσκευές και αισθητήρες IoT επιτρέπει την παρακολούθηση και τον έλεγχο σε πραγματικό χρόνο της κατανάλωσης ενέργειας σε έξυπνα κτίρια (Jia et al., 2019). Αυτό επιτρέπει στους διαχειριστές κτιρίων να βελτιστοποιούν τα συστήματα

θέρμανσης, ψύξης και φωτισμού με βάση τα επίπεδα πληρότητας και τα πρότυπα χρήσης, μειώνοντας τελικά τη σπατάλη ενέργειας και μειώνοντας το κόστος κοινής ωφέλειας (Dutkiewicz, 2016).

- Ασφάλεια: Η υψηλής ταχύτητας, αξιόπιστη συνδεσιμότητα που παρέχεται από τα δίκτυα 5G υποστηρίζει την ανάπτυξη προηγμένων συστημάτων ασφαλείας, όπως παρακολούθηση βίντεο, έλεγχος πρόσβασης και ανίχνευση εισβολής (Chettri & Bera, 2019). Αυτό βοηθά στη διασφάλιση της ασφαλείας των ενοίκων και των περιουσιακών στοιχείων του κτιρίου, ενώ επιτρέπει την επικοινωνία σε πραγματικό χρόνο μεταξύ των συστημάτων ασφαλείας και των αρμόδιων αρχών σε περίπτωση έκτακτης ανάγκης (El-Shorbagy, 2021).
- Παρακολούθηση δομικής υγείας: Η τεχνολογία 5G διευκολύνει την παρακολούθηση σε πραγματικό χρόνο της δομικής ακεραιότητας για κτίρια, γέφυρες, σήραγγες και άλλες κρίσιμες υποδομές (Rao & Prasad, 2018). Οι αισθητήρες που είναι ενσωματωμένοι στις δομές μπορούν να μεταδώσουν δεδομένα σχετικά με την καταπόνηση, την παραμόρφωση και άλλες παραμέτρους, επιτρέποντας την έγκαιρη ανίχνευση πιθανών προβλημάτων και επιτρέποντας την προληπτική συντήρηση για την αποφυγή δαπανηρών επισκευών ή καταστροφικών βλαβών (Rajaei et al., 2020).
- Έξυπνη στάθμευση και διαχείριση κυκλοφορίας: Η ενσωμάτωση της τεχνολογίας 5G με συσκευές και αισθητήρες IoT μπορεί να επιτρέψει την παρακολούθηση σε πραγματικό χρόνο της διαθεσιμότητας στάθμευσης και των συνθηκών κυκλοφορίας γύρω από έξυπνα κτίρια και αστική υποδομή (Liu et al., 2019). Αυτές οι πληροφορίες μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την καθοδήγηση των οδηγών σε διαθέσιμα σημεία στάθμευσης, τη βελτιστοποίηση της ροής της κυκλοφορίας και τη μείωση της συμφόρησης, βελτιώνοντας τελικά τη συνολική απόδοση των συστημάτων μεταφορών σε έξυπνες πόλεις (Zhou & Li, 2020).
- Αυτοματοποιημένη διαχείριση κτιρίων: Η εξαιρετικά χαμηλή καθυστέρηση και η συνδεσιμότητα υψηλής ταχύτητας των δικτύων 5G είναι ζωτικής σημασίας για τη λειτουργία αυτοματοποιημένων συστημάτων σε έξυπνα κτίρια (El-Shorbagy, 2021). Αυτά τα συστήματα μπορούν να ελέγχουν διάφορες πτυχές των λειτουργιών του κτιρίου, όπως συστήματα “Θέρμανσης, Εξαερισμού και Κλιματισμού (Heating, Ventilation, and Air Conditioning - HVAC)”, φωτισμού

και ασφάλειας, με βάση δεδομένα σε πραγματικό χρόνο και αλγόριθμους τεχνητής νοημοσύνης. Αυτό μπορεί να οδηγήσει σε βελτιωμένη άνεση για τους ενοίκους του κτιρίου, μειωμένη κατανάλωση ενέργειας και χαμηλότερο κόστος συντήρησης (Chettri & Bera, 2019).

- Διαχείριση εγκαταστάσεων και παρακολούθηση περιουσιακών στοιχείων: Η συνδεσιμότητα υψηλής ταχύτητας που παρέχεται από τα δίκτυα 5G επιτρέπει την παρακολούθηση σε πραγματικό χρόνο περιουσιακών στοιχείων και εξοπλισμού σε έξυπνα κτίρια και υποδομές (Jia et al., 2019). Αυτό βοηθά τους διαχειριστές εγκαταστάσεων να βελτιστοποιήσουν τη χρήση των πόρων, να προγραμματίσουν τις δραστηριότητες συντήρησης και να βελτιώσουν τη συνολική λειτουργική απόδοση (Li et al., 2018).
- Ψηφιακή συνδεσιμότητα για τους ενοίκους: Η τεχνολογία 5G μπορεί να βελτιώσει την ψηφιακή εμπειρία για τους ενοίκους έξυπνων κτιρίων παρέχοντας πρόσβαση στο Διαδίκτυο υψηλής ταχύτητας και επιτρέποντας την ανάπτυξη προηγμένων ψηφιακών υπηρεσιών, όπως η επαυξημένη πραγματικότητα, η εικονική πραγματικότητα και η καθλωτική ψυχαγωγία (Rajaei et al., 2020). Αυτό μπορεί να βελτιώσει την παραγωγικότητα, τη συνεργασία και τη συνολική ικανοποίηση των χρηστών στα έξυπνα κτίρια (Dutkiewicz, 2016).

Συμπερασματικά, η ενσωμάτωση της τεχνολογίας 5G σε έξυπνα κτίρια και υποδομές έχει τη δυνατότητα να μεταμορφώσει τον τρόπο με τον οποίο σχεδιάζονται, λειτουργούν και συντηρούνται αυτές οι εγκαταστάσεις. Αξιοποιώντας τις δυνατότητες υψηλής ταχύτητας και χαμηλής καθυστέρησης του 5G, οι πόλεις μπορούν να δημιουργήσουν πιο αποτελεσματικά, βιώσιμα και πιο χρηστοκεντρικά κτίρια και υποδομές, συμβάλλοντας τελικά στη συνολική ποιότητα ζωής για τους κατοίκους και τους επισκέπτες (Zhou & Li, 2020). Οι εξελίξεις στην ενεργειακή απόδοση, την ασφάλεια, την παρακολούθηση της δομικής υγείας, την έξυπνη στάθμευση και διαχείριση κυκλοφορίας, την αυτοματοποιημένη διαχείριση κτιρίων, τη διαχείριση εγκαταστάσεων και την ψηφιακή συνδεσιμότητα που ενεργοποιούνται από την τεχνολογία 5G μπορούν να οδηγήσουν σε πιο ανθεκτικά, προσαρμόσιμα και συνδεδεμένα αστικά περιβάλλοντα (El-Shorbagy, 2021).

Η έλευση των δικτύων 5G έχει δημιουργήσει μυριάδες ευκαιρίες για την ανάπτυξη έξυπνων πόλεων, προσφέροντας πολυάριθμα οφέλη στους κατοίκους των πόλεων

και στο περιβάλλον. Η ενσωμάτωση της τεχνολογίας 5G σε διάφορους τομείς, συμπεριλαμβανομένων των μεταφορών, της ενέργειας, της δημόσιας ασφάλειας, της υγειονομικής περίθαλψης και της περιβαλλοντικής διαχείρισης, έχει τη δυνατότητα να φέρει επανάσταση στην αστική ζωή βελτιώνοντας την αποτελεσματικότητα, τη βιωσιμότητα και τη συνολική ποιότητα ζωής στις πόλεις (Dutkiewicz, 2016). Καθώς τα δίκτυα 5G συνεχίζουν να αναπτύσσονται σε όλο τον κόσμο, είναι ζωτικής σημασίας για τις κυβερνήσεις, τους πολεοδόμους και τους παρόχους τεχνολογίας να συνεργαστούν αποτελεσματικά για να αξιοποιήσουν πλήρως τις δυνατότητες αυτής της πρωτοποριακής τεχνολογίας και να δημιουργήσουν ένα καλύτερο μέλλον για όλους (Zhou & Li, 2020).

1.8 5G Σύμπραξη Δημόσιου και Ιδιωτικού Τομέα

Η “Εταιρική Σχέση 5G Δημόσιου και Ιδιωτικού Τομέα (5G Public-Private Partnership - 5G-PPP)” είναι μια κοινή πρωτοβουλία μεταξύ της Ευρωπαϊκής Επιτροπής και της ευρωπαϊκής βιομηχανίας ΤΠΕ (Alcaraz-Calero et al., 2017). Η συνεργασία στοχεύει να διευκολύνει την έρευνα, την ανάπτυξη δικτύων 5G και συναφών τεχνολογιών σε όλη την Ευρώπη. Το 5G-PPP διαδραματίζει κρίσιμο ρόλο στην προώθηση της καινοτομίας, στην προώθηση της τυποποίησης και στην προώθηση της συνεργασίας μεταξύ διαφόρων ενδιαφερομένων, συμπεριλαμβανομένων των τηλεπικοινωνιακών φορέων, των κατασκευαστών εξοπλισμού, των ερευνητικών ιδρυμάτων και των κυβερνητικών φορέων (Mohr, 2015).

Ένας από τους πρωταρχικούς στόχους του 5G-PPP είναι να επιταχύνει την ανάπτυξη της τεχνολογίας 5G με τη συγκέντρωση πόρων και τεχνογνωσίας από διάφορους ενδιαφερόμενους φορείς (Marsch et al., 2018). Η συνεργασία επικεντρώνεται στη χρηματοδότηση και τον συντονισμό ερευνητικών έργων για την αντιμετώπιση βασικών τεχνολογικών προκλήσεων, όπως η αρχιτεκτονική δικτύου, η χρήση του φάσματος και η ασφάλεια. Υποστηρίζοντας δραστηριότητες έρευνας και ανάπτυξης, το 5G-PPP συμβάλλει στην πρόοδο της τεχνολογίας 5G, ανοίγοντας το δρόμο για καινοτόμες εφαρμογές σε διάφορους τομείς (Kemppainen, 2016).

Ένας άλλος σημαντικός ρόλος του 5G-PPP είναι η προώθηση της τυποποίησης και της διαλειτουργικότητας στα δίκτυα 5G. Καθώς η τεχνολογία 5G εξελίσσεται, είναι σημαντικό να καθιερωθούν κοινά πρότυπα και πρωτόκολλα για να διασφαλιστεί η απρόσκοπτη επικοινωνία και ενσωμάτωση μεταξύ διαφορετικών συσκευών, δικτύων και εφαρμογών (Trebilcock & Rosenstock, 2015). Το 5G-PPP διευκολύνει τη

συνεργασία μεταξύ παραγόντων του κλάδου, ερευνητών και ρυθμιστικών αρχών για την ανάπτυξη και υιοθέτηση αυτών των προτύπων, τα οποία είναι κρίσιμα για την ευρεία ανάπτυξη και υιοθέτηση της τεχνολογίας 5G (Markopoulos et al., 2021).

Επιπλέον, το 5G-PPP διαδραματίζει ζωτικό ρόλο στην προώθηση της διατομεακής συνεργασίας για την ανάπτυξη και εφαρμογή εφαρμογών 5G. Συγκεντρώνοντας ενδιαφερόμενους φορείς από διάφορους κλάδους, όπως η υγειονομική περίθαλψη, οι μεταφορές, η ενέργεια και η δημόσια ασφάλεια, η εταιρική σχέση ενθαρρύνει την ανταλλαγή ιδεών, γνώσης και πόρων (Markopoulos et al., 2021). Αυτή η συλλογική προσέγγιση βοηθά στον εντοπισμό νέων περιπτώσεων χρήσης και επιχειρηματικών μοντέλων, οδηγώντας στην υιοθέτηση της τεχνολογίας 5G σε διαφορετικούς τομείς και επιτρέποντας καινοτόμες λύσεις για την αντιμετώπιση των κοινωνικών προκλήσεων (Mohr, 2015).

Το 5G-PPP υποστηρίζει επίσης τη δημιουργία δοκιμαστικών κλινών και τοποθεσιών δοκιμών για τον πειραματισμό και την επικύρωση τεχνολογιών και εφαρμογών 5G (Marsch et al., 2018). Αυτές οι κλίνες δοκιμών παρέχουν ένα ελεγχόμενο περιβάλλον για τους ενδιαφερόμενους να αξιολογήσουν την απόδοση, την επεκτασιμότητα και τη διαλειτουργικότητα των λύσεων 5G, διασφαλίζοντας ότι πληρούν τις αυστηρές απαιτήσεις διάφορων βιομηχανιών. Διευκολύνοντας τη δοκιμή και την επικύρωση των τεχνολογιών 5G, το 5G-PPP συμβάλλει στην επιτάχυνση της εμπορευματοποίησης και της ανάπτυξής τους σε πραγματικές ρυθμίσεις (Achard & Di Bernardino, 2018).

Συνοπτικά, η εταιρική σχέση δημόσιου-ιδιωτικού τομέα 5G διαδραματίζει κρίσιμο ρόλο στην ανάπτυξη δικτύων και εφαρμογών 5G (Kemppainen, 2016). Με την προώθηση της συνεργασίας, την υποστήριξη της έρευνας και της ανάπτυξης, την προώθηση της τυποποίησης και τη διευκόλυνση της διατομεακής δέσμευσης, η 5G-PPP συμβάλλει στην πρόοδο της τεχνολογίας 5G και στην ευρεία υιοθέτησή της σε διάφορους κλάδους (Mohr, 2015). Οι προσπάθειες της εταιρικής σχέσης όχι μόνο επιτρέπουν καινοτόμες εφαρμογές σε έξυπνες πόλεις, αλλά συμβάλλουν επίσης στην αντιμετώπιση ευρύτερων κοινωνικών προκλήσεων και στην προώθηση της οικονομικής ανάπτυξης.

1.9 Verticals

Στο πλαίσιο των δικτύων 5G, ο όρος «Κάθετος» ("Verticals") αναφέρεται στους διάφορους κλάδους της βιομηχανίας που μπορούν να επωφεληθούν από τις προηγμένες δυνατότητες της τεχνολογίας 5G. Αυτοί οι κλάδοι περιλαμβάνουν ένα ευρύ φάσμα εφαρμογών και περιπτώσεων χρήσης, συμπεριλαμβανομένων των έξυπνων πόλεων, της υγειονομικής περίθαλψης, των μεταφορών, της ενέργειας, της κατασκευής, της γεωργίας και της ψυχαγωγίας, μεταξύ άλλων (Spinelli & Mancuso, 2020). Η έννοια των κάθετων υπογραμμίζει την ανάγκη για μια προσαρμοσμένη προσέγγιση για την ανάπτυξη δικτύων 5G, καθώς κάθε κλάδος της βιομηχανίας έχει τις μοναδικές απαιτήσεις και προκλήσεις του.

Ο ρόλος των κάθετων στις εφαρμογές των δικτύων 5G είναι ζωτικής σημασίας, καθώς βοηθούν στον εντοπισμό συγκεκριμένων αναγκών και ευκαιριών που μπορεί να αντιμετωπίσει η τεχνολογία 5G (Papagianni et al., 2020). Εστιάζοντας στις μοναδικές απαιτήσεις κάθε κλάδου, τα δίκτυα 5G μπορούν να σχεδιαστούν και να βελτιστοποιηθούν ώστε να παρέχουν την απαραίτητη απόδοση, αξιοπιστία και ασφάλεια που απαιτούνται για διάφορες εφαρμογές (Vannithamby & Soong, 2020).

Για παράδειγμα, στον κλάδο της υγειονομικής περίθαλψης, η συνδεσιμότητα εξαιρετικά χαμηλής καθυστέρησης και υψηλής ταχύτητας που προσφέρουν τα δίκτυα 5G είναι απαραίτητες για την ενεργοποίηση των χειρουργείων εξ αποστάσεως, της παρακολούθησης ασθενών σε πραγματικό χρόνο και των υπηρεσιών τηλεϊατρικής (Condoluci et al., 2018). Αντιμετωπίζοντας τις ειδικές ανάγκες του τομέα της υγειονομικής περίθαλψης, η τεχνολογία 5G μπορεί να συμβάλει στη βελτίωση των αποτελεσμάτων των ασθενών και στις πιο προσιτές υπηρεσίες υγειονομικής περίθαλψης (Elayoubi et al., 2019).

Στον κλάδο των μεταφορών, τα δίκτυα 5G μπορούν να υποστηρίξουν την ανάπτυξη ευφυών συστημάτων μεταφορών, συμπεριλαμβανομένων των συνδεδεμένων και αυτόνομων οχημάτων, της έξυπνης διαχείρισης της κυκλοφορίας και της πλοήγησης σε πραγματικό χρόνο (Zhang et al., 2020). Καλύπτοντας τις ειδικές απαιτήσεις του τομέα των μεταφορών, όπως η επικοινωνία χαμηλής καθυστέρησης και η αξιόπιστη συνδεσιμότητα, η τεχνολογία 5G μπορεί να βελτιώσει την οδική ασφάλεια, να μειώσει τη συμφόρηση και να βελτιώσει τη συνολική απόδοση των μεταφορών (Ordonez-Lucena et al., 2020).

Στον κατασκευαστικό κλάδο, τα δίκτυα 5G μπορούν να επιτρέψουν προηγμένο βιομηχανικό αυτοματισμό και παρακολούθηση σε πραγματικό χρόνο των διαδικασιών παραγωγής, συμβάλλοντας στην αύξηση της απόδοσης, στη μείωση

του χρόνου διακοπής λειτουργίας και στη βελτιωμένη ποιότητα των προϊόντων (Vannithamby & Soong, 2020). Αντιμετωπίζοντας τις μοναδικές ανάγκες του κατασκευαστικού τομέα, όπως αξιόπιστη συνδεσιμότητα για ρομποτικά συστήματα και επικοινωνία χαμηλής καθυστέρησης για έλεγχο σε πραγματικό χρόνο, η τεχνολογία 5G μπορεί να υποστηρίξει τη μετατροπή των παραδοσιακών εργοστασίων σε έξυπνες εγκαταστάσεις παραγωγής (Condoluci et al., 2018).

Η έννοια των κάθετων τονίζει επίσης την ανάγκη για συνεργασία μεταξύ των ενδιαφερομένων από διαφορετικούς κλάδους της βιομηχανίας και του κλάδου των τηλεπικοινωνιών. Με τη συνεργασία, αυτοί οι ενδιαφερόμενοι μπορούν να προσδιορίσουν τις συγκεκριμένες απαιτήσεις κάθε κλάδου και να αναπτύξουν προσαρμοσμένες λύσεις 5G που ανταποκρίνονται στις μοναδικές ανάγκες τους (Elayoubi et al., 2019). Αυτή η συλλογική προσέγγιση όχι μόνο βοηθά στην επιτάχυνση της ανάπτυξης δικτύων 5G, αλλά διασφαλίζει επίσης ότι η τεχνολογία προσφέρει απτά οφέλη σε ένα ευρύ φάσμα βιομηχανιών (Paragianni et al., 2020).

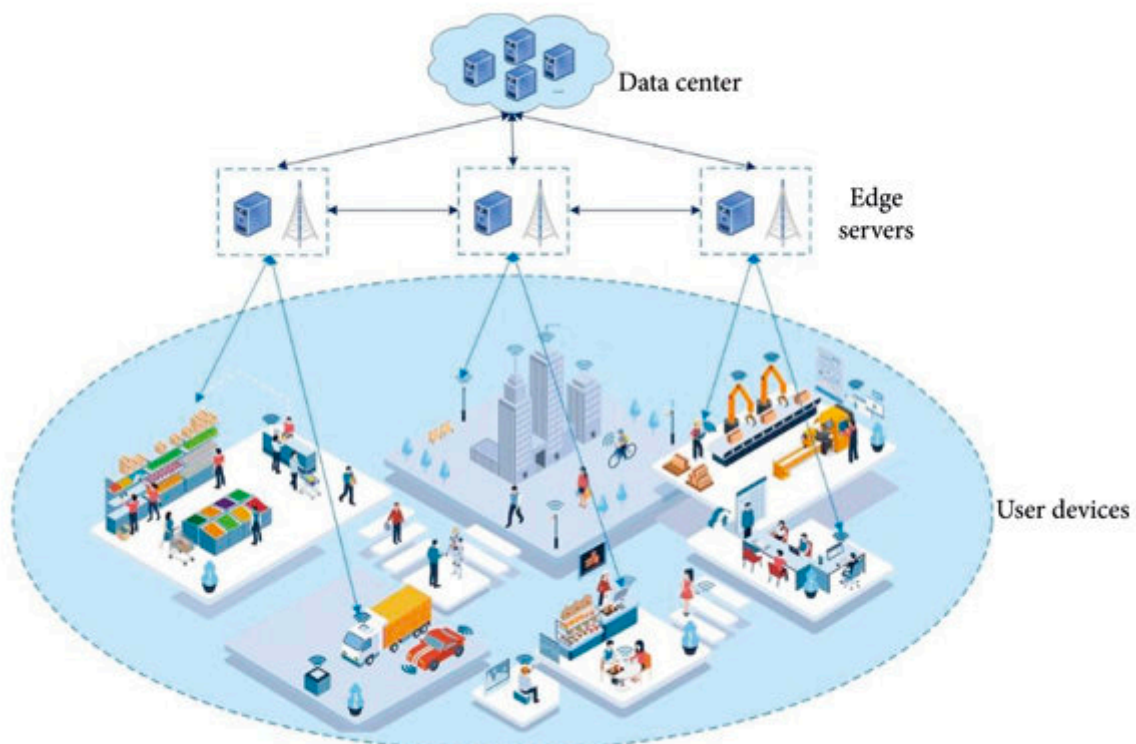
Συμπερασματικά, η έννοια των κάθετων διαδραματίζει κεντρικό ρόλο στις εφαρμογές των δικτύων 5G, επισημαίνοντας τους διάφορους κλάδους της βιομηχανίας που μπορούν να επωφεληθούν από τις προηγμένες δυνατότητες της τεχνολογίας 5G (Zhang et al., 2020). Εστιάζοντας στις μοναδικές απαιτήσεις και προκλήσεις κάθε κλάδου, τα δίκτυα 5G μπορούν να προσαρμοστούν ώστε να παρέχουν την απαραίτητη απόδοση, αξιοπιστία και ασφάλεια που απαιτούνται για διάφορες εφαρμογές (Spinelli & Mancuso, 2020). Επιπλέον, η έμφαση στα κάθετα ενθαρρύνει τη συνεργασία μεταξύ των ενδιαφερομένων από διαφορετικές βιομηχανίες και τον τομέα των τηλεπικοινωνιών, διασφαλίζοντας ότι η τεχνολογία 5G αναπτύσσεται με τρόπο που να ανταποκρίνεται στις ανάγκες ενός ευρέος φάσματος εφαρμογών και περιπτώσεων χρήσης (Vannithamby & Soong, 2020).

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΗ ΑΚΡΟΥ ΚΑΙ ΝΕΦΟΥΣ

2.1 Υπολογιστική άκρου και η σημασία της στα Δίκτυα 5G

Η υπολογιστική άκρου (Edge Computing, EC) είναι μια καινοτόμος προσέγγιση που περιλαμβάνει επεξεργασία και ανάλυση δεδομένων πιο κοντά στην πηγή παραγωγής, αντί να βασίζεται αποκλειστικά σε κεντρικά κέντρα δεδομένων. Αυτή η ιδέα διαδραματίζει ζωτικό ρόλο στις εφαρμογές των δικτύων 5G, καθώς βοηθά να ξεπεραστούν οι προκλήσεις που σχετίζονται με την καθυστέρηση, το εύρος ζώνης και το απόρρητο δεδομένων (Pham et al., 2020). Διανέμοντας υπολογιστικούς πόρους σε όλο το δίκτυο και φέρνοντάς τους πιο κοντά στις συσκευές που παράγουν και καταναλώνουν δεδομένα, το EC βελτιώνει την απόδοση και την αποδοτικότητα διαφόρων εφαρμογών σε έξυπνες πόλεις (Le et al., 2016).



Σχήμα 5: Αρχιτεκτονική δικτύου 5G σε edge computing. Πηγή: (Li & Ye, 2021)

Ένα από τα βασικά πλεονεκτήματα του EC στο πλαίσιο των δικτύων 5G είναι η σημαντική μείωση του λανθάνοντος χρόνου. Η επικοινωνία χαμηλής καθυστέρησης είναι ζωτικής σημασίας για πολλές εφαρμογές, όπως τα αυτόνομα οχήματα, η εξ αποστάσεως χειρουργική επέμβαση και η ανάλυση σε πραγματικό χρόνο (Abbas et al., 2017). Επεξεργάζοντας δεδομένα πιο κοντά στην πηγή, ο υπολογισμός άκρων διασφαλίζει ότι ο χρόνος που απαιτείται για τη μετάδοση και την ανάλυση δεδομένων είναι ελάχιστος, επιτρέποντας επικοινωνία εξαιρετικά χαμηλής καθυστέρησης και υποστηρίζοντας την απρόσκοπτη λειτουργία εφαρμογών ευαίσθητων στο χρόνο (Ganne, 2022).

Ένα άλλο πλεονέκτημα του EC είναι η αποτελεσματική χρήση των πόρων του δικτύου. Σε ένα παραδοσιακό κεντρικό μοντέλο, τα δεδομένα που παράγονται από συσκευές πρέπει να μεταδίδονται σε μακρινά κέντρα δεδομένων για επεξεργασία, τα οποία μπορούν να καταναλώσουν σημαντικά ποσά εύρους ζώνης (Mao et al., 2017). Ο υπολογισμός άκρων, από την άλλη πλευρά, επιτρέπει την τοπική επεξεργασία και ανάλυση δεδομένων, μειώνοντας τον όγκο των δεδομένων που πρέπει να μεταδοθούν μέσω του δικτύου. Αυτό βοηθά στην άμβλυση της συμφόρησης του δικτύου, βελτιστοποιεί τη χρήση του εύρους ζώνης και συμβάλλει σε μια πιο αποτελεσματική και αξιόπιστη υποδομή επικοινωνίας (Wang et al., 2015).

Το απόρρητο και η ασφάλεια των δεδομένων ενισχύονται επίσης μέσω της εφαρμογής υπολογιστών αιχμής σε δίκτυα 5G. Με την τοπική επεξεργασία δεδομένων, το EC μειώνει τον κίνδυνο παραβίασης δεδομένων ή μη εξουσιοδοτημένης πρόσβασης που μπορεί να συμβεί κατά τη μετάδοση δεδομένων σε κεντρικά κέντρα δεδομένων (Hassan et al., 2019). Επιπλέον, το EC επιτρέπει τη συμμόρφωση με τους κανονισμούς περί κυριαρχίας δεδομένων διασφαλίζοντας ότι τα ευαίσθητα δεδομένα παραμένουν εντός μιας συγκεκριμένης δικαιοδοσίας (Taleb et al., 2017).

Στο πλαίσιο των έξυπνων πόλεων, οι υπολογιστές αιχμής διαδραματίζουν κρίσιμο ρόλο στο να επιτρέπουν σε διάφορες εφαρμογές 5G να λειτουργούν βέλτιστα. Για παράδειγμα, στα ευφυή συστήματα μεταφορών, ο υπολογισμός αιχμής επιτρέπει τη διαχείριση της κυκλοφορίας σε πραγματικό χρόνο και την επικοινωνία μεταξύ των οχημάτων, βελτιώνοντας την οδική ασφάλεια και μειώνοντας τη συμφόρηση (Le et al., 2016). Στις υπηρεσίες δημόσιας ασφάλειας και έκτακτης ανάγκης, το EC υποστηρίζει ανάλυση δεδομένων και λήψη αποφάσεων σε πραγματικό χρόνο, διασφαλίζοντας ταχεία και συντονισμένη απόκριση σε καταστάσεις έκτακτης ανάγκης

(Narayanan et al., 2020). Στην υγειονομική περίθαλψη, το EC επιτρέπει την παρακολούθηση ασθενών από απόσταση σε πραγματικό χρόνο και τις υπηρεσίες τηλεϊατρικής, βελτιώνοντας την ποιότητα και την προσβασιμότητα των υπηρεσιών υγειονομικής περίθαλψης (Ganne, 2022).

Συνοπτικά, η έννοια του υπολογιστικού άκρου είναι υψίστης σημασίας στις εφαρμογές των δικτύων 5G, καθώς αντιμετωπίζει βασικές προκλήσεις που σχετίζονται με την καθυστέρηση, το εύρος ζώνης και το απόρρητο δεδομένων (Pham et al., 2020). Φέρνοντας τους υπολογιστικούς πόρους πιο κοντά στην πηγή δημιουργίας δεδομένων, το EC εξασφαλίζει επικοινωνία εξαιρετικά χαμηλής καθυστέρησης, βελτιστοποιεί τη χρήση πόρων δικτύου και ενισχύει την ασφάλεια των δεδομένων. Αυτό, με τη σειρά του, επιτρέπει σε διάφορες εφαρμογές 5G σε έξυπνες πόλεις να λειτουργούν αποτελεσματικά, συμβάλλοντας τελικά στη βελτίωση της αστικής διαβίωσης και στη συνολική ανθεκτικότητα των οικοσυστημάτων των έξυπνων πόλεων (Shorgin et al., 2014).

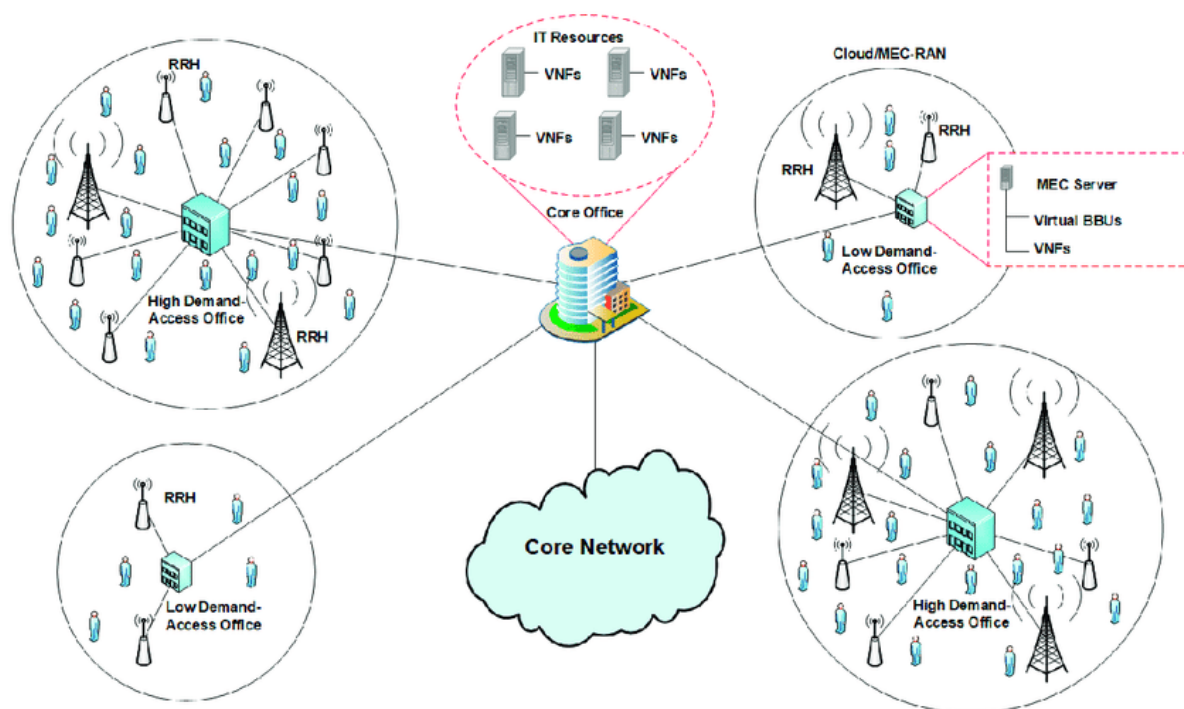
2.2 Η υπολογιστική νέφος και η Σημασία της στα Δίκτυα 5G

Η υπολογιστική νέφος (Cloud Computing, CC) είναι μια τεχνολογία που επιτρέπει την παράδοση υπολογιστικών πόρων, όπως επεξεργαστική ισχύ, αποθήκευση και εφαρμογές, ως υπηρεσία μέσω του Διαδικτύου (Shi & Dustdar, 2016). Αυτή η προσέγγιση επιτρέπει στους χρήστες να έχουν πρόσβαση και να χρησιμοποιούν αυτούς τους πόρους κατ' απαίτηση, χωρίς την ανάγκη φυσικής υποδομής ή προκαταβολικών επενδύσεων κεφαλαίου (Hassan et al., 2019). Το CC διαδραματίζει σημαντικό ρόλο στις εφαρμογές των δικτύων 5G, καθώς συμπληρώνει και ενισχύει τις δυνατότητες της τεχνολογίας 5G, προωθώντας την καινοτομία και επιτρέποντας νέες περιπτώσεις χρήσης σε διάφορους κλάδους (Wang et al., 2015).

Ένας από τους βασικούς ρόλους του CC στο πλαίσιο των δικτύων 5G είναι η υποστήριξη για ευέλικτη και επεκτάσιμη ανάπτυξη εφαρμογών και υπηρεσιών (Narayanan et al., 2020). Αξιοποιώντας τους πόρους και την υποδομή που διατίθενται στο cloud, οι πάροχοι υπηρεσιών και οι επιχειρήσεις μπορούν να αναπτύξουν γρήγορα νέες εφαρμογές, να τις κλιμακώσουν ανάλογα με τη ζήτηση και να βελτιστοποιήσουν τη χρήση των πόρων. Αυτή η ευελιξία επιτρέπει ταχύτερη καινοτομία, βελτιωμένη απόδοση κόστους και καλύτερη ανταπόκριση στις ανάγκες της αγοράς (Abbas et al., 2017).

Η Χρήση Τεχνολογιών Οπτικού Fronthaul για Εφαρμογές Υπολογιστικής Άκρου Εστιάζοντας στα Δίκτυα 5G

Μια άλλη σημαντική πτυχή του CC στις εφαρμογές των δικτύων 5G είναι η ενεργοποίηση προηγμένων δυνατοτήτων ανάλυσης και τεχνητής νοημοσύνης (AI) (Siriwardhana et al., 2021). Οι πλατφόρμες cloud προσφέρουν ένα ευρύ φάσμα εργαλείων και υπηρεσιών για την επεξεργασία και την ανάλυση μεγάλου όγκου δεδομένων που παράγονται από συνδεδεμένες συσκευές και εφαρμογές σε ένα οικοσύστημα 5G (Ganne, 2022). Αξιοποιώντας αυτές τις δυνατότητες, οι επιχειρήσεις και οι οργανισμοί μπορούν να αποκτήσουν πολύτιμες γνώσεις, να αυτοματοποιήσουν τις διαδικασίες και να λάβουν αποφάσεις που βασίζονται σε δεδομένα, οδηγώντας τελικά στην ανάπτυξη και βελτιώνοντας τη συνολική απόδοση (Le et al., 2016).



Σχήμα 2: Αρχιτεκτονική δικτύου 5G που εφαρμόζει Cloud/ Mobile Edge Computing (MEC) Πηγή:

(Ruiz et al., 2018)

Το CC διαδραματίζει επίσης κρίσιμο ρόλο στην υποστήριξη της ανάπτυξης νέων επιχειρηματικών μοντέλων και προσφορών υπηρεσιών σε δίκτυα 5G. Με το μοντέλο τιμολόγησης του pay-as-you-go και τη δυνατότητα ταχείας ανάπτυξης και κλιμάκωσης υπηρεσιών, το CC επιτρέπει στις επιχειρήσεις να εξερευνούν καινοτόμες περιπτώσεις χρήσης, όπως υπολογιστές αιχμής, τεμαχισμός δικτύου και ιδιωτικά δίκτυα 5G (Shorgin et al., 2014). Παρέχοντας την απαραίτητη υποδομή και εργαλεία

για πειραματισμό, το CC ενισχύει την καινοτομία και επιταχύνει την υιοθέτηση της τεχνολογίας 5G σε διάφορους κλάδους της βιομηχανίας (Taleb et al., 2017).

Επιπλέον, η ενοποίηση του CC και των δικτύων 5G επιτρέπει την απρόσκοπτη και αξιόπιστη πρόσβαση σε εφαρμογές και υπηρεσίες, ανεξάρτητα από την τοποθεσία του χρήστη (Wang et al., 2015). Η συνδεσιμότητα υψηλής ταχύτητας και χαμηλής καθυστέρησης που παρέχεται από τα δίκτυα 5G, σε συνδυασμό με την παγκόσμια εμβέλεια των πλατφορμών cloud, διασφαλίζει ότι οι χρήστες μπορούν να έχουν πρόσβαση σε δεδομένα και εφαρμογές με ελάχιστη καθυστέρηση, βελτιώνοντας την εμπειρία χρήστη και επιτρέποντας τη συνεργασία και την επικοινωνία σε πραγματικό χρόνο (Pham et al., 2020).

Συνοπτικά, το CC διαδραματίζει κεντρικό ρόλο στις εφαρμογές των δικτύων 5G υποστηρίζοντας την ευέλικτη και επεκτάσιμη ανάπτυξη υπηρεσιών, επιτρέποντας προηγμένες δυνατότητες ανάλυσης και τεχνητής νοημοσύνης, ενισχύοντας την καινοτομία και νέα επιχειρηματικά μοντέλα και διασφαλίζοντας απρόσκοπτη πρόσβαση σε εφαρμογές και δεδομένα (Le et al., 2016). Η ενοποίηση του υπολογιστικού νέφους και της τεχνολογίας 5G έχει τη δυνατότητα να μεταμορφώσει τις βιομηχανίες και να οδηγήσει στην οικονομική ανάπτυξη, επιτρέποντας σε επιχειρήσεις και οργανισμούς να αξιοποιήσουν τα συνδυασμένα οφέλη και των δύο τεχνολογιών. Καθώς τα δίκτυα 5G συνεχίζουν να εξελίσσονται και να επεκτείνονται, το CC θα παραμείνει βασικός παράγοντας καινοτομίας και ανάπτυξης στο οικοσύστημα 5G (Shorgin et al., 2014).

2.3 Ομοιότητες και Διαφορές

Το EC και το CC είναι και τα δύο βασικά στοιχεία του οικοσυστήματος 5G, το καθένα από τα οποία προσφέρει ξεχωριστά πλεονεκτήματα και δυνατότητες που μπορούν να αξιοποιηθούν σε διάφορες εφαρμογές. Ενώ μοιράζονται ορισμένες ομοιότητες, έχουν επίσης αξιοσημείωτες διαφορές που τα καθιστούν κατάλληλα για διαφορετικές περιπτώσεις χρήσης εντός δικτύων 5G.

Ομοιότητες:

- **Επεκτασιμότητα:** Τόσο ο υπολογισμός αιχμής όσο και το CC επιτρέπουν την επεκτάσιμη ανάπτυξη εφαρμογών και υπηρεσιών. Παρέχουν την ευελιξία προσαρμογής των πόρων ανάλογα με τη ζήτηση, διασφαλίζοντας ότι οι εφαρμογές μπορούν να αυξηθούν ή να μειωθούν ανάλογα με τις ανάγκες (Mao et al., 2017).

- Βελτιστοποίηση πόρων: Το Edge και το CC βοηθούν στη βελτιστοποίηση της χρήσης των πόρων κατανέποντας υπολογιστικούς πόρους σε όλο το δίκτυο, επιτρέποντας την πιο αποτελεσματική κατανομή και χρήση των πόρων (Abbas et al., 2017).
- Υποστήριξη για προηγμένες τεχνολογίες: Τόσο το edge όσο και το CC διευκολύνουν την ενσωμάτωση προηγμένων τεχνολογιών, όπως η τεχνητή νοημοσύνη, η μηχανική μάθηση και η ανάλυση μεγάλων δεδομένων, στο οικοσύστημα 5G (Hassan et al., 2019).

Διαφορές:

- Τοποθεσία Επεξεργασίας Δεδομένων: Η κύρια διαφορά μεταξύ του υπολογισμού αιχμής και του υπολογιστικού νέφους έγκειται στη θέση επεξεργασίας δεδομένων. Το EC φέρνει την επεξεργαστική ισχύ πιο κοντά στην πηγή παραγωγής δεδομένων, συνήθως στην άκρη του δικτύου ή στις ίδιες τις συσκευές. Αντίθετα, το CC συγκεντρώνει την επεξεργασία σε απομακρυσμένα κέντρα δεδομένων, τα οποία είναι προσβάσιμα μέσω του Διαδικτύου (Narayanan et al., 2020).
- Latency: Λόγω της εγγύτητας των υπολογιστικών πόρων στην πηγή δεδομένων, το EC προσφέρει σημαντικά χαμηλότερο λανθάνοντα χρόνο σε σύγκριση με το CC (Shi & Dustdar, 2016). Αυτό καθιστά το EC πιο κατάλληλο για εφαρμογές ευαίσθητες στο χρόνο, όπως αυτόνομα οχήματα, χειρουργικές επεμβάσεις εξ αποστάσεως και αναλύσεις σε πραγματικό χρόνο, οι οποίες απαιτούν επικοινωνία εξαιρετικά χαμηλής καθυστέρησης (Pan & McElhannon, 2017).
- Χρήση εύρους ζώνης: Ο υπολογισμός άκρων μειώνει την ποσότητα των δεδομένων που πρέπει να μεταδοθούν μέσω του δικτύου επεξεργάζοντας δεδομένα τοπικά. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα, πιο αποτελεσματική χρήση του εύρους ζώνης δικτύου και μειωμένη συμφόρηση δικτύου. Από την άλλη πλευρά, το CC βασίζεται στη μετάδοση δεδομένων σε κεντρικά κέντρα δεδομένων, τα οποία μπορούν να καταναλώσουν σημαντικά ποσά εύρους ζώνης, ειδικά για εφαρμογές έντασης δεδομένων (Taleb et al., 2017).
- Απόρρητο και ασφάλεια δεδομένων: Οι υπολογιστές αιχμής μπορούν να βελτιώσουν το απόρρητο και την ασφάλεια των δεδομένων διατηρώντας τα ευαίσθητα δεδομένα πιο κοντά στην πηγή και μειώνοντας τον κίνδυνο που

σχετίζεται με τη μετάδοση δεδομένων (Mao et al., 2017). Αντίθετα, το CC μπορεί να απαιτεί τη μετάδοση δεδομένων και την αποθήκευση σε απομακρυσμένα κέντρα δεδομένων, γεγονός που θα μπορούσε δυνητικά να εκθέσει τα δεδομένα σε υψηλότερο κίνδυνο μη εξουσιοδοτημένης πρόσβασης ή παραβιάσεων (Siriwardhana et al., 2021).

- **Κόστος και πολυπλοκότητα:** Η εφαρμογή υπολογιστών αιχμής ενδέχεται να απαιτεί πρόσθετες επενδύσεις σε συσκευές και υποδομές αιχμής, καθώς και αυξημένη πολυπλοκότητα στη διαχείριση κατανεμημένων πόρων. Συγκριτικά, το CC συχνά επιτρέπει στις επιχειρήσεις να αξιοποιήσουν την υπάρχουσα υποδομή και να επωφεληθούν από τις οικονομίες κλίμακας που παρέχονται από μεγάλους παρόχους cloud, μειώνοντας το αρχικό κόστος και απλοποιώντας τη διαχείριση (Hassan et al., 2019).

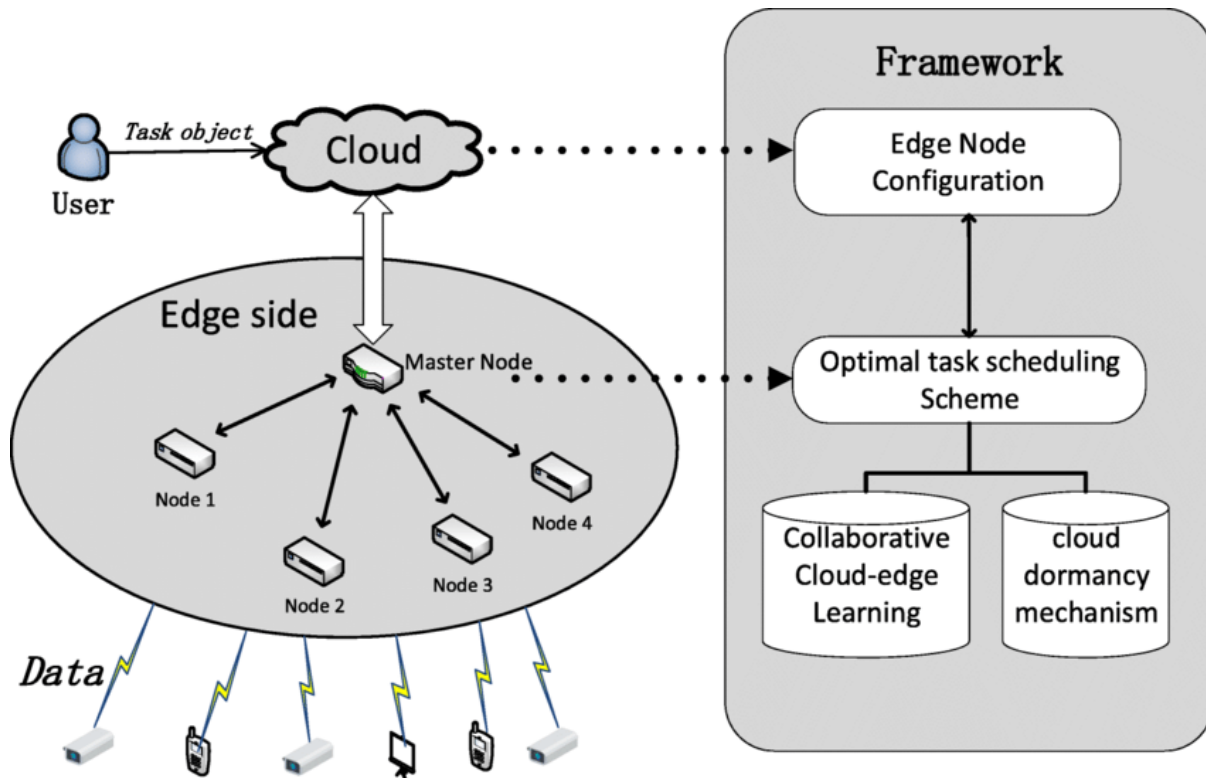
Συμπερασματικά, το EC και το CC είναι συμπληρωματικές τεχνολογίες στο πλαίσιο των δικτύων 5G, καθεμία από τις οποίες προσφέρει μοναδικά πλεονεκτήματα και αντιμετωπίζει διαφορετικές προκλήσεις. Ενώ το EC είναι κατάλληλο για εφαρμογές χαμηλής καθυστέρησης, ευαίσθητες στα δεδομένα, το CC υπερέχει στην παροχή κεντρικής επεξεργαστικής ισχύος, παγκόσμιας προσβασιμότητας και οικονομικής επεκτασιμότητας (Pan & McElhannon, 2017). Κατανοώντας τις ομοιότητες και τις διαφορές μεταξύ αυτών των δύο προσεγγίσεων, οι επιχειρήσεις και οι οργανισμοί μπορούν να λάβουν τεκμηριωμένες αποφάσεις σχετικά με τον καλύτερο τρόπο αξιοποίησης του edge και του CC στις εφαρμογές και τις υπηρεσίες τους με δυνατότητα 5G (Shi & Dustdar, 2016).

2.4 Ανάγκες από Πλευρά Δικτύωσης

Το Edge και το CC είναι δύο παραδείγματα που μεταμορφώνουν τον τρόπο που χρησιμοποιούμε υπολογιστικούς πόρους. Μας δίνουν τη δυνατότητα να επεξεργαζόμαστε και να αποθηκεύουμε μεγάλους όγκους δεδομένων σε πραγματικό χρόνο, παρέχοντάς μας μεγαλύτερη ευελιξία, επεκτασιμότητα και αποτελεσματικότητα. Ωστόσο, η επιτυχία του edge και του CC εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από τις διασυνδέσεις που συνδέουν τα διάφορα στοιχεία αυτών των συστημάτων (Esposito et al., 2017). Σε αυτή την ενότητα, θα συζητήσουμε τον ρόλο των διασυνδέσεων στον υπολογιστικό άκρο και το cloud, τη σημασία τους και πώς μπορούν να επιτευχθούν .

2.4.1. Διασυνδέσεις για Edge και CC

Οι διασυνδέσεις αναφέρονται στις φυσικές και λογικές συνδέσεις μεταξύ διαφορετικών στοιχείων ενός συστήματος υπολογιστών ακμών ή νέφους. Αυτές οι συνδέσεις είναι ζωτικής σημασίας για την αποτελεσματική μεταφορά δεδομένων και την ομαλή λειτουργία αυτών των συστημάτων.



Σχήμα 6: Συνεργατικό πλαίσιο cloud-edge computing. Πηγή: (Xu et al., 2020)

Ο ρόλος των διασυνδέσεων στο edge και στο CC είναι (Cao et al., 2020):

- Παροχή μεταφοράς δεδομένων υψηλής ταχύτητας: Το Edge και το CC περιλαμβάνουν την επεξεργασία και αποθήκευση μεγάλου όγκου δεδομένων. Ως εκ τούτου, οι διασυνδέσεις θα πρέπει να σχεδιάζονται έτσι ώστε να παρέχουν μεταφορά δεδομένων υψηλής ταχύτητας ώστε να διασφαλίζεται ότι τα δεδομένα μπορούν να μεταδοθούν γρήγορα και αποτελεσματικά μεταξύ των διαφορετικών στοιχείων του συστήματος.
- Εξασφάλιση χαμηλού λανθάνοντος χρόνου: Στον υπολογισμό ακμών, τα δεδομένα υποβάλλονται σε επεξεργασία στην άκρη του δικτύου, κάτι που απαιτεί συνδέσεις χαμηλής καθυστέρησης μεταξύ των συσκευών ακμής και των κέντρων δεδομένων cloud. Στο CC, τα δεδομένα υποβάλλονται σε επεξεργασία στα κέντρα δεδομένων cloud, κάτι που απαιτεί συνδέσεις χαμηλής καθυστέρησης μεταξύ των κέντρων δεδομένων cloud και των

τελικών χρηστών. Ως εκ τούτου, οι διασυνδέσεις θα πρέπει να σχεδιάζονται έτσι ώστε να διασφαλίζουν χαμηλό λανθάνοντα χρόνο για να επιτρέπουν την επεξεργασία και ανάλυση δεδομένων σε πραγματικό χρόνο (D'Agostino et al., 2019).

- Εξασφάλιση υψηλού εύρους ζώνης: Το Edge και το CC περιλαμβάνουν την επεξεργασία και αποθήκευση μεγάλου όγκου δεδομένων. Ως εκ τούτου, οι διασυνδέσεις θα πρέπει να σχεδιάζονται έτσι ώστε να διασφαλίζουν υψηλό εύρος ζώνης για να χειρίζονται μεγάλους όγκους δεδομένων και να αποτρέπουν τυχόν σημεία συμφόρησης στο σύστημα (Kochovski et al., 2020).

Η σημασία των διασυνδέσεων στο edge και στο CC δεν μπορεί να υπερεκτιμηθεί. Η επιτυχία του edge και του CC εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από τις διασυνδέσεις που συνδέουν τα διάφορα στοιχεία αυτών των συστημάτων. Οι διασυνδέσεις είναι σημαντικές για διάφορους λόγους (Esposito et al., 2017):

- Αποδοτικότητα: Οι διασυνδέσεις επιτρέπουν την αποτελεσματική μεταφορά δεδομένων μεταξύ των διαφορετικών στοιχείων του συστήματος, διασφαλίζοντας ότι τα δεδομένα μπορούν να υποβληθούν σε επεξεργασία και ανάλυση σε πραγματικό χρόνο. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα μεγαλύτερη και πιο βελτιωμένη απόδοση του συστήματος.
- Επεκτασιμότητα: Οι διασυνδέσεις επιτρέπουν στο σύστημα να κλιμακώνεται καθώς αυξάνεται ο όγκος των δεδομένων. Αυτό διασφαλίζει ότι το σύστημα μπορεί να χειριστεί τις αυξανόμενες απαιτήσεις που του επιβάλλονται, χωρίς καμία υποβάθμιση στην απόδοση.
- Αξιοπιστία: Οι διασυνδέσεις διασφαλίζουν ότι το σύστημα είναι αξιόπιστο και μπορεί να χειριστεί τυχόν διακοπές ή αστοχίες. Αυτό είναι απαραίτητο για κρίσιμες εφαρμογές, όπως η υγειονομική περίθαλψη ή το βιομηχανικό IoT (Kochovski et al., 2020).

Η επίτευξη διασυνδέσεων για υπολογιστές αιχμής και cloud απαιτεί προσεκτικό σχεδιασμό. Οι διασυνδέσεις πρέπει να σχεδιάζονται ώστε να πληρούν τις ειδικές απαιτήσεις του συστήματος, λαμβάνοντας υπόψη παράγοντες όπως η ταχύτητα, η καθυστέρηση και το εύρος ζώνης. Ακολουθούν μερικοί από τους τρόπους με τους οποίους μπορούν να επιτευχθούν διασυνδέσεις για υπολογιστές ακμών και cloud (D'Agostino et al., 2019):

- Συνδέσεις από σημείο σε σημείο: Στον υπολογισμό άκρης, οι διασυνδέσεις είναι συνήθως συνδέσεις σημείου προς σημείο μεταξύ των συσκευών άκρης και των κέντρων δεδομένων cloud. Αυτές οι συνδέσεις θα πρέπει να είναι αξιόπιστες, επεκτάσιμες και ικανές να χειρίζονται μεγάλους όγκους δεδομένων. Οι διασυνδέσεις θα πρέπει επίσης να είναι σε θέση να χειρίζονται κίνηση σε πραγματικό χρόνο και να παρέχουν χαμηλή καθυστέρηση, καθώς η καθυστέρηση μπορεί να έχει σημαντικό αντίκτυπο στην απόδοση των εφαρμογών υπολογιστών αιχμής.
- Εικονικά δίκτυα: Στο CC, οι διασυνδέσεις είναι συνήθως ένας συνδυασμός φυσικών και λογικών συνδέσεων. Οι φυσικές συνδέσεις χρησιμοποιούνται για τη μετάδοση δεδομένων μεταξύ των κέντρων δεδομένων cloud, ενώ οι λογικές συνδέσεις χρησιμοποιούνται για τη μετάδοση δεδομένων μεταξύ των κέντρων δεδομένων cloud και των τελικών χρηστών. Τα εικονικά δίκτυα χρησιμοποιούνται για τη δημιουργία ενός λογικού δικτύου που συνδέει τα διάφορα στοιχεία του συστήματος. Αυτά τα δίκτυα μπορούν να σχεδιαστούν για να παρέχουν συγκεκριμένα επίπεδα απόδοσης, όπως χαμηλή καθυστέρηση ή υψηλό εύρος ζώνης. Μπορούν επίσης να χρησιμοποιηθούν για τον διαχωρισμό διαφορετικών τύπων κίνησης, όπως κίνηση σε πραγματικό χρόνο, διασφαλίζοντας ότι κάθε τύπος κίνησης αντιμετωπίζεται κατάλληλα (Kochovski et al., 2020).
- Εικονικοποίηση λειτουργιών δικτύου (NFV): Το NFV είναι μια τεχνική που επιτρέπει την εικονικοποίηση λειτουργιών δικτύου, όπως τείχη προστασίας ή εξισορροπητές φορτίου. Αυτό επιτρέπει στο δίκτυο να είναι πιο ευέλικτο και επεκτάσιμο, καθώς νέες λειτουργίες δικτύου μπορούν να προστεθούν ή να αφαιρεθούν ανάλογα με τις ανάγκες. Το NFV μπορεί επίσης να βελτιώσει την απόδοση του συστήματος επιτρέποντας στις λειτουργίες δικτύου να αναπτύσσονται πιο κοντά στην άκρη, μειώνοντας την καθυστέρηση και βελτιώνοντας την απόδοση (Li et al., 2016).
- Δικτύωση που ορίζεται από λογισμικό (SDN): Το SDN είναι μια τεχνική που διαχωρίζει το επίπεδο ελέγχου και το επίπεδο δεδομένων του δικτύου, επιτρέποντας στο δίκτυο να είναι πιο ευέλικτο και προγραμματιζόμενο. Το SDN μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την αυτοματοποίηση της παροχής πόρων δικτύου, επιτρέποντας στο σύστημα να κλιμακωθεί πιο αποτελεσματικά. Μπορεί επίσης να χρησιμοποιηθεί για την παροχή δυναμικών πολιτικών

δικτύου, όπως εξισορρόπηση φορτίου ή διαμόρφωση κίνησης, βελτιώνοντας την απόδοση και την αξιοπιστία του συστήματος (Esposito et al., 2017).

Συμπερασματικά, οι διασυνδέσεις είναι απαραίτητες για την επιτυχία του edge και του CC. Επιτρέπουν την αποτελεσματική μεταφορά δεδομένων μεταξύ των διαφορετικών στοιχείων του συστήματος, διασφαλίζοντας ότι τα δεδομένα μπορούν να υποβληθούν σε επεξεργασία και ανάλυση σε πραγματικό χρόνο. Οι διασυνδέσεις θα πρέπει να σχεδιάζονται ώστε να πληρούν τις ειδικές απαιτήσεις του συστήματος, λαμβάνοντας υπόψη παράγοντες όπως η ταχύτητα, η καθυστέρηση και το εύρος ζώνης. Η επίτευξη διασυνδέσεων για υπολογιστές αιχμής και cloud απαιτεί προσεκτικό σχεδιασμό και τεχνικές όπως συνδέσεις σημείου προς σημείο, εικονικά δίκτυα, NFV και SDN μπορούν να χρησιμοποιηθούν για να επιτευχθεί το επιθυμητό επίπεδο απόδοσης και αξιοπιστίας (Cao et al., 2020).

2.4.2. Μετάδοση υψηλής ταχύτητας για Edge και CC

Η μετάδοση υψηλής ταχύτητας είναι ένα κρίσιμο συστατικό του edge και του CC. Αυτές οι τεχνολογίες περιλαμβάνουν την επεξεργασία και αποθήκευση μεγάλου όγκου δεδομένων και η μετάδοση υψηλής ταχύτητας είναι απαραίτητη για την αποτελεσματική μεταφορά αυτών των δεδομένων. Η μετάδοση υψηλής ταχύτητας είναι επίσης απαραίτητη για εφαρμογές σε πραγματικό χρόνο, όπως ροή βίντεο και παιχνίδια. Σε αυτή την ενότητα, θα συζητήσουμε τον ρόλο της μετάδοσης υψηλής ταχύτητας στον υπολογιστικό άκρο και στο cloud, τη σημασία της και πώς μπορεί να επιτευχθεί (D'Agostino et al., 2019).

Η μετάδοση υψηλής ταχύτητας αναφέρεται στη μετάδοση δεδομένων σε υψηλές ταχύτητες. Στο edge και στο CC, η μετάδοση υψηλής ταχύτητας παίζει κρίσιμο ρόλο στην αποτελεσματική μεταφορά δεδομένων μεταξύ των διαφορετικών στοιχείων του συστήματος. Ο ρόλος της μετάδοσης υψηλής ταχύτητας στον υπολογιστικό άκρο και στο cloud είναι (Esposito et al., 2017):

- Ενεργοποίηση αποτελεσματικής μεταφοράς δεδομένων: Το Edge και το CC περιλαμβάνουν την επεξεργασία και αποθήκευση μεγάλου όγκου δεδομένων. Επομένως, η μετάδοση υψηλής ταχύτητας είναι απαραίτητη για την αποτελεσματική μεταφορά αυτών των δεδομένων μεταξύ των διαφορετικών στοιχείων του συστήματος.

- Ενεργοποίηση εφαρμογών σε πραγματικό χρόνο: Το Edge και το CC χρησιμοποιούνται όλο και περισσότερο για εφαρμογές σε πραγματικό χρόνο, όπως ροή βίντεο και παιχνίδια. Η μετάδοση υψηλής ταχύτητας είναι απαραίτητη για την παροχή υψηλής ποιότητας μέσων ροής και άλλων εφαρμογών έντασης δεδομένων (Cao et al., 2020).
- Εξασφάλιση χαμηλού λανθάνοντος χρόνου: Στον υπολογισμό ακμών, τα δεδομένα υποβάλλονται σε επεξεργασία στην άκρη του δικτύου, κάτι που απαιτεί συνδέσεις χαμηλής καθυστέρησης μεταξύ των συσκευών ακμής και των κέντρων δεδομένων cloud. Στο CC, τα δεδομένα υποβάλλονται σε επεξεργασία στα κέντρα δεδομένων cloud, κάτι που απαιτεί συνδέσεις χαμηλής καθυστέρησης μεταξύ των κέντρων δεδομένων cloud και των τελικών χρηστών. Ως εκ τούτου, η μετάδοση υψηλής ταχύτητας είναι απαραίτητη για τη διασφάλιση χαμηλής καθυστέρησης και τη δυνατότητα επεξεργασίας και ανάλυσης δεδομένων σε πραγματικό χρόνο (Wu et al., 2020).

Η σημασία της μετάδοσης υψηλής ταχύτητας στον υπολογιστικό άκρο και στο cloud δεν μπορεί να υπερεκτιμηθεί. Η επιτυχία του edge και του CC εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από την ικανότητα μετάδοσης μεγάλου όγκου δεδομένων σε υψηλές ταχύτητες. Η σημασία της μετάδοσης υψηλής ταχύτητας στον υπολογιστικό άκρο και στο σύννεφο μπορεί να συνοψιστεί ως εξής (Kochovski et al., 2020):

- Αποδοτικότητα: Η μετάδοση υψηλής ταχύτητας επιτρέπει την αποτελεσματική μεταφορά δεδομένων μεταξύ των διαφορετικών στοιχείων του συστήματος, διασφαλίζοντας ότι τα δεδομένα μπορούν να υποβληθούν σε επεξεργασία και να αναλυθούν σε πραγματικό χρόνο. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα μεγαλύτερη απόδοση και βελτιωμένη απόδοση του συστήματος.
- Ποιότητα υπηρεσίας: Η μετάδοση υψηλής ταχύτητας είναι απαραίτητη για την παροχή υπηρεσιών υψηλής ποιότητας, όπως ροή βίντεο και gaming. Χωρίς μετάδοση υψηλής ταχύτητας, η ποιότητα των υπηρεσιών μπορεί να υποβαθμιστεί, με αποτέλεσμα κακή εμπειρία χρήστη.
- Καινοτομία: Η μετάδοση υψηλής ταχύτητας επιτρέπει την ανάπτυξη νέων εφαρμογών και υπηρεσιών που δεν ήταν δυνατές νωρίτερα. Η διαθεσιμότητα μετάδοσης υψηλής ταχύτητας μπορεί να επιτρέψει την ανάπτυξη νέων τεχνολογιών, όπως τα αυτόνομα οχήματα και το βιομηχανικό IoT.

2.4.3. Επίτευξη μετάδοσης υψηλής ταχύτητας για Edge και CC

Η επίτευξη μετάδοσης υψηλής ταχύτητας για υπολογιστές ακμών και cloud απαιτεί προσεκτικό σχεδιασμό. Ακολουθούν μερικοί από τους τρόπους με τους οποίους μπορεί να επιτευχθεί μετάδοση υψηλής ταχύτητας για υπολογιστές ακμών και cloud:

- **Δίκτυα υψηλής ταχύτητας:** Τα δίκτυα υψηλής ταχύτητας, όπως τα δίκτυα 5G και οπτικών ινών, παρέχουν μεταφορά δεδομένων υψηλής ταχύτητας, χαμηλή καθυστέρηση και υψηλό εύρος ζώνης. Η χρήση αυτών των δικτύων σε υπολογιστές αιχμής και cloud μπορεί να επιτρέψει την επεξεργασία και ανάλυση δεδομένων σε πραγματικό χρόνο, κάτι που είναι απαραίτητο για εφαρμογές όπως τα αυτόνομα οχήματα και το βιομηχανικό IoT.
- **Βελτιστοποίηση δικτύου:** Οι τεχνικές βελτιστοποίησης δικτύου, όπως η διαμόρφωση κίνησης και η εξισορρόπηση φορτίου, μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τη βελτιστοποίηση της απόδοσης του δικτύου. Αυτές οι τεχνικές μπορούν να βοηθήσουν στο να διασφαλιστεί ότι το δίκτυο μπορεί να χειριστεί τις αυξανόμενες απαιτήσεις που τίθενται σε αυτό χωρίς καμία υποβάθμιση στην απόδοση (Wu et al., 2020).
- **EC:** Ο υπολογισμός άκρων περιλαμβάνει την επεξεργασία δεδομένων στην άκρη του δικτύου, η οποία μπορεί να μειώσει τον όγκο των δεδομένων που πρέπει να μεταδοθούν στα κέντρα δεδομένων cloud. Αυτό μπορεί να μειώσει τον όγκο των δεδομένων που πρέπει να μεταδοθούν, επιτρέποντας τη μετάδοση υψηλής ταχύτητας και μειώνοντας την καθυστέρηση (Li et al., 2016).
- **Τεχνικές συμπίεσης:** Οι τεχνικές συμπίεσης, όπως η συμπίεση δεδομένων και η συμπίεση βίντεο, μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τη μείωση του μεγέθους των δεδομένων που πρέπει να μεταδοθούν, επιτρέποντας τη μετάδοση υψηλής ταχύτητας και μειώνοντας την καθυστέρηση.
- **Δικτύωση που ορίζεται από λογισμικό (SDN):** Το SDN είναι μια τεχνική που διαχωρίζει το επίπεδο ελέγχου και το επίπεδο δεδομένων του δικτύου, επιτρέποντας στο δίκτυο να είναι πιο ευέλικτο και προγραμματιζόμενο. Το SDN μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τη βελτιστοποίηση της απόδοσης του δικτύου, επιτρέποντας τη μετάδοση υψηλής ταχύτητας και μειώνοντας την καθυστέρηση (Esposito et al., 2017).

Συμπερασματικά, η μετάδοση υψηλής ταχύτητας είναι κρίσιμη για την επιτυχία του edge και του CC. Αυτές οι τεχνολογίες περιλαμβάνουν την επεξεργασία και

αποθήκευση μεγάλου όγκου δεδομένων και η μετάδοση υψηλής ταχύτητας είναι απαραίτητη για την αποτελεσματική μεταφορά αυτών των δεδομένων. Η μετάδοση υψηλής ταχύτητας είναι επίσης απαραίτητη για εφαρμογές σε πραγματικό χρόνο, όπως ροή βίντεο και παιχνίδια. Η επίτευξη μετάδοσης υψηλής ταχύτητας για υπολογιστές ακμών και νέφους απαιτεί προσεκτικό σχεδιασμό και τεχνικές όπως δίκτυα υψηλής ταχύτητας, βελτιστοποίηση δικτύου, υπολογισμός άκρων, τεχνικές συμπίεσης και SDN μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την επίτευξη του επιθυμητού επιπέδου απόδοσης και αξιοπιστίας. Η διαθεσιμότητα μετάδοσης υψηλής ταχύτητας μπορεί να επιτρέψει την ανάπτυξη νέων τεχνολογιών και εφαρμογών, ανοίγοντας το δρόμο για έναν πιο συνδεδεμένο και αποτελεσματικό κόσμο (Ghosh & Grolinger, 2020).

2.5. Other Networking Needs for Edge and CC

Το Edge και το CC φέρνουν επανάσταση στον τρόπο με τον οποίο επεξεργαζόμαστε και αποθηκεύουμε δεδομένα. Αυτές οι τεχνολογίες προσφέρουν μεγαλύτερη ευελιξία, επεκτασιμότητα και αποτελεσματικότητα από τα παραδοσιακά μοντέλα υπολογιστών. Ωστόσο, η επιτυχία του edge και του CC εξαρτάται από κάτι περισσότερο από την απλή μετάδοση και τις διασυνδέσεις υψηλής ταχύτητας. Άλλες ανάγκες δικτύωσης, όπως η ασφάλεια, η επεκτασιμότητα και η αξιοπιστία, είναι εξίσου σημαντικές. Σε αυτήν την ενότητα, θα συζητήσουμε αυτές τις ανάγκες δικτύωσης και τη σημασία τους στον υπολογισμό αιχμής και στο cloud (Li et al., 2016).

Η ασφάλεια είναι μια κρίσιμη ανάγκη δικτύωσης στο edge και στο CC. Το Edge και το CC περιλαμβάνουν την επεξεργασία και αποθήκευση ευαίσθητων δεδομένων, όπως προσωπικών πληροφοριών ή βιομηχανικών δεδομένων. Επομένως, η δικτυακή υποδομή θα πρέπει να σχεδιαστεί ώστε να παρέχει ασφαλή και αξιόπιστη επικοινωνία μεταξύ των συσκευών αιχμής, των κέντρων δεδομένων cloud και των τελικών χρηστών (Wu et al., 2020).

Ο ρόλος της ασφάλειας στο edge και στο CC είναι:

- Προστασία δεδομένων: Το Edge και το CC περιλαμβάνουν την επεξεργασία και αποθήκευση ευαίσθητων δεδομένων. Η δικτυακή υποδομή θα πρέπει να έχει σχεδιαστεί για να προστατεύει αυτά τα δεδομένα από μη εξουσιοδοτημένη πρόσβαση, τροποποίηση ή κλοπή (Albatineh et al., 2020).

- Διασφάλιση απορρήτου: Το Edge και το CC περιλαμβάνουν την επεξεργασία και αποθήκευση προσωπικών πληροφοριών. Η υποδομή δικτύωσης θα πρέπει να σχεδιαστεί έτσι ώστε να διασφαλίζεται ότι αυτές οι πληροφορίες παραμένουν ιδιωτικές και ασφαλείς (Kochovski et al., 2020).
- Αποτροπή επιθέσεων: Το Edge και το CC είναι ευάλωτα σε διάφορους τύπους επιθέσεων, όπως επιθέσεις άρνησης υπηρεσίας ή επιθέσεις κακόβουλου λογισμικού. Η υποδομή δικτύωσης θα πρέπει να σχεδιαστεί για να αποτρέπει αυτές τις επιθέσεις και να διασφαλίζει ότι το σύστημα είναι ανθεκτικό σε αυτές (Sriram, 2022).

Για να επιτευχθεί ασφάλεια στο edge και στο CC, μπορούν να χρησιμοποιηθούν διάφορες τεχνικές, όπως κρυπτογράφηση, έλεγχος ταυτότητας, έλεγχος πρόσβασης και ανίχνευση/αποτροπή εισβολής. Αυτές οι τεχνικές μπορούν να χρησιμοποιηθούν για να διασφαλιστεί ότι τα δεδομένα προστατεύονται από μη εξουσιοδοτημένη πρόσβαση, ότι το σύστημα είναι ανθεκτικό σε επιθέσεις και ότι διατηρείται το απόρρητο των χρηστών.

Η επεκτασιμότητα είναι μια άλλη κρίσιμη ανάγκη δικτύωσης στο edge και στο CC. Το Edge και το CC περιλαμβάνουν την επεξεργασία και αποθήκευση μεγάλου όγκου δεδομένων. Επομένως, η δικτυακή υποδομή θα πρέπει να είναι επεκτάσιμη και ικανή να χειρίζεται μεγάλους όγκους δεδομένων χωρίς καμία υποβάθμιση στην απόδοση.

Ο ρόλος της επεκτασιμότητας στο edge και στο CC είναι:

- Βεβαιωθείτε ότι το σύστημα μπορεί να αντιμετωπίσει τις αυξανόμενες απαιτήσεις: Το Edge και το CC χρησιμοποιούνται για έναν αυξανόμενο αριθμό εφαρμογών και υπηρεσιών. Η υποδομή δικτύωσης θα πρέπει να είναι επεκτάσιμη και ικανή να χειρίζεται τις αυξανόμενες απαιτήσεις που τίθενται σε αυτήν.
- Βεβαιωθείτε ότι το σύστημα μπορεί να επεκταθεί: Καθώς ο όγκος των δεδομένων αυξάνεται, η υποδομή δικτύωσης θα πρέπει να σχεδιαστεί ώστε να είναι εύκολα επεκτάσιμη.

Για να επιτευχθεί επεκτασιμότητα σε υπολογιστές ακμών και νέφους, μπορούν να χρησιμοποιηθούν διάφορες τεχνικές, όπως εξισορρόπηση φορτίου, εικονικοποίηση και δικτύωση που καθορίζεται από λογισμικό. Αυτές οι τεχνικές μπορούν να χρησιμοποιηθούν για να διασφαλιστεί ότι το σύστημα μπορεί να χειριστεί τις αυξανόμενες απαιτήσεις, ότι το σύστημα μπορεί να επεκταθεί εύκολα και ότι η απόδοση του συστήματος δεν υποβαθμίζεται (Albatineh et al., 2020).

Η αξιοπιστία είναι μια κρίσιμη ανάγκη δικτύωσης στο edge και στο CC. Το Edge και το CC περιλαμβάνουν την επεξεργασία και αποθήκευση κρίσιμων δεδομένων. Επομένως, η δικτυακή υποδομή θα πρέπει να σχεδιαστεί έτσι ώστε να παρέχει υψηλή διαθεσιμότητα και αξιοπιστία (Li et al., 2016).

Ο ρόλος της αξιοπιστίας στο edge και στο CC είναι (Sriram, 2022):

- Βεβαιωθείτε ότι το σύστημα είναι διαθέσιμο: Το Edge και το CC χρησιμοποιούνται για κρίσιμες εφαρμογές, όπως η υγειονομική περίθαλψη ή το βιομηχανικό IoT. Η υποδομή δικτύωσης θα πρέπει να σχεδιαστεί έτσι ώστε να διασφαλίζεται ότι το σύστημα είναι διαθέσιμο όταν χρειάζεται.
- Βεβαιωθείτε ότι το σύστημα είναι ανθεκτικό: Το Edge και το CC είναι ευάλωτα σε διάφορους τύπους αστοχιών, όπως αστοχίες υλικού ή αστοχίες δικτύου. Η υποδομή δικτύωσης θα πρέπει να σχεδιαστεί ώστε να διασφαλίζει ότι το σύστημα είναι ανθεκτικό σε αυτές τις αστοχίες (Cao et al., 2020).

Για να επιτευχθεί αξιοπιστία στο edge και στο CC, μπορούν να χρησιμοποιηθούν διάφορες τεχνικές, όπως πλεονασμός, σχεδιασμός με ανοχή σε σφάλματα και σχεδιασμός αποκατάστασης καταστροφών. Αυτές οι τεχνικές μπορούν να χρησιμοποιηθούν για να διασφαλιστεί ότι το σύστημα είναι διαθέσιμο όταν χρειάζεται, ότι το σύστημα είναι ανθεκτικό σε αστοχίες και ότι η απόδοση του συστήματος δεν υποβαθμίζεται (Esposito et al., 2017).

Συμπερασματικά, η ασφάλεια, η επεκτασιμότητα και η αξιοπιστία είναι κρίσιμες ανάγκες δικτύωσης στο edge και στο CC. Η υποδομή δικτύωσης θα πρέπει να σχεδιαστεί έτσι ώστε να διασφαλίζει ότι το σύστημα είναι ασφαλές, επεκτάσιμο και αξιόπιστο. Η επίτευξη αυτών των αναγκών δικτύωσης απαιτεί προσεκτικό σχεδιασμό και τεχνικές όπως κρυπτογράφηση, έλεγχος ταυτότητας, έλεγχος πρόσβασης, εξισορρόπηση φορτίου, εικονικοποίηση, δικτύωση που καθορίζεται από λογισμικό, πλεονασμός, σχεδιασμός με ανοχή σε σφάλματα και σχεδιασμός αποκατάστασης καταστροφών μπορούν να χρησιμοποιηθούν για να επιτευχθεί το επιθυμητό επίπεδο απόδοσης και αξιοπιστίας. Η διαθεσιμότητα μιας ασφαλούς, επεκτάσιμης και αξιόπιστης δικτυακής υποδομής είναι απαραίτητη για την επιτυχία του edge και CC, επιτρέποντας την ανάπτυξη νέων τεχνολογιών και εφαρμογών που μπορούν να μεταμορφώσουν τον τρόπο επεξεργασίας και αποθήκευσης δεδομένων. Αντιμετωπίζοντας αυτές τις ανάγκες δικτύωσης, το edge και το CC μπορούν να εκπληρώσουν την υπόσχεσή τους για μεγαλύτερη ευελιξία, επεκτασιμότητα και

Η Χρήση Τεχνολογιών Οπτικού Fronthaul για Εφαρμογές Υπολογιστικής Άκρου Εστιάζοντας στα Δίκτυα 5G

αποτελεσματικότητα, παρέχοντας τη βάση για έναν πιο συνδεδεμένο και αποτελεσματικό κόσμο.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

OPTICAL FRONTHAUL ΓΙΑ 5G

3.1. Optical Fronthaul για 5G

3.1.1. Βασικά χαρακτηριστικά και πλεονεκτήματα του Optical Fronthaul

Το Optical Fronthaul είναι ένα κρίσιμο στοιχείο των δικτύων 5G, που επιτρέπει την αποτελεσματική μεταφορά δεδομένων μεταξύ του δικτύου ραδιοπρόσβασης (RAN) και της κεντρικής μονάδας επεξεργασίας (CPU). Το Optical fronthaul είναι ένα υψηλής χωρητικότητας, χαμηλής καθυστέρησης και αξιόπιστο δίκτυο μεταφοράς που συνδέει τις απομακρυσμένες ραδιομονάδες (RRU) με τις μονάδες επεξεργασίας βασικής ζώνης (BBU) που βρίσκονται στο κεντρικό γραφείο (Ranaweera et al., 2017).

Το Optical Fronthaul διαδραματίζει κρίσιμο ρόλο στην υλοποίηση προηγμένων χαρακτηριστικών 5G, όπως το τεράστιο MIMO, η διαμόρφωση δέσμης και η κοπή δικτύου. Το Optical Fronthaul επιτρέπει την επεξεργασία κίνησης υψηλού εύρους ζώνης και χαμηλής καθυστέρησης στην άκρη του δικτύου, επιτρέποντας ανάλυση και επεξεργασία δεδομένων σε πραγματικό χρόνο (Alimi et al., 2017).

Ο σκοπός αυτής της ενότητας είναι να παράσχει μια επισκόπηση της οπτικής προκατασκευής σε δίκτυα 5G. Θα συζητήσουμε τα βασικά χαρακτηριστικά και τα πλεονεκτήματα του οπτικού fronthaul και τις διαφορετικές αρχιτεκτονικές και τεχνολογίες που χρησιμοποιούνται στο οπτικό fronthaul (Macho et al., 2016).

Το Optical fronthaul έχει πολλά βασικά χαρακτηριστικά και πλεονεκτήματα που το καθιστούν απαραίτητο για δίκτυα 5G. Μερικά από τα βασικά χαρακτηριστικά και τα πλεονεκτήματα της οπτικής πρόσοψης είναι (Song et al., 2019):

- **Υψηλή χωρητικότητα:** Το Optical fronthaul παρέχει υψηλή χωρητικότητα για υποστήριξη της μετάδοσης δεδομένων υψηλού εύρους ζώνης από τις RRU στις BBU. Αυτή η υψηλή χωρητικότητα επιτρέπει την εφαρμογή προηγμένων χαρακτηριστικών 5G, όπως το τεράστιο MIMO, το οποίο απαιτεί την επεξεργασία μεγάλων ποσοτήτων δεδομένων.
- **Χαμηλή καθυστέρηση:** Το Optical fronthaul παρέχει χαμηλή καθυστέρηση, η οποία είναι απαραίτητη για εφαρμογές σε πραγματικό χρόνο, όπως τα

αυτόνομα οχήματα και το βιομηχανικό IoT. Η χαμηλή καθυστέρηση διασφαλίζει ότι τα δεδομένα μπορούν να υποβληθούν σε επεξεργασία και να αναλυθούν σε πραγματικό χρόνο, επιτρέποντας ταχύτερη λήψη αποφάσεων και βελτιωμένη απόδοση (Macho et al., 2016).

- **Αξιοπιστία:** Το Optical fronthaul παρέχει υψηλή αξιοπιστία, η οποία είναι απαραίτητη για κρίσιμες για την αποστολή εφαρμογές, όπως η υγειονομική περίθαλψη και η δημόσια ασφάλεια. Η υψηλή αξιοπιστία διασφαλίζει ότι τα δεδομένα μεταδίδονται χωρίς διακοπές ή καθυστερήσεις, διασφαλίζοντας ότι το σύστημα είναι πάντα διαθέσιμο όταν χρειάζεται (Ranaweera et al., 2017).
- **Οικονομική απόδοση:** Το Optical fronthaul είναι μια οικονομικά αποδοτική λύση για δίκτυα 5G, καθώς επιτρέπει τη χρήση κεντρικών ή κατακεντρωμένων μονάδων επεξεργασίας, μειώνοντας το κόστος ανάπτυξης και συντήρησης (Alimi et al., 2017).

Αρχιτεκτονικές και Τεχνολογίες που χρησιμοποιούνται στο Optical Fronthaul

Το Optical fronthaul μπορεί να υλοποιηθεί χρησιμοποιώντας διαφορετικές αρχιτεκτονικές και τεχνολογίες, ανάλογα με τις συγκεκριμένες απαιτήσεις του δικτύου. Μερικές από τις πιο κοινές αρχιτεκτονικές και τεχνολογίες που χρησιμοποιούνται στο οπτικό fronthaul είναι (Torres-Ferrera et al., 2017):

- **Κεντρικό RAN (CRAN):** Το CRAN είναι μια κεντρική αρχιτεκτονική που χρησιμοποιεί μια κεντρική ομάδα BBU για την εξυπηρέτηση πολλαπλών RRU. Αυτή η αρχιτεκτονική επιτρέπει την αποτελεσματική κατανομή των πόρων, μειώνοντας το συνολικό κόστος του συστήματος. Στο CRAN, τα RRU συνδέονται με τα BBU χρησιμοποιώντας οπτικές ζεύξεις υψηλής ταχύτητας (Macho et al., 2016).
- **Κατακεντρωμένο ραδιόφωνο μέσω ίνας (D-ROF):** Το D-ROF είναι μια κατακεντρωμένη αρχιτεκτονική που χρησιμοποιεί καλώδια οπτικών ινών για τη μεταφορά ραδιοσημάτων από τα RRU στα BBU. Το D-ROF επιτρέπει την αποτελεσματική επεξεργασία της κίνησης υψηλού εύρους ζώνης και χαμηλής καθυστέρησης στην άκρη του δικτύου, επιτρέποντας ανάλυση και επεξεργασία δεδομένων σε πραγματικό χρόνο (Ranaweera et al., 2017).
- **Αναλογικό ραδιόφωνο μέσω οπτικών ινών (A-ROF):** Το A-ROF είναι μια κατακεντρωμένη αρχιτεκτονική που χρησιμοποιεί αναλογική διαμόρφωση για τη μεταφορά ραδιοσημάτων από τα RRU στα BBU. Το A-ROF είναι μια

οικονομικά αποδοτική λύση για δίκτυα 5G, καθώς δεν απαιτεί τη χρήση ακριβών μονάδων ψηφιακής επεξεργασίας (Alimi et al., 2017).

Συμπερασματικά, το οπτικό fronthaul είναι ένα κρίσιμο στοιχείο των δικτύων 5G, επιτρέποντας την αποτελεσματική μεταφορά δεδομένων μεταξύ του RAN και της CPU. Το Optical fronthaul παρέχει πολλά βασικά χαρακτηριστικά και πλεονεκτήματα, όπως η υψηλή χωρητικότητα, η χαμηλή καθυστέρηση, η αξιοπιστία και η οικονομική απόδοση. Οι διαφορετικές αρχιτεκτονικές και τεχνολογίες που χρησιμοποιούνται στο οπτικό fronthaul, όπως CRAN, D-ROF και A-ROF, επιτρέπουν την αποτελεσματική επεξεργασία της κίνησης υψηλού εύρους ζώνης και χαμηλής καθυστέρησης στην άκρη του δικτύου, επιτρέποντας ανάλυση και επεξεργασία σε πραγματικό χρόνο των δεδομένων. Η κατανόηση των βασικών χαρακτηριστικών και πλεονεκτημάτων του οπτικού fronthaul και των διαφορετικών αρχιτεκτονικών και τεχνολογιών που χρησιμοποιούνται στο οπτικό fronthaul είναι απαραίτητη για το σχεδιασμό και την υλοποίηση δικτύων 5G. Εκμεταλλευόμενοι τη δύναμη του οπτικού fronthaul, τα δίκτυα 5G μπορούν να εκπληρώσουν την υπόσχεσή τους για συνδεσιμότητα υψηλής ταχύτητας, επιτρέποντας την ανάπτυξη νέων τεχνολογιών και εφαρμογών που μπορούν να αλλάξουν τον τρόπο που ζούμε και εργαζόμαστε (Wang et al., 2021).

3.1.2. Αρχιτεκτονικές του Optical Fronthaul

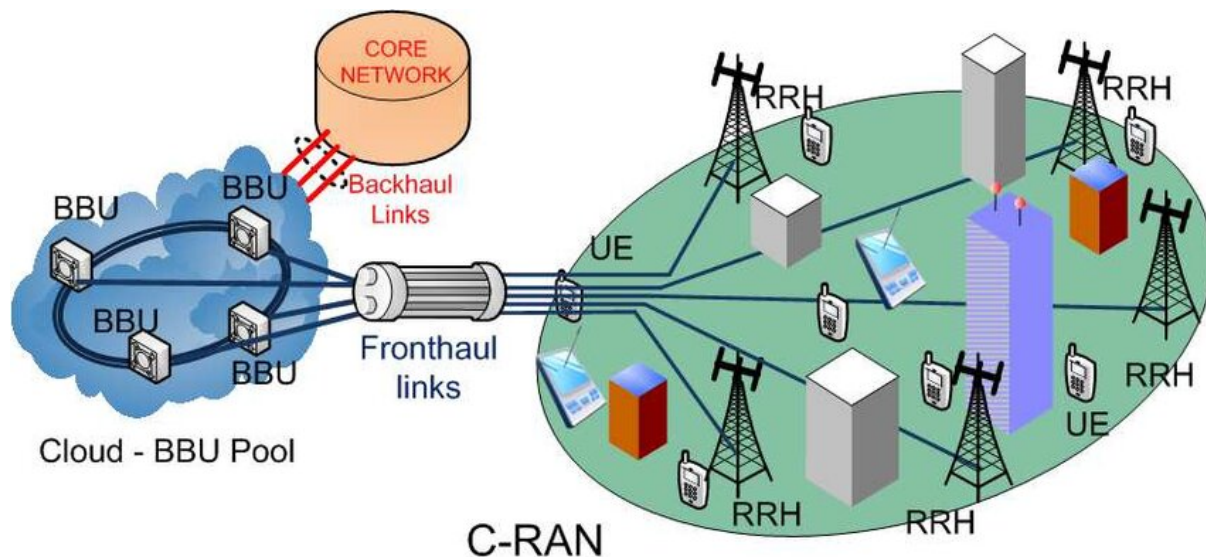
Το Optical fronthaul είναι ένα κρίσιμο στοιχείο των δικτύων 5G, που επιτρέπει την αποτελεσματική μεταφορά δεδομένων μεταξύ των “Απομακρυσμένων Ασύρματων Μονάδων (Remote Radio Units - RRU)” και των “Μονάδων Επεξεργασίας Βασικής Ζώνης (Baseband Processing Units - BBUs)”. Το Optical fronthaul μπορεί να υλοποιηθεί χρησιμοποιώντας διαφορετικές αρχιτεκτονικές, καθεμία με τα δικά της πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα. Σε αυτήν την ενότητα, θα συζητήσουμε τις διαφορετικές αρχιτεκτονικές του οπτικού fronthaul, συμπεριλαμβανομένου του “Κεντρικού RAN (centralized RAN - CRAN)”, του “Κατανεμημένη Ραδιοπρόσβαση Μέσω Ίνας (Distributed Radio Over Fiber - D-ROF)” και του “Αναλογική Ραδιοπρόσβαση Μέσω Ίνων (Analog Radio Over Fiber - A-ROF)” (Ranaweera et al., 2017).

Κεντρικό RAN (CRAN)

Το Centralized RAN (CRAN) είναι μια κεντρική αρχιτεκτονική που χρησιμοποιεί μια κεντρική ομάδα BBU για την εξυπηρέτηση πολλαπλών RRU. Στο CRAN, τα RRU

Η Χρήση Τεχνολογιών Οπτικού Fronthaul για Εφαρμογές Υπολογιστικής Άκρου Εστιάζοντας στα Δίκτυα 5G

συνδέονται με τα BBU χρησιμοποιώντας οπτικές ζεύξεις υψηλής ταχύτητας. Το πλεονέκτημα του CRAN είναι η αποτελεσματική κατανομή των πόρων, μειώνοντας το συνολικό κόστος του συστήματος. Στο CRAN, τα BBU μπορούν να βρίσκονται σε ένα κεντρικό γραφείο, με τα RRU να αναπτύσσονται σε απομακρυσμένες τοποθεσίες. Αυτή η κεντρική αρχιτεκτονική επιτρέπει την αποτελεσματική χρήση των πόρων, μειώνοντας το συνολικό κόστος ανάπτυξης και συντήρησης (Ranaweera et al., 2017).



Σχήμα 7: Αρχιτεκτονική C-RAN. Πηγή: (Ha et al., 2015)

Ένα από τα βασικά οφέλη του CRAN είναι η ικανότητα επεξεργασίας και ανάλυσης δεδομένων κεντρικά, επιτρέποντας την πιο αποτελεσματική κατανομή και διαχείριση των πόρων. Αυτή η κεντρική επεξεργασία επιτρέπει επίσης την εφαρμογή προηγμένων χαρακτηριστικών 5G, όπως το τεράστιο MIMO και τη διαμόρφωση δέσμης. Ωστόσο, ένα από τα βασικά μειονεκτήματα του CRAN είναι η αυξημένη καθυστέρηση που εισάγεται από την κεντρική επεξεργασία (Alimi et al., 2017).

Το Distributed Radio over Fiber (D-ROF) είναι μια κατακεντρωμένη αρχιτεκτονική που χρησιμοποιεί καλώδια οπτικών ινών για τη μεταφορά ραδιοσημάτων από τα RRU στα BBU. Στο D-ROF, τα RRU συνδέονται με τα BBU χρησιμοποιώντας καλώδια οπτικών ινών, επιτρέποντας την αποτελεσματική επεξεργασία της κίνησης υψηλού εύρους ζώνης και χαμηλής καθυστέρησης στην άκρη του δικτύου. Το D-ROF επιτρέπει την εφαρμογή προηγμένων χαρακτηριστικών 5G, όπως το τεράστιο MIMO, η διαμόρφωση δέσμης και η κοπή δικτύου (Ranaweera et al., 2017).

Το πλεονέκτημα του D-ROF είναι η αποτελεσματική επεξεργασία της κίνησης υψηλού εύρους ζώνης και χαμηλής καθυστέρησης στην άκρη του δικτύου, επιτρέποντας ανάλυση και επεξεργασία δεδομένων σε πραγματικό χρόνο. Το D-ROF επιτρέπει επίσης την αποτελεσματική κοινή χρήση των πόρων, μειώνοντας το συνολικό κόστος ανάπτυξης και συντήρησης. Ωστόσο, ένα από τα βασικά μειονεκτήματα του D-ROF είναι η αυξημένη πολυπλοκότητα του συστήματος, που απαιτεί περισσότερα καλώδια οπτικών ινών και οπτικά εξαρτήματα, αυξάνοντας το συνολικό κόστος του συστήματος (Macho et al., 2016).

Analog Radio over Fiber (A-ROF)

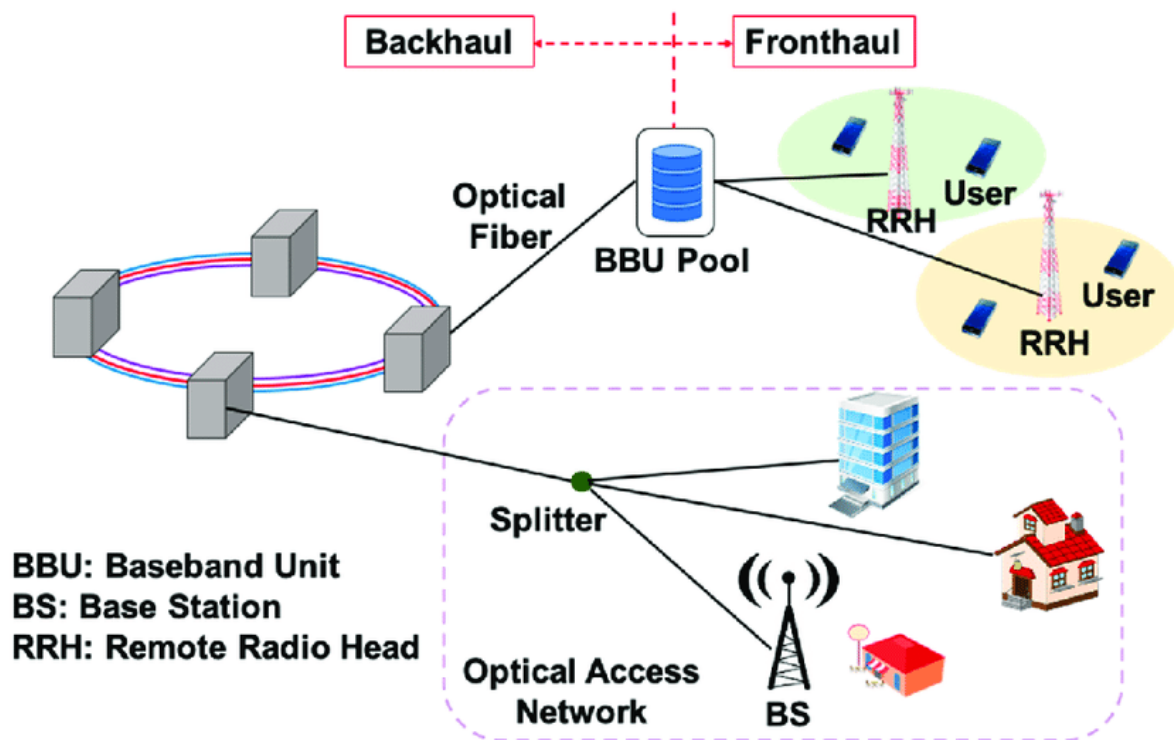
Το Analog Radio over Fiber (A-ROF) είναι μια κατακευματισμένη αρχιτεκτονική που χρησιμοποιεί αναλογική διαμόρφωση για τη μεταφορά ραδιοσημάτων από τα RRU στα BBU. Το A-ROF είναι μια οικονομικά αποδοτική λύση για δίκτυα 5G, καθώς δεν απαιτεί τη χρήση ακριβών μονάδων ψηφιακής επεξεργασίας. Το A-ROF χρησιμοποιεί αναλογική διαμόρφωση για τη μετάδοση των ραδιοσημάτων μέσω των καλωδίων οπτικών ινών, επιτρέποντας την αποτελεσματική επεξεργασία της κίνησης υψηλού εύρους ζώνης και χαμηλής καθυστέρησης στην άκρη του δικτύου (Ranaweera et al., 2017).

Το πλεονέκτημα του A-ROF είναι η οικονομική αποδοτικότητα του συστήματος, καθώς δεν απαιτεί τη χρήση ακριβών μονάδων ψηφιακής επεξεργασίας. Το A-ROF επιτρέπει επίσης την εφαρμογή προηγμένων χαρακτηριστικών 5G, όπως το τεράστιο MIMO, η διαμόρφωση δέσμης και η κοπή δικτύου. Ωστόσο, ένα από τα βασικά μειονεκτήματα του A-ROF είναι η μειωμένη ευελιξία του συστήματος, καθώς περιορίζεται από την αναλογική διαμόρφωση που χρησιμοποιείται για τη μετάδοση των ραδιοσημάτων (Song et al., 2019).

Συμπερασματικά, η επιλογή της αρχιτεκτονικής για οπτικό fronthaul εξαρτάται από τις συγκεκριμένες απαιτήσεις του δικτύου. Το CRAN είναι μια κεντρική αρχιτεκτονική που επιτρέπει την αποτελεσματική κοινή χρήση των πόρων, μειώνοντας το συνολικό κόστος του συστήματος. Το D-ROF είναι μια κατακευματισμένη αρχιτεκτονική που επιτρέπει την αποτελεσματική επεξεργασία της κίνησης υψηλού εύρους ζώνης και χαμηλής καθυστέρησης στην άκρη του δικτύου, επιτρέποντας ανάλυση και επεξεργασία δεδομένων σε πραγματικό χρόνο. Το A-ROF είναι μια οικονομικά αποδοτική λύση για δίκτυα 5G, καθώς δεν απαιτεί τη χρήση ακριβών μονάδων ψηφιακής επεξεργασίας. Κάθε αρχιτεκτονική έχει τα δικά της πλεονεκτήματα και

Η Χρήση Τεχνολογιών Οπτικού Fronthaul για Εφαρμογές Υπολογιστικής Άκρου Εστιάζοντας στα Δίκτυα 5G

μειονεκτήματα και η επιλογή της αρχιτεκτονικής θα εξαρτηθεί από τις συγκεκριμένες απαιτήσεις του δικτύου (Kim et al., 2016).



Σχήμα 8: Αρχιτεκτονική συστήματος Radio-over-fiber (RoF). Πηγή: (He et al., 2020)

Η κατανόηση των διαφορετικών αρχιτεκτονικών του οπτικού fronthaul είναι απαραίτητη για το σχεδιασμό και την υλοποίηση δικτύων 5G. Επιλέγοντας την κατάλληλη αρχιτεκτονική, οι φορείς εκμετάλλευσης δικτύων μπορούν να διασφαλίσουν ότι το δίκτυό τους πληροί τις συγκεκριμένες απαιτήσεις των εφαρμογών και των υπηρεσιών τους. Το Optical fronthaul είναι ένα κρίσιμο συστατικό των δικτύων 5G, που επιτρέπει την εφαρμογή προηγμένων χαρακτηριστικών όπως το τεράστιο MIMO, τη διαμόρφωση δέσμης και τον τεμαχισμό δικτύου. Εκμεταλλευόμενοι τη δύναμη του οπτικού fronthaul, τα δίκτυα 5G μπορούν να εκπληρώσουν την υπόσχεσή τους για συνδεσιμότητα υψηλής ταχύτητας, επιτρέποντας την ανάπτυξη νέων τεχνολογιών και εφαρμογών που μπορούν να αλλάξουν τον τρόπο που ζούμε και εργαζόμαστε (Ranaweera et al., 2017).

3.1.3. Τεχνολογίες για Optical Fronthaul

Το Optical fronthaul είναι ένα κρίσιμο στοιχείο των δικτύων 5G, που επιτρέπει την αποτελεσματική μεταφορά δεδομένων μεταξύ των “Απομακρυσμένων Ραδιομονάδων (Remote Radio Units - RRU)” και των “Μονάδων Επεξεργασίας Βασικής Ζώνης (Baseband Processing Units - BBUs)”. Το Optical fronthaul μπορεί να υλοποιηθεί χρησιμοποιώντας διαφορετικές τεχνολογίες, καθεμία με τα δικά της πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα. Σε αυτή την ενότητα, θα συζητήσουμε τις διαφορετικές τεχνολογίες που χρησιμοποιούνται στην οπτική πρόσοψη, συμπεριλαμβανομένης της “Πολυπλεξίας με Διάρθρωση Τραχέους Μήκους Κύματος (Coarse Wavelength Division Multiplexing - CWDM)”, της “Πολυπλεξίας Διαίρεσης Πυκνού Μήκους Κύματος (Dense Wavelength Division Multiplexing - DWDM)” και της “Πολυπλεξίας Διαίρεσης Χρόνου και Μήκους Κύματος (Time and Wavelength Division Multiplexing - TWDM)” (Ranaweera et al., 2017).

Coarse Wavelength Division Multiplexing (CWDM)

Η CWDM είναι μια τεχνολογία που επιτρέπει τη μεταφορά πολλαπλών σημάτων μέσω ενός μόνο καλωδίου οπτικών ινών. Στο CWDM, πολλαπλά σήματα εκχωρούνται διαφορετικά μήκη κύματος και συνδυάζονται σε ένα μόνο καλώδιο οπτικών ινών. Το πλεονέκτημα του CWDM είναι ότι μειώνει τον αριθμό των απαιτούμενων καλωδίων οπτικών ινών, μειώνοντας το συνολικό κόστος του συστήματος. Το CWDM είναι κατάλληλο για μικρές έως μεσαίες αποστάσεις, συνήθως έως 80 km (Alimi et al., 2017).

Ένα από τα βασικά μειονεκτήματα του CWDM είναι ότι έχει περιορισμένη χωρητικότητα, καθώς μπορεί να υποστηρίξει μόνο περιορισμένο αριθμό μηκών κύματος. Αυτό καθιστά το CWDM λιγότερο κατάλληλο για εφαρμογές υψηλού εύρους ζώνης, όπως ροή βίντεο και μεταφορά δεδομένων υψηλής ταχύτητας (Kim et al., 2016).

Dense Wavelength Division Multiplexing (DWDM)

Η DWDM είναι μια τεχνολογία που επιτρέπει τη μεταφορά πολλαπλών σημάτων μέσω ενός μόνο καλωδίου οπτικών ινών. Στο DWDM, πολλαπλά σήματα εκχωρούνται διαφορετικά μήκη κύματος και συνδυάζονται σε ένα μόνο καλώδιο οπτικών ινών. Το πλεονέκτημα του DWDM είναι ότι επιτρέπει τη μετάδοση μεγάλου αριθμού σημάτων σε μεγάλες αποστάσεις, συνήθως έως 400 km ή περισσότερο. (Mitsolidou et al., 2019)

Το DWDM έχει μεγαλύτερη χωρητικότητα από το CWDM, καθώς μπορεί να υποστηρίξει μεγαλύτερο αριθμό μηκών κύματος. Αυτό καθιστά το DWDM κατάλληλο για εφαρμογές υψηλού εύρους ζώνης, όπως ροή βίντεο και μεταφορά δεδομένων υψηλής ταχύτητας. Ωστόσο, ένα από τα βασικά μειονεκτήματα του DWDM είναι η αυξημένη πολυπλοκότητα του συστήματος, που απαιτεί περισσότερα οπτικά εξαρτήματα και ακριβέστερο έλεγχο μήκους κύματος, αυξάνοντας το συνολικό κόστος του συστήματος (Ranaweera et al., 2017).

Time and Wavelength Division Multiplexing (TWDM)

Η TWDM είναι μια τεχνολογία που συνδυάζει τα πλεονεκτήματα της “Πολυπλεξίας Διαίρεσης Χρόνου (Time Division Multiplexing - TDM)” και της πολυπλεξίας διαίρεσης μήκους κύματος (WDM). Το TWDM επιτρέπει τη μετάδοση πολλαπλών σημάτων μέσω ενός μόνο καλωδίου οπτικών ινών, με κάθε σήμα να έχει διαφορετικό μήκος κύματος και χρονική θυρίδα. Το πλεονέκτημα του TWDM είναι ότι επιτρέπει την αποτελεσματική χρήση του διαθέσιμου εύρους ζώνης, αυξάνοντας τη συνολική χωρητικότητα του συστήματος (Alimi et al., 2017).

Το TWDM είναι κατάλληλο για εφαρμογές υψηλού εύρους ζώνης, όπως ροή βίντεο και μεταφορά δεδομένων υψηλής ταχύτητας, επιτρέποντας τη μετάδοση πολλαπλών σημάτων σε μεγάλες αποστάσεις. Ένα από τα βασικά πλεονεκτήματα του TWDM είναι η αποτελεσματική χρήση του διαθέσιμου εύρους ζώνης, μειώνοντας το συνολικό κόστος του συστήματος. Ωστόσο, ένα από τα βασικά μειονεκτήματα του TWDM είναι η αυξημένη πολυπλοκότητα του συστήματος, που απαιτεί περισσότερα οπτικά εξαρτήματα και πιο ακριβή έλεγχο χρόνου και μήκους κύματος (Ranaweera et al., 2017).

Συμπερασματικά, η επιλογή της τεχνολογίας για οπτικό fronthaul εξαρτάται από τις συγκεκριμένες απαιτήσεις του δικτύου. Το CWDM είναι κατάλληλο για μικρές έως μεσαίες αποστάσεις, συνήθως έως 80 km, και είναι οικονομικά αποδοτικό για συστήματα χαμηλής χωρητικότητας. Το DWDM είναι κατάλληλο για μεγάλες αποστάσεις, συνήθως έως 400 km ή περισσότερο, και έχει μεγαλύτερη χωρητικότητα από το CWDM. Το TWDM συνδυάζει τα πλεονεκτήματα του TDM και του WDM, επιτρέποντας την αποτελεσματική χρήση του διαθέσιμου εύρους ζώνης, μειώνοντας το συνολικό κόστος του συστήματος. Η κατανόηση των διαφορετικών τεχνολογιών που χρησιμοποιούνται στην οπτική fronthaul είναι απαραίτητη για το σχεδιασμό και την υλοποίηση δικτύων 5G. Επιλέγοντας την κατάλληλη τεχνολογία, οι φορείς εκμετάλλευσης δικτύων μπορούν να διασφαλίσουν ότι το δίκτυό τους πληροί τις

συγκεκριμένες απαιτήσεις των εφαρμογών και των υπηρεσιών τους. Το Optical fronthaul είναι ένα κρίσιμο συστατικό των δικτύων 5G, που επιτρέπει την εφαρμογή προηγμένων χαρακτηριστικών όπως το τεράστιο MIMO, τη διαμόρφωση δέσμης και τον τεμαχισμό δικτύου. Αξιοποιώντας τη δύναμη της οπτικής προμετωπίδας και επιλέγοντας την κατάλληλη τεχνολογία, τα δίκτυα 5G μπορούν να εκπληρώσουν την υπόσχεσή τους για συνδεσιμότητα υψηλής ταχύτητας, επιτρέποντας την ανάπτυξη νέων τεχνολογιών και εφαρμογών που μπορούν να αλλάξουν τον τρόπο που ζούμε και εργαζόμαστε (Song et al., 2019).

Εκτός από τις τεχνολογίες που συζητήθηκαν παραπάνω, άλλες τεχνολογίες που χρησιμοποιούνται στο οπτικό fronthaul περιλαμβάνουν το Ethernet fronthaul και το Radio Over Ethernet (RoE). Το Ethernet fronthaul είναι μια τεχνολογία που επιτρέπει τη μεταφορά της κίνησης Ethernet μεταξύ των RRU και των BBU, χρησιμοποιώντας διακόπτες και δρομολογητές Ethernet. Το RoE είναι μια τεχνολογία που επιτρέπει τη μεταφορά ραδιοσημάτων μέσω Ethernet, επιτρέποντας την αποτελεσματική επεξεργασία της κίνησης υψηλού εύρους ζώνης και χαμηλής καθυστέρησης στην άκρη του δικτύου (Ranaweera et al., 2017).

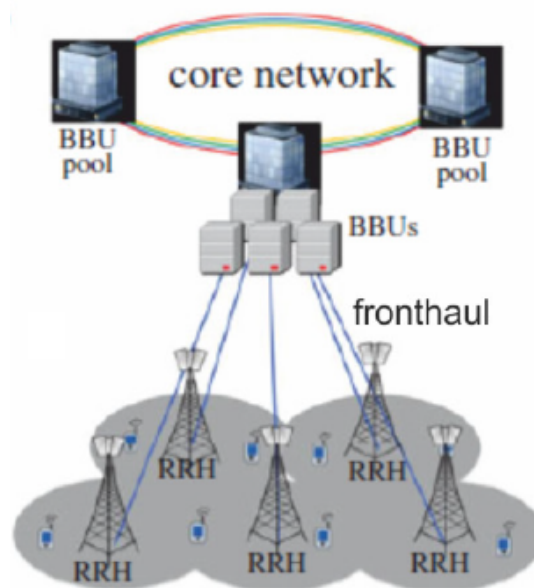
Κάθε τεχνολογία έχει τα δικά της πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα και η επιλογή της τεχνολογίας θα εξαρτηθεί από τις συγκεκριμένες απαιτήσεις του δικτύου. Η κατανόηση των διαφορετικών τεχνολογιών που χρησιμοποιούνται στην οπτική fronthaul είναι απαραίτητη για το σχεδιασμό και την υλοποίηση δικτύων 5G. Επιλέγοντας την κατάλληλη τεχνολογία, οι φορείς εκμετάλλευσης δικτύων μπορούν να διασφαλίσουν ότι το δίκτυό τους πληροί τις συγκεκριμένες απαιτήσεις των εφαρμογών και των υπηρεσιών τους, επιτρέποντας την αποτελεσματική επεξεργασία της κίνησης υψηλού εύρους ζώνης και χαμηλής καθυστέρησης στην άκρη του δικτύου (Kim, 2018).

Συνολικά, η επιλογή της κατάλληλης αρχιτεκτονικής και τεχνολογίας για οπτικό fronthaul είναι κρίσιμη για τον επιτυχημένο σχεδιασμό και την ανάπτυξη δικτύων 5G. Το Optical fronthaul επιτρέπει την αποτελεσματική μεταφορά δεδομένων μεταξύ των RRU και BBU, επιτρέποντας την υλοποίηση προηγμένων χαρακτηριστικών όπως το τεράστιο MIMO, τη διαμόρφωση δέσμης και τον τεμαχισμό δικτύου. Αξιοποιώντας την ισχύ του οπτικού fronthaul, τα δίκτυα 5G μπορούν να εκπληρώσουν την υπόσχεσή τους για συνδεσιμότητα υψηλής ταχύτητας, επιτρέποντας την ανάπτυξη νέων τεχνολογιών και εφαρμογών που μπορούν να αλλάξουν τον τρόπο που ζούμε και εργαζόμαστε..

3.1.4. Centralized RAN (CRAN)

Το Centralized RAN (CRAN) είναι μια κεντρική αρχιτεκτονική που χρησιμοποιεί μια κεντρική ομάδα BBU για την εξυπηρέτηση πολλαπλών RRU. Στο CRAN, τα RRU συνδέονται με τα BBU χρησιμοποιώντας οπτικές ζεύξεις υψηλής ταχύτητας. Το CRAN έχει αναδειχθεί ως δημοφιλής αρχιτεκτονική για δίκτυα 5G λόγω της ικανότητάς του να μοιράζεται αποτελεσματικά τους πόρους, να μειώνει το συνολικό κόστος και να ενεργοποιεί προηγμένες λειτουργίες όπως το τεράστιο MIMO και τη διαμόρφωση δέσμης (Kim et al., 2016).

Η κεντρική επεξεργασία στο CRAN επιτρέπει την υλοποίηση προηγμένων χαρακτηριστικών, όπως το μαζικό MIMO και τη διαμόρφωση δέσμης, καθώς και τον τεμαχισμό δικτύου και την εικονικοποίηση. Με την κεντρική επεξεργασία των δεδομένων, το CRAN επιτρέπει την πιο αποτελεσματική κατανομή και διαχείριση πόρων, βελτιστοποιώντας την απόδοση του δικτύου και βελτιώνοντας την εμπειρία του χρήστη. Το CRAN επιτρέπει επίσης την αποτελεσματική κοινή χρήση των πόρων, μειώνοντας το συνολικό κόστος ανάπτυξης και συντήρησης (Song et al., 2019).



Σχήμα 9: Αρχιτεκτονική Centralized-RAN. Πηγή: (Ha et al., 2015)

Ένα από τα βασικά πλεονεκτήματα του CRAN είναι η ικανότητά του να υποστηρίζει τον κεντρικό συντονισμό, επιτρέποντας την εφαρμογή προηγμένων χαρακτηριστικών, όπως το τεράστιο MIMO και τη διαμόρφωση δέσμης. Το τεράστιο

MIMO και η διαμόρφωση δέσμης είναι βασικά χαρακτηριστικά για δίκτυα 5G, επιτρέποντας μεγαλύτερη χωρητικότητα, καλύτερη κάλυψη και μειωμένες παρεμβολές. Στο CRAN, αυτά τα χαρακτηριστικά μπορούν να εφαρμοστούν πιο αποτελεσματικά λόγω της κεντρικής επεξεργασίας, επιτρέποντας την υλοποίηση μεγαλύτερων και πιο περίπλοκων συστοιχιών κεραιών (Ranaweera et al., 2017).

Ένα άλλο πλεονέκτημα του CRAN είναι η δυνατότητα υλοποίησης τεμαχισμού και εικονικοποίησης δικτύου. Ο τεμαχισμός δικτύου επιτρέπει τη δημιουργία εικονικών δικτύων, το καθένα με τα δικά του χαρακτηριστικά, επιτρέποντας πιο αποτελεσματική κοινή χρήση πόρων και καλύτερη προσαρμογή των υπηρεσιών. Η εικονικοποίηση επιτρέπει την αποτελεσματική κοινή χρήση φυσικών πόρων, μειώνοντας το συνολικό κόστος ανάπτυξης και συντήρησης (Kim, 2018).

Μία από τις βασικές προκλήσεις του CRAN είναι η αυξημένη καθυστέρηση που εισάγεται από την κεντρική επεξεργασία. Στο CRAN, τα δεδομένα πρέπει να μεταφέρονται μέσω οπτικών ζεύξεων υψηλής ταχύτητας μεταξύ των RRU και των BBU, εισάγοντας πρόσθετο λανθάνοντα χρόνο. Αυτή η αυξημένη καθυστέρηση μπορεί να έχει αρνητικό αντίκτυπο σε εφαρμογές που απαιτούν επεξεργασία σε πραγματικό χρόνο ή χαμηλής καθυστέρησης, όπως η επαυξημένη πραγματικότητα και τα αυτόνομα οχήματα (Gomes & Assimakopoulos, 2018).

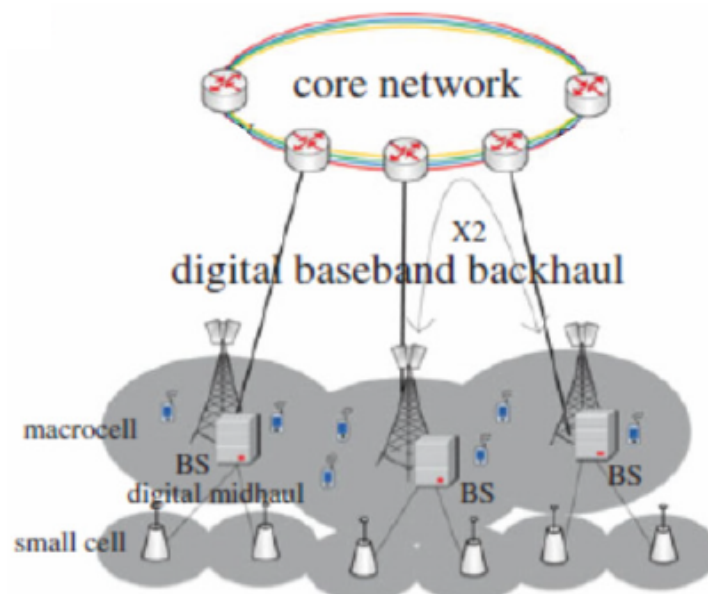
Για να αντιμετωπιστεί αυτή η πρόκληση, αναπτύσσονται νέες τεχνολογίες όπως ο υπολογισμός αιχμής και το κατανεμημένο υπολογιστικό νέφος. Το EC επιτρέπει την επεξεργασία δεδομένων στην άκρη του δικτύου, πιο κοντά στον τελικό χρήστη, μειώνοντας την καθυστέρηση και βελτιώνοντας την απόδοση. Το κατανεμημένο υπολογιστικό νέφος επιτρέπει τη διανομή των πόρων cloud σε πολλαπλές τοποθεσίες, επιτρέποντας την πιο αποτελεσματική κατανομή και διαχείριση πόρων (Ranaweera et al., 2017).

Συμπερασματικά, το CRAN είναι μια κεντρική αρχιτεκτονική που χρησιμοποιεί μια κεντρική ομάδα BBU για την εξυπηρέτηση πολλαπλών RRU. Το CRAN επιτρέπει την υλοποίηση προηγμένων χαρακτηριστικών, όπως το τεράστιο MIMO και τη διαμόρφωση δέσμης, καθώς και τον τεμαχισμό δικτύου και την εικονικοποίηση. Το CRAN επιτρέπει την αποτελεσματική κοινή χρήση των πόρων, μειώνοντας το συνολικό κόστος ανάπτυξης και συντήρησης. Ωστόσο, μία από τις βασικές προκλήσεις του CRAN είναι η αυξημένη καθυστέρηση που εισάγεται από την κεντρική επεξεργασία. Για να αντιμετωπιστεί αυτή η πρόκληση, αναπτύσσονται νέες τεχνολογίες όπως ο υπολογισμός αιχμής και το κατανεμημένο υπολογιστικό νέφος.

Η κατανόηση των πλεονεκτημάτων και των προκλήσεων του CRAN είναι απαραίτητη για το σχεδιασμό και την υλοποίηση δικτύων 5G, επιτρέποντας την ανάπτυξη νέων τεχνολογιών και εφαρμογών που μπορούν να αλλάξουν τον τρόπο που ζούμε και εργαζόμαστε (Kim et al., 2016).

3.1.5. Distributed Radio over Fiber (D-ROF)

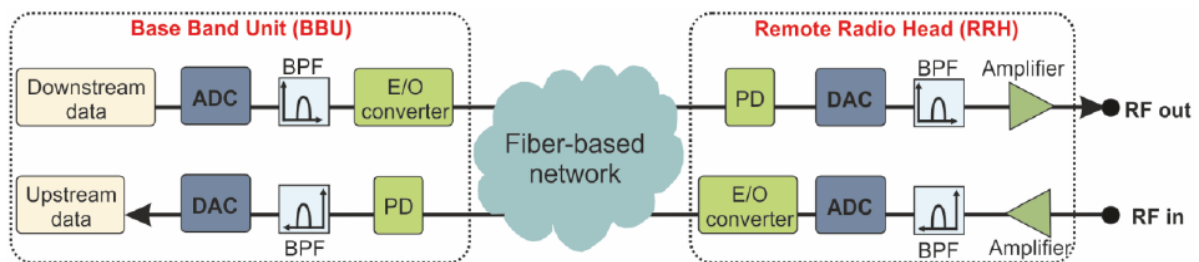
Το Distributed Radio over Fiber (D-ROF) είναι μια τεχνολογία που επιτρέπει τη διανομή ραδιοσημάτων μέσω καλωδίων οπτικών ινών. Στο D-ROF, τα RRU συνδέονται με τα BBU χρησιμοποιώντας καλώδια οπτικών ινών, επιτρέποντας τη μεταφορά ραδιοσημάτων σε μεγάλες αποστάσεις χωρίς σημαντική απώλεια σήματος. Το D-ROF έχει αναδειχθεί ως δημοφιλής αρχιτεκτονική για δίκτυα 5G λόγω της ικανότητάς του να επιτρέπει την επικοινωνία χαμηλής καθυστέρησης, υψηλού εύρους ζώνης και να βελτιώνει τη συνολική απόδοση του δικτύου.



Σχήμα 10: Αρχιτεκτονική Digital - Radio-over-Fiber (D-RoF) σήματος. Πηγή: (Ha et al., 2015)

Το D-ROF μπορεί να υλοποιηθεί χρησιμοποιώντας διαφορετικές αρχιτεκτονικές, συμπεριλαμβανομένου του συστήματος καταμεμημένης ραδιοκεραίας (DAS) και του δικτύου πρόσβασης ραδιοφώνου (RAN). Στο DAS, τα RRU κατανέμονται σε όλη την περιοχή κάλυψης, με κάθε RRU συνδεδεμένο στο BBU χρησιμοποιώντας ένα αποκλειστικό καλώδιο οπτικών ινών. Το DAS είναι κατάλληλο για περιοχές κάλυψης μικρού έως μεσαίου μεγέθους, συνήθως μέχρι μερικά χιλιόμετρα. Στο RAN, τα RRU

είναι κεντρικά και συνδέονται με το BBU χρησιμοποιώντας ένα κοινό καλώδιο οπτικών ινών. Το RAN είναι κατάλληλο για μεγαλύτερες περιοχές κάλυψης, συνήθως έως και δεκάδες χιλιόμετρα (Ranaweera et al., 2017).



Σχήμα 11: Διάγραμμα του τρόπου μετάδοσης του Digital - Radio-over-Fiber (D-RoF) σήματος..

Πηγή: (Ha et al., 2015)

Ένα από τα βασικά πλεονεκτήματα του D-ROF είναι η ικανότητά του να επιτρέπει την επικοινωνία χαμηλής καθυστέρησης και υψηλού εύρους ζώνης. Με τη διανομή των ραδιοσημάτων σε καλώδια οπτικών ινών, το D-ROF επιτρέπει τη μεταφορά κίνησης υψηλού εύρους ζώνης και χαμηλής καθυστέρησης σε μεγάλες αποστάσεις χωρίς σημαντική απώλεια σήματος. Αυτό επιτρέπει την υλοποίηση προηγμένων χαρακτηριστικών, όπως το τεράστιο MIMO, τη διαμόρφωση δέσμης και τον τεμαχισμό δικτύου, βελτιώνοντας τη συνολική απόδοση του δικτύου και την εμπειρία χρήστη (Kim et al., 2016).

Ένα άλλο πλεονέκτημα του D-ROF είναι η ικανότητά του να βελτιώνει τη συνολική απόδοση του δικτύου. Με τη διανομή των ραδιοσημάτων σε καλώδια οπτικών ινών, το D-ROF επιτρέπει την αποτελεσματική κοινή χρήση των πόρων, μειώνοντας το συνολικό κόστος ανάπτυξης και συντήρησης. Το D-ROF επιτρέπει επίσης την υλοποίηση προηγμένων λειτουργιών, όπως ο κεντρικός συντονισμός και η εικονικοποίηση, η βελτιστοποίηση της απόδοσης του δικτύου και η βελτίωση της εμπειρίας χρήστη (Song et al., 2019).

Μία από τις βασικές προκλήσεις του D-ROF είναι η αυξημένη πολυπλοκότητα του συστήματος, που απαιτεί περισσότερα οπτικά εξαρτήματα και πιο ακριβή έλεγχο του σήματος. Αυτό μπορεί να αυξήσει το συνολικό κόστος του συστήματος, καθιστώντας το λιγότερο κατάλληλο για εφαρμογές χαμηλού κόστους. Το D-ROF απαιτεί επίσης προσεκτικό σχεδιασμό για τη διασφάλιση της βέλτιστης απόδοσης, που απαιτεί βαθιά κατανόηση του συστήματος και των στοιχείων του.

Για την αντιμετώπιση αυτών των προκλήσεων, αναπτύσσονται νέες τεχνολογίες όπως η δικτύωση που ορίζεται από λογισμικό (SDN) και η εικονικοποίηση λειτουργιών δικτύου (NFV). Το SDN επιτρέπει τη δυναμική κατανομή πόρων δικτύου, βελτιστοποιώντας την απόδοση του δικτύου και βελτιώνοντας την εμπειρία του χρήστη. Το NFV επιτρέπει την εικονικοποίηση των λειτουργιών του δικτύου, μειώνοντας το συνολικό κόστος ανάπτυξης και συντήρησης (Ranaweera et al., 2017).

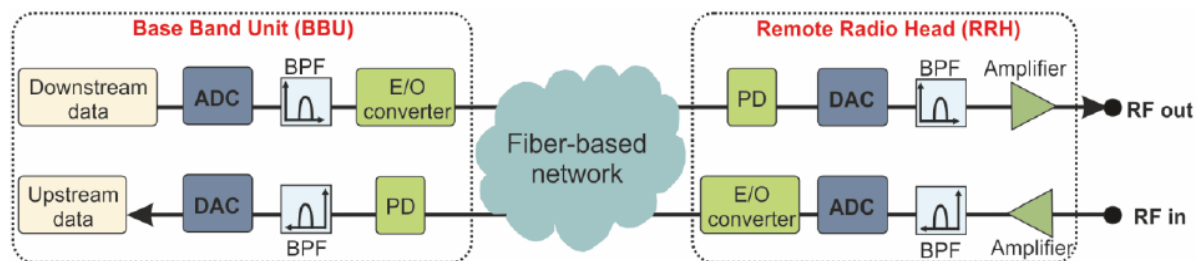
Συμπερασματικά, το D-ROF είναι μια τεχνολογία που επιτρέπει τη διανομή ραδιοσημάτων πάνω από καλώδια οπτικών ινών. Το D-ROF επιτρέπει την επικοινωνία χαμηλής καθυστέρησης, υψηλού εύρους ζώνης και βελτιώνει τη συνολική απόδοση του δικτύου. Το D-ROF μπορεί να υλοποιηθεί χρησιμοποιώντας διαφορετικές αρχιτεκτονικές, συμπεριλαμβανομένου του συστήματος κατανεμημένης ραδιοκεραίας (DAS) και του δικτύου πρόσβασης ραδιοφώνου (RAN). Ωστόσο, μία από τις βασικές προκλήσεις του D-ROF είναι η αυξημένη πολυπλοκότητα του συστήματος, που απαιτεί περισσότερα οπτικά στοιχεία και πιο ακριβή έλεγχο του σήματος. Για την αντιμετώπιση αυτών των προκλήσεων, αναπτύσσονται νέες τεχνολογίες όπως η δικτύωση που ορίζεται από λογισμικό (SDN) και η εικονικοποίηση λειτουργιών δικτύου (NFV). Η κατανόηση των πλεονεκτημάτων και των προκλήσεων του D-ROF είναι απαραίτητη για το σχεδιασμό και την υλοποίηση δικτύων 5G, επιτρέποντας την ανάπτυξη νέων τεχνολογιών και εφαρμογών που μπορούν να αλλάξουν τον τρόπο που ζούμε και εργαζόμαστε (Gomes & Assimakopoulos, 2018).

3.1.6. Analog Radio over Fiber (A-ROF)

Το Analog Radio over Fiber (A-ROF) είναι μια τεχνολογία που επιτρέπει τη διανομή αναλογικών ραδιοσημάτων μέσω καλωδίων οπτικών ινών. Στο A-ROF, τα σήματα RF μετατρέπονται σε οπτικά σήματα και μεταδίδονται μέσω καλωδίων οπτικών ινών στην απομακρυσμένη μονάδα, όπου μετατρέπονται ξανά σε σήματα RF. Το A-ROF έχει αναδειχθεί ως δημοφιλής αρχιτεκτονική για δίκτυα 5G λόγω της ικανότητάς του να επιτρέπει την επικοινωνία χαμηλής καθυστέρησης, υψηλού εύρους ζώνης και να βελτιώνει τη συνολική απόδοση του δικτύου (Kim et al., 2016).

Το A-ROF μπορεί να υλοποιηθεί χρησιμοποιώντας διαφορετικές αρχιτεκτονικές, συμπεριλαμβανομένου του συστήματος κατανεμημένης ραδιοκεραίας (DAS) και του

δικτύου πρόσβασης ραδιοφώνου (RAN). Στο DAS, τα RRU κατανέμονται σε όλη την περιοχή κάλυψης, με κάθε RRU συνδεδεμένο στο BBU χρησιμοποιώντας ένα αποκλειστικό καλώδιο οπτικών ινών. Στο RAN, τα RRU είναι κεντρικά και συνδέονται με το BBU χρησιμοποιώντας ένα κοινό καλώδιο οπτικών ινών (Song et al., 2019).



Σχήμα 12: Διάγραμμα του τρόπου μετάδοσης του Analog - Radio-over-Fiber (D-RoF) σήματος..

Πηγή: (Ha et al., 2015)

Ένα από τα βασικά πλεονεκτήματα του A-ROF είναι η ικανότητά του να επιτρέπει την επικοινωνία χαμηλής καθυστέρησης και υψηλού εύρους ζώνης. Μετατρέποντας τα σήματα RF σε οπτικά σήματα, το A-ROF επιτρέπει τη μεταφορά κίνησης υψηλού εύρους ζώνης και χαμηλής καθυστέρησης σε μεγάλες αποστάσεις χωρίς σημαντική απώλεια σήματος. Αυτό επιτρέπει την υλοποίηση προηγμένων χαρακτηριστικών, όπως το τεράστιο MIMO, τη διαμόρφωση δέσμης και τον τεμαχισμό δικτύου, βελτιώνοντας τη συνολική απόδοση του δικτύου και την εμπειρία χρήστη.

Ένα άλλο πλεονέκτημα του A-ROF είναι η ικανότητά του να βελτιώνει τη συνολική απόδοση του δικτύου. Μετατρέποντας τα σήματα RF σε οπτικά σήματα, το A-ROF επιτρέπει την αποτελεσματική κοινή χρήση των πόρων, μειώνοντας το συνολικό κόστος ανάπτυξης και συντήρησης. Το A-ROF επιτρέπει επίσης την υλοποίηση προηγμένων λειτουργιών, όπως ο κεντρικός συντονισμός και η εικονικοποίηση, η βελτιστοποίηση της απόδοσης του δικτύου και η βελτίωση της εμπειρίας χρήστη.

Μία από τις βασικές προκλήσεις του A-ROF είναι η αυξημένη πολυπλοκότητα του συστήματος, που απαιτεί περισσότερα οπτικά εξαρτήματα και πιο ακριβή έλεγχο του σήματος. Αυτό μπορεί να αυξήσει το συνολικό κόστος του συστήματος, καθιστώντας το λιγότερο κατάλληλο για εφαρμογές χαμηλού κόστους. Το A-ROF απαιτεί επίσης προσεκτικό σχεδιασμό για τη διασφάλιση της βέλτιστης απόδοσης, που απαιτεί βαθιά κατανόηση του συστήματος και των στοιχείων του (Kim et al., 2016).

Για την αντιμετώπιση αυτών των προκλήσεων, αναπτύσσονται νέες τεχνολογίες όπως η δικτύωση που ορίζεται από λογισμικό (SDN) και η εικονικοποίηση

λειτουργιών δικτύου (NFV). Το SDN επιτρέπει τη δυναμική κατανομή πόρων δικτύου, βελτιστοποιώντας την απόδοση του δικτύου και βελτιώνοντας την εμπειρία του χρήστη. Το NFV επιτρέπει την εικονικοποίηση των λειτουργιών του δικτύου, μειώνοντας το συνολικό κόστος ανάπτυξης και συντήρησης (Gomes & Assimakopoulos, 2018).

Συμπερασματικά, το A-ROF είναι μια τεχνολογία που επιτρέπει τη διανομή αναλογικών ραδιοσημάτων πάνω από καλώδια οπτικών ινών. Το A-ROF επιτρέπει την επικοινωνία χαμηλής καθυστέρησης, υψηλού εύρους ζώνης και βελτιώνει τη συνολική απόδοση του δικτύου. Το A-ROF μπορεί να υλοποιηθεί χρησιμοποιώντας διαφορετικές αρχιτεκτονικές, συμπεριλαμβανομένου του συστήματος κατανεμημένης ραδιοκεραίας (DAS) και του δικτύου πρόσβασης ραδιοφώνου (RAN). Ωστόσο, μία από τις βασικές προκλήσεις του A-ROF είναι η αυξημένη πολυπλοκότητα του συστήματος, που απαιτεί περισσότερα οπτικά εξαρτήματα και πιο ακριβή έλεγχο του σήματος. Για την αντιμετώπιση αυτών των προκλήσεων, αναπτύσσονται νέες τεχνολογίες όπως η δικτύωση που ορίζεται από λογισμικό (SDN) και η εικονικοποίηση λειτουργιών δικτύου (NFV). Η κατανόηση των πλεονεκτημάτων και των προκλήσεων του A-ROF είναι απαραίτητη για το σχεδιασμό και την υλοποίηση δικτύων 5G, επιτρέποντας την ανάπτυξη νέων τεχνολογιών και εφαρμογών που μπορούν να αλλάξουν τον τρόπο που ζούμε και εργαζόμαστε.

3.2. CPRI και eCPRI

3.2.1. Εισαγωγή στο CPRI και eCPRI

Το Common Public Radio Interface (CPRI) είναι μια τυπική διεπαφή για τη διασύνδεση μονάδων επεξεργασίας βασικής ζώνης (BBU) και απομακρυσμένων ραδιομονάδων (RRU) σε συστήματα ασύρματων επικοινωνιών. Το CPRI χρησιμοποιείται ευρέως σε δίκτυα 4G και 5G, επιτρέποντας τη μετάδοση ψηφιακών σημάτων υψηλής ταχύτητας μεταξύ των BBU και των RRU (Raikwar et al., 2013).

Το CPRI εισήχθη για πρώτη φορά το 2003 ως κοινή προσπάθεια πολλών μεγάλων εταιρειών ασύρματης επικοινωνίας, συμπεριλαμβανομένων των Nokia, Ericsson και Huawei. Η αρχική έκδοση του CPRI υποστήριζε μέγιστο ρυθμό μετάδοσης δεδομένων 3,072 Gbps, με μέγιστη απόσταση 10 km μεταξύ των BBU και των RRU. Έκτοτε, έχουν κυκλοφορήσει αρκετές νέες εκδόσεις του CPRI, με αυξημένες ταχύτητες δεδομένων και μεγαλύτερες αποστάσεις (Guo et al., 2013).

Στο CPRI, τα ψηφιακά σήματα μεταδίδονται χρησιμοποιώντας οπτικές ίνες, επιτρέποντας τη μετάδοση υψηλής ταχύτητας σε μεγάλες αποστάσεις χωρίς σημαντική απώλεια σήματος. Το CPRI υποστηρίζει πολλαπλά κανάλια, επιτρέποντας την ταυτόχρονη μετάδοση πολλαπλών σημάτων μέσω του ίδιου καλωδίου οπτικών ινών. Το CPRI υποστηρίζει επίσης πολλαπλούς τρόπους μετάδοσης, συμπεριλαμβανομένων της μετάδοσης από σημείο σε σημείο και πολλαπλών σημείων (Cai et al., 2018).

Ένα από τα βασικά πλεονεκτήματα του CPRI είναι η ικανότητά του να ενεργοποιεί την κεντρική επεξεργασία, επιτρέποντας την εφαρμογή προηγμένων χαρακτηριστικών όπως το τεράστιο MIMO και τη διαμόρφωση δέσμης. Με την κεντρική επεξεργασία των δεδομένων, το CPRI επιτρέπει την πιο αποτελεσματική κατανομή και διαχείριση πόρων, βελτιστοποιώντας την απόδοση του δικτύου και βελτιώνοντας την εμπειρία του χρήστη (Wang et al., 2016).

Ωστόσο, μία από τις βασικές προκλήσεις του CPRI είναι η αυξημένη καθυστέρηση που εισάγεται από την κεντρική επεξεργασία. Αυτό μπορεί να έχει αρνητικό αντίκτυπο σε εφαρμογές που απαιτούν επεξεργασία σε πραγματικό χρόνο ή χαμηλής καθυστέρησης, όπως η επαυξημένη πραγματικότητα και τα αυτόνομα οχήματα.

Για την αντιμετώπιση αυτής της πρόκλησης, αναπτύχθηκε μια νέα έκδοση του CPRI που ονομάζεται ενισχυμένο CPRI (eCPRI). Το eCPRI επιτρέπει την κατανομή των λειτουργιών επεξεργασίας μεταξύ των BBU και των RRU, επιτρέποντας την αποτελεσματική επεξεργασία της κίνησης υψηλού εύρους ζώνης και χαμηλής καθυστέρησης στην άκρη του δικτύου. Διανέμοντας τις λειτουργίες επεξεργασίας, το eCPRI επιτρέπει την υλοποίηση προηγμένων χαρακτηριστικών, όπως ο τεμαχισμός δικτύου και η εικονικοποίηση, βελτιώνοντας τη συνολική απόδοση του δικτύου και την εμπειρία χρήστη (Guo et al., 2013).

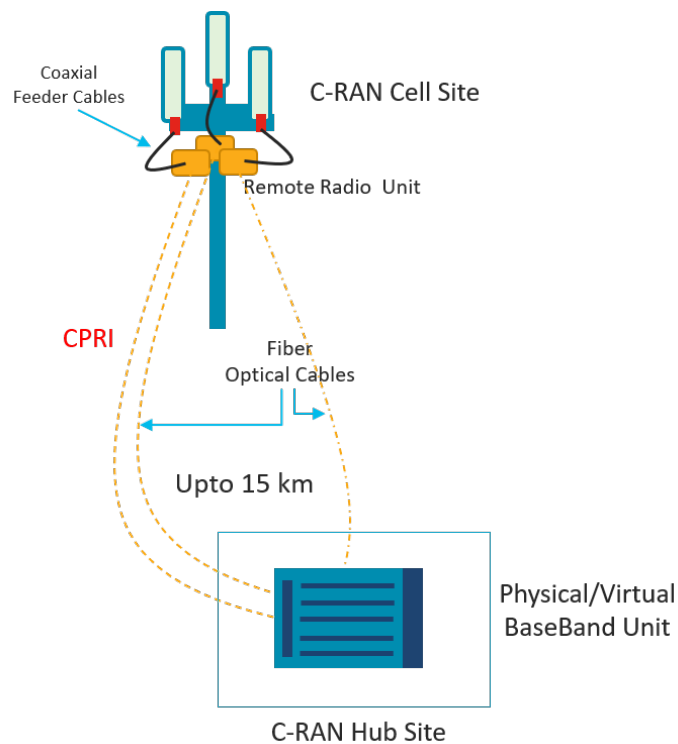
Το eCPRI υποστηρίζει πολλαπλούς τρόπους μετάδοσης, συμπεριλαμβανομένης της μετάδοσης από σημείο σε σημείο και πολλαπλών σημείων, και επιτρέπει την ταυτόχρονη μετάδοση πολλαπλών σημάτων μέσω του ίδιου καλωδίου οπτικών ινών. Το eCPRI υποστηρίζει επίσης τη δυναμική κατανομή πόρων δικτύου, βελτιστοποιώντας την απόδοση του δικτύου και βελτιώνοντας την εμπειρία χρήστη (Cai et al., 2018).

Συμπερασματικά, το CPRI και το eCPRI είναι τυπικές διεπαφές για τη διασύνδεση BBU και RRU σε συστήματα ασύρματων επικοινωνιών. Το CPRI επιτρέπει τη

μετάδοση ψηφιακών σημάτων υψηλής ταχύτητας μεταξύ των BBU και των RRU, επιτρέποντας την κεντρική επεξεργασία και την εφαρμογή προηγμένων χαρακτηριστικών, όπως το τεράστιο MIMO και τη διαμόρφωση δέσμης. Ωστόσο, το CPRI εισάγει αυξημένη καθυστέρηση λόγω της κεντρικής επεξεργασίας, η οποία μπορεί να έχει αρνητικό αντίκτυπο σε εφαρμογές επεξεργασίας σε πραγματικό χρόνο ή σε εφαρμογές χαμηλής καθυστέρησης. Το eCPRI αντιμετωπίζει αυτήν την πρόκληση επιτρέποντας τη διανομή των λειτουργιών επεξεργασίας μεταξύ των BBU και των RRU, βελτιώνοντας τη συνολική απόδοση του δικτύου και την εμπειρία του χρήστη. Η κατανόηση των πλεονεκτημάτων και των προκλήσεων του CPRI και του eCPRI είναι απαραίτητη για το σχεδιασμό και την υλοποίηση δικτύων 5G, επιτρέποντας την ανάπτυξη νέων τεχνολογιών και εφαρμογών που μπορούν να αλλάξουν τον τρόπο που ζούμε και εργαζόμαστε (Raikwar et al., 2013).

3.2.2. Διεπαφή και λειτουργία CPRI

Το Common Public Radio Interface (CPRI) είναι μια τυπική διεπαφή για τη διασύνδεση μονάδων επεξεργασίας βασικής ζώνης (BBU) και απομακρυσμένων ραδιομονάδων (RRU) σε συστήματα ασύρματων επικοινωνιών. Το CPRI επιτρέπει τη μετάδοση ψηφιακών σημάτων υψηλής ταχύτητας μεταξύ των BBU και των RRU, επιτρέποντας την κεντρική επεξεργασία και την εφαρμογή προηγμένων χαρακτηριστικών, όπως το τεράστιο MIMO και τη διαμόρφωση δέσμης.



Σχήμα 13: Διεπαφή Common Public Radio Interface (CPRI). Πηγή: (Cai et al., 2018)

Η διεπαφή CPRI αποτελείται από δύο κύρια στοιχεία: την οπτική μεταφορά και την ηλεκτρική διεπαφή. Το στοιχείο οπτικής μεταφοράς επιτρέπει τη μετάδοση ψηφιακών σημάτων υψηλής ταχύτητας μέσω καλωδίων οπτικών ινών, ενώ η ηλεκτρική διεπαφή επιτρέπει τη μεταφορά σημάτων ελέγχου και διαχείρισης μεταξύ των BBU και των RRU (Wang et al., 2016).

Στο CPRI, τα ψηφιακά σήματα μεταδίδονται χρησιμοποιώντας οπτικές ίνες, επιτρέποντας τη μετάδοση υψηλής ταχύτητας σε μεγάλες αποστάσεις χωρίς σημαντική απώλεια σήματος. Το στοιχείο οπτικής μεταφοράς του CPRI αποτελείται από πολλαπλές λωρίδες, με κάθε λωρίδα να φέρει ξεχωριστή ροή δεδομένων. Κάθε λωρίδα μπορεί να υποστηρίξει ρυθμό δεδομένων έως και 10 Gbps, επιτρέποντας τη μεταφορά κίνησης υψηλού εύρους ζώνης και χαμηλής καθυστέρησης μεταξύ των BBU και των RRU (Guo et al., 2013).

Η ηλεκτρική διεπαφή του CPRI επιτρέπει τη μεταφορά σημάτων ελέγχου και διαχείρισης μεταξύ των BBU και των RRU. Η ηλεκτρική διεπαφή υποστηρίζει πολλαπλά πρωτόκολλα, συμπεριλαμβανομένων των Ethernet και JTAG, επιτρέποντας την αποτελεσματική μεταφορά των σημάτων ελέγχου και διαχείρισης μέσω του ίδιου καλωδίου οπτικών ινών με τα ψηφιακά σήματα (Raikwar et al., 2013).

Η διεπαφή CPRI υποστηρίζει πολλαπλούς τρόπους μετάδοσης, συμπεριλαμβανομένης της μετάδοσης από σημείο σε σημείο και πολλαπλών σημείων. Στη μετάδοση από σημείο σε σημείο, κάθε RRU συνδέεται σε ένα αποκλειστικό BBU χρησιμοποιώντας ένα ξεχωριστό καλώδιο οπτικών ινών. Στη μετάδοση πολλαπλών σημείων, πολλά RRU συνδέονται σε ένα μόνο BBU χρησιμοποιώντας ένα κοινό καλώδιο οπτικών ινών. Η μετάδοση πολλαπλών σημείων επιτρέπει την αποτελεσματική κοινή χρήση των πόρων, μειώνοντας το συνολικό κόστος ανάπτυξης και συντήρησης.

Ένα από τα βασικά πλεονεκτήματα του CPRI είναι η ικανότητά του να ενεργοποιεί την κεντρική επεξεργασία, επιτρέποντας την εφαρμογή προηγμένων χαρακτηριστικών όπως το τεράστιο MIMO και τη διαμόρφωση δέσμης. Με την κεντρική επεξεργασία των δεδομένων, το CPRI επιτρέπει την πιο αποτελεσματική κατανομή και διαχείριση πόρων, βελτιστοποιώντας την απόδοση του δικτύου και βελτιώνοντας την εμπειρία του χρήστη (Cai et al., 2018).

Ωστόσο, μία από τις βασικές προκλήσεις του CPRI είναι η αυξημένη καθυστέρηση που εισάγεται από την κεντρική επεξεργασία. Αυτό μπορεί να έχει αρνητικό αντίκτυπο σε εφαρμογές που απαιτούν επεξεργασία σε πραγματικό χρόνο ή χαμηλής καθυστέρησης, όπως η επαυξημένη πραγματικότητα και τα αυτόνομα οχήματα (Wang et al., 2016).

Για την αντιμετώπιση αυτής της πρόκλησης, αναπτύχθηκε μια νέα έκδοση του CPRI που ονομάζεται ενισχυμένο CPRI (eCPRI). Το eCPRI επιτρέπει την κατανομή των λειτουργιών επεξεργασίας μεταξύ των BBU και των RRU, επιτρέποντας την αποτελεσματική επεξεργασία της κίνησης υψηλού εύρους ζώνης και χαμηλής καθυστέρησης στην άκρη του δικτύου. Διανέμοντας τις λειτουργίες επεξεργασίας, το eCPRI επιτρέπει την υλοποίηση προηγμένων χαρακτηριστικών, όπως ο τεμαχισμός δικτύου και η εικονικοποίηση, βελτιώνοντας τη συνολική απόδοση του δικτύου και την εμπειρία χρήστη.

Συμπερασματικά, η διεπαφή CPRI επιτρέπει τη μετάδοση ψηφιακών σημάτων υψηλής ταχύτητας μεταξύ των BBU και των RRU, επιτρέποντας την κεντρική επεξεργασία και την εφαρμογή προηγμένων χαρακτηριστικών, όπως το τεράστιο MIMO και τη διαμόρφωση δέσμης. Η διεπαφή CPRI αποτελείται από δύο κύρια στοιχεία: την οπτική μεταφορά και την ηλεκτρική διεπαφή. Το στοιχείο οπτικής μεταφοράς επιτρέπει τη μετάδοση ψηφιακών σημάτων υψηλής ταχύτητας μέσω καλωδίων οπτικών ινών, ενώ η ηλεκτρική διεπαφή επιτρέπει τη μεταφορά σημάτων

ελέγχου και διαχείρισης μεταξύ των BBU και των RRU. Ωστόσο, η αυξημένη καθυστέρηση που εισάγεται από την κεντρική επεξεργασία είναι μια βασική πρόκληση του CPRI, η οποία αντιμετωπίζεται από τη νέα έκδοση του CPRI που ονομάζεται eCPRI. Η κατανόηση της λειτουργίας και των δυνατοτήτων του CPRI και του eCPRI είναι απαραίτητη για το σχεδιασμό και την υλοποίηση δικτύων 5G, επιτρέποντας την ανάπτυξη νέων τεχνολογιών και εφαρμογών που μπορούν να αλλάξουν τον τρόπο που ζούμε και εργαζόμαστε (Guo et al., 2013).

3.2.3. Διεπαφή και λειτουργία eCPRI

Το Enhanced Common Public Radio Interface (eCPRI) είναι μια νέα έκδοση του προτύπου Common Public Radio Interface (CPRI) που επιτρέπει την κατανομή των λειτουργιών επεξεργασίας μεταξύ της μονάδας επεξεργασίας βασικής ζώνης (BBU) και της απομακρυσμένης μονάδας ραδιοφώνου (RRU). Το eCPRI αναπτύχθηκε για να αντιμετωπίσει την αυξημένη καθυστέρηση που εισάγεται από την κεντρική επεξεργασία του CPRI, επιτρέποντας την αποτελεσματική επεξεργασία της κίνησης υψηλού εύρους ζώνης και χαμηλής καθυστέρησης στην άκρη του δικτύου.

Η διεπαφή eCPRI αποτελείται από δύο κύρια στοιχεία: το ψηφιακό fronthaul και το radio fronthaul. Το ψηφιακό εξάρτημα fronthaul επιτρέπει τη μετάδοση ψηφιακών σημάτων υψηλής ταχύτητας μεταξύ του BBU και του RRU, ενώ το στοιχείο ραδιοεπικοινωνίας fronthaul επιτρέπει τη μεταφορά σημάτων ελέγχου και διαχείρισης μεταξύ του BBU και του RRU (Raikwar et al., 2013).

Στο eCPRI, το ψηφιακό στοιχείο fronthaul αποτελείται από πολλαπλές λωρίδες, με κάθε λωρίδα να φέρει ξεχωριστή ροή δεδομένων. Κάθε λωρίδα μπορεί να υποστηρίξει ρυθμό δεδομένων έως και 25 Gbps, επιτρέποντας την αποτελεσματική μεταφορά κίνησης υψηλού εύρους ζώνης και χαμηλής καθυστέρησης μεταξύ του BBU και του RRU. Το ψηφιακό στοιχείο fronthaul του eCPRI υποστηρίζει επίσης πολλαπλούς τρόπους μετάδοσης, συμπεριλαμβανομένης της μετάδοσης από σημείο σε σημείο και πολλαπλών σημείων (Cai et al., 2018).

Το στοιχείο radio fronthaul του eCPRI επιτρέπει τη μεταφορά σημάτων ελέγχου και διαχείρισης μεταξύ του BBU και του RRU. Το στοιχείο radio fronthaul υποστηρίζει πολλαπλά πρωτόκολλα, συμπεριλαμβανομένων των Ethernet και JTAG, επιτρέποντας την αποτελεσματική μεταφορά σημάτων ελέγχου και διαχείρισης μέσω του ίδιου καλωδίου οπτικών ινών με τα ψηφιακά σήματα (Wang et al., 2016).

Ένα από τα βασικά πλεονεκτήματα του eCPRI είναι η ικανότητά του να επιτρέπει τη διανομή των λειτουργιών επεξεργασίας μεταξύ του BBU και του RRU, επιτρέποντας την αποτελεσματική επεξεργασία της κίνησης υψηλού εύρους ζώνης και χαμηλής καθυστέρησης στην άκρη του δικτύου. Διανέμοντας τις λειτουργίες επεξεργασίας, το eCPRI επιτρέπει την υλοποίηση προηγμένων χαρακτηριστικών, όπως ο τεμαχισμός δικτύου και η εικονικοποίηση, βελτιώνοντας τη συνολική απόδοση του δικτύου και την εμπειρία χρήστη.

Το eCPRI επιτρέπει επίσης τη δυναμική κατανομή πόρων δικτύου, βελτιστοποιώντας την απόδοση του δικτύου και βελτιώνοντας την εμπειρία του χρήστη. Το eCPRI υποστηρίζει πολλαπλούς τρόπους μετάδοσης, συμπεριλαμβανομένης της μετάδοσης από σημείο σε σημείο και πολλαπλών σημείων, και επιτρέπει την ταυτόχρονη μετάδοση πολλαπλών σημάτων μέσω του ίδιου καλωδίου οπτικών ινών. Ωστόσο, μία από τις βασικές προκλήσεις του eCPRI είναι η αυξημένη πολυπλοκότητα του συστήματος, που απαιτεί περισσότερα οπτικά στοιχεία και πιο ακριβή έλεγχο του σήματος. Αυτό μπορεί να αυξήσει το συνολικό κόστος του συστήματος, καθιστώντας το λιγότερο κατάλληλο για εφαρμογές χαμηλού κόστους (Guo et al., 2013).

Για την αντιμετώπιση αυτών των προκλήσεων, αναπτύσσονται νέες τεχνολογίες όπως η δικτύωση που ορίζεται από λογισμικό (SDN) και η εικονικοποίηση λειτουργιών δικτύου (NFV). Το SDN επιτρέπει τη δυναμική κατανομή πόρων δικτύου, βελτιστοποιώντας την απόδοση του δικτύου και βελτιώνοντας την εμπειρία του χρήστη. Το NFV επιτρέπει την εικονικοποίηση των λειτουργιών του δικτύου, μειώνοντας το συνολικό κόστος ανάπτυξης και συντήρησης (Cai et al., 2018).

Συμπερασματικά, το eCPRI είναι μια νέα έκδοση του προτύπου CPRI που επιτρέπει την κατανομή των λειτουργιών επεξεργασίας μεταξύ του BBU και του RRU, επιτρέποντας την αποτελεσματική επεξεργασία της κίνησης υψηλού εύρους ζώνης και χαμηλής καθυστέρησης στην άκρη του δικτύου. Η διεπαφή eCPRI αποτελείται από δύο κύρια στοιχεία: το ψηφιακό fronthaul και το radio fronthaul. Το ψηφιακό εξάρτημα fronthaul επιτρέπει τη μετάδοση ψηφιακών σημάτων υψηλής ταχύτητας μεταξύ του BBU και του RRU, ενώ το στοιχείο ραδιοεπικοινωνίας fronthaul επιτρέπει τη μεταφορά σημάτων ελέγχου και διαχείρισης μεταξύ του BBU και του RRU. Η κατανόηση της λειτουργίας και των δυνατοτήτων του eCPRI είναι απαραίτητη για το σχεδιασμό και την υλοποίηση δικτύων 5G, επιτρέποντας την ανάπτυξη νέων

τεχνολογιών και εφαρμογών που μπορούν να αλλάξουν τον τρόπο που ζούμε και εργαζόμαστε.

3.2.4. Comparison between CPRI and eCPRI

Η κοινή δημόσια διασύνδεση ραδιοφώνου (CPRI) και η βελτιωμένη κοινή δημόσια διασύνδεση ραδιοφώνου (eCPRI) είναι τυπικές διεπαφές για τη διασύνδεση μονάδων επεξεργασίας ζώνης βάσης (BBUs) και απομακρυσμένων ραδιομονάδων (RRU) σε συστήματα ασύρματων επικοινωνιών. Ενώ το CPRI επιτρέπει την κεντρική επεξεργασία, το eCPRI επιτρέπει την κατανομή των λειτουργιών επεξεργασίας μεταξύ του BBU και του RRU, επιτρέποντας την αποτελεσματική επεξεργασία της κίνησης υψηλού εύρους ζώνης και χαμηλής καθυστέρησης στην άκρη του δικτύου (Wang et al., 2016).

Μία από τις βασικές διαφορές μεταξύ CPRI και eCPRI είναι το επίπεδο επεξεργασίας που εκτελείται στην άκρη του δικτύου. Στο CPRI, οι περισσότερες από τις λειτουργίες επεξεργασίας εκτελούνται κεντρικά, με τα BBU να είναι υπεύθυνα για το μεγαλύτερο μέρος της επεξεργασίας. Αυτό μπορεί να οδηγήσει σε αυξημένη καθυστέρηση, η οποία μπορεί να έχει αρνητικό αντίκτυπο σε εφαρμογές επεξεργασίας σε πραγματικό χρόνο ή σε εφαρμογές χαμηλής καθυστέρησης.

Στο eCPRI, οι λειτουργίες επεξεργασίας κατανέμονται μεταξύ του BBU και του RRU, επιτρέποντας την αποτελεσματική επεξεργασία της κίνησης υψηλού εύρους ζώνης και χαμηλής καθυστέρησης στην άκρη του δικτύου. Αυτό μπορεί να βελτιώσει τη συνολική αποτελεσματικότητα του δικτύου και την εμπειρία του χρήστη, ιδιαίτερα για εφαρμογές που απαιτούν επεξεργασία σε πραγματικό χρόνο ή χαμηλής καθυστέρησης, όπως η επταυξημένη πραγματικότητα και τα αυτόνομα οχήματα.

Μια άλλη βασική διαφορά μεταξύ CPRI και eCPRI είναι ο ρυθμός δεδομένων και η απόσταση που υποστηρίζονται από κάθε πρότυπο. Ενώ το CPRI υποστηρίζει μέγιστο ρυθμό δεδομένων 10 Gbps και μέγιστη απόσταση 10 km μεταξύ BBU και RRU, το eCPRI υποστηρίζει μέγιστο ρυθμό δεδομένων 25 Gbps και μέγιστη απόσταση 40 km μεταξύ BBU και RRU (Raikwar et al., 2013).

Ο αυξημένος ρυθμός δεδομένων και η απόσταση που υποστηρίζονται από το eCPRI επιτρέπουν την αποτελεσματική μεταφορά κίνησης υψηλού εύρους ζώνης και χαμηλής καθυστέρησης μεταξύ του BBU και του RRU, επιτρέποντας την εφαρμογή προηγμένων χαρακτηριστικών, όπως ο διαχωρισμός δικτύου και η εικονικοποίηση.

Μία από τις βασικές προκλήσεις του eCPRI είναι η αυξημένη πολυπλοκότητα του συστήματος, που απαιτεί περισσότερα οπτικά στοιχεία και πιο ακριβή έλεγχο του σήματος. Αυτό μπορεί να αυξήσει το συνολικό κόστος του συστήματος, καθιστώντας το λιγότερο κατάλληλο για εφαρμογές χαμηλού κόστους (Guo et al., 2013).

Για την αντιμετώπιση αυτών των προκλήσεων, αναπτύσσονται νέες τεχνολογίες όπως η δικτύωση που ορίζεται από λογισμικό (SDN) και η εικονικοποίηση λειτουργιών δικτύου (NFV). Το SDN επιτρέπει τη δυναμική κατανομή πόρων δικτύου, βελτιστοποιώντας την απόδοση του δικτύου και βελτιώνοντας την εμπειρία του χρήστη. Το NFV επιτρέπει την εικονικοποίηση των λειτουργιών του δικτύου, μειώνοντας το συνολικό κόστος ανάπτυξης και συντήρησης (Wang et al., 2016).

Συμπερασματικά, το CPRI και το eCPRI είναι τυπικές διεπαφές για τη διασύνδεση BBU και RRU σε συστήματα ασύρματων επικοινωνιών. Ενώ το CPRI επιτρέπει την κεντρική επεξεργασία, το eCPRI επιτρέπει την κατανομή των λειτουργιών επεξεργασίας μεταξύ του BBU και του RRU, επιτρέποντας την αποτελεσματική επεξεργασία της κίνησης υψηλού εύρους ζώνης και χαμηλής καθυστέρησης στην άκρη του δικτύου. Η κατανόηση των διαφορών μεταξύ CPRI και eCPRI είναι απαραίτητη για το σχεδιασμό και την υλοποίηση δικτύων 5G, επιτρέποντας την ανάπτυξη νέων τεχνολογιών και εφαρμογών που μπορούν να μεταμορφώσουν τον τρόπο που ζούμε και εργαζόμαστε..

Πίνακας 1: Πίνακας συνοπτικής σύγκρισης μεταξύ CPRI και eCPRI

Παράμετροι	CPRI	eCPRI
Τι προσφέρει	<ul style="list-style-type: none">• Κεντρική Επεξεργασία• Τυπική διεπαφή για τη διασύνδεση BBU και RRU	<ul style="list-style-type: none">• Κατανεμημένη επεξεργασία μεταξύ BBU και RRU• Επιτρέπει την αποτελεσματική επεξεργασία στην άκρη του δικτύου
Εκτέλεση	<ul style="list-style-type: none">• Αυξημένη καθυστέρηση λόγω κεντρικής επεξεργασίας• Μπορεί να επηρεάσει εφαρμογές επεξεργασίας σε πραγματικό χρόνο ή χαμηλής καθυστέρησης• Μέγιστος ρυθμός μετάδοσης δεδομένων: 10 Gbps	<ul style="list-style-type: none">• Μειωμένη καθυστέρηση λόγω κατανεμημένης επεξεργασίας• Βελτιωμένη εμπειρία χρήστη σε εφαρμογές σε πραγματικό χρόνο• Μέγιστος ρυθμός μετάδοσης δεδομένων: 25 Gbps

Εμβέλεια	<ul style="list-style-type: none"> • Μέγιστη απόσταση 10km 	<ul style="list-style-type: none"> • Μέγιστη απόσταση 40km
Πρόσθετη σύγκριση	<ul style="list-style-type: none"> • Λιγότερη πολυπλοκότητα, δυνητικά πιο κατάλληλο για χαμηλού κόστους εφαρμογές • Δεν διαθέτει προηγμένες λειτουργίες όπως διαχωρισμός δικτύου • Μπορεί να περιοριστεί από την έλλειψη δυναμικής κατανομής 	<ul style="list-style-type: none"> • Αυξημένη πολυπλοκότητα που απαιτεί περισσότερα οπτικά στοιχεία και πιο ακριβής έλεγχος σήματος • Υποστηρίζει προηγμένες λειτουργίες όπως διαχωρισμός δικτύου • Οφέλη από τεχνολογίες όπως το SDN και το NFV, ενεργοποίηση • δυναμική κατανομή πόρων δικτύου και μείωση κόστους εγκατάστασης και συντήρησης

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

ΕΜΠΕΙΡΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΣΧΕΤΙΚΩΝ ΕΡΕΥΝΩΝ

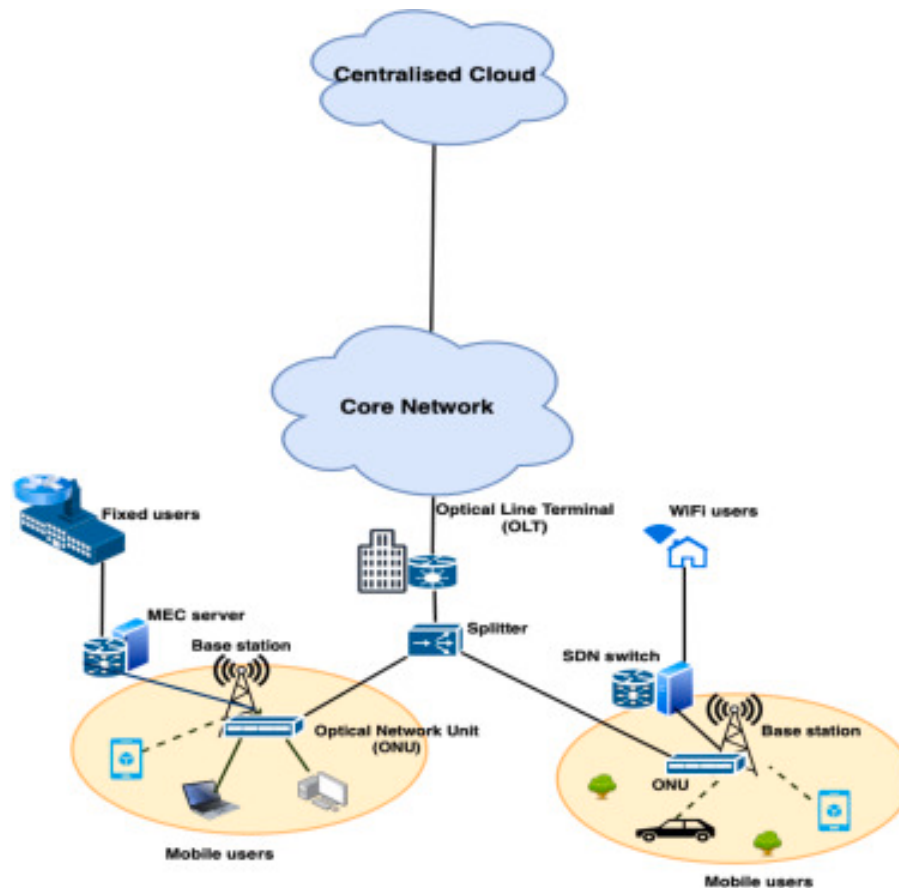
4.1. Ενσωμάτωση Παθητικών Οπτικών Δικτύων και Mobile EC σε δίκτυα 5G και Πέραν Αυτού

Στην εργασία «Integration of Passive Optical Networks and Mobile EC for 5G and Beyond: An Analysis» των Dias et al. (2023) παρέχεται μια ολοκληρωμένη μελέτη της απρόσκοπτης ενσωμάτωσης των παθητικών οπτικών δικτύων (passive optical networks - PON) και της κινητής υπολογιστικής άκρου (mobile EC - MEC) ως λύση για τη διαχείριση των υπολογιστικών απαιτήσεων και της ευαίσθητης στην καθυστέρηση φύσης των αναδυόμενων εφαρμογών 5G. Οι συγγραφείς διερευνούν τα εγγενή χαρακτηριστικά των PON και των MEC και πώς η ενσωμάτωσή τους μπορεί να εξυπηρετήσει καλύτερα τις ευαίσθητες στην καθυστέρηση (latency-sensitive) εφαρμογές. Προτείνουν επίσης ένα πλαίσιο ομοσπονδιακής ενισχυτικής μάθησης (federated reinforcement learning - FedRL) για δυναμική κατανομή πόρων, αποδεικνύοντας μέσω προσομοιώσεων την αποτελεσματικότητά του στην επίτευξη σημαντικής μείωσης λανθάνουσας κατάστασης και εξοικονόμησης χρόνου.

Τα παθητικά οπτικά δίκτυα και η κινητή υπολογιστική άκρου είναι δύο τεχνολογίες που μπορούν να αντιμετωπίσουν τις προκλήσεις της αύξησης του αριθμού των εφαρμογών που είναι ευαίσθητες στην καθυστέρηση και υπολογιστικά απαιτητικές (computation-intensive) στα δίκτυα 5G και πέραν αυτών. Τα PON, που

χρησιμοποιούνται κυρίως σε αναπτύξεις οπτικών ινών στο σπίτι (fiber-to-the-home - FTTH), έχουν εξελιχθεί σημαντικά με την πάροδο των ετών, προσφέροντας αυξημένο εύρος ζώνης και αποτελεσματικότητα μέσω τεχνικών όπως η πολυπλεξία διαίρεσης μήκους κύματος (wavelength division multiplexing - WDM) και η πολυπλεξία με ορθογώνια διαίρεση συχνότητας (orthogonal frequency division multiplexing - OFDM). Από την άλλη πλευρά, η MEC φέρνει τους υπολογιστικούς πόρους πιο κοντά στον τελικό χρήστη, μειώνοντας έτσι σημαντικά τον λανθάνοντα χρόνο καθώς εξαλείφει την ανάγκη μεταφοράς δεδομένων σε ένα μακρινό κέντρο δεδομένων για επεξεργασία.

Οι συγγραφείς υποστηρίζουν εύγλωττα ότι μια ολοκληρωμένη αρχιτεκτονική PON-MEC μπορεί να επιφέρει σημαντικά οφέλη σε διάφορες αναδυόμενες εφαρμογές. Παρουσιάζουν διάφορες περιπτώσεις χρήσης, συμπεριλαμβανομένων των e-Health, Industry 4.0 και επαυξημένης πραγματικότητας/εικονικής πραγματικότητας (augmented reality/virtual reality - AR/VR). Στην ηλεκτρονική υγεία, η συνδυασμένη αρχιτεκτονική PON-MEC θα επέτρεπε στα δεδομένα που συλλέγονται από φορητές συσκευές IoT να υποβάλλονται σε επεξεργασία γρήγορα και με ακρίβεια, προς όφελος εφαρμογών όπως η απομακρυσμένη χειρουργική (τηλεχειρουργική). Στο Industry 4.0, η ενσωμάτωση θα βοηθούσε στην ανάλυση δεδομένων σε πραγματικό χρόνο και θα βελτιστοποιούσε τις διαδικασίες παραγωγής, ενώ στην AR/VR, οι συνδέσεις υψηλής χωρητικότητας των PON και ο υπολογισμός χαμηλής καθυστέρησης (low-latency computation) της MEC θα εξασφάλιζαν μια απρόσκοπτη και καθηλωτική εμπειρία χρήστη.



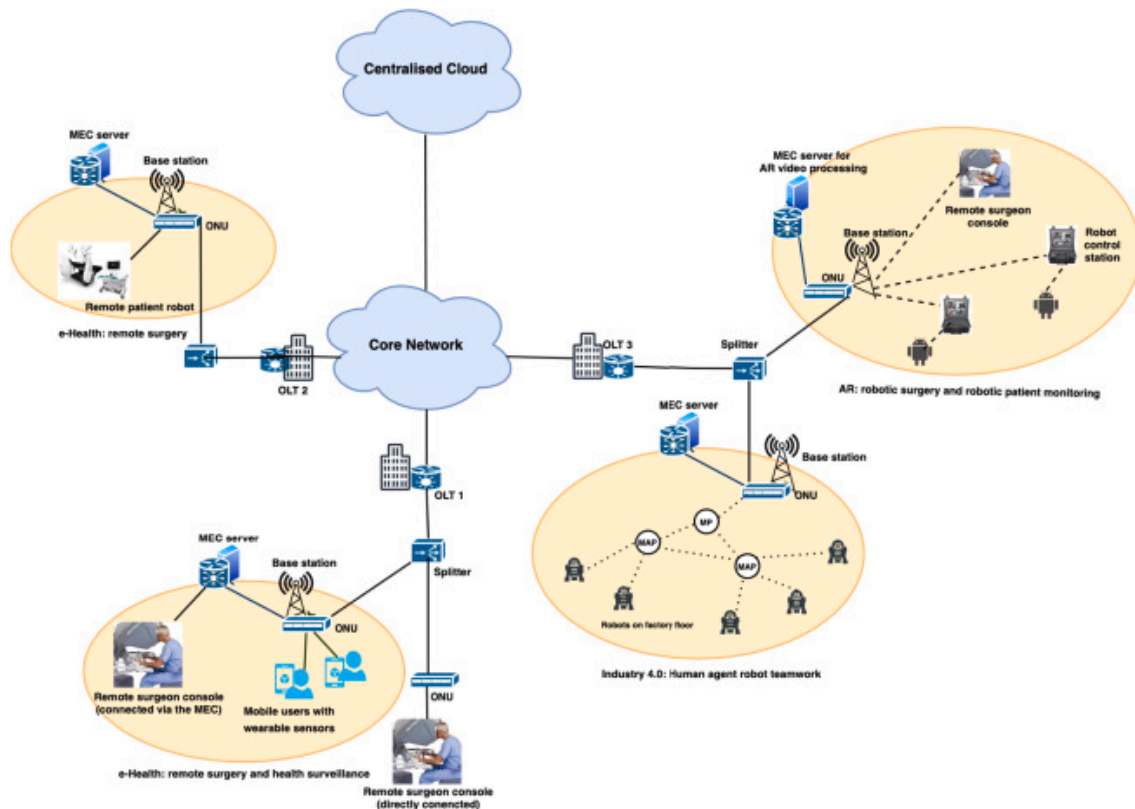
Σχήμα 141: Αρχιτεκτονική υπολογιστικής άκρου πολλαπλής πρόσβασης (MEC).

Πηγή: (Dias et al, 2023)

Το σχήμα 1 στην εργασία των Dias et al. (2023) παρουσιάζει την αρχιτεκτονική υπολογιστικής άκρου πολλαπλής πρόσβασης (multi-access EC - MEC). Το σχήμα απεικονίζει την τοποθέτηση των διακομιστών MEC σε κοντινή απόσταση από τους τελικούς χρήστες σε ένα δίκτυο ραδιοπρόσβασης (radio access network - RAN). Οι διακομιστές τοποθετούνται σε πολλές τοποθεσίες, συμπεριλαμβανομένων του σταθμού βάσης μακροεντολών LTE, του ελεγκτή ραδιοδικτύου (radio network controller - RNC) ή του σημείου συγκέντρωσης κυψελών τεχνολογίας πρόσβασης πολλαπλών ραδιοσυχνοτήτων (multi-radio access technology - RAT). Οι διακομιστές MEC λειτουργούν είτε για να επεξεργάζονται αιτήματα από τελικούς χρήστες που βρίσκονται κοντά τους είτε για να προωθούν αιτήματα στα κεντρικά κέντρα δεδομένων για περαιτέρω επεξεργασία. Η αρχιτεκτονική MEC ορίζεται ως αυτή που εξυπηρετεί τόσο ενσύρματες όσο και ασύρματες τεχνολογίες δικτύωσης στα άκρα του δικτύου.

Ωστόσο, οι συγγραφείς επισημαίνουν ότι η ενσωμάτωση των PON και της MEC δεν εγγυάται αυτόματα ότι θα ικανοποιηθούν οι απαιτήσεις καθυστέρησης αυτών των εφαρμογών. Υπάρχει ανάγκη για δυναμική διαχείριση της κατανομής πόρων από άκρο σε άκρο σε αυτά τα ετερογενή δίκτυα. Για την αντιμετώπιση αυτής της πρόκλησης, οι συγγραφείς προτείνουν ένα πλαίσιο FedRL, το οποίο αξιοποιεί την ενισχυτική μάθηση για τη βελτιστοποίηση της κατανομής εύρους ζώνης και την ομοσπονδιακή μάθηση για την ανταλλαγή εμπειριών μεταξύ πολλών PON-MEC.

Η δύναμη του προτεινόμενου πλαισίου FedRL έγκειται στην ικανότητά του να επιταχύνει τη λήψη αποφάσεων με την ανταλλαγή εμπειριών μεταξύ μιας ομοσπονδίας PON-MEC, με αποτέλεσμα σημαντική εξοικονόμηση χρόνου. Αυτό το πλαίσιο δίνει τη δυνατότητα στα τοπικά περιβάλλοντα μάθησης να συνεργάζονται, επιτρέποντας στις αποφάσεις που λαμβάνονται σε κάθε PON-MEC να είναι αυτοπροσαρμοσμένες στο περιβάλλον, βελτιώνοντας έτσι την απόδοση του δικτύου. Το σχήμα 2 στην εργασία των Dias et al. (2023) παρουσιάζει τις περιπτώσεις χρήσης της ενσωμάτωσης των παθητικών οπτικών δικτύων και της υπολογιστικής άκρου πολλαπλής πρόσβασης (PON-MEC). Το σχήμα απεικονίζει διάφορες περιπτώσεις χρήσης της ενσωμάτωσης PON-MEC, συμπεριλαμβανομένων των e-Health, Industry 4.0, Smart Grid και Smart City. Η περίπτωση χρήσης e-Health περιγράφεται περαιτέρω στο κείμενο ως παράδειγμα μιας εφαρμογής που είναι ευαίσθητη στην καθυστέρηση και απαιτεί σημαντικούς πόρους επεξεργασίας, οι οποίοι μπορούν να μεταφορτωθούν σε έναν διακομιστή αιχμής που βρίσκεται κοντά στον τελικό χρήστη.



Σχήμα 12: Περιπτώσεις χρήσης PON-MEC. Πηγή: (Dias et al, 2023)

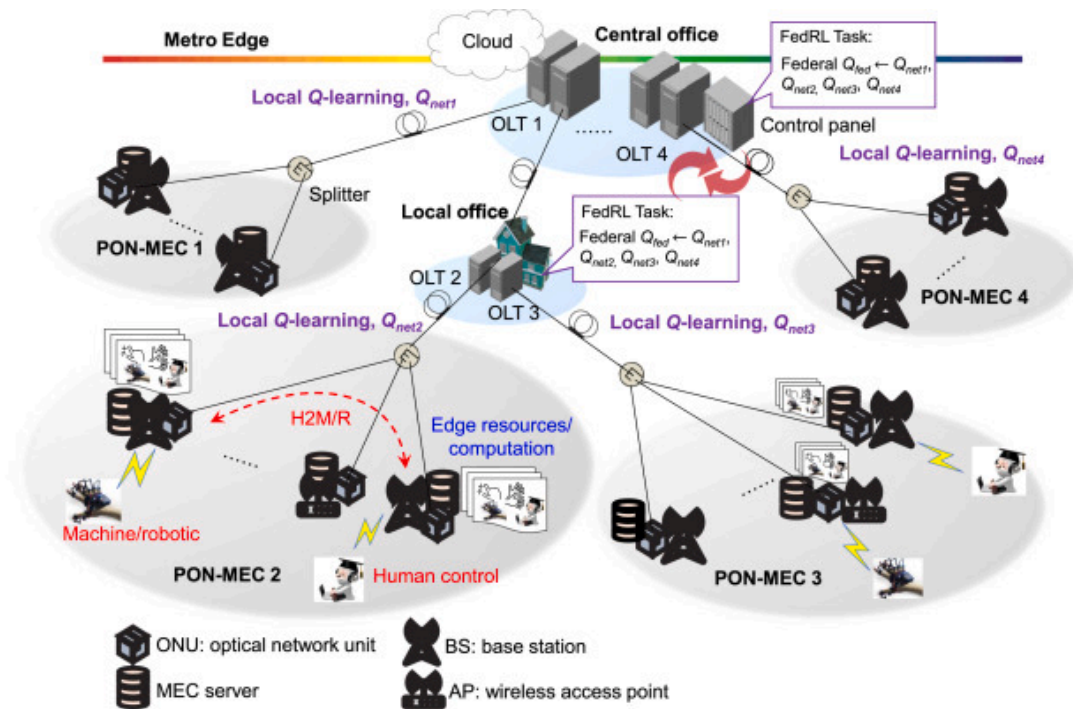
Μέσω προσομοιώσεων, οι συγγραφείς παρέχουν στοιχεία που αποδεικνύουν ότι το προτεινόμενο πλαίσιο FedRL μειώνει σημαντικά τον λανθάνοντα χρόνο και βελτιώνει τον ρυθμό εκμάθησης σε σύγκριση με τους παραδοσιακούς αλγόριθμους κατανομής εύρους ζώνης. Είναι σημαντικό ότι τα πλεονεκτήματα του πλαισίου FedRL αποδείχθηκαν ξεκάθαρα κάτω από διαφορετικές διαμορφώσεις δικτύου και φόρτους κυκλοφορίας, επιδεικνύοντας την ανθεκτικότητα της προσέγγισης.

Ωστόσο, οι συγγραφείς εξετάζουν επίσης τους περιορισμούς του προτεινόμενου πλαισίου τους. Για να είναι η ομοσπονδιακή μάθηση αποτελεσματική στην επιτάχυνση της λήψης αποφάσεων, τα συμμετέχοντα PON-MEC θα πρέπει να είναι ομοιογενή, καθώς ετερογενή περιβάλλοντα θα μπορούσαν ενδεχομένως να επηρεάσουν τη σύγκλιση και την απόδοση του πλαισίου. Αυτή η πρόκληση υποδεικνύει πιθανές μελλοντικές προσπάθειες για την ανάπτυξη μεθόδων για την αποτελεσματική διαχείριση ετερογενών περιβαλλόντων.

Το σχήμα 3 στην εργασία των Dias et al. (2023) παρουσιάζει το πλαίσιο FedRL σε ομοσπονδιακά PON-MEC για την υποστήριξη επικοινωνιών H2M/R (human-to-machine/robot) χαμηλής καθυστέρησης. Το σχήμα απεικονίζει την αρχιτεκτονική του προτεινόμενου πλαισίου, το οποίο αποτελείται από πολλαπλά PON-MEC που

Η Χρήση Τεχνολογιών Οπτικού Fronthaul για Εφαρμογές Υπολογιστικής Άκρου Εστιάζοντας στα Δίκτυα 5G

συνενώνονται μεταξύ τους για τη βελτιστοποίηση των αποφάσεων κατανομής εύρους ζώνης. Το πλαίσιο χρησιμοποιεί ενισχυτική μάθηση για τη βελτιστοποίηση της κατανομής των πόρων στα PON-MEC και την κοινή μάθηση μεταξύ των PON-MEC για να μεγιστοποιήσει την εξοικονόμηση χρόνου για τη λήψη τέτοιων αποφάσεων. Το σχήμα δείχνει επίσης τα διαφορετικά στοιχεία του πλαισίου, συμπεριλαμβανομένων των PON-MEC, του αλγόριθμου ενίσχυσης μάθησης και του στοιχείου κοινής μάθησης.



Σχήμα 13: Πλαίσιο FedRL πάνω από ομοσπονδιακά PON-MEC για υποστήριξη επικοινωνιών H2M/R χαμηλής καθυστέρησης. Πηγή: (Dias et al, 2023)

Συμπερασματικά, η έρευνα που έγινε από τους Dias et al. (2023) αποτελεί σημαντική συνεισφορά στο πεδίο καθώς διερευνά πώς η ενοποίηση των τεχνολογιών PON και MEC μπορεί να αντιμετωπίσει τις προκλήσεις που τίθενται από τις υπολογιστικές απαιτήσεις και την ευαισθησία στην καθυστέρηση των αναδυόμενων εφαρμογών 5G. Επιπλέον, παρέχουν ένα νέο πλαίσιο που βασίζεται στην ομοσπονδιακή ενισχυτική μάθηση για αποτελεσματική κατανομή πόρων σε αυτά τα δίκτυα. Η εργασία αυτή είναι ένα ουσιαστικό βήμα προς την επίτευξη των φιλόδοξων στόχων απόδοσης που έχουν τεθεί για μελλοντικά δίκτυα, καθώς αποτελεί οδηγό για περαιτέρω έρευνα και ανάπτυξη σε αυτόν τον τομέα.

Ωστόσο, όπως κάθε πρωτοποριακή εργασία, εγείρει επίσης νέα ερωτήματα και προτείνει μελλοντικές κατευθύνσεις έρευνας, όπως η εξερεύνηση τεχνικών

μηχανικής μάθησης για την επιτάχυνση των αποφάσεων ενισχυτικής μάθησης σε κάθε PON-MEC και η ανάπτυξη στρατηγικών για τον προσδιορισμό της καλύτερης σύνθεσης PON -MEC για τον σχηματισμό αποτελεσματικών ομοσπονδιών. Ως εκ τούτου, ενώ οι συγγραφείς έχουν θέσει με επιτυχία ισχυρές βάσεις για την ενσωμάτωση των PON και της MEC για την υποστήριξη του δικτύου 5G και μελλοντικών γενεών, υπάρχει ακόμη πολλή δουλειά που πρέπει να γίνει σε αυτόν τον πολλά υποσχόμενο τομέα έρευνας.

Η σημασία της εργασίας «Integration of Passive Optical Networks and Mobile EC for 5G and Beyond: An Analysis» των Dias et al. (2023) δεν μπορεί να υπερεκτιμηθεί, ιδιαίτερα στο πλαίσιο της τρέχουσας εξέλιξης του δικτύου προς το 5G και πέρα. Καθώς προχωράμε σε μια εποχή που ορίζεται από το διαδίκτυο των πραγμάτων (internet of things - IoT), το απτικό διαδίκτυο (tactile internet) και την επικοινωνία ανθρώπου με μηχανή/ρομπότ (H2M/R), η εργασία αποτελεί κομβικό κομμάτι της έρευνας για την αντιμετώπιση των περίπλοκων υπολογιστικών απαιτήσεων και της ευαίσθητης στην καθυστέρηση φύσης των αναδυόμενων αυτών τεχνολογιών.

Αυτή η εργασία καλύπτει ένα κρίσιμο κενό στη βιβλιογραφία, καθώς διερευνά όχι μόνο τα εγγενή χαρακτηριστικά των παθητικών οπτικών δικτύων και της κινητής υπολογιστικής άκρου, αλλά και την ολοκληρωμένη εφαρμογή τους σε πραγματικά περιβάλλοντα. Επιπλέον, προτείνει ένα καινοτόμο πλαίσιο ομοσπονδιακής ενισχυτικής μάθησης (FedRL) για δυναμική κατανομή πόρων. Αυτή η λεπτομερής διερεύνηση της ενσωμάτωσης PON-MEC και η διαμόρφωση του πλαισίου FedRL παρέχουν συγκεκριμένα βήματα για την αντιμετώπιση των προκλήσεων που θέτουν οι μελλοντικές απαιτήσεις δικτύωσης.

Οι συγγραφείς επισημαίνουν διάφορες περιπτώσεις χρήσης – e-Health, Industry 4.0 και Augmented Reality/Virtual Reality (AR/VR) – όπου μια ολοκληρωμένη αρχιτεκτονική PON-MEC μπορεί να είναι επωφελής. Μιλώντας για αυτές τις πρακτικές εφαρμογές, η εργασία συμβάλλει σημαντικά στην κατανόηση του τρόπου με τον οποίο τα PON υψηλής χωρητικότητας και οι MEC χαμηλής καθυστέρησης μπορούν να ενσωματωθούν και να βελτιστοποιηθούν για να ανταποκρίνονται στις απαιτήσεις διαφόρων εφαρμογών ευαίσθητων στην καθυστέρηση. Αυτή η έμφαση στις εφαρμογές πραγματικού κόσμου (real-world applications) ενισχύει τη συνάφεια και τη δυνατότητα εφαρμογής της έρευνας, καθιστώντας την πολύτιμη πηγή τόσο για ακαδημαϊκούς όσο και για επαγγελματίες του χώρου.

Επιπλέον, το προτεινόμενο πλαίσιο FedRL για τη διαχείριση της δυναμικής κατανομής πόρων σε ετερογενή δίκτυα προσφέρει μια νέα προοπτική για τη διαχείριση του λανθάνοντος χρόνου σε αυτά τα δίκτυα. Αξιοποιώντας τα πλεονεκτήματα τόσο της ενισχυτικής μάθησης για τη βελτιστοποίηση της κατανομής εύρους ζώνης όσο και της ομοσπονδιακής μάθησης για την ανταλλαγή εμπειριών μεταξύ πολλαπλών PON-MEC, το πλαίσιο εισάγει μια μοναδική προσέγγιση για τη βελτίωση της απόδοσης του λανθάνοντος χρόνου, καθιστώντας την εργασία πρωτοπόρα στον τομέα.

Ωστόσο, ενώ η εργασία υπερέχει από πολλές απόψεις, υπάρχουν κάποιες αδυναμίες τις οποίες θα μπορούσε να αντιμετωπίσει μελλοντική έρευνα για να ενισχυθεί το εύρος και ο αντίκτυπος της μελέτης. Μια τέτοια αδυναμία έγκειται στην υπόθεση της ομοιογένειας μεταξύ των PON-MEC στο προτεινόμενο πλαίσιο FedRL. Στον πραγματικό κόσμο, τα δίκτυα μπορεί να μην είναι πάντα ομοιογενή λόγω διαφορών στην αρχιτεκτονική, περιβάλλοντος κυκλοφορίας και άλλων χαρακτηριστικών. Όπως αναγνωρίζουν οι συγγραφείς, όταν τα τοπικά περιβάλλοντα μάθησης είναι ετερογενή, η ομοσπονδιακή μάθηση μπορεί να μην συγκλίνει στη σωστή απόφαση που απαιτείται σε κάθε τοπική μάθηση και το ποσοστό σύγκλισης μπορεί επίσης να επηρεαστεί αρνητικά. Αυτός ο περιορισμός υποδεικνύει την ανάγκη για μελλοντική έρευνα που διερευνά στρατηγικές για την αποτελεσματική αντιμετώπιση ετερογενών περιβαλλόντων στο πλαίσιο της ομοσπονδιακής μάθησης. Επίσης, αν και οι συγγραφείς συζητούν διάφορες περιπτώσεις χρήσης, δεν εμβαθύνουν στον αντίκτυπο της ενσωμάτωσης του PON και της MEC στην ασφάλεια και το απόρρητο. Δεδομένων των αυξανόμενων ανησυχιών σχετικά με την ασφάλεια των δεδομένων και το απόρρητο στις επικοινωνίες δικτύου, μελλοντική έρευνα θα μπορούσε να διερευνήσει πώς οι πτυχές αυτές ενδέχεται να επηρεαστούν σε ένα ολοκληρωμένο περιβάλλον PON-MEC και πώς μπορεί να γίνει αποτελεσματική διαχείριση.

Επιπλέον, οι συγγραφείς δεν πραγματοποίησαν καμία δοκιμή του προτεινόμενου πλαισίου FedRL σε πραγματικό περιβάλλον. Ενώ οι προσομοιώσεις παρείχαν πολύτιμες πληροφορίες για την απόδοση του πλαισίου κάτω από διαφορετικές διαμορφώσεις δικτύου και φορτία κυκλοφορίας, οι δοκιμές σε πραγματικό περιβάλλον θα μπορούσαν να προσφέρουν πρόσθετα στοιχεία για την επικύρωση και περαιτέρω βελτίωση του πλαισίου.

Μια άλλη πτυχή που θα μπορούσε να αντιμετωπιστεί σε μελλοντική έρευνα είναι η ανάπτυξη αλγορίθμων ή στρατηγικών για να καθοριστούν τα PON-MEC που θα πρέπει να σχηματίσουν ομοσπονδία. Καθώς η εργασία επικεντρώθηκε κυρίως στα οφέλη της ανταλλαγής εμπειριών μεταξύ ομοιογενών PON-MEC, η κατανόηση του τρόπου βέλτιστου σχηματισμού αυτών των ομοσπονδιών θα προσέθετε ένα άλλο επίπεδο πολυπλοκότητας και ρεαλισμού στο προτεινόμενο πλαίσιο.

Εν κατακλείδι, η εργασία των Dias et al. (2023) αποτελεί σημαντική συνεισφορά στο σύνολο των γνώσεων σχετικά με την ολοκληρωμένη αρχιτεκτονική PON-MEC για εφαρμογές ευαίσθητες στην καθυστέρηση. Η εξερεύνηση της ενσωμάτωσης των PON-MEC, η παρουσίαση πρακτικών εφαρμογών και η πρότασή για ένα νέο πλαίσιο ομοσπονδιακής ενισχυτικής μάθησης αποδεικνύουν τη σημασία της στη μελέτη του δικτύου 5G και των μελλοντικών γενεών. Ωστόσο, η αντιμετώπιση των αδυναμιών σε ενδεχόμενη μελλοντική έρευνα θα μπορούσε να ενισχύσει τον συνολικό αντίκτυπο και την ανθεκτικότητα της μελέτης, καθιστώντας την πολύτιμη πηγή τόσο για ακαδημαϊκούς όσο και για επαγγελματίες του χώρου.

4.2. Κριτική εξέταση του σχεδιασμού διάταξης χαμηλής καθυστέρησης σε οπτικά δίκτυα Fronthaul 5G

Η μελέτη «Low-delay layout planning based on improved particle swarm optimization algorithm in 5G optical fronthaul network» των Wang et al., (2021) αντιμετωπίζει την πρόκληση της εξασφάλισης χαμηλής καθυστέρησης στον σχεδιασμό των δικτύων 5G. Όπως υποδηλώνει ο τίτλος, η εργασία παρουσιάζει μια μέθοδο σχεδιασμού διάταξης χαμηλής καθυστέρησης για δίκτυα 5G χρησιμοποιώντας έναν αλγόριθμο βελτιστοποίησης σμήνους σωματιδίων (particle swarm optimization algorithm). Οι συγγραφείς προτείνουν μια μέθοδο βελτιστοποίησης που ενσωματώνει μια βελτιωμένη έκδοση του μη γραμμικού αλγόριθμου βελτιστοποίησης σμήνους σωματιδίων με συντελεστή βάρους αδράνειας (NL-wPSO).

Το έγγραφο προσδιορίζει και αντιμετωπίζει τις απαιτήσεις των ευαίσθητων στο χρόνο εφαρμογών όπως ο αυτόματος πιλότος, η τηλεϊατρική και ο βιομηχανικός αυτοματισμός που απαιτούν αυστηρότερες απαιτήσεις για την καθυστέρηση από άκρο σε άκρο (end-to-end delay). Οι Wang et al. ισχυρίζονται ότι το κρίσιμο στάδιο στην υλοποίηση τέτοιων υπηρεσιών είναι ο σχεδιασμός χαμηλής καθυστέρησης των δικτύων 5G. Για το σκοπό αυτό, προτείνουν έναν αλγόριθμο που μπορεί να

βελτιστοποιήσει τη διάταξη των ενεργών μονάδων ραδιοκεραίας (active antenna units - AAU) στο δίκτυο fronthaul. Αυτή η βελτιστοποίηση, με τη σειρά της, οδηγεί σε μικρότερη απόσταση μεταξύ των AAU και του διακομιστή υπολογιστικής άκρου, μειώνοντας έτσι την καθυστέρηση μετάδοσης.

Η μελέτη εντάσσει το έργο της στο πλαίσιο των αναδυόμενων προκλήσεων και λύσεων στη δικτύωση 5G, εστιάζοντας συγκεκριμένα στην ενισχυμένη κινητή ευρυζωνικότητα (enhanced mobile broadband - eMBB), στην εξαιρετικά αξιόπιστη και χαμηλής καθυστέρησης επικοινωνία (ultra reliable & low latency communication - uRLLC) και στην μαζική επικοινωνία συσκευών (massive machine type communication - mMTC). Συζητά την υιοθέτηση νέων τεχνολογιών και πλαισίων δικτύου για την αντιμετώπιση των προκλήσεων που έχουν εντοπιστεί, αναφέροντας ως παράδειγμα το δίκτυο ασύρματης πρόσβασης cloud (cloud wireless access network - C-RAN). Το C-RAN, μια πράσινη αρχιτεκτονική δικτύου ασύρματης πρόσβασης που βασίζεται σε κεντρική επεξεργασία, συνεργατικό ραδιόφωνο και υπολογιστικό νέφος σε πραγματικό χρόνο, παρέχει ένα εξαιρετικό πλαίσιο για την πρόταση της μελέτης.

Οι συγγραφείς προτείνουν τον συνδυασμό παθητικού οπτικού δικτύου πολυπλεξίας διαίρεσης κύματος (wavelength division multiplexing passive optical network - WDM PON) και C-RAN ως λύση δικτύου πρόσβασης. Υποστηρίζουν ότι ενώ το WDM PON μειώνει την κατανάλωση πόρων οπτικού καλωδίου και βελτιώνει τη συγκέντρωση της ανάπτυξης μονάδων διανομής (distributed units – DU), εξακολουθεί να αμφισβητείται από τη συνεχώς αυξανόμενη ζήτηση κίνησης που φέρνουν οι εφαρμογές 5G.

Οι συγγραφείς αναγνωρίζουν τους περιορισμούς των παραδοσιακών ολοκληρωμένων δικτύων όπου τα κέντρα δεδομένων είναι μακριά από συνδρομητές, γεγονός που οδηγεί σε αυξημένη καθυστέρηση μετάδοσης και αρνητικές επιπτώσεις στην ποιότητα της υπηρεσίας (quality of service - QoS) για υπηρεσίες ευαίσθητες στο χρόνο. Για να αντιμετωπιστεί αυτό, προτείνουν την υιοθέτηση προτύπων κινητής υπολογιστικής άκρου (mobile EC – MEC), τα οποία έχουν προωθηθεί από το Ευρωπαϊκό Ινστιτούτο Τηλεπικοινωνιακών Προτύπων (European Telecommunications Standards Institute - ETSI). Η MEC είναι μια προηγμένη τεχνολογία που φέρνει την πλατφόρμα υπολογιστικού νέφους (CC) στο άκρο του δικτύου (network edge), βελτιώνοντας έτσι την εμπειρία των χρηστών και καλύπτοντας τις ανάγκες του βιομηχανικού αυτοματισμού.

Οι συγγραφείς κάνουν σημαντική συνεισφορά προτείνοντας μια νέα προσέγγιση σχεδιασμού δικτύου που βασίζεται στον αλγόριθμο NL-wPSO. Αποδεικνύουν ότι η λύση του προβλήματος βελτιστοποίησης είναι η θέση κάθε σωματιδίου και η τιμή καταλληλότητας μπορεί να προσδιοριστεί από την αντικειμενική συνάρτηση. Περαιτέρω, υπογραμμίζουν τη νέα πτυχή της δουλειάς τους, η οποία είναι η προσθήκη ενός μη γραμμικού φθίνοντος βάρους (nonlinear decreasing weight) στον αλγόριθμο PSO για την αντιμετώπιση προβλημάτων σύγκλισης και του κινδύνου πτώσης σε τοπική βελτιστοποίηση.

Οι συγγραφείς χρησιμοποιούν τη μέθοδο συν-προσομοίωσης MATLAB και Origin για να επικυρώσουν την προσέγγισή τους. Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης καταδεικνύουν την υπεροχή του προτεινόμενου NL-wPSO έναντι των βασικών αλγορίθμων PSO και wPSO. Παρουσιάζουν αποτελέσματα που δείχνουν μειωμένη καθυστέρηση μετάδοσης με τον βελτιωμένο αλγόριθμο.

Συνοπτικά, η εργασία των Wang et al. αντιπροσωπεύει μια αξιοσημείωτη πρόοδο στον τομέα του σχεδιασμού δικτύων 5G. Παρουσιάζει μια καινοτόμο λύση για τη βελτιστοποίηση της διάταξης των AAU στο δίκτυο fronthaul, ένα πρόβλημα ιδιαίτερης σημασίας στον τομέα. Αξιοποιώντας έναν βελτιωμένο αλγόριθμο βελτιστοποίησης σμήνους σωματιδίων, οι ερευνητές επιδεικνύουν μια πολλά υποσχόμενη προσέγγιση για τη μείωση της καθυστέρησης μετάδοσης στα δίκτυα 5G, βελτιώνοντας έτσι την ποιότητα της υπηρεσίας για εφαρμογές ευαίσθητες στο χρόνο. Τα ευρήματα αυτής της μελέτης έχουν σημαντικές συνέπειες για τον μελλοντικό σχεδιασμό και την ανάπτυξη των δικτύων 5G και αποτελούν σημείο αναφοράς για τους ερευνητές σε αυτόν τον τομέα.

Η εργασία των Wang et al. (2021), «Low-delay layout planning based on improved particle swarm optimization algorithm in 5G optical fronthaul network», είναι κρίσιμης σημασίας για διάφορους λόγους. Ο σημαντικότερος είναι η έγκαιρη συνεισφορά του στον ταχέως εξελισσόμενο τομέα της δικτύωσης 5G και στις συναφείς προκλήσεις. Καθώς ο κλάδος των τηλεπικοινωνιών συνεχίζει να προοδεύει με αμείλικτο ρυθμό, η εργασία παρέχει διορατική λύση σε ένα από τα πιο σημαντικά ζητήματα - την καθυστέρηση στην απόδοση του δικτύου, ειδικά όσον αφορά εφαρμογές ευαίσθητες στο χρόνο.

Η σημασία αυτής της μελέτης μπορεί να αποδοθεί στο γεγονός ότι αντιμετωπίζει άμεσα ένα από τα τρία βασικά σενάρια εφαρμογών στα δίκτυα 5G: την εξαιρετικά αξιόπιστη και χαμηλής καθυστέρησης επικοινωνία (uRLLC). Καθώς η βιομηχανία

προωθεί την ενσωμάτωση της τεχνολογίας 5G σε διάφορες πτυχές της καθημερινής ζωής, όπως η τηλεϊατρική, ο βιομηχανικός αυτοματισμός και η αυτόνομη οδήγηση, η εξασφάλιση χαμηλής καθυστέρησης δεν είναι πλέον απλώς ένα τεχνικό εμπόδιο, αλλά προϋπόθεση για την επιτυχή εφαρμογή αυτών των τεχνολογιών.

Επιπλέον, η πρόταση της εργασίας για χρησιμοποίηση του αλγορίθμου βελτιστοποίησης σμήνους σωματιδίων (PSO) και της βελτιωμένης εκδοχής του, τον μη γραμμικό αλγόριθμο βελτιστοποίησης σμήνους σωματιδίων με συντελεστή βάρους αδράνειας (NL-wPSO), στον σχεδιασμό διάταξης των ενεργών μονάδων ραδιοκεραίας (AAU) είναι καινοτόμα. Η ενσωμάτωση αυτού του αλγορίθμου καταδεικνύει την αποτελεσματική χρήση μεθόδων τεχνητής νοημοσύνης για την αντιμετώπιση των πραγματικών προκλήσεων στις τηλεπικοινωνίες.

Ωστόσο, όπως κάθε ερευνητική εργασία, έτσι και η συγκεκριμένη έχει κάποιες αδυναμίες. Πρώτον, ενώ η εργασία συζητά διεξοδικά τον σχεδιασμό και την υλοποίηση του αλγορίθμου NL-wPSO, βασίζεται σε προσομοιώσεις. Η απόδοση και η επιτυχία της προτεινόμενης μεθόδου σε πραγματικά περιβάλλοντα μπορεί να διαφέρει από εκείνες στις ελεγχόμενες προσομοιώσεις. Επομένως, μελλοντικές μελέτες θα πρέπει να εξετάσουν το ενδεχόμενο εφαρμογής του αλγορίθμου σε ένα πραγματικό περιβάλλον δικτύου 5G για να ελέγξουν την αποτελεσματικότητα και την αξιοπιστία του.

Δεύτερον, η εργασία επικεντρώνεται κυρίως στην εφαρμογή του αλγορίθμου NL-wPSO για τον σχεδιασμό διάταξης στο πλαίσιο των δικτύων 5G. Ωστόσο, κάνει μικρή αναφορά στην πιθανή προσαρμογή και εφαρμογή του αλγορίθμου σε άλλα περιβάλλοντα δικτύου. Επομένως, μελλοντική έρευνα θα ήταν καλό να διερευνήσει πώς η προτεινόμενη μέθοδος θα μπορούσε να τροποποιηθεί και να εφαρμοστεί σε άλλους τύπους δικτύων, συμπεριλαμβανομένων παλαιότερων γενεών όπως το 4G ή μελλοντικών γενεών πέρα από το 5G.

Τέλος, ενώ η εργασία παρουσιάζει μια πολλά υποσχόμενη λύση για τη βελτίωση του λανθάνοντος χρόνου, δεν εξετάζει εκτενώς τις πολύπλοκες αντισταθμίσεις στον προγραμματισμό του δικτύου, όπως το κόστος, η κατανάλωση ενέργειας και οι περιορισμοί υλικού. Περαιτέρω έρευνα θα μπορούσε να επεκταθεί σε αυτές τις πτυχές, παρέχοντας μια πιο ολοκληρωμένη άποψη του σχεδιασμού και της βελτιστοποίησης του δικτύου.

Η μελέτη αφήνει επίσης περιθώρια για μελλοντική εξερεύνηση στους τομείς της μηχανικής μάθησης και της τεχνητής νοημοσύνης στο σχεδιασμό δικτύων. Ο

αλγόριθμος PSO και η τροποποιημένη έκδοσή του που χρησιμοποιούνται σε αυτή την εργασία είναι μόνο δύο από τις πολλές πιθανές μεθόδους υπολογιστικής νοημοσύνης που θα μπορούσαν να εφαρμοστούν. Άλλες τεχνικές, όπως γενετικοί αλγόριθμοι ή μοντέλα βαθιάς μάθησης, θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν και να δοκιμαστούν για την αποτελεσματικότητά τους στη βελτίωση της καθυστέρησης στα δίκτυα 5G.

Επιπλέον, ενώ η εργασία παρουσιάζει μια επιτυχημένη εφαρμογή του αλγορίθμου PSO στον σχεδιασμό διάταξης AAU, υπάρχουν πολλά άλλα προβλήματα βελτιστοποίησης στο πλαίσιο του δικτύου 5G που μπορούν επίσης να ωφεληθούν από παρόμοιες προσεγγίσεις. Για παράδειγμα, τεχνικές βελτιστοποίησης θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν για την κατανομή φάσματος, τον έλεγχο ισχύος ή την τοποθέτηση και διαμόρφωση άλλων τύπων εξοπλισμού δικτύου.

Συμπερασματικά, η έρευνα των Wang et al. (2021) αντιπροσωπεύει ένα σημαντικό βήμα προόδου στον τομέα της δικτύωσης 5G, ιδιαίτερα στη μείωση του λανθάνοντος χρόνου για εφαρμογές ευαίσθητες στο χρόνο. Παρά τους πιθανούς περιορισμούς, η εργασία ανοίγει πολλές δυνατότητες για περαιτέρω έρευνα, ιδιαίτερα στον τομέα του συνδυασμού τεχνητής νοημοσύνης και δικτύων τηλεπικοινωνιών.

4.3. Δίκτυο ραδιοπρόσβασης με τεχνολογία υπολογιστικής άκρου και FSO Fronthaul και Backhaul σε UAV

Η εργασία των Dong et al. (2018) παρουσιάζει μια ολοκληρωμένη ανάλυση της χρήσης μη επανδρωμένων εναέριων οχημάτων (unmanned aerial vehicles - UAV) για ασύρματη επικοινωνία. Οι συγγραφείς συζητούν τα πιθανά οφέλη από τη χρήση UAV για ασύρματη επικοινωνία, συμπεριλαμβανομένης της ικανότητάς τους να παρέχουν ευέλικτη ανάπτυξη και ταχεία απόκριση συμβάντων. Υπογραμμίζουν επίσης τις προκλήσεις που συνδέονται με αυτήν την τεχνολογία, όπως η διαχείριση πόρων επικοινωνίας και οι τεχνολογίες υλικού και δικτύωσης.

Η εργασία ξεκινά με μια επισκόπηση της τρέχουσας κατάστασης της ασύρματης επικοινωνίας και των προκλήσεων που συνδέονται με αυτήν. Οι συγγραφείς σημειώνουν ότι τα παραδοσιακά συστήματα ασύρματης επικοινωνίας συχνά περιορίζονται από τη σταθερή υποδομή τους και την έλλειψη ευελιξίας. Υποστηρίζουν ότι τα UAV δίνουν λύση σε αυτές τις προκλήσεις καθώς προσφέρουν μια ευέλικτη και δυναμική πλατφόρμα για ασύρματη επικοινωνία.

Στη συνέχεια, οι συγγραφείς συζητούν τα πιθανά οφέλη από τη χρήση UAV για ασύρματη επικοινωνία. Σημειώνουν ότι τα UAV μπορούν να αναπτυχθούν γρήγορα

για να παρέχουν ασύρματη κάλυψη σε περιοχές όπου η παραδοσιακή υποδομή δεν είναι διαθέσιμη ή έχει υποστεί ζημιά. Υπογραμμίζουν επίσης τη δυνατότητα των UAV να παρέχουν ασύρματη κάλυψη κατά παραγγελία για εκδηλώσεις όπως συναυλίες, φεστιβάλ και αθλητικές εκδηλώσεις.

Στη συνέχεια, η εργασία μιλά για τις προκλήσεις που σχετίζονται με τη χρήση UAV για ασύρματη επικοινωνία. Οι συγγραφείς σημειώνουν ότι η διαχείριση των πόρων επικοινωνίας αποτελεί βασική πρόκληση, καθώς τα UAV πρέπει να είναι σε θέση να κατανέμουν αποτελεσματικά τους πόρους επικοινωνίας σε πολλούς χρήστες. Υπογραμμίζουν επίσης την ανάγκη για τεχνολογίες υλικού και δικτύωσης που έχουν σχεδιαστεί ειδικά για UAV.

Για να αντιμετωπιστούν αυτές οι προκλήσεις, οι συγγραφείς προτείνουν μια νέα αρχιτεκτονική δικτύου ραδιοπρόσβασης με τεχνολογία υπολογιστικής άκρου που χρησιμοποιεί UAV για συνδέσεις fronthaul και backhaul. Η αρχιτεκτονική έχει σχεδιαστεί για να παρέχει μια ευέλικτη και δυναμική πλατφόρμα για ασύρματη επικοινωνία, ενώ παράλληλα αντιμετωπίζει τις προκλήσεις που σχετίζονται με τη διαχείριση πόρων επικοινωνίας και τις τεχνολογίες υλικού και δικτύωσης.

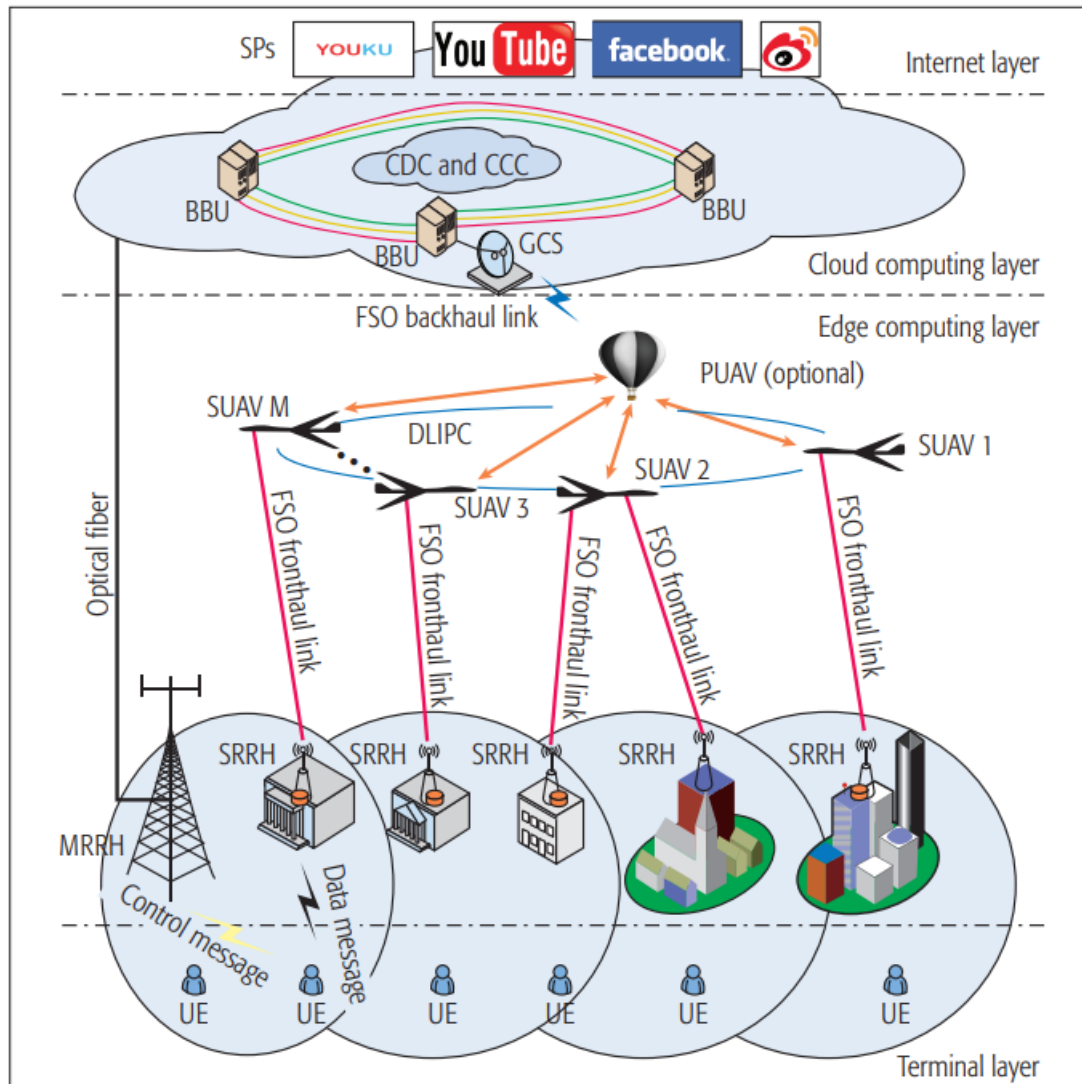
Στη συνέχεια, οι συγγραφείς παρέχουν μια λεπτομερή ανάλυση της προτεινόμενης αρχιτεκτονικής, συμπεριλαμβανομένων των τεχνολογιών υλικού και δικτύωσης. Μιλούν για τη χρήση δικτύωσης που καθορίζεται από λογισμικό (software-defined networking - SDN) και εικονικοποίησης λειτουργιών δικτύου (network function virtualization - NFV) για να καταστεί δυνατή η δυναμική κατανομή πόρων και η αποτελεσματική διαχείριση της επικοινωνίας. Υπογραμμίζουν επίσης τη χρήση της υπολογιστικής άκρου για να είναι δυνατή η επεξεργασία και ανάλυση δεδομένων σε πραγματικό χρόνο.

Η εργασία ολοκληρώνεται με αναφορά στις ερευνητικές προκλήσεις και την πρόοδο που σχετίζεται με τη διαχείριση πόρων επικοινωνίας με τη χρήση UAV για ασύρματη επικοινωνία. Οι συγγραφείς σημειώνουν ότι υπάρχει ακόμη πολλή δουλειά που πρέπει να γίνει σε αυτόν τον τομέα, ιδιαίτερα στην ανάπτυξη αποτελεσματικών αλγορίθμων κατανομής πόρων επικοινωνίας. Υπογραμμίζουν επίσης την ανάγκη για περαιτέρω έρευνα στο υλικό και τις τεχνολογίες δικτύωσης που έχουν σχεδιαστεί ειδικά για UAV.

Στην εργασία των Dias et al. (2023), το σχήμα 4 παρουσιάζει μια απεικόνιση της προτεινόμενης αρχιτεκτονικής δικτύου ραδιοπρόσβασης ακραίου νέφους (edge cloud radio access network - EC-RAN) με συνδέσμους οπτικών επικοινωνιών

Η Χρήση Τεχνολογιών Οπτικού Fronthaul για Εφαρμογές Υπολογιστικής Άκρου Εστιάζοντας στα Δίκτυα 5G

ελεύθερου χώρου (free-space optical - FSO) και οπτικών ινών (fiber-optic backhaul - FnB) που είναι τοποθετημένοι σε μη επανδρωμένα εναέρια οχήματα (UAV). Το σχήμα παρέχει μια οπτική αναπαράσταση της προτεινόμενης αρχιτεκτονικής, η οποία έχει σχεδιαστεί για να συμπληρώνει την επίγεια υποδομή και να παρέχει ευέλικτη και δυναμική ασύρματη επικοινωνία.



Σχήμα 14: Απεικόνιση EC-RAN με συνδέσμους FSO-FnB σε UAV. Πηγή: (Dong et al., 2018)

Το σχήμα δείχνει έναν αριθμό UAV που πετούν σε διαφορετικά ύψη, με κάθε UAV να είναι εξοπλισμένο με μονάδα αποθήκευσης κρυφής μνήμης (cache) και ελαφριά μονάδα βασικής ζώνης επικοινωνιών (baseband unit - BBU). Τα UAV συνδέονται με έναν σταθμό ελέγχου εδάφους (ground control station - GCS) μέσω ζεύξεων FSO και FnB, οι οποίες χρησιμοποιούνται για επικοινωνία fronthaul και backhaul. Οι σύνδεσμοι FSO χρησιμοποιούνται για επικοινωνία μεταξύ των UAV και του GCS,

ενώ οι σύνδεσμοι FnB χρησιμοποιούνται για την επικοινωνία μεταξύ του GCS και του βασικού δικτύου.

Το σχήμα δείχνει επίσης έναν αριθμό συσκευών εξοπλισμού χρήστη (user equipment -UE) στο έδαφος, οι οποίες συνδέονται με τα UAV μέσω ασύρματων συνδέσεων. Τα UAV λειτουργούν ως σταθμοί βάσης για τις συσκευές UE, παρέχοντας ασύρματη κάλυψη σε περιοχές όπου η παραδοσιακή υποδομή δεν είναι διαθέσιμη ή έχει υποστεί ζημιά.

Συνολικά, το σχήμα 4 παρέχει μια σαφή και συνοπτική απεικόνιση της προτεινόμενης αρχιτεκτονικής EC-RAN με συνδέσεις FSO-FnB τοποθετημένες σε UAV. Το σχήμα υπογραμμίζει τα βασικά στοιχεία της αρχιτεκτονικής, συμπεριλαμβανομένων των UAV, των μονάδων αποθήκευσης κρυφής μνήμης, των ελαφρών BBU, των συνδέσμων FSO, των συνδέσμων FnB και των συσκευών UE. Παρέχει επίσης μια οπτική αναπαράσταση του τρόπου με τον οποίο η αρχιτεκτονική έχει σχεδιαστεί για να συμπληρώνει την επίγεια υποδομή και να παρέχει ευέλικτη και δυναμική ασύρματη επικοινωνία.

Η εργασία των Dong et al. (2018) αποτελεί σημαντική συνεισφορά στον τομέα της ασύρματης επικοινωνίας, καθώς παρουσιάζει μια νέα προσέγγιση για τη χρήση μη επανδρωμένων εναέριων οχημάτων (UAV) για συνδέσεις fronthaul και backhaul σε μια αρχιτεκτονική δικτύου ραδιοπρόσβασης. Η εργασία υπογραμμίζει τα πιθανά οφέλη από τη χρήση UAV για ασύρματη επικοινωνία, συμπεριλαμβανομένης της ικανότητάς τους να παρέχουν ευέλικτη ανάπτυξη και ταχεία απόκριση συμβάντων. Αντιμετωπίζει επίσης τις προκλήσεις που σχετίζονται με αυτήν την τεχνολογία, όπως η διαχείριση πόρων επικοινωνίας και οι τεχνολογίες υλικού και δικτύωσης.

Ένα από τα βασικά πλεονεκτήματα αυτής της εργασίας είναι η ολοκληρωμένη ανάλυση της προτεινόμενης αρχιτεκτονικής. Οι συγγραφείς παρέχουν μια λεπτομερή επισκόπηση του υλικού και των τεχνολογιών δικτύωσης που απαιτούνται για την αρχιτεκτονική, καθώς και των προκλήσεων διαχείρισης πόρων επικοινωνίας που πρέπει να αντιμετωπιστούν. Προτείνουν επίσης μια νέα προσέγγιση για την αντιμετώπιση αυτών των προκλήσεων, χρησιμοποιώντας δικτύωση που ορίζεται από λογισμικό (SDN) και εικονικοποίηση λειτουργιών δικτύου (NFV) για να καταστεί δυνατή η δυναμική κατανομή πόρων και η αποτελεσματική διαχείριση της επικοινωνίας.

Ένα άλλο πλεονέκτημα της εργασίας αυτής είναι η εστίασή της στην υπολογιστική άκρου, η οποία επιτρέπει την επεξεργασία και ανάλυση δεδομένων σε πραγματικό

χρόνο. Οι συγγραφείς υπογραμμίζουν τα πιθανά οφέλη της για ασύρματη επικοινωνία, συμπεριλαμβανομένων της μειωμένης καθυστέρησης και της βελτιωμένης απόδοσης δικτύου. Συζητούν επίσης τις προκλήσεις που σχετίζονται με αυτήν, όπως η ανάγκη για αποτελεσματική επεξεργασία και αποθήκευση δεδομένων.

Παρά τα δυνατά αυτά σημεία, υπάρχουν ορισμένες αδυναμίες στην εργασία που θα μπορούσαν να αντιμετωπιστούν σε μελλοντική έρευνα. Μια από αυτές είναι η έλλειψη εμπειρικών δεδομένων για την υποστήριξη της προτεινόμενης αρχιτεκτονικής. Ενώ οι συγγραφείς παρέχουν μια λεπτομερή ανάλυση της αρχιτεκτονικής, δεν υπάρχουν εμπειρικά στοιχεία που να αποδεικνύουν την αποτελεσματικότητά της σε πραγματικό περιβάλλον. Η μελλοντική έρευνα θα μπορούσε να αντιμετωπίσει την αδυναμία αυτή με τη διεξαγωγή πειραμάτων για την αξιολόγηση της απόδοσης της προτεινόμενης αρχιτεκτονικής σε διαφορετικά σενάρια.

Μια άλλη αδυναμία της εργασίας είναι η περιορισμένη αναφορά στα ρυθμιστικά και νομικά ζητήματα που σχετίζονται με τη χρήση UAV για ασύρματη επικοινωνία. Οι συγγραφείς αναφέρουν εν συντομία την ανάγκη για συμμόρφωση με τους κανονισμούς, αλλά δεν παρέχουν λεπτομερή ανάλυση των νομικών και ρυθμιστικών προκλήσεων που πρέπει να αντιμετωπιστούν. Η μελλοντική έρευνα θα μπορούσε να αντιμετωπίσει την αδυναμία αυτή παρέχοντας μια πιο ολοκληρωμένη ανάλυση των νομικών και ρυθμιστικών ζητημάτων που σχετίζονται με τη χρήση UAV για ασύρματη επικοινωνία.

Επιπλέον, θα ήταν σκόπιμη μια λεπτομερέστερη αναφορά των πιθανών ζητημάτων ασφάλειας και απορρήτου που σχετίζονται με τη συγκεκριμένη χρήση UAV. Ενώ οι συγγραφείς αναφέρουν εν συντομία την ανάγκη για μέτρα ασφάλειας και προστασίας της ιδιωτικής ζωής, δεν παρέχουν λεπτομερή ανάλυση των πιθανών κινδύνων και προκλήσεων. Η μελλοντική έρευνα θα μπορούσε να αντιμετωπίσει την παράλειψη αυτή παρέχοντας μια πιο ολοκληρωμένη ανάλυση των θεμάτων ασφάλειας και απορρήτου σχετικά.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Η εργασία αυτή είχε ως στόχο να διερευνήσει την ενσωμάτωση των οπτικών τεχνολογιών fronthaul και της υπολογιστικής άκρου στο πλαίσιο των δικτύων 5G. Ασχολήθηκε με ένα ευρύ φάσμα πλαισίων, από τις εφαρμογές έξυπνων πόλεων των δικτύων 5G έως τη σημασία της υπολογιστικής άκρου και του cloud στα δίκτυα αυτά. Η ανάλυση εμβάθυνε στο fronthaul για 5G, περιγράφοντας τα βασικά χαρακτηριστικά, τα οφέλη και τις διάφορες αρχιτεκτονικές που σχετίζονται με το θέμα. Έγιναν επίσης αναφορές στη διεθνή βιβλιογραφία σχετικά ώστε να υπάρξει καλύτερη κατανόηση του αντικειμένου.

Όπως αναφέρθηκε στα διάφορα κεφάλαια της εργασίας αυτής, τα δίκτυα 5G προσφέρουν τεράστιες ευκαιρίες μεταμόρφωσης του τρόπου που ζούμε και εργαζόμαστε, λόγω των άνευ προηγουμένου δυνατοτήτων τους σε ταχύτητα, καθυστέρηση και συνδεσιμότητα. Ωστόσο, η αξιοποίηση αυτού του δυναμικού προϋποθέτει την υπέρβαση πολλών τεχνικών προκλήσεων. Ειδικότερα, η αποτελεσματική ενσωμάτωση των τεχνολογιών fronthaul με εφαρμογές υπολογιστικής άκρου είναι ζήτημα που απαιτεί περαιτέρω έρευνα και ανάπτυξη.

Η ανάλυση της ερευνητικής εργασίας των Dias et al. (2023) παρείχε ένα πολύτιμο πρίσμα υπό το οποίο διερευνήθηκε η ενσωμάτωση των παθητικών οπτικών δικτύων (PON) και της κινητής υπολογιστικής άκρου (MEC) σε δίκτυα 5G και μελλοντικών γενεών. Οι συγγραφείς πρότειναν ένα νέο πλαίσιο ομοσπονδιακής ενισχυτικής μάθησης (FedRL) για δυναμική κατανομή πόρων, καταδεικνύοντας τη δυνατότητα συνδυασμού αυτών των δύο τεχνολογιών για την κάλυψη των υπολογιστικών απαιτήσεων και της ευαισθησίας στην καθυστέρηση των αναδυόμενων εφαρμογών 5G. Αν και πολλά υποσχόμενη, η εργασία αυτή τόνισε επίσης την ανάγκη για μελλοντική έρευνα που θα διερευνά στρατηγικές για την αποτελεσματική αντιμετώπιση ετερογενών περιβαλλόντων στο πλαίσιο της ομοσπονδιακής μάθησης. Σε παρόμοιο πνεύμα, η μελέτη των Wang et al. (2021) τόνισε τη σημασία της χαμηλής καθυστέρησης στον σχεδιασμό των δικτύων 5G. Οι συγγραφείς πρότειναν μια καινοτόμο μέθοδο που βασίζεται σε μια βελτιωμένη έκδοση του αλγόριθμου βελτιστοποίησης σμήνους σωματιδίων με συντελεστή βάρους αδράνειας (NL-wPSO) για τη βελτιστοποίηση της διάταξης των ενεργών μονάδων ραδοκεραίας (AAU) στο

δίκτυο fronthaul, μειώνοντας έτσι την καθυστέρηση μετάδοσης. Ωστόσο, υπάρχει ανάγκη για περαιτέρω έρευνα, ιδιαίτερα για πραγματικές δοκιμές του προτεινόμενου πλαισίου και περαιτέρω διερεύνηση των χρήσεων της τεχνητής νοημοσύνης και των τεχνικών μηχανικής μάθησης στο σχεδιασμό και τη βελτιστοποίηση δικτύου.

Η ανάλυση της μελέτης των Dong et al. (2018) έριξε φως στη δυνατότητα χρήσης μη επανδρωμένων εναέριων οχημάτων (UAV) για ασύρματη επικοινωνία. Οι συγγραφείς πρότειναν μια νέα αρχιτεκτονική δικτύων ραδιοπρόσβασης με υπολογιστική άκρου που χρησιμοποιεί UAV για συνδέσεις fronthaul και backhaul. Αν και η πρότασή τους υπόσχεται ευέλικτη ανάπτυξη και ταχεία απόκριση συμβάντων, εγείρει επίσης νέα ερωτήματα σχετικά με τα εμπειρικά δεδομένα για την υποστήριξη της προτεινόμενης αρχιτεκτονικής, τα ρυθμιστικά και νομικά ζητήματα, την ασφάλεια και το απόρρητο.

Συνοψίζοντας, οι τρεις αναλυθείσες εργασίες παρουσιάζουν την πρόοδο που έχει γίνει προς την ενσωμάτωση των τεχνολογιών fronthaul και της υπολογιστικής άκρου σε δίκτυα 5G, αλλά επισημαίνουν επίσης πιθανές αδυναμίες και τομείς για περαιτέρω έρευνα. Τα ευρήματά τους τονίζουν τη σημασία αυτού του θέματος και την ανάγκη για συνεχή έρευνα και ανάπτυξη στο μέλλον.

Μελλοντικά, είναι σαφές ότι ο τομέας της δικτύωσης 5G, ειδικά η ενσωμάτωση των τεχνολογιών fronthaul και της υπολογιστικής άκρου, θα συνεχίσει να εξελίσσεται με ταχείς ρυθμούς. Καθώς προχωράμε στην εποχή του διαδικτύου των πραγμάτων (IoT), του απτικού διαδικτύου και της επικοινωνίας ανθρώπου με μηχανή/ρομπότ (H2M/R), θα χρειαστούν πιο εξελιγμένα, αξιόπιστα και αποτελεσματικά συστήματα για την αντιμετώπιση των υπολογιστικών απαιτήσεων και της ευαίσθητης στην καθυστέρηση φύσης των αναδυόμενων αυτών τεχνολογιών.

Απαιτείται επίσης περαιτέρω έρευνα για την επικύρωση των ευρημάτων αυτών των μελετών σε πραγματικά περιβάλλοντα. Ενώ παρέχουν πολύτιμες γνώσεις, οι προσομοιώσεις δεν μπορούν να συλλάβουν πλήρως τις πολυπλοκότητες και τις μεταβλητότητες των πραγματικών καταστάσεων. Η μελλοντική έρευνα θα πρέπει επίσης να εμβαθύνει στις ρυθμιστικές και νομικές πτυχές των τεχνολογιών αυτών, καθώς και στις επιπτώσεις τους στην ασφάλεια και την ιδιωτικότητα. Καθώς η τεχνολογία συνεχίζει να προοδεύει, είναι επιτακτική ανάγκη να παραμείνουμε ενήμεροι για τα ζητήματα αυτά και να εργαστούμε προληπτικά για την εξεύρεση λύσεων.

Η Χρήση Τεχνολογιών Οπτικού Fronthaul για Εφαρμογές Υπολογιστικής Άκρου Εστιάζοντας στα Δίκτυα 5G

Μια άλλη ευκαιρία για μελλοντική έρευνα βρίσκεται στην περαιτέρω διερεύνηση των τεχνικών τεχνητής νοημοσύνης και μηχανικής μάθησης στο πλαίσιο των δικτύων 5G. Όπως φαίνεται στην εργασία των Wang et al. (2021), οι τεχνικές αυτές προσφέρουν τεράστιες δυνατότητες για βελτιστοποίηση του σχεδιασμού και της απόδοσης του δικτύου.

Συμπερασματικά, η εργασία αυτή παρείχε μια σε βάθος διερεύνηση της ενσωμάτωσης των τεχνολογιών fronthaul και της υπολογιστικής άκρου σε δίκτυα 5G. Ενώ έχει σημειωθεί σημαντική πρόοδος, απομένει ακόμα πολλή δουλειά. Με συνεχή έρευνα και ανάπτυξη μπορεί να αξιοποιηθεί το πλήρες δυναμικό αυτών των τεχνολογιών, φέρνοντάς μας πιο κοντά στον κόσμο του 5G και των μελλοντικών γενεών.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Abbas, N., Zhang, Y., Taherkordi, A., & Skeie, T. (2017). Mobile edge computing: A survey. *IEEE Internet of Things Journal*, 5(1), 450-465.
- Achard, P. O., & Di Bernardino, A. (2018). Public Private Partnerships: Strategic Assets and Managerial Models.
- Agyapong, P. K., Iwamura, M., Staehle, D., Kiess, W., & Benjebbour, A. (2014). Design considerations for a 5G network architecture. *IEEE Communications Magazine*, 52(11), 65-75.
- Albataineh, H., Nijim, M., & Bollampall, D. (2020, August). The design of a novel smart home control system using smart grid based on edge and cloud computing. In *2020 IEEE 8th International Conference on Smart Energy Grid Engineering (SEGE)* (pp. 88-91). IEEE.
- Alcaraz-Calero, J., Belikaidis, I. P., Cano, C. J. B., Bisson, P., Bourse, D., Bredel, M., ... & Wang, Q. (2017, October). Leading innovations towards 5G: Europe's perspective in 5G infrastructure public-private partnership (5G-PPP). In *2017 IEEE 28th Annual International Symposium on Personal, Indoor, and Mobile Radio Communications (PIMRC)* (pp. 1-5). IEEE.
- Alfa, A. S., Maharaj, B. T., Ghazaleh, H. A., & Awoyemi, B. (2018). The role of 5G and IoT in smart cities. *Handbook of Smart Cities: Software Services and Cyber Infrastructure*, 31-54.
- Alimi, I. A., Teixeira, A. L., & Monteiro, P. P. (2017). Toward an efficient C-RAN optical fronthaul for the future networks: A tutorial on technologies, requirements, challenges, and solutions. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 20(1), 708-769.
- Alnoman, A., & Anpalagan, A. (2017). Towards the fulfillment of 5G network requirements: technologies and challenges. *Telecommunication Systems*, 65, 101-116.
- Al-Turjman, F. (2020). Intelligence and security in big 5G-oriented IoNT: an overview. *Future Generation Computer Systems*, 102, 357-368.
- Anwar, S., & Prasad, R. (2018). Framework for future telemedicine planning and infrastructure using 5G technology. *Wireless Personal Communications*, 100, 193-208.

- Arfaoui, G., Bisson, P., Blom, R., Borgaonkar, R., Englund, H., Félix, E., ... & Zahariev, A. (2018). A security architecture for 5G networks. *IEEE access*, 6, 22466-22479.
- Bangerter, B., Talwar, S., Arefi, R., & Stewart, K. (2014). Networks and devices for the 5G era. *IEEE Communications Magazine*, 52(2), 90-96.
- Beard, C. (2016). High reliability 4g and 5g cellular wireless services for smart cities. *IEEE smart cities ISCW-KC-2016*.
- Buzzi, S., Chih-Lin, I., Klein, T. E., Poor, H. V., Yang, C., & Zappone, A. (2016). A survey of energy-efficient techniques for 5G networks and challenges ahead. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 34(4), 697-709.
- Cai, M., Liu, Q., & Jiang, H. (2018, August). A novel efficient wireless fronthaul (EWF) method for the common public radio interface (CPRI) signal transmission. In *2018 IEEE 88th Vehicular Technology Conference (VTC-Fall)* (pp. 1-5). IEEE.
- Cai, M., Liu, Q., & Jiang, H. (2018, August). A novel efficient wireless fronthaul (EWF) method for the common public radio interface (CPRI) signal transmission. In *2018 IEEE 88th Vehicular Technology Conference (VTC-Fall)* (pp. 1-5). IEEE.
- Cai, M., Liu, Q., & Jiang, H. (2018, August). A novel efficient wireless fronthaul (EWF) method for the common public radio interface (CPRI) signal transmission. In *2018 IEEE 88th Vehicular Technology Conference (VTC-Fall)* (pp. 1-5). IEEE.
- Camacho, F., Cárdenas, C., & Muñoz, D. (2018). Emerging technologies and research challenges for intelligent transportation systems: 5G, HetNets, and SDN. *International Journal on Interactive Design and Manufacturing (IJIDeM)*, 12, 327-335.
- Cao, K., Liu, Y., Meng, G., & Sun, Q. (2020). An overview on edge computing research. *IEEE access*, 8, 85714-85728.
- Chen, M., Yang, J., Hao, Y., Mao, S., & Hwang, K. (2017). A 5G cognitive system for healthcare. *Big Data and Cognitive Computing*, 1(1), 2.
- Chettri, L., & Bera, R. (2019). A comprehensive survey on Internet of Things (IoT) toward 5G wireless systems. *IEEE Internet of Things Journal*, 7(1), 16-32.
- Condoluci, M., Lema, M. A., Mahmoodi, T., & Dohler, M. (2018). 5g IoT industry verticals and network requirements. In *Powering the Internet of Things With 5G Networks* (pp. 148-175). IGI Global.
- Condoluci, M., Sardis, F., & Mahmoodi, T. (2016). Softwarization and virtualization in 5G networks for smart cities. In *Internet of Things. IoT Infrastructures: Second*

- International Summit, IoT 360° 2015, Rome, Italy, October 27–29, 2015, Revised Selected Papers, Part I* (pp. 179-186). Springer International Publishing.
- D'Agostino, D., Morganti, L., Corni, E., Cesini, D., & Merelli, I. (2019). Combining edge and cloud computing for low-power, cost-effective metagenomics analysis. *Future Generation Computer Systems*, *90*, 79-85.
- Dananjayan, S., & Raj, G. M. (2021). 5G in healthcare: how fast will be the transformation?. *Irish Journal of Medical Science (1971-)*, *190*(2), 497-501.
- Das, P., Ghosh, S., Chatterjee, S., & De, S. (2020, September). Energy harvesting-enabled 5G advanced air pollution monitoring device. In *2020 IEEE 3rd 5G World Forum (5GWF)* (pp. 218-223). IEEE.
- De Dutta, S., & Prasad, R. (2019). Security for smart grid in 5G and beyond networks. *Wireless personal communications*, *106*, 261-273.
- Dias, I., Ruan, L., Ranaweera, C., & Wong, E. (2023). From 5G to beyond: Passive optical network and multi-access edge computing integration for latency-sensitive applications. *Optical Fiber Technology*, *75*, 103191.
- Dong, Y., Hassan, M. Z., Cheng, J., Hossain, M. J., & Leung, V. C. (2018). An edge computing empowered radio access network with UAV-mounted FSO fronthaul and backhaul: Key challenges and approaches. *IEEE Wireless Communications*, *25*(3), 154-160.
- Dragičević, T., Siano, P., & Prabakaran, S. S. (2019). Future generation 5G wireless networks for smart grid: A comprehensive review. *Energies*, *12*(11), 2140.
- Dutkiewicz, E. (2016, December). Radio spectrum research for emerging IoT and 5G networks: applications to smart buildings and smart cities. In *Proceedings of the 7th Symposium on Information and Communication Technology* (pp. 2-2).
- Elayoubi, S. E., Jemaa, S. B., Altman, Z., & Galindo-Serrano, A. (2019). 5G RAN slicing for verticals: Enablers and challenges. *IEEE Communications Magazine*, *57*(1), 28-34.
- El-Shorbagy, A. M. (2021). 5G Technology and the Future of Architecture. *Procedia Computer Science*, *182*, 121-131.
- Eremia, M., Toma, L., & Sanduleac, M. (2017). The smart city concept in the 21st century. *Procedia Engineering*, *181*, 12-19.

- Esposito, C., Castiglione, A., Pop, F., & Choo, K. K. R. (2017). Challenges of connecting edge and cloud computing: A security and forensic perspective. *IEEE Cloud computing*, 4(2), 13-17.
- Ganne, A. (2022). Cloud Computing And Security Model-A Brief Survey. *International Research Journal of Modernization in Engineering Technology*, 4(11).
- Garau, M., Anedda, M., Desogus, C., Ghiani, E., Murrioni, M., & Celli, G. (2017, June). A 5G cellular technology for distributed monitoring and control in smart grid. In *2017 IEEE international symposium on broadband multimedia systems and broadcasting (BMSB)* (pp. 1-6). IEEE.
- Ghazal, T. M. (2022). A review on security threats, vulnerabilities, and counter measures of 5G enabled Internet-of-Medical-Things. *IET Communications*, 16(5), 421-432.
- Ghosh, A. M., & Grolinger, K. (2020). Edge-cloud computing for Internet of Things data analytics: Embedding intelligence in the edge with deep learning. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 17(3), 2191-2200.
- Gnanasekaran, V., Fridtun, H. T., Hatlen, H., Langøy, M. M., Syrstad, A., Subramanian, S., & De Moor, K. (2021, November). Digital carbon footprint awareness among digital natives: an exploratory study. In *Norsk IKT-konferanse for forskning og utdanning* (No. 1, pp. 99-112).
- Gohar, A., & Nencioni, G. (2021). The role of 5G technologies in a smart city: The case for intelligent transportation system. *Sustainability*, 13(9), 5188.
- Gomes, N. J., & Assimakopoulos, P. (2018, July). Optical fronthaul options for meeting 5G requirements. In *2018 20th International Conference on Transparent Optical Networks (ICTON)* (pp. 1-4). IEEE.
- Gong, Y., Guo, X., Liu, Q., Long, Y., & Li, Y. (2022, April). Monitoring and analysis of the current environmental situation of electromagnetic radiation from 5g application base stations. In *Journal of Physics: Conference Series* (Vol. 2242, No. 1, p. 012026). IOP Publishing.
- Guevara, L., & Auat Cheein, F. (2020). The role of 5G technologies: Challenges in smart cities and intelligent transportation systems. *Sustainability*, 12(16), 6469.
- Guo, B., Cao, W., Tao, A., & Samardzija, D. (2013). LTE/LTE-A signal compression on the CPRI interface. *Bell Labs Technical Journal*, 18(2), 117-133.

- Gupta, A., & Jha, R. K. (2015). A survey of 5G network: Architecture and emerging technologies. *IEEE access*, 3, 1206-1232.
- Ha, Vu & Le, Long & Dao, Dung. (2015). Coordinated Multipoint (CoMP) Transmission Design for Cloud-RANs with Limited Fronthaul Capacity Constraints. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*. PP. 10.1109/TVT.2015.2485668.
- Han, Q., Liang, S., & Zhang, H. (2015). Mobile cloud sensing, big data, and 5G networks make an intelligent and smart world. *IEEE network*, 29(2), 40-45.
- Hassan, N., Yau, K. L. A., & Wu, C. (2019). Edge computing in 5G: A review. *IEEE Access*, 7, 127276-127289.
- He, J., Lee, J., Kandeepan, S., & Wang, K. (2020, November). Machine learning techniques in radio-over-fiber systems and networks. In *Photonics* (Vol. 7, No. 4, p. 105). MDPI.
- Higashino, T., Yamaguchi, H., Hiromori, A., Uchiyama, A., & Yasumoto, K. (2017, June). Edge computing and IoT based research for building safe smart cities resistant to disasters. In *2017 IEEE 37th international conference on distributed computing systems (ICDCS)* (pp. 1729-1737). IEEE.
- Hui, H., Ding, Y., Shi, Q., Li, F., Song, Y., & Yan, J. (2020). 5G network-based Internet of Things for demand response in smart grid: A survey on application potential. *Applied Energy*, 257, 113972.
- Huseien, G. F., & Shah, K. W. (2021). Potential applications of 5G network technology for climate change control: A scoping review of Singapore. *Sustainability*, 13(17), 9720.
- Huseien, G. F., & Shah, K. W. (2022). A review on 5G technology for smart energy management and smart buildings in Singapore. *Energy and AI*, 7, 100116.
- Ishkineeva, G., Ishkineeva, F., & Akhmetova, S. (2015). Major approaches towards understanding smart cities concept. *Asian Social Science*, 11(5), 70.
- Jia, M., Komeily, A., Wang, Y., & Srinivasan, R. S. (2019). Adopting Internet of Things for the development of smart buildings: A review of enabling technologies and applications. *Automation in Construction*, 101, 111-126.
- Jordaan, C. G., Malekian, N., & Malekian, R. (2019). Internet of things and 5G solutions for development of smart cities and connected systems. *Communications of the CCISA*, 25(2), 1-16.

- Kemppainen, P. (2016). Pharma industrial internet: A reference model based on 5g public private partnership infrastructure, industrial internet consortium reference architecture and pharma industry standards. *Nordic and Baltic Journal of Information and Communications Technologies*, 2016(1), 141-162.
- Kim, B. G., Bae, S. H., Kim, H., & Chung, Y. C. (2016, July). Optical fronthaul technologies for next-generation mobile communications. In *2016 18th International Conference on Transparent Optical Networks (ICTON)* (pp. 1-3). IEEE.
- Kim, H. (2018, March). RoF-based optical fronthaul technology for 5G and beyond. In *2018 Optical Fiber Communications Conference and Exposition (OFC)* (pp. 1-3). IEEE.
- Kochovski, P., Stankovski, V., Gec, S., Faticanti, F., Savi, M., Siracusa, D., & Kum, S. (2020). Smart contracts for service-level agreements in edge-to-cloud computing. *Journal of Grid Computing*, 18, 673-690.
- Kumari, A., Tanwar, S., Tyagi, S., Kumar, N., Obaidat, M. S., & Rodrigues, J. J. (2019). Fog computing for smart grid systems in the 5G environment: Challenges and solutions. *IEEE Wireless Communications*, 26(3), 47-53.
- Latif, S., Qadir, J., Farooq, S., & Imran, M. A. (2017). How 5G wireless (and concomitant technologies) will revolutionize healthcare?. *Future Internet*, 9(4), 93.
- Le, N. T., Hossain, M. A., Islam, A., Kim, D. Y., Choi, Y. J., & Jang, Y. M. (2016). Survey of promising technologies for 5G networks. *Mobile information systems*, 2016.
- Li, D. (2019). 5G and intelligence medicine—how the next generation of wireless technology will reconstruct healthcare?. *Precision clinical medicine*, 2(4), 205-
- Li, H., Shou, G., Hu, Y., & Guo, Z. (2016, March). Mobile edge computing: Progress and challenges. In *2016 4th IEEE international conference on mobile cloud computing, services, and engineering (MobileCloud)* (pp. 83-84). IEEE.
- Li, Q. C., Niu, H., Papathanassiou, A. T., & Wu, G. (2014). 5G network capacity: Key elements and technologies. *IEEE Vehicular Technology Magazine*, 9(1), 71-78.
- Li, S., Da Xu, L., & Zhao, S. (2018). 5G Internet of Things: A survey. *Journal of Industrial Information Integration*, 10, 1-9.
- Li, X., & Ye, B. (2021). Latency-Aware Computation Offloading for 5G Networks in Edge Computing. *Security and Communication Networks*, 2021, 1-15.

- Li, Y., Xie, Z., Mo, C., Chen, Y., & Wang, J. (2022, September). A low-power water quality monitoring system and prediction model. In *2022 IEEE 24th International Workshop on Multimedia Signal Processing (MMSP)* (pp. 1-11). IEEE.
- Lin, T. W., Hsu, C. L., Le, T. V., Lu, C. F., & Huang, B. Y. (2021). A smartcard-based user-controlled single sign-on for privacy preservation in 5G-IoT telemedicine systems. *Sensors*, *21*(8), 2880.
- Liu, C., Li, H., & Zhang, Q. (2020). Research on sewage monitoring and water quality prediction based on wireless sensors and support vector machines. *Wireless Communications and Mobile Computing*, *2020*, 1-10.
- Liu, Y., Yang, C., Jiang, L., Xie, S., & Zhang, Y. (2019). Intelligent edge computing for IoT-based energy management in smart cities. *IEEE network*, *33*(2), 111-117.
- Ma, L., Zhang, W., Lv, M., & Li, J. (2022). The study of immersive physiology courses based on intelligent network through virtual reality technology in the context of 5G. *Computational Intelligence and Neuroscience*, *2022*.
- Macho, A., Morant, M., & Llorente, R. (2016). Next-generation optical fronthaul systems using multicore fiber media. *Journal of Lightwave Technology*, *34*(20), 4819-4827.
- Mao, Y., You, C., Zhang, J., Huang, K., & Letaief, K. B. (2017). A survey on mobile edge computing: The communication perspective. *IEEE communications surveys & tutorials*, *19*(4), 2322-2358.
- Markopoulos, I., Valcarenghi, L., Mesogiti, I., Taferner, M., Boleguin, P., Bouali, F., ... & Cattoni, A. (2021). The 5G Infrastructure Public Private Partnership (5G PPP) White paper on "Service Performance Measurement Methods over 5G Experimental Networks", May 2021.
- Marsch, P., Bulakci, Ö., Queseth, O., & Boldi, M. (2018). *5G System Design*. Wiley.
- Matinkhah, S. M., & Shafik, W. (2019, December). Smart grid empowered by 5G technology. In *2019 Smart Grid Conference (SGC)* (pp. 1-6). IEEE.
- Mazhar, T., Malik, M. A., Haq, I., Rozeela, I., Ullah, I., Khan, M. A., ... & Hamam, H. (2022). The Role of ML, AI and 5G Technology in Smart Energy and Smart Building Management. *Electronics*, *11*(23), 3960.

- Minoli, D., & Occhiogrosso, B. (2019). Practical aspects for the integration of 5G networks and IoT applications in smart cities environments. *Wireless Communications and Mobile Computing, 2019*.
- Mitsolidou, C., Vagionas, C., Mesodiakaki, A., Maniotis, P., Kalfas, G., GH Roeloffzen, C., ... & Pleros, N. (2019). A 5G C-RAN optical fronthaul architecture for hotspot areas using OFDM-based analog IFoF waveforms. *Applied Sciences, 9*(19), 4059.
- Mohr, W. (2015, July). The 5G infrastructure public-private partnership. In *Proc. Presentation ITU GSC Meeting* (p. 35).
- Mustakim, H. U. (2020). 5G vehicular network for smart vehicles in smart city: A review. *Journal of Computer, Electronic, and Telecommunication (COMPLETE), 1*(1).
- Narayanan, A., De Sena, A. S., Gutierrez-Rojas, D., Melgarejo, D. C., Hussain, H. M., Ullah, M., ... & Nardelli, P. H. (2020). Key advances in pervasive edge computing for industrial internet of things in 5g and beyond. *IEEE Access, 8*, 206734-206754.
- Nizzi, F., Pecorella, T., Bertini, M., Fantacci, R., Bastianini, M., Cerboni, C., ... & Fratini, A. (2018, October). Evaluation of IoT and videosurveillance applications in a 5G Smart City: the Italian 5G experimentation in Prato. In *2018 AEIT International Annual Conference* (pp. 1-6). IEEE.
- Oleshchuk, V., & Fensli, R. (2011). Remote patient monitoring within a future 5G infrastructure. *Wireless Personal Communications, 57*, 431-439.
- Oproiu, E. M., Iordache, M., Patachia, C., Costea, C., & Marghescu, I. (2017, November). Development and implementation of a Smart City Use Case in a 5G mobile network's operator. In *2017 25th Telecommunication Forum (TELFOR)* (pp. 1-4). IEEE.
- Ordenez-Lucena, J., Tranoris, C., Rodrigues, J., & Contreras, L. M. (2020, June). Cross-domain slice orchestration for advanced vertical trials in a multi-vendor 5G facility. In *2020 European Conference on Networks and Communications (EuCNC)* (pp. 40-45). IEEE.
- Padmashree, T., & Nayak, S. S. (2020, October). 5G technology for e-Health. In *2020 Fourth International Conference on I-SMAC (IoT in Social, Mobile, Analytics and Cloud)(I-SMAC)* (pp. 211-216). IEEE.
- Pan, J., & McElhannon, J. (2017). Future edge cloud and edge computing for internet of things applications. *IEEE Internet of Things Journal, 5*(1), 439-449.

- Pandav, K., Te, A. G., Tomer, N., Nair, S. S., & Tewari, A. K. (2022). Leveraging 5G technology for robotic surgery and cancer care. *Cancer Reports*, 5(8), e1595.
- Panwar, N., Sharma, S., & Singh, A. K. (2016). A survey on 5G: The next generation of mobile communication. *Physical Communication*, 18, 64-84.
- Papagianni, C., Manges-Bafalluy, J., Bermudez, P., Barmounakis, S., De Vleeschauwer, D., Brenes, J., ... & Pepe, T. (2020, June). 5Growth: AI-driven 5G for Automation in Vertical Industries. In *2020 European Conference on Networks and Communications (EuCNC)* (pp. 17-22). IEEE.
- Pawłowicz, B., Salach, M., & Trybus, B. (2019). Smart city traffic monitoring system based on 5G cellular network, RFID and machine learning. In *Engineering Software Systems: Research and Praxis* (pp. 151-165). Springer International Publishing.
- Pham, Q. V., Fang, F., Ha, V. N., Piran, M. J., Le, M., Le, L. B., ... & Ding, Z. (2020). A survey of multi-access edge computing in 5G and beyond: Fundamentals, technology integration, and state-of-the-art. *IEEE access*, 8, 116974-117017.
- Poongodi, M., Hamdi, M., Vijayakumar, V., Rawal, B. S., & Maode, M. (2020, September). An effective electronic waste management solution based on blockchain smart contract in 5G communities. In *2020 IEEE 3rd 5G World Forum (5GWF)* (pp. 1-6). IEEE.
- Qadir, Z., Ullah, F., Munawar, H. S., & Al-Turjman, F. (2021). Addressing disasters in smart cities through UAVs path planning and 5G communications: A systematic review. *Computer Communications*, 168, 114-135.
- Raikwar, A., Mishra, A. K., & Jayendra, D. B. (2013, February). Analysis and implementation techniques of 11 inband reset in common public radio interface. In *2013 IEEE International Conference on Industrial Technology (ICIT)* (pp. 1006-1010). IEEE.
- Rajaei, H., Kanumuri, B., & Narreddi, N. (2020, May). SBDC: smart building data center for IoT, EDGE, and 5G. In *2020 Spring Simulation Conference (SpringSim)* (pp. 1-12). IEEE.
- Ranaweera, C., Wong, E., Nirmalathas, A., Jayasundara, C., & Lim, C. (2017). 5G C-RAN with optical fronthaul: An analysis from a deployment perspective. *Journal of Lightwave Technology*, 36(11), 2059-2068.

- Rao, S. K., & Prasad, R. (2018). Impact of 5G technologies on smart city implementation. *Wireless Personal Communications, 100*, 161-176.
- Raveendran, R., & Tabet Aoul, K. A. (2021). A meta-integrative qualitative study on the hidden threats of smart buildings/cities and their associated impacts on humans and the environment. *Buildings, 11*(6), 251.
- Ruiz, L., Durán, R. J., De Miguel, I., Khodashenas, P. S., Pedreno-Manresa, J. J., Merayo, N., ... & Abril, E. J. (2018). A genetic algorithm for vnf provisioning in nfv-enabled cloud/mec ran architectures. *Applied Sciences, 8*(12), 2614.
- Rusti, B., Stefanescu, H., Ghenta, J., & Patachia, C. (2018, June). Smart city as a 5G ready application. In *2018 International Conference on Communications (COMM)* (pp. 207-212). IEEE.
- Shamsuddin, S., & Srinivasan, S. (2021). Just smart or just and smart cities? Assessing the literature on housing and information and communication technology. *Housing Policy Debate, 31*(1), 127-150.
- Shen, Y., Fang, W., Ye, F., & Kadoch, M. (2020). EV charging behavior analysis using hybrid intelligence for 5G smart grid. *Electronics, 9*(1), 80.
- Shi, W., & Dustdar, S. (2016). The promise of edge computing. *Computer, 49*(5), 78-81.
- Shorgin, S., Samouylov, K., Gudkova, I., Galinina, O., & Andreev, S. (2014, October). On the benefits of 5G wireless technology for future mobile cloud computing. In *2014 International Science and Technology Conference (Modern Networking Technologies)(MoNeTeC)* (pp. 1-4). IEEE.
- Siriwardhana, Y., Porambage, P., Liyanage, M., & Ylianttila, M. (2021). A survey on mobile augmented reality with 5G mobile edge computing: architectures, applications, and technical aspects. *IEEE Communications Surveys & Tutorials, 23*(2), 1160-1192.
- Skouby, K. E., & Lynggaard, P. (2014, November). Smart home and smart city solutions enabled by 5G, IoT, AAI and CoT services. In *2014 international conference on contemporary computing and informatics (IC3I)* (pp. 874-878). IEEE.
- Song, C., Zhang, M., Zhan, Y., Wang, D., Guan, L., Liu, W., ... & Xu, S. (2019). Hierarchical edge cloud enabling network slicing for 5G optical fronthaul. *Journal of Optical Communications and Networking, 11*(4), B60-B70.

- Spinelli, F., & Mancuso, V. (2020). Toward enabled industrial verticals in 5G: A survey on MEC-based approaches to provisioning and flexibility. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 23(1), 596-630.
- Sriram, G. S. (2022). Edge computing vs. Cloud computing: an overview of big data challenges and opportunities for large enterprises. *International Research Journal of Modernization in Engineering Technology and Science*, 4(1), 1331-1337.
- Su, X., Liu, X., Motlagh, N. H., Cao, J., Su, P., Pellikka, P., ... & Tarkoma, S. (2021). Intelligent and scalable air quality monitoring with 5G edge. *IEEE Internet Computing*, 25(2), 35-44.
- Taleb, T., Samdanis, K., Mada, B., Flinck, H., Dutta, S., & Sabella, D. (2017). On multi-access edge computing: A survey of the emerging 5G network edge cloud architecture and orchestration. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 19(3), 1657-1681.
- Tang, Y., Dananjayan, S., Hou, C., Guo, Q., Luo, S., & He, Y. (2021). A survey on the 5G network and its impact on agriculture: Challenges and opportunities. *Computers and Electronics in Agriculture*, 180, 105895.
- Tebe, P. I., Wen, G., Li, J., Yang, Y., Tian, W., Chong, J., & Zhang, W. (2022). 5G-Enabled medical data transmission in mobile hospital systems. *IEEE Internet of Things Journal*, 9(15), 13679-13693.
- Thomas, B., Holland, J. D., & Minot, E. O. (2011). Wildlife tracking technology options and cost considerations. *Wildlife Research*, 38(8), 653-663.
- Torres-Ferrera, P., Straullu, S., Abrate, S., & Gaudino, R. (2017). Upstream and downstream analysis of an optical fronthaul system based on DSP-assisted channel aggregation. *Journal of Optical Communications and Networking*, 9(12), 1191-1201.
- Trebilcock, M., & Rosenstock, M. (2015). Infrastructure public-private partnerships in the developing world: Lessons from recent experience. *The Journal of Development Studies*, 51(4), 335-354.
- Usman, M., Asghar, M. R., Granelli, F., & Qaraqe, K. (2018, June). Integrating smart city applications in 5G networks. In *Proceedings of the 2nd International Conference on Future Networks and Distributed Systems* (pp. 1-5).
- van Hilten, M., & Wolfert, S. (2022). 5G in agri-food-A review on current status, opportunities and challenges. *Computers and Electronics in Agriculture*, 201, 107291.

- Vannithamby, R., & Soong, A. (Eds.). (2020). *5G Verticals: Customizing Applications, Technologies and Deployment Techniques*. John Wiley & Sons.
- Wang, G., Gu, R., & Ji, Y. (2016). Resource allocation optimization for time and wavelength division multiplexing passive optical network enabled mobile fronthaul with bitrate-variable compressed common public radio interface. *Journal of Optical Communications and Networking*, 8(6), 417-426.
- Wang, N., Liu, J., Lu, J., Zeng, X., & Zhao, X. (2021). Low-delay layout planning based on improved particle swarm optimization algorithm in 5G optical fronthaul network. *Optical Fiber Technology*, 67, 102736.
- Wang, N., Liu, J., Lu, J., Zeng, X., & Zhao, X. (2021). Low-delay layout planning based on improved particle swarm optimization algorithm in 5G optical fronthaul network. *Optical Fiber Technology*, 67, 102736.
- Wang, X., Han, G., Du, X., & Rodrigues, J. J. (2015). Mobile cloud computing in 5G: Emerging trends, issues, and challenges [Guest Editorial]. *IEEE Network*, 29(2), 4-5.
- West, D. M. (2016). Achieving sustainability in a 5G world. *The brooking institution, governance studies. Certer for technology innovation at brookings, Washington, DC*.
- Wong, V. W., Schober, R., Ng, D. W. K., & Wang, L. C. (Eds.). (2017). *Key technologies for 5G wireless systems*. Cambridge university press.
- Wu, H., Zhang, Z., Guan, C., Wolter, K., & Xu, M. (2020). Collaborate edge and cloud computing with distributed deep learning for smart city internet of things. *IEEE Internet of Things Journal*, 7(9), 8099-8110.
- Wu, S., Wu, D., Ye, R., Li, K., Lu, Y., Xu, J., ... & Lv, F. (2020). Pilot study of robot-assisted teleultrasound based on 5G network: A new feasible strategy for early imaging assessment during COVID-19 pandemic. *IEEE transactions on ultrasonics, ferroelectrics, and frequency control*, 67(11), 2241-2248.
- Xiang, W., Zheng, K., & Shen, X. S. (Eds.). (2016). *5G mobile communications*. Springer.
- Xu, S., Zhang, Z., Kadoch, M., & Cheriet, M. (2020). A collaborative cloud-edge computing framework in distributed neural network. *EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking*, 2020(1), 1-17.

- Yang, X., Shu, L., Chen, J., Ferrag, M. A., Wu, J., Nurellari, E., & Huang, K. (2021). A survey on smart agriculture: Development modes, technologies, and security and privacy challenges. *IEEE/CAA Journal of Automatica Sinica*, 8(2), 273-302.
- Yin, C., Xiong, Z., Chen, H., Wang, J., Cooper, D., & David, B. (2015). A literature survey on smart cities. *Sci. China Inf. Sci.*, 58(10), 1-18.
- Yu, H., Lee, H., & Jeon, H. (2017). What is 5G? Emerging 5G mobile services and network requirements. *Sustainability*, 9(10), 1848.
- Zhang, D., Rodrigues, J. J., Zhai, Y., & Sato, T. (2021). Design and implementation of 5G e-health systems: Technologies, use cases, and future challenges. *IEEE Communications Magazine*, 59(9), 80-85.
- Zhang, L., Farhang, A., Feng, G., & Onireti, O. (Eds.). (2020). *Radio Access Network Slicing and Virtualization for 5G Vertical Industries*. John Wiley & Sons.
- Zhang, Y., Li, J., Zheng, D., Li, P., & Tian, Y. (2018). Privacy-preserving communication and power injection over vehicle networks and 5G smart grid slice. *Journal of Network and Computer Applications*, 122, 50-60.
- Zhou, S., Wei, C., Song, C., Pan, X., Chang, W., & Yang, L. (2022). Short-term traffic flow prediction of the smart city using 5G internet of vehicles based on edge computing. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*.
- Zhou, Y., & Li, L. (2020). The 5G communication technology-oriented intelligent building system planning and design. *Computer Communications*, 160, 402-410.