



ΔΙΕΘΝΕΣ
ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ
ΤΗΣ ΕΛΛΑΔΟΣ

ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ
ΚΑΙ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ

ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΑΝΑΘΕΣΗ ΠΟΡΩΝ ΓΙΑ ΤΗΝ ΑΠΟ ΑΚΡΗ ΣΕ
ΑΚΡΗ ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗ ΤΩΝ ΔΙΚΤΥΩΝ 6^{ης}
ΓΕΝΙΑΣ (6G)



Της φοιτήτριας
Χριστίνας Αμπατζίδου
Αρ. Μητρώου: 144405

Επιβλέπουσα
Αγάπη Μεσοδιακάκη
Έκτακτο διδακτικό προσωπικό

10 Σεπτεμβρίου 2023

Ανάθεση πόρων για την από άκρη σε άκρη βελτιστοποίηση των δικτύων 6ης γενιάς (6G)

Κωδικός: 21396

Χριστίνα Αμπατζίδου

Αγάπη Μεσοδιακάκη

Ημερομηνία ανάληψης: 28/10/2021

Ημερομηνία περάτωσης: 10/09/2023

Βεβαιώνω ότι είμαι ο συγγραφέας αυτής της εργασίας και ότι κάθε βοήθεια την οποία είχα για την προετοιμασία της είναι πλήρως αναγνωρισμένη και αναφέρεται στην εργασία. Επίσης, έχω καταγράψει τις όποιες πηγές από τις οποίες έκανα χρήση δεδομένων, ιδεών, εικόνων και κειμένου, είτε αυτές αναφέρονται ακριβώς είτε παραφρασμένες. Επιπλέον, βεβαιώνω ότι αυτή η εργασία προετοιμάστηκε από εμένα προσωπικά, ειδικά ως πτυχιακή εργασία, στο Τμήμα Μηχανικών Πληροφορικής και Ηλεκτρονικών Συστημάτων του ΔΙ.ΠΑ.Ε.

Η παρούσα εργασία αποτελεί πνευματική ιδιοκτησία της φοιτήτριας Χριστίνας Αμπατζίδου που την εκπόνησε. Στο πλαίσιο της πολιτικής ανοικτής πρόσβασης, η συγγραφέας/δημιουργός εκχωρεί στο Διεθνές Πανεπιστήμιο της Ελλάδος άδεια χρήσης του δικαιώματος αναπαραγωγής, δανεισμού, παρουσίασης στο κοινό και ψηφιακής διάχυσης της εργασίας διεθνώς, σε ηλεκτρονική μορφή και σε οποιοδήποτε μέσο, για διδακτικούς και ερευνητικούς σκοπούς, άνευ ανταλλάγματος. Η ανοικτή πρόσβαση στο πλήρες κείμενο της εργασίας, δεν σημαίνει καθ' οιονδήποτε τρόπο παραχώρηση δικαιωμάτων διανοητικής ιδιοκτησίας της συγγραφέως/δημιουργού, ούτε επιτρέπει την αναπαραγωγή, αναδημοσίευση, αντιγραφή, πώληση, εμπορική χρήση, διανομή, έκδοση, μεταφόρτωση (downloading), ανάρτηση (uploading), μετάφραση, τροποποίηση με οποιονδήποτε τρόπο, τμηματικά ή περιληπτικά της εργασίας, χωρίς τη ρητή προηγούμενη έγγραφη συναίνεση της συγγραφέως/δημιουργού.

Η έγκριση της πτυχιακής εργασίας από το Τμήμα Μηχανικών Πληροφορικής και Ηλεκτρονικών Συστημάτων του Διεθνούς Πανεπιστημίου της Ελλάδος, δεν υποδηλώνει απαραίτητως και αποδοχή των απόψεων της συγγραφέως, εκ μέρους του Τμήματος.

*«Αφιερωμένο στην οικογένειά μου, στην καθηγήτριά μου και σε όλες τις γυναίκες του τομέα μας που
συνδράμουν στην πληροφορική ένα-bit-την-φορά.»*

Πρόλογος

Η επιλογή του συγκεκριμένου θέματος έγινε με βάση το ενδιαφέρον και την περιέργειά μου για τον τομέα των δικτύων και ιδιαίτερα ως προς το τι έχει να μας προσφέρει η επόμενη γενιά. Τα δίκτυα έκτης γενιάς, αναμένεται να απασχολήσουν την ερευνητική κοινότητα για τα επόμενα 10 χρόνια. Είναι αξιοθαύμαστα τα άλματα της τεχνολογίας των τηλεπικοινωνιακών δικτύων, καθώς με κάθε εξέλιξη που ακολουθεί υπάρχει ραγδαία βελτίωση σε όλους τους τομείς κάθε τεχνολογίας, είτε αφορά την ταχύτητα αποστολής δεδομένων, την χωρητικότητα των ασύρματων ζεύξεων, αλλά κυρίως το πώς επηρεάζουν την καθημερινότητά μας, πώς βελτιώνουν την εμπειρία του χρήστη, τις δυνατότητες που δίνονται για τη δημιουργία νέων εφαρμογών. Με την έρευνα και την ενασχόλησή μου με το θέμα, αποκόμισα νέες γνώσεις σχετικά με την λειτουργία των τηλεπικοινωνιακών δικτύων, τα προβλήματα που υπάρχουν αλλά και το πόσο μπορούν να εξελιχθούν. Από τεχνική άποψη ήρθα σε επαφή με ένα νέο εργαλείο για εμένα, το MATLAB, όπου χρειάστηκε να εξοικειωθώ με το περιβάλλον, την γλώσσα και την γενικότερη λειτουργία του σαν πρόγραμμα.

Περίληψη

Η εξέλιξη των τηλεπικοινωνιακών δικτύων προσφέρει αναρίθμητα οφέλη. Όμως με τις αυξανόμενες απαιτήσεις σε κίνηση, οι προκλήσεις που αντιμετωπίζουν πληθαίνουν. Με αφορμή αυτό το γεγονός, η παρούσα εργασία εστιάζει στο πρόβλημα της από κοινού ανάθεσης πόρων, της συσχέτισης χρηστών και της δρομολόγησης κίνησης για την βελτιστοποίηση των δικτύων έκτης γενιάς. Πιο συγκεκριμένα, προσεγγίζεται η υπάρχουσα βιβλιογραφία και οι λύσεις που υπάρχουν ήδη για τα δίκτυα πέμπτης γενιάς και προσαρμόζονται στις αντίστοιχες απαιτήσεις. Παρουσιάζονται τα δίκτυα έκτης γενιάς, οι κύριες τεχνολογίες τους, τα χαρακτηριστικά τους και οι καινοτομίες που προσφέρουν, γίνεται μία εκτεταμένη ανάλυση της παρούσας βιβλιογραφίας ώστε να γίνει αντιληπτό τι έχει μελετηθεί μέχρι πρότινος και τι εξετάζεται. Έπειτα, αναλύεται ο αλγόριθμος που φαίνεται να επιλύει καλύτερα το πρόβλημα υπό διερεύνηση και αξιολογείται μέσα από έμπρακτη δοκιμή στο περιβάλλον προσομοιώσεων του MATLAB. Έπειτα από την δοκιμή διαφόρων σεναρίων, αντλούνται τα αποτελέσματα που φανερώνουν την υπεροχή του αλγορίθμου έναντι των υπολοίπων της βιβλιογραφίας. Επιπροσθέτως, η έρευνα επεκτείνεται συγκρίνοντας πώς ανταποκρίνεται ο αλγόριθμος σε άλλες μεταβολές των τιμών που επηρεάζουν την κίνηση του δικτύου και η σημαντικότητα που αυτές έχουν στην ενεργειακή του απόδοση. Τέλος, προτείνονται τρόποι για την περαιτέρω εξέλιξη του αλγορίθμου και την βελτιστοποίηση των αποτελεσμάτων του.

End-to-end resource allocation in 6th generation (6G) networks

Christina Ampatzidou

Abstract

The evolution of telecommunication networks offers countless benefits. But as the traffic demands are increasing, so are the challenges they have to face. In view of this fact, this paper focuses on the problem of joint resource assignment, user association, and traffic routing for the optimization of sixth generation networks. More specifically, the existing literature and solutions that already exist for fifth generation networks are approached and adapted to the respective requirements. Sixth generation networks are presented with their main technologies, their characteristics and the innovations they offer. An extensive analysis of the present literature is made to understand what has been studied so far and what is being considered. Then is presented the algorithm that seems to best solve the problem under investigation. It is then analyzed and evaluated through hands-on testing in the MATLAB simulation environment. After testing various scenarios, results are drawn that reveal the superiority of the algorithm over the rest of the literature. In addition, the research is further extended by comparing how the algorithm responds to other value changes that affect network traffic and the importance these have on its energy efficiency. Finally, ways are suggested for the further development of the algorithm and the optimization of its results.

Ευχαριστίες

Ευχαριστώ την καθηγήτριά μου, Αγάπη Μεσοδιακάκη, που με υπομονή, επιμονή και αμέριστη κατανόηση, με βοήθησε με την καθοδήγησή της να φέρω εις πέρας την παρούσα εργασία και να επεκτείνω τις τεχνολογικές μου γνώσεις.

Ευχαριστώ την οικογένεια και τους φίλους μου για όλη την υποστήριξη που μου παρείχαν.

Περιεχόμενα

Πρόλογος	iv
Περίληψη	v
Abstract	vi
Ευχαριστίες	vii
Περιεχόμενα	viii
Κατάλογος Σχημάτων	ix
Κατάλογος Πινάκων	ix
Συντομογραφίες	x
1 Εισαγωγή	1
1.1 Εισαγωγή	1
1.2 Τηλεπικοινωνιακά δίκτυα	1
1.3 Δίκτυα Πρώτης Γενιάς (1G)	3
1.4 Δίκτυα Δεύτερης Γενιάς (2G)	4
1.5 Δίκτυα Τρίτης Γενιάς (3G)	5
1.6 Δίκτυα Τέταρτης Γενιάς (4G)	7
1.7 Δίκτυα Πέμπτης Γενιάς (5G)	9
1.8 Δίκτυα Έκτης Γενιάς (6G)	11
1.8.1 Καινοτομίες και δείκτες επιδόσεων	11
1.8.2 Τεχνολογίες κλειδιά	13
1.8.3 Προκλήσεις	21
1.9 Στόχος και σκοπός της πτυχιακής	25
1.10 Δομή πτυχιακής	25
1.11 Επίλογος	26
2 Πρόβλημα υπό διερεύνηση και παρούσα βιβλιογραφία	27
2.1 Εισαγωγή	27
2.2 Ανάλυση προβλήματος: Ανάθεση πόρων στα ετερογενή δίκτυα	27
2.3 Σύγχρονες βιβλιογραφικές αναφορές	31
2.4 Επίλογος	35
3 Μεθοδολογία και ανάπτυξη λύσης	36
3.1 Εισαγωγή	36
3.2 Μοντέλο υπολογισμού της ενεργειακής απόδοσης	36
3.2.1 Access Network	36
3.2.2 X-haul συνδέσεις	38
3.3 Ανάλυση αλγορίθμου HERA	40
3.4 Επίλογος	42
4 Προσομοίωση και αποτελέσματα	43
4.1 Εισαγωγή	43
4.2 HERA vs SoA	43
4.3 Ανάλυση των αποτελεσμάτων	48
4.4 Επίλογος	53
5 Συμπεράσματα και προτάσεις βελτίωσης	54
5.1 Εισαγωγή	54
5.2 Επέκταση της έρευνας	54
5.3 Επίλογος	56
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	57
A□ Κώδικας	63

Κατάλογος Σχημάτων

1.1	Τοπολογία κυβελωτού δικτύου.	2
1.2	Motorola DynaTac 8000X: Το πρώτο κινητό τηλέφωνο.	4
1.3	Διαγραμματική σύγκριση μεταξύ FDMA, TDMA και CDMA	4
1.4	Παράδειγμα τοπολογίας δικτύου 3G	6
1.5	Τοπολογία δικτύου LTE	8
1.6	Τεχνολογίες των δικτύων 4G.	9
1.7	Παράδειγμα αρχιτεκτονικής δικτύου 5G	10
1.8	Το φάσμα εκπομπής σε THz.	13
1.9	Διάγραμμα μετατροπής φυσικών υπηρεσιών διαδικτύου σε εικονικοποιημένα συστήματα VNF.	15
1.10	Παράδειγμα δικτύου που ενσωματώνει SFC	16
1.11	Διαγραμματική εκπομπή των συστημάτων RIS	17
1.12	Μετάδοση σήματος σε συσκευές UAV	19
1.13	Επίγειες, εναέριες και διαστημικές συνδέσεις	20
1.14	Απεικόνιση edge computing	23
1.15	Απεικόνιση ετερογενούς δικτύου με διάφορες διασυνδέσεις και χρήση δυναμικού φάσματος	24
2.1	Παράδειγμα συνδέσεων ενός ετερογενούς δικτύου 6G	28
2.2	Σχηματική απεικόνιση του edge computing	33
2.3	Παράδειγμα κόμβου με το μεγαλύτερο closeness centrality	34
2.4	Παράδειγμα κόμβου με το μεγαλύτερο betweenness centrality	35
3.1	Παράδειγμα τοπολογίας ετερογενούς δικτύου.	38
3.2	Το διάγραμμα ροής του HERA.	41
4.1	Σχηματική απεικόνιση της τοπολογίας του δικτύου το οποίο εξετάζει ο αλγόριθμος HERA.	44
4.2	Μεταβολές του Energy Efficiency για τους όλους τους αλγόριθμους.	47
4.3	Μεταβολές του χρόνου υπολογισμού για τους όλους τους αλγόριθμους.	48
4.4	Μεταβολές τιμής του Energy Efficiency για $\lambda=1$	49
4.5	Μεταβολές τιμής του Energy Efficiency για $\lambda=0.1$	50
4.6	Μεταβολές τιμής του χρόνου εκτέλεσης για $\lambda=1$	50
4.7	Μεταβολές τιμής του χρόνου εκτέλεσης για $\lambda=0.1$	51
4.8	Συνολική κατανάλωση ενέργειας του δικτύου για $\lambda=1$	51
4.9	Συνολική κατανάλωση ενέργειας του δικτύου για $\lambda=0.1$	52
5.1	Αναπαράσταση επεξεργασίας δεδομένων μέσω Reinforcement Learning.	55
5.2	Σύγκριση σειριακών υπολογισμών με παράλληλους υπολογισμούς	56

Κατάλογος Πινάκων

1.1	Χαρακτηριστικά GPRS vs EDGE.	5
1.2	Τεχνολογίες των δικτύων 3G.	7
1.3	Η εξέλιξη των δικτύων τηλεπικοινωνιών ανά χρονολογία, με τα data rates και τις συχνότητες που εκπέμπουν	10
1.4	Συγκριτικός πίνακας τιμών των KPIs για τα δίκτυα 5G και 6G.	12
1.5	THz Επικοινωνίες.	14
2.1	Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα του NFV	30
2.2	Τομείς που εξετάζει κάθε άρθρο της βιβλιογραφίας	31
4.1	Παράμετροι του VNF.	45
4.2	Τιμές των μεταβλητών στην προσομοίωση.	46

Συνομογραφίες

1G	First generation
2D	Two-dimensional
2G	Second generation
3G	Third generation
4G	Fourth generation
5G	Fifth generation
6G	Sixth generation
AI	Artificial Intelligence
AL	Aggregation Layer
AMPS	Advanced Mobile Phone System
AN	Access Network
AP	Access Point
AR	Augmented Reality
B5G	Beyond 5G
BDMA	Beam-Division Multiple Access
BS	Base Station
CDMA	Code-Division Multiple Access
CPU	Central Power Unit
CSD	Circuit Switched Domain
DSNU	Delay-Satisfied NFV-enabled Network Update
E2E	End to End
EDGE	Enhanced Data rates for GSM Evolution
EV-DO	Evolution-Data Optimized
EV-DV	Evolution-Data and Voice
FDMA	Frequency Division Multiple Access
FM	Frequency Modulation
FW	Firewall
G	Generation
GBITS	Giga Bits
GEO	Geostationary
gNB	gNodeB
GPRS	General Packet Radio Services
GSM	Global System for Mobile communication
HAPS	High Altitude Platform Station
HD	High Definition
HERA	Heuristic Algorithm
HETNET	Heterogeneous Networks
HSPA	High Speed Packet Access
HSPA+	Evolved High-Speed Packet Access
IDPS	Intrusion Detection/Prevention System
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers
ILP	Integer Linear Programming
IOE	Internet Of Everything
IOT	Internet Of Things

IP	Internet Protocol
IRS	Intelligent Reflecting Surfaces
KBPS	Kilo Bits Per Second
KHZ	Kilo Hertz
KPI	Key Performance Indicators
LAN	Local Area Networks
LAS-CDMA	Large Area Synchronized Code-Division Multiple Access
LEO	Low Earth Orbit
LOS	Line Of Sight
LTE	Long Term Evolution
LTE-A	Long Term Evolution Advanced
MBPS	Mega Bits per Second
MC-CDMA	Multi-Carrier Code-Division Multiple Access
MEC	Multi-Access Edge Computing
MEO	Medium Earth Orbit
MHZ	Mega Hertz
ML	Machine Learning
mMIMO	massive Multiple-Input Multiple-Output
MMS	Multimedia Messaging Service
mmWAVE	Millimeter wave
NAT	Network Address Translation
NETWORK LMDs	Network Local Multipoint Distribution Service
NFV	Network Functions Virtualization
NMT	Nordic Mobile Telephone
NR	New Radio
NTT	Nippon Telegraph and Telephone
OFDMA	Orthogonal Frequency-Division Multiple Access
PAN	Personal Area Network
PRB	Physical Resource Blocks
PSD	Packet Switched Domain
PTP	Point-to-point
QOS	Quality Of Service
RB	Resource Blocks
RF	Radio Frequences
RIS	Reconfigurable Intelligent Surfaces
RL	Reinforcement Learning
RTT	Round Trip Time
SC	Small Cells
SC-FDMA	Single-carrier FDMA
SDN	Software Defined Networking
SFC	Service Function Chain
SINR	Signal-to-Interference-plus-Noise Ratio
SMS	Short Message Service
SNR	Signal-to-Noise Ratio
SOA	State Of the Art
SW	Switch
TDMA	Time Division Multiple Access

TDMA	Time Division Synchronous Code Division Multiple Access
THZ	Tera Hertz
TM	Traffic Montor
UA	User Association
UAV	Unmanned Aerial Vehicle
UE	User Equipment
UHD	Ultra High Definition
UMTS	Universal Mobile Telecommunication System
VNF	Virtual Network Functions
VOC	Video Optimization Controller
VR	Virtual Reality
WAN	Wide Area Network
WCDMA	Wideband Code Division Multiple Access
WiMAX	Worldwide Interoperability for Microwave Access
WLAN	Wireless Local Area Network
WOC	WAN Optimization Controller
WPAN	Wireless Personal Area Network
XAI	Explainable Artificial Intelligence
X-HAUL	Fronthaul, Midhaul and Backhaul

Κεφάλαιο 1ο: Εισαγωγή

1.1 Εισαγωγή

Τις τελευταίες δεκαετίες, τα δίκτυα κινητής ασύρματης επικοινωνίας γνώρισαν τεράστια αλλαγή. Η κάθε καινούρια γενιά κυψελωτών δικτύων (G) αντιπροσωπεύει μια αλλαγή στη φύση του συστήματος, την ταχύτητα, την τεχνολογία και τη συχνότητα εκπομπής. Κάθε γενιά έχει κάποια πρότυπα, ικανότητες, τεχνικές και νέα χαρακτηριστικά που τη διαφοροποιούν από την προηγούμενη. Στο κεφάλαιο αυτό, γίνεται μία εισαγωγή στις γενιές δικτύων έως το σήμερα, γίνεται εκτενέστερη αναφορά στα δίκτυα έκτης γενιάς, τις τεχνολογίες, τις καινοτομίες, τους δείκτες επιδόσεων και τα εμπόδια που αντιμετωπίζουν. Στο τέλος αναφέρεται ο σκοπός και ο στόχος της πτυχιακής και η δομή που ακολουθεί το κείμενο.

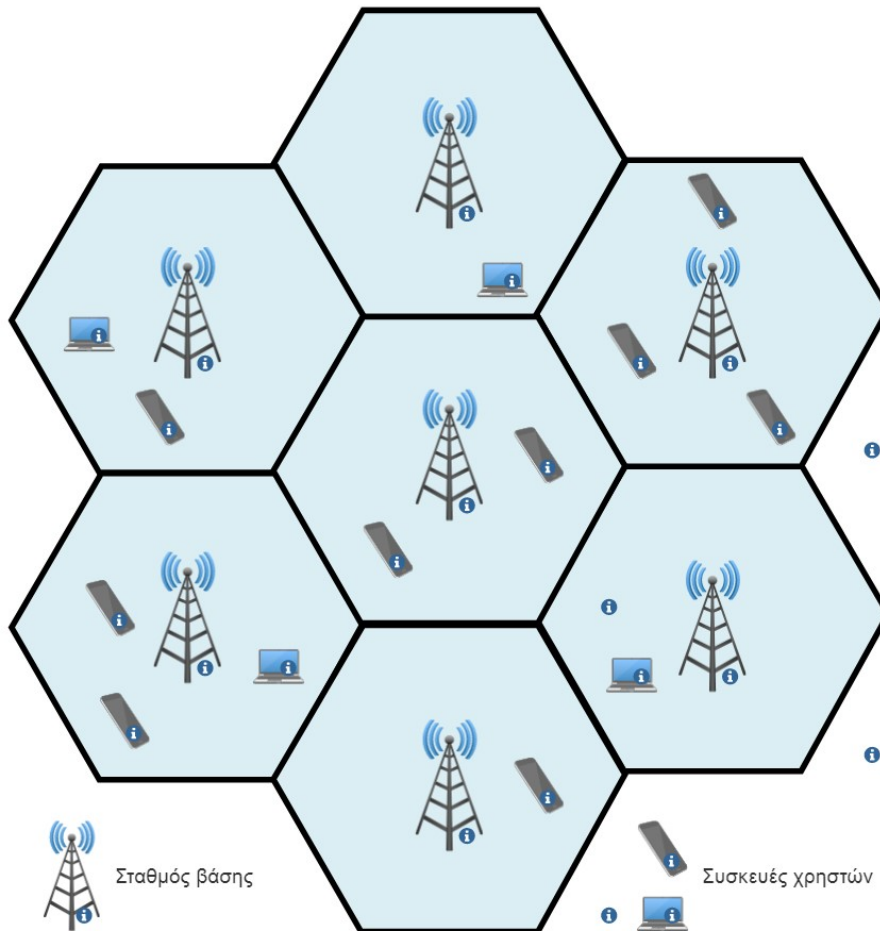
1.2 Τηλεπικοινωνιακά δίκτυα

Η ανθρώπινη ανάγκη για επικοινωνία αποτελεί ένα έμφυτο χαρακτηριστικό που μας συνοδεύει από την αρχή της ύπαρξης του είδους μας. Η απόσταση μεταξύ πομπού και δέκτη, αποτέλεσε το βασικό πρόβλημα που επιλύουν οι τηλεπικοινωνίες. Ένας ορισμός για τον όρο τηλεπικοινωνίες είναι: “το σύνολο των συσκευών, μέσων μετάδοσης και διαδικασιών με τα οποία δύο απομακρυσμένοι χρήστες μπορούν να ανταλλάσσουν πληροφορίες.” Κάνοντας μία αναδρομή στο παρελθόν, η μετάδοση σημάτων εξ’ αποστάσεως ξεκίνησε από τα σήματα Morse, έπειτα προχώρησε στον τηλεγράφο έως ότου είχαμε την πρώτη μετάδοση φωνής μέσω του τηλεφώνου από τον Alexander Graham Bell [1]. Από τότε και όσο εξελίσσονται οι τρόποι και τα μέσα με τα οποία μεταδίδεται η φωνή, εξελίσσονται και οι λύσεις που δίνονται για να επιτυγχάνεται η καλύτερη δυνατή επικοινωνία. Τα συστήματα επικοινωνιών ξεκίνησαν με point-to-point (PtP) ζεύξεις, συνδέοντας απευθείας τους χρήστες που επιθυμούσαν να επικοινωνήσουν. Όμως ο αριθμός των χρηστών αυξάνονταν διαρκώς κάνοντας αυτού του είδους την υλοποίηση σχεδόν αδύνατη. Επομένως, δημιουργήθηκαν ενδιάμεσοι κόμβοι και οι συνδέσεις γίνονται πλέον μεταξύ αυτών και όχι απευθείας μεταξύ των χρηστών. Με τον τρόπο αυτό, η επικοινωνία γίνεται μεταξύ των χρηστών σε οποιοδήποτε μέρος του πλανήτη και δεν μεταδίδονται μόνο δεδομένα φωνής, αλλά και πακέτα πολυμέσων χάρις την εξέλιξη του διαδικτύου.

Από το αναλογικό τηλέφωνο του 1876 [2] μέχρι τα VR chat room του σήμερα, στόχος είναι κάθε μορφή τηλεπικοινωνίας να πλησιάζει όσο πιο κοντά γίνεται στην άμεση ανθρώπινη αλληλεπίδραση, την face-to-face επικοινωνία, όπου δεν υπάρχουν εμπόδια, καθυστέρηση ή αλλοίωση στην μετάδοση του μηνύματος. Επί το πλείστον τα προβλήματα παραμένουν κοινά. Μείωση θορύβου, αδιάλειπτες συνδέσεις, άμεση επικοινωνία χωρίς καθυστερήσεις, ευρεία κάλυψη σε κάθε περιοχή, απλοποίηση των μέσων και των διαδικασιών, on-demand υπηρεσίες, αξιοπιστία στην ακεραιότητά του μηνύματος. Όλα τα παραπάνω υπάρχουν και αντιμετωπίζονται σε κάθε εξέλιξη των τηλεπικοινωνιών. Στις κινητές επικοινωνίες, παρατηρείται αλλαγή τεχνολογικής γενιάς σχεδόν κάθε δεκαετία. Το φαινόμενο αυτό συμβαίνει ώστε να μπορεί κάθε νέα γενιά δικτύων, τα λεγόμενα “G”, να υποστηρίζει μεγαλύτερο εύρος εφαρμογών και να ανταποκρίνεται στις απαιτήσεις τους.

Για να γίνει εφικτή η ασύρματη επικοινωνία, δημιουργήθηκαν τα κυψελωτά δίκτυα (cellular networks).

Ονομάστηκαν έτσι καθώς χρησιμοποιούσαν κυψέλες, δηλαδή γεωγραφικές περιοχές κάλυψης του σήματος σε σχήμα εξαγώνου για την καλύτερη διαχείριση της κίνησης, όπως φαίνεται στο Σχήμα 1.1. Κάθε κυψέλη αποτελούνταν από τον κεντρικό κόμβο-σταθμό βάσης ο οποίος ήταν υπεύθυνος για την παραλαβή και την αποστολή των ραδιοκυμάτων στις συσκευές οι οποίες άνηκαν στην περιοχή κάλυψής του. Κάθε φορά που μία συσκευή χρειάζεται να μετακινηθεί και να αλλάξει τοποθεσία, αλλάζει κυψέλη και συνδέεται στον σταθμό ο οποίος της παρέχει το ισχυρότερο σήμα.



Σχήμα 1.1: Τοπολογία κυψελωτού δικτύου.

Στις πρώτες δεκαετίες του 2000, οι συσκευές που συνδέονταν στο διαδίκτυο άρχισαν να αυξάνονται με ρυθμούς που έδειχναν μία συνεχή απαίτηση για κατανάλωση δεδομένων χωρίς σταματημό. Οι τηλεπικοινωνιακοί πάροχοι βρέθηκαν αντιμέτωποι με αυτή την πρόκληση, καθώς για την εξυπηρέτηση όλων των χρηστών θα χρειαστεί να αυξήσουν την χωρητικότητα των δικτύων τους και να μειώσουν τα έξοδα που προκύπτουν από τον όγκο της κίνησης. Οι μέχρι τότε γνωστές τεχνικές για επέκταση του δικτύου δεν επαρκούσαν για την επίλυση του προβλήματος. Ο σχεδιασμός και η ανάπτυξη των ετερογενών δικτύων (HetNets) αποτέλεσε την λύση σε αυτό το πρόβλημα [3]. Η νέα αυτή αρχιτεκτονική δικτύου επιτρέπει στις συσκευές να συνδέονται σε κόμβους χαμηλής κατανάλωσης ενέργειας που καλύπτουν περισσότερες περιοχές, είτε απομακρυσμένες, είτε πολυπληθείς με διαρκή κίνηση. Οι συσκευές δεν συνδέονται πλέον με τον σταθμό βάσης ο οποίος προσφέρει το ισχυρότερο σήμα, αλλά με αυτόν με την καλύτερη απόδοση σε ταχύτητα.

Στην παρούσα δεκαετία, παρατηρείται η ενσωμάτωση των δικτύων 5ης γενιάς (5G). Ωστόσο, η ανάγκη για την υποστήριξη εφαρμογών με πλούσιο περιεχόμενο πολυμέσων όπως ολογράμματα, περιβάλλοντα εικονικής πραγματικότητας, η σύνδεση όλων των συσκευών (connectivity for all things) αλλά και η υποστήριξη κρίσιμων εφαρμογών που αφορούν τομείς που απαιτούν άμεση ανάδραση, καθιστούν αναγκαία την έρευνα και ανάπτυξη λύσεων με μεγαλύτερο εύρος ζώνης (bandwidth). Επομένως, το βλέμμα στρέφεται στο επόμενο βήμα, την επόμενη γενιά, αυτό που ονομάζεται beyond 5G συστήματα ή αλλιώς 6G [4].

1.3 Δίκτυα Πρώτης Γενιάς (1G)

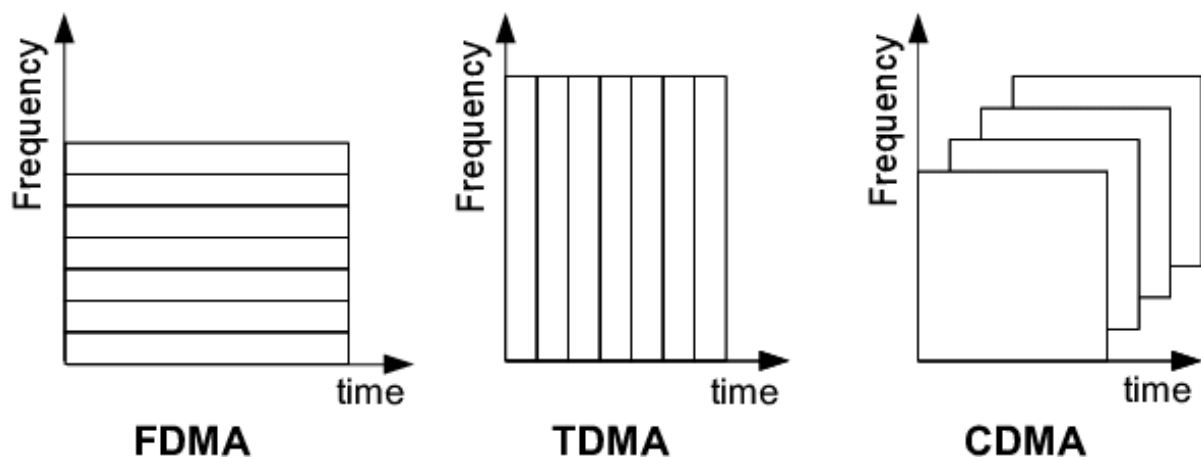
Το πρώτο φορητό κινητό τηλέφωνο, όπως φαίνεται στο Σχήμα 1.2, παρουσιάστηκε από τη Motorola το 1973 [5]. Το πρώτο εμπορικό αυτοματοποιημένο κυψελοειδές δίκτυο κυκλοφόρησε από την NTT στην Ιαπωνία το 1979, ακολουθούμενο από την κυκλοφορία του συστήματος κινητής τηλεφωνίας Nordic (NMT) στη Δανία, τη Φινλανδία, τη Νορβηγία και τη Σουηδία, το 1981 [6]. Μετά από αυτό ξεκίνησε η ανάπτυξη σε γενιές για κινητή ασύρματη επικοινωνία. Τα δίκτυα πρώτης γενιάς (1G) χρησιμοποιήθηκαν μόνο για φωνητικές κλήσεις. Αποτελούσαν μια αναλογική τεχνολογία που αναπτύχθηκε τη δεκαετία του 1980. Χρησιμοποιήθηκαν για υπηρεσίες φωνής και βασίστηκαν στην τεχνολογία Advanced Mobile Phone System (AMPS). Το σύστημα AMPS διαμορφωνόταν με βάση αναλογική διαμόρφωση σήματος (FM-“Frequency Modulation” ραδιοσυχνότητες) και χρησιμοποιούσε Frequency Division Multiple Access (FDMA) το οποίο διαχωρίζει το εύρος ζώνης σε κανάλια για κάθε χρήστη, με χωρητικότητα καναλιού 30 kHz και ζώνη συχνοτήτων 824-894 MHz και υποστήριζε ταχύτητες έως 2,4 kbps. Η περιορισμένη χωρητικότητα είχε ως αποτέλεσμα την εξυπηρέτηση μικρού αριθμού χρηστών ταυτόχρονα σε μία περιοχή και σε περιόδους υψηλής ζήτησης να υπάρχει συμφόρηση και να απορρίπτονται πολλές κλήσεις. Η αναλογική αυτή προσέγγιση παρείχε τις βασικές δυνατότητες φωνητικής επικοινωνίας αλλά υστερούσε σε τομείς όπως η ποιότητα και η ασφάλεια των κλήσεων. Παρά τους περιορισμούς της, η πρώτη γενιά δικτύων κινητής τηλεφωνίας αντιπροσώπευε μια σημαντική ανακάλυψη στις τηλεπικοινωνίες, καθώς έθεσε τα θεμέλια για την ανάπτυξη πιο προηγμένων γενιών κινητής τεχνολογίας. Η μετάβαση από το 1G στο 2G έφερε ψηφιακή τεχνολογία, βελτιωμένη ποιότητα κλήσεων και την εισαγωγή γραπτών μηνυμάτων, θέτοντας το έδαφος για την ταχεία εξέλιξη της κινητής επικοινωνίας που συνεχίζεται μέχρι σήμερα.



Σχήμα 1.2: Motorola DynaTac 8000X: Το πρώτο κινητό τηλέφωνο [5].

1.4 Δίκτυα Δεύτερης Γενιάς (2G)

Τα δίκτυα κινητής επικοινωνίας δεύτερης γενιάς (2G) διαφοροποιούνται από τα αναλογικά της πρώτης γενιάς, καθώς είναι μια ψηφιακή τεχνολογία που εισήχθη στα τέλη της δεκαετίας του 1980. Χρησιμοποιούσαν ψηφιακά σήματα για μετάδοση φωνής και είχαν ταχύτητα 64 kbps. Το εύρος ζώνης του 2G ήταν 30-200 kHz. Η καινοτομία που προσέφερε το 2G, ήταν η παροχή υπηρεσιών όπως η αποστολή σύντομων μηνυμάτων (SMS) και μηνυμάτων εικόνας και πολυμέσων (MMS). Όπως φαίνεται στο Σχήμα 1.3, χρησιμοποιούσαν σχήματα ψηφιακής διαμόρφωσης, όπως Time Division Multiple Access (TDMA) και Code Division Multiple Access (CDMA) [7]. Το TDMA επέτρεπε τη διαίρεση των σημάτων σε χρονοθυρίδες (slots) και σε κάθε slot μπορούσε μόνο ένας χρήστης να μεταδίδει ή να παραλαμβάνει. Το CDMA παρείχε σε κάθε χρήστη έναν ειδικό κωδικό για να επικοινωνεί μέσω ενός πολυπλεξικού (multiplex) φυσικού καναλιού.



Σχήμα 1.3: Διαγραμματική σύγκριση μεταξύ FDMA, TDMA και CDMA [8].

Στα δίκτυα 2G, παρουσιάζεται και το πιο ευρέως χρησιμοποιούμενο πρότυπο κινητής τηλεφωνίας GSM (Global System for Mobile Communication). Η τεχνολογία GSM ήταν η πρώτη που υποστήριξε τη διεθνή περιαγωγή, δίνοντας τη δυνατότητα στους συνδρομητές κινητής τηλεφωνίας να χρησιμοποιούν τις συνδέσεις κινητής τηλεφωνίας τους σε διάφορες χώρες του κόσμου με καλύτερη ποιότητα και χωρητικότητα. Καθώς η τεχνολογία GSM βελτιώνονταν συνεχώς για την παροχή καλύτερων υπηρεσιών, οδηγήθηκε στην ανάπτυξη των συστημάτων 2.5 γενιάς (2.5G). Το 2.5G βρίσκεται μεταξύ των τεχνολογιών 2G και 3G. Επιπρόσθετα με τον τομέα μεταγωγής κυκλώματος (CSD) 2G, το 2.5G υλοποιεί έναν τομέα μεταγωγής πακέτων (PSD) με ρυθμό δεδομένων 144 kbps [9]. Το 2G χρησιμοποίησε τις τεχνολογίες General Packet Radio Service (GPRS) και Enhanced Data rates in GSM Environment (EDGE). Το GPRS εμπειρεύει πρωτόκολλα μεταγωγής πακέτων και τη δυνατότητα χρέωσης του συνδρομητή ανάλογα με την ποσότητα των δεδομένων που αποστέλλονται και όχι τον χρόνο σύνδεσης. Το GPRS υποστήριξε ευέλικτους ρυθμούς μετάδοσης δεδομένων και παρείχε συνεχή σύνδεση με το δίκτυο γεγονός που αποτέλεσε σημαντικό βήμα προς την ανάπτυξη του 3G. Ταυτόχρονα, το EDGE υπερτερούσε του GPRS ως προς την ταχύτητα, προσφέροντας σχεδόν διπλάσια τιμή, φέρνοντάς το ένα βήμα πιο κοντά προς τα δίκτυα 3G, όπως φαίνεται και στον Πίνακα 1.1.

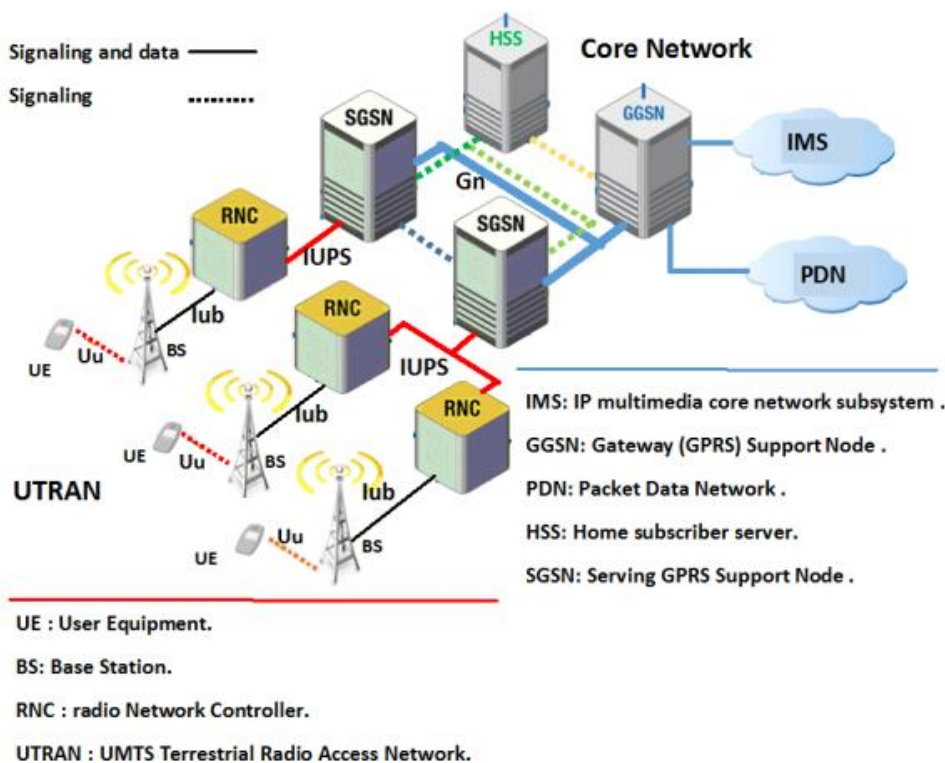
Πρότυπο	GPRS	EDGE
Γενιά υλοποίησης	2G	2.5G
Μέγιστη ταχύτητα download	114 Kbps	384 Kbps

Πίνακας 1.1: Χαρακτηριστικά GPRS vs EDGE.

1.5 Δίκτυα Τρίτης Γενιάς (3G)

Στο 3G χρησιμοποιούνται ψηφιακά δίκτυα για την παροχή ευρυζωνικών υπηρεσιών/υπηρεσιών πολυμέσων. Καθοδηγούμενη εν μέρει από την πρόοδο της τεχνολογίας του διαδικτύου και των IP δικτύων, η αρχιτεκτονική του 3G παρέχει υποστήριξη για βελτιωμένο ρυθμό μετάδοσης δεδομένων (throughput) και ποιότητα υπηρεσιών (QoS). Η αρχιτεκτονική ενός δικτύου 3G, έμοιαζε με αυτό στο Σχήμα 1.4. Υπηρεσίες όπως η παγκόσμια περιαγωγή και η βελτιωμένη ποιότητα φωνής είναι σημαντικά επιτεύγματα της τεχνολογίας αυτής.

Ο στόχος των δικτύων 3G ήταν να προσφέρουν αυξημένους ρυθμούς δεδομένων από 144 kbps σε 384 kbps σε περιοχές ευρείας κάλυψης και 2 Mbps σε περιοχές τοπικής κάλυψης. Το 3G προσφέρει προηγμένες υπηρεσίες στους χρήστες σε σύγκριση με το 1G και το 2G. Έχει εύρος ζώνης 15-20 MHz που χρησιμοποιείται για internet υψηλής ταχύτητας, συνομιλία μέσω βίντεο κ.λπ [11]. Ένα μειονέκτημα της τεχνολογίας, ωστόσο, είναι ότι στον τομέα της ενεργειακής απόδοσης, οι συσκευές χρηστών (UE) καταναλώνουν σημαντικά περισσότερη ενέργεια σε σύγκριση με τα περισσότερα μοντέλα 2G και είναι λιγότερο οικονομικό να λειτουργήσει και να συντηρηθεί ένα δίκτυο 3G σε αντίθεση με την προηγούμενη γενιά δικτύων. Στον Πίνακα 1.2 αναφέρονται οι πιο διαδεδομένες τεχνολογίες που χρησιμοποιούνταν στα δίκτυα 3G και αναλύονται στη συνέχεια.



Σχήμα 1.4: Παράδειγμα τοπολογίας δικτύου 3G [10].

- **CDMA2000:** Το CDMA2000 αποτελεί μία οικογένεια προτύπων κινητής επικοινωνίας 3G που βασίζονται στην τεχνολογία CDMA. Περιλαμβάνει πολλές εκδόσεις όπως CDMA2000 1x, CDMA 2000 1xEV-DO (Evolution-Data Optimized) και CDMA 2000 1xEV-DV (Evolution-Data and Voice). Το CDMA 2000 παρέχει υψηλότερους ρυθμούς δεδομένων και χωρητικότητα σε σύγκριση με τον προκάτοχό του, IS-95 (1xRTT), επιτρέποντας ταχύτερη πρόσβαση στο διαδίκτυο, υπηρεσίες πολυμέσων και βελτιωμένη ποιότητα φωνητικών κλήσεων [12].
- **WCDMA:** Το WCDMA είναι μια τεχνολογία 3G που χρησιμοποιείται ως μέρος του Universal Mobile Telecommunications System (UMTS). Είναι μία από τις κύριες διεπαφές για δίκτυα 3G, προσφέροντας υψηλότερους ρυθμούς δεδομένων και αυξημένη χωρητικότητα σε σύγκριση με παλαιότερες τεχνολογίες 2G. Το WCDMA χρησιμοποιεί ευρύτερες ζώνες συχνοτήτων και προηγμένες τεχνικές CDMA [13].
- **UMTS:** Το UMTS είναι μια τεχνολογία κινητής επικοινωνίας τρίτης γενιάς (3G) που έχει σχεδιαστεί για να παρέχει υπηρεσίες δεδομένων και φωνής υψηλής ταχύτητας σε κινητές συσκευές. Είναι ο διάδοχος του GSM (2G) και αποτελεί τη βάση για πολλά σύγχρονα δίκτυα κινητής τηλεφωνίας. Το UMTS χρησιμοποιεί το WCDMA ως κύρια διεπαφή [14].
- **TD-SCDMA:** Το TD-SCDMA είναι ένα πρότυπο κινητής επικοινωνίας 3G που αναπτύχθηκε μαζί με το WCDMA για το 3G δίκτυο της Κίνας. Το TD-SCDMA χρησιμοποιεί διαίρεση χρόνου (Time Division Duplexing-TDD) για να διαχωρίσει τις μεταδόσεις up-link και down-link ζεύξης και το συνδυάζει με τεχνικές CDMA για την αποτελεσματική χρήση του διαθέσιμου φάσματος και την παροχή υψηλών ρυθμών δεδομένων [15].

Πρότυπο	CDMA2000	WCDMA	UMTS	TD-SCDMA
Γενιά δικτύων	2G και 3G	3G	3G	3G
Κύρια χαρακτηριστικά	Συμβατότητα με προηγούμενες γενιές, δεδομένα και φωνή	Ευρυζωνικό φάσμα, παγκόσμιο standard	Εξέλιξη του GSM, υψηλές ταχύτητες	Πολυπλεξία διαίρεσης χρόνου και πολυπλεξία διαίρεσης κώδικα
Τοποθεσία υλοποίησης	Βόρεια Αμερική	Παγκοσμίως	Παγκοσμίως	Κίνα

Πίνακας 1.2: Τεχνολογίες των δικτύων 3G.

Αυτές οι τεχνολογίες ήταν ζωτικής σημασίας για την εξέλιξη της κινητής επικοινωνίας, επιτρέποντας μεγαλύτερες ταχύτητες δεδομένων, βελτιωμένη ποιότητα φωνής και ένα ευρύ φάσμα υπηρεσιών πολυμέσων για τις κινητές συσκευές καθώς προετοιμάζαν το πεδίο για την ανάπτυξη των δικτύων της επόμενης γενιάς.

1.6 Δίκτυα Τέταρτης Γενιάς (4G)

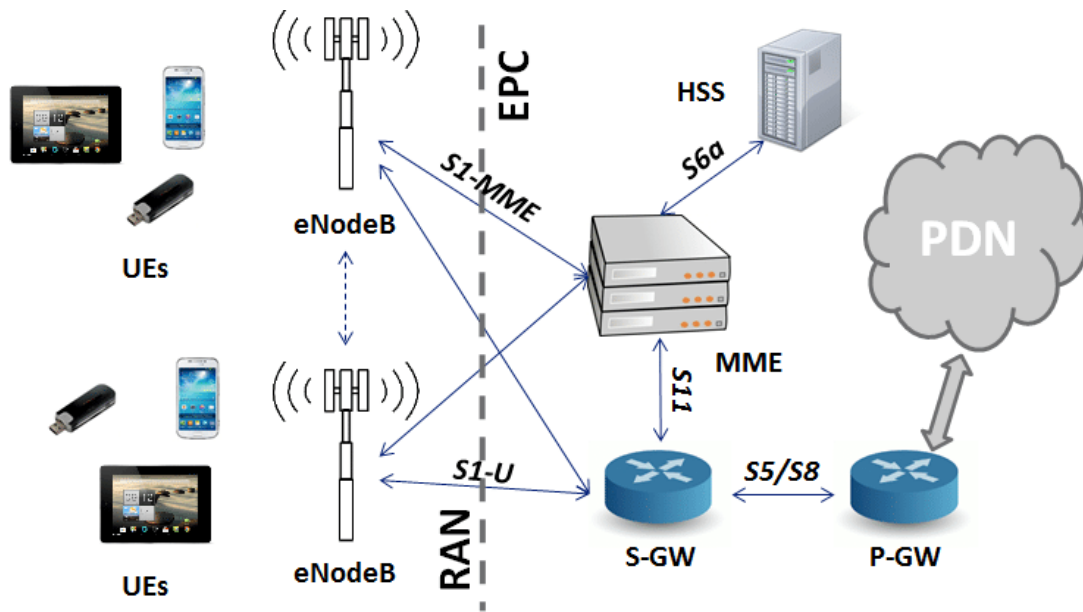
Η τέταρτη γενιά (4G) ενσωματώνει το 3G με internet για την υποστήριξη ασύρματου διαδικτύου για κινητά, κάτι που αποτελεί εξέλιξη για την υπέρβαση των περιορισμών του 3G. Επίσης αυξάνει το QoS, το εύρος ζώνης, ενώ ταυτόχρονα μειώνει το κόστος των πόρων. Το σύστημα κινητής τηλεφωνίας τέταρτης γενιάς εισήχθη στα τέλη της πρώτης δεκαετίας του 2000 και ήταν ένα σύστημα δικτύου βασισμένο σε IP (Internet Protocol). Ο κύριος στόχος της τεχνολογίας 4G ήταν να παρέχει υπηρεσίες υψηλής ταχύτητας, υψηλής ποιότητας, υψηλής χωρητικότητας, ασφάλειας και χαμηλού κόστους για υπηρεσίες φωνής και δεδομένων, πολυμέσων και διαδικτύου μέσω IP. Ο λόγος για τη μετάβαση σε IP είναι η ύπαρξη μιας κοινής πλατφόρμας για όλες τις τεχνολογίες που είχαν αναπτυχθεί. Είχε τη δυνατότητα να ικανοποιεί αιτήματα στα 100 Mbit/s για επικοινωνία υψηλής κινητικότητας και 1 Gbit/s για επικοινωνία χαμηλής κινητικότητας. Το εύρος συχνοτήτων που χρησιμοποιείται από τα δίκτυα 4G, βρίσκεται ανάμεσα στα 700 MHz και τα 3 GHz [16].

Η φορητότητα ήταν βασικός παράγοντας στο 4G για την παροχή ασύρματων υπηρεσιών οποτεδήποτε και οπουδήποτε. Η τεχνολογία 4G ενσωματώνει διαφορετικές ασύρματες τεχνολογίες για να παρέχει ελευθερία κινήσεων και αδιάκοπη περιαγωγή από τη μια τεχνολογία στην άλλη, οι κυριότερες από τις οποίες αναλύονται στη συνέχεια:

- **LTE (Long-Term Evolution):**

Το LTE είναι ένα πρότυπο για ασύρματη ευρυζωνική επικοινωνία, που χρησιμοποιείται κυρίως για δίκτυα κινητής τηλεφωνίας. Έχει σχεδιαστεί για να παρέχει υψηλότερους ρυθμούς δεδομένων, χαμηλότερο λανθάνοντα χρόνο και βελτιωμένη φασματική απόδοση σε σύγκριση με προηγούμενες γενιές. Το LTE χρησιμοποιεί Ορθογώνια Πολυπλεξία Διαίρεσης Συχνότητας (OFDM) για μετάδοση κατερχόμενης ζεύξης και Πολλαπλή Πρόσβαση Διαίρεσης Συχνότητας Single-Carrier (SC-FDMA) για μετάδοση άνω ζεύξης [17]. Μία γενική εικόνα της αρχιτεκτονικής του 4G-LTE

παρουσιάζεται στο Σχήμα 1.5.



Σχήμα 1.5: Τοπολογία δικτύου LTE [18]

- **WiMAX (Worldwide Interoperability for Microwave Access):**

Το WiMAX είναι μια τεχνολογία ασύρματης επικοινωνίας που παρέχει ευρυζωνική πρόσβαση υψηλής ταχύτητας σε μια ευρεία περιοχή. Βασίζεται στο πρότυπο IEEE 802.16 και μπορεί να υποστηρίξει τόσο σταθερές όσο και κινητές τηλεπικοινωνιακές υπηρεσίες. Το WiMAX χρησιμοποιεί την ορθογώνια πολυπλεξία διαίρεσης συχνότητας (OFDM) για αποτελεσματική μετάδοση δεδομένων και μπορεί να καλύψει μεγαλύτερες αποστάσεις σε σύγκριση με το Wi-Fi [19].

- **OFDMA (Orthogonal Frequency Division Multiple Access):**

Το OFDMA είναι μια τεχνική πολλαπλής πρόσβασης που χρησιμοποιείται σε πολλά σύγχρονα συστήματα επικοινωνίας. Συνδυάζει τις αρχές του OFDM (Ορθογώνιας Πολυπλεξίας Διαίρεσης Συχνότητας), με την τεχνολογία πολλαπλής πρόσβασης (Multiple Access). Διαιρεί μια ροή δεδομένων υψηλής ταχύτητας σε πολλαπλές υποροές χαμηλότερης ταχύτητας και τις μεταδίδει ταυτόχρονα σε πολλαπλούς υπομεταφορείς, επιτρέποντας σε πολλούς χρήστες ή συσκευές να επικοινωνούν ταυτόχρονα στην ίδια ζώνη συχνότητας. Το OFDMA είναι γνωστό για την “ανθεκτικότητά” του έναντι των παρεμβολών, καθιστώντας το κατάλληλο για μετάδοση υψηλής ταχύτητας δεδομένων σε ασύρματες και ευρυζωνικές εφαρμογές [20].

- **MC-CDMA (Multi-Carrier Code Division Multiple Access):**

Το MC-CDMA είναι μια παραλλαγή της παραδοσιακής τεχνικής πολλαπλής πρόσβασης διαίρεσης κώδικα (CDMA) που συνδυάζει τα οφέλη τόσο του CDMA όσο και του OFDMA. Διαιρεί τη ροή δεδομένων σε πολλαπλές υποροές και τις διαδίδει χρησιμοποιώντας CDMA πριν τις μεταδώσει σε πολλαπλούς υποφορείς με OFDMA. Αυτή η προσέγγιση χρησιμοποιείται για τη βελτίωση της χωρητικότητας και της απόδοσης των συστημάτων ασύρματης επικοινωνίας [21].

- **LAS-CDMA (Large Area Synchronized Code Division Multiple Access):**

Το LAS-CDMA είναι μια τεχνολογία ασύρματης επικοινωνίας που έχει σχεδιαστεί για να παρέχει πρόσβαση δεδομένων υψηλής ταχύτητας σε μεγάλες περιοχές, ειδικά για υπαίθρια περιβάλλοντα. Βασίζεται στις αρχές του CDMA, αλλά ενσωματώνει προηγμένες τεχνικές συγχρονισμού για αποτελεσματική επικοινωνία σε μεγάλες αποστάσεις [22].

Στο Σχήμα 1.6 συγκρίνονται και συνοψίζονται μερικά από τα χαρακτηριστικά των τεχνολογιών του 4G.

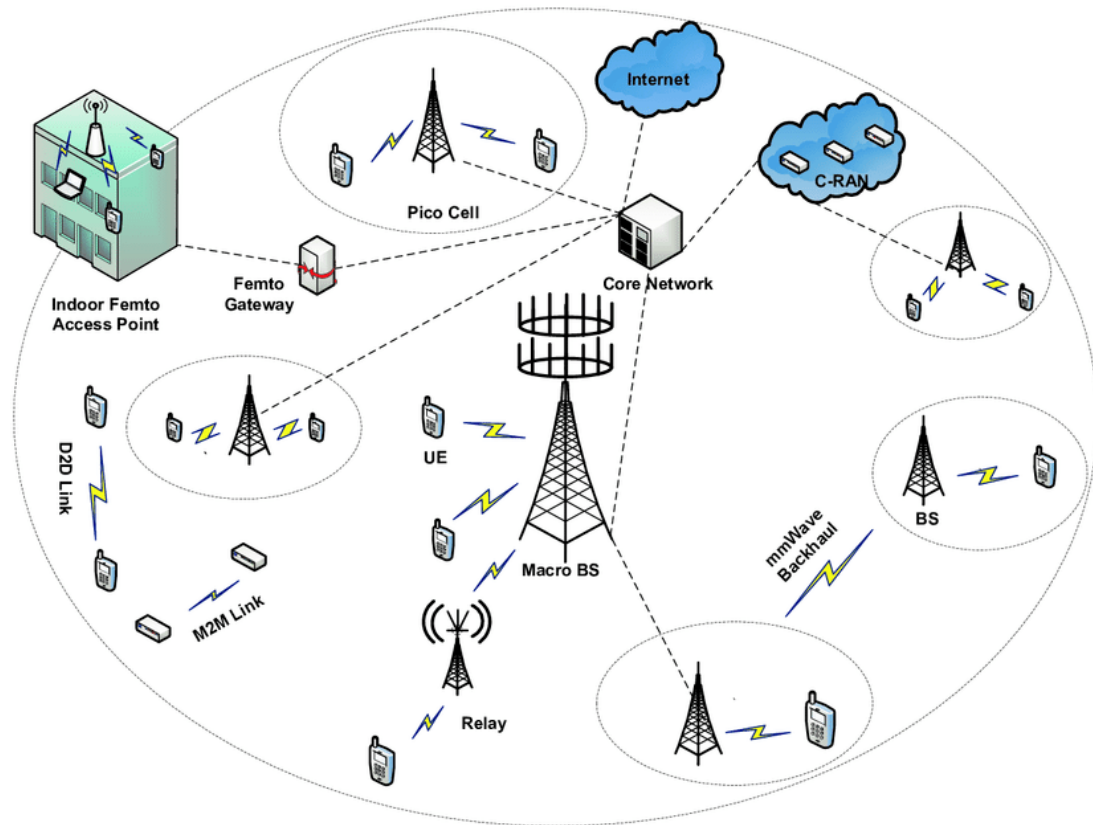
	LTE	HSPA+	WiMAX
<i>Προτερήματα</i>	Προσφέρει την καλύτερη κάλυψη και υποστηρίζεται από τους περισσότερους παρόχους τηλεπικοινωνιών	Βασίζεται σε υπάρχουσες υποδομές	Έχει προοπτικές για υψηλό εύρος ζώνης ή μεγάλη κάλυψη
<i>Περιορισμοί</i>	Περιορισμένο φάσμα	Περιορισμένες νέες υποδομές	Περιορισμένη διαθεσιμότητα
<i>Κατανάλωση ενέργειας</i>	Χαμηλή	Χαμηλή	Υψηλή
<i>Ακτίνα κάλυψης</i>	Μικρή	Μικρή	Ευρεία
<i>Κόστος</i>	Χαμηλό	Χαμηλό	Υψηλό

Σχήμα 1.6: Τεχνολογίες των δικτύων 4G.

1.7 Δίκτυα Πέμπτης Γενιάς (5G)

Παρόλο που το 4G προσφέρει αξιοπρεπές QoS, έχει μία συνολική καλή απόδοση και χρησιμοποιείται παγκοσμίως, δεν επαρκεί για να υποστηρίξει τις απαιτήσεις των διαρκώς αυξανόμενων χρηστών και των νέων εφαρμογών. Επομένως το 5G καλείται να υποστηρίξει βελτιωμένο εύρος ζώνης, μαζική συνδεσιμότητα μεταξύ των συσκευών και αξιόπιστες επικοινωνίες με χαμηλά επίπεδα καθυστέρησης. Επί του παρόντος, τα δίκτυα 5G χρησιμοποιούνται εμπορικά παγκοσμίως. Μπορούν να υποστηρίξουν μορφές δικτύων (WAN), (LAN) και προσωπικά δίκτυα (PANs). Τα δίκτυα 5G έχουν τη δυνατότητα να υποστηρίξουν ροή βίντεο υψηλής ευκρίνειας (HD) και πολλές εφαρμογές που παρουσιάζουν αυξημένη κατανάλωση δεδομένων. Επίσης, έχουν τη δυνατότητα να επιτυγχάνουν ταχύτερη απόδοση από το σύστημα LTE-A με μέγιστο ρυθμό μετάδοσης δεδομένων περίπου 20 Gb/s [23]. Παράδειγμα τοπολογίας των 5G δικτύων, φαίνεται στο Σχήμα 1.7.

Επιπλέον, μια προηγμένη τεχνολογία πολλαπλής πρόσβασης που ονομάζεται πολλαπλή πρόσβαση διαίρεσης δέσμης (BDMA) μπορεί να αξιοποιηθεί από δίκτυα 5G για την αύξηση της χωρητικότητας του συστήματος. Οι πρόσφατες εξελίξεις σε έξυπνες συσκευές και εφαρμογές έχουν προωθήσει τον πολλαπλασιασμό των δικτύων IoE. Το IoE περιλαμβάνει αυτόνομα και ιπτάμενα οχήματα, εφαρμογές υγειονομικής περίθαλψης, ευφυείς υπηρεσίες και άλλες εφαρμογές που απαιτούν ελάχιστη καθυστέρηση. Η εξέλιξη του IoE, απαιτεί δυνατότητες ανίχνευσης και υπολογισμού που μπορεί να υπερβαίνουν τις δυνατότητες των δικτύων 5G. Επιπλέον, ο ρυθμός δεδομένων που μπορεί να υποστηριχθεί από δίκτυα 5G είναι απίθανο να αντεπεξέλθει στην τεράστια αύξηση της κυκλοφορίας δεδομένων που προβλέπεται να υπάρξει στο μέλλον [25]. Αυτό αποτελεί και ένα από τα κίνητρα της ερευνητικής κοινότητας για τη εξέλιξη των υφιστάμενων ασύρματων συστημάτων προκειμένου να ανταποκριθούν στις μελλοντικές



Σχήμα 1.7: Παράδειγμα αρχιτεκτονικής δικτύου 5G [24].

απαιτήσεις κίνησης. Στον Πίνακα 1.3, συνοψίζονται μερικές από τις τιμές των KPI από τα δίκτυα έως σήμερα, όπου φαίνεται η ραγδαία εξέλιξη και καινοτομεί κάθε γενιάς ανά δεκαετία.

Γενιά δικτύων	Δεκαετία	Συχνότητα εκπομπής	Data rates
1G	1980's	800-900 MHz	2 kbps
2G	1990's	850-1900 MHz	14.4-64 kbps
3G	2000's	1.6-2.5 GHz	144 kbps-2 Mbps
4G	2010's	2-8 GHz	100 Mbps-1 Gbps
5G	2020's	3-300 GHz	>1 Gbps

Πίνακας 1.3: Η εξέλιξη των δικτύων τηλεπικοινωνιών ανά χρονολογία, με τα data rates και τις συχνότητες που εκπέμπουν [26].

1.8 Δίκτυα Έκτης Γενιάς (6G)

Τα δίκτυα 6ης γενιάς διαφοροποιούνται από αυτά των προηγούμενων γενιών καθώς παρουσιάζουν σημαντική αύξηση στην απόδοση και τα χαρακτηριστικά τους. Οι πιο σημαντικές εξελίξεις παρουσιάζονται στις τιμές που αποδίδονται στους δείκτες επιδόσεων ή αλλιώς KPIs (Key Performance Indicators). Σύμφωνα με τις προβλέψεις για τις επερχόμενες περιπτώσεις χρήσης (use cases), τις απαιτήσεις τους και τις υποθέσεις που γίνονται σχετικά με τον ρυθμό ανάπτυξης των ασύρματων τεχνολογιών, το [27] αναφέρει τις τιμές των KPIs στις 5G τεχνολογίες, για τη βραχυπρόθεσμη, τη μεσοπρόθεσμη και τη μακροπρόθεσμη εξέλιξη του 5G, σε σύγκριση με τους KPIs που αναφέρονται στο σημερινό 5G New Radio (NR).

1.8.1 Καινοτομίες και δείκτες επιδόσεων

1. Αναμένουμε υψηλούς ρυθμούς μετάδοσης όπως τον μέγιστο ρυθμό δεδομένων (peak data rate), τον μέσο ρυθμό δεδομένων (average data rate) και την αξιοπιστία του ρυθμού δεδομένων, ώστε να διασφαλιστεί η απρόσκοπτη μετάδοση περιεχομένου πολυμέσων υψηλής ευκρίνειας, η συνδεσιμότητα IoT εξοπλισμού και οι εμπειρίες εικονικής/επαυξημένης πραγματικότητας (VR/AR).
2. Τα δίκτυα 6G στοχεύουν στην επίτευξη εξαιρετικά χαμηλής καθυστέρησης για να μπορούν να υποστηρίξουν real-time εφαρμογές και διαδραστικές εφαρμογές. Αναφερόμαστε στην καθυστέρηση μετ' επιστροφής (round-trip delay), καθυστέρηση από άκρο σε άκρο (end-to-end latency) και στην σταθερότητα του χρόνου καθυστέρησης για την υποστήριξη εφαρμογών όπως αυτόνομα οχήματα και τηλεϊατρική που απαιτούν άμεσους χρόνους απόκρισης.
3. Λόγω του πολλαπλασιασμού των συσκευών Internet of Things (IoT), τα δίκτυα 6G αναμένεται να υποστηρίξουν τεράστιο αριθμό συνδεδεμένων συσκευών σε μικρές περιοχές. Είναι σημαντικό να υπάρχει επαρκής χωρητικότητα για την εξυπηρέτηση μεγάλου αριθμού συσκευών ανά μονάδα επιφάνειας, για τις ταυτόχρονες συνδέσεις χρηστών και την πυκνότητα συσκευών, ώστε να διασφαλιστεί αποτελεσματική και αξιόπιστη συνδεσιμότητα για την ανάπτυξη του IoT δικτύου.
4. Η βιωσιμότητα και η ενεργειακή απόδοση αποτελούν κρίσιμα ζητήματα για τα δίκτυα του μέλλοντος. Τα δίκτυα 6G αναμένεται να συμβάλλουν θετικά ως προς την κατανάλωση ενέργειας ανά μεταδιδόμενο bit, την από μέρους αλλά και τη συνολική κατανάλωση ενέργειας του δικτύου, για την ελαχιστοποίηση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων στον πλανήτη μας.
5. Τα δίκτυα 6ης γενιάς θα πρέπει να μεγιστοποιήσουν την αποτελεσματική χρήση του διαθέσιμου εύρους φάσματος εκπομπής, εκμεταλλεύοντας συχνότητες όπου μπορούν να συμβάλλουν στην εκπομπή του σήματος για μέγιστα αποτελέσματα [28].

Συνοψίζουμε τις τιμές των κριτηρίων ποιότητας (KPIs) στον παρακάτω πίνακα:

Παρά τις εντυπωσιακές αποδόσεις των δικτύων 6ης γενιάς, δεν αναμένεται να αντικαταστήσουν πλήρως τα δίκτυα των προηγούμενων γενιών, αλλά θα λειτουργούν συμπληρωματικά για τις εφαρμογές που ξεκίνησαν να αναπτύσσονται μέσα στα πλαίσια των δικτύων 5ης γενιάς και μπορούν να υποστηρίξουν καλύτερα. Όσο η τεχνολογία εξελίσσεται και όλο και περισσότερες παλιότερα “ανεξάρτητες”

KPIs	5G	6G
Spectrum	<52.6 GHz	< 1000 GHz
Bandwidth	<0.5 GHz	< 10 GHz
Peak data rate	DL: >20Gbps UL: >10Gbps	DL: >400Gbps UL: >200Gbps
User peak data rate	DL: >100Mbps UL: >50Mbps	< DL: >2Gbps UL: >1Gbps
Peak spectral efficiency	DL: >30bps/Hz UL: >15bps/Hz	DL: >60bps/Hz UL: >30bps/Hz
Density	>1 συσκευή/τ.μ.	>2 συσκευές/τ.μ.
Area traffic capacity	>10Mbps/τ.μ.	>200Mbps/τ.μ.
Reliability	URLLC: >5/9	URLLC: > 9/9
U-PLANE Latency	<1ms	<0.1ms
C-PLANE Latency	<20ms	<2ms
Net. energy efficiency	Qualitative	>100 gain
Term. energy efficiency	Qualitative	< 100 gain
Mobility	<500χλμ/ώρα	< 1000χλμ/ώρα
Positioning accuracy	<1μ	< 1εκ

Πίνακας 1.4: Συγκριτικός πίνακας τιμών των KPIs για τα δίκτυα 5G και 6G.

συσκευές συνδέονται στο διαδίκτυο παρατηρούμε το φαινόμενο του Διαδικτύου των Πάντων (Internet of Everything). Με τη διασύνδεση όλο και περισσότερων συσκευών, η συνδεσιμότητα παύει να αφορά τις συσκευές αυτές καθαυτές, αλλά επικεντρωνόμαστε στα αποτελέσματα των δεδομένων που διακινούνται. Οι αισθητήρες και οι μετρήσεις που συγκεντρώνουν, χρησιμοποιούνται σαν input για την αλληλεπίδρασή τους με τον χρήστη ή επηρεάζουν τις ενέργειες άλλων συσκευών [29]. Βλέποντας ότι το μέλλον συνδέει ολοένα και περισσότερες συσκευές, είναι αναγκαίο να υπάρχουν και μη επίγειες συνδέσεις ώστε να επιτυγχάνεται δικτυακή κάλυψη στα σημεία που τα δίκτυα 5ης γενιάς δεν μπορούσαν να ανταποκριθούν, αλλά και για της εναέριες ή υποθαλάσσιες συνδέσεις. Τα δίκτυα 6G δεν θα συνδέουν μόνο συσκευές, αλλά την ευφυία που προκύπτει από τις υλοποιήσεις τεχνητής νοημοσύνης. Τα συστήματα θα είναι ικανά να υοθετήσουν προηγμένες τεχνικές μηχανικής μάθησης και συλλέγοντας πληροφορίες από τις εφαρμογές τους, θα μπορούν να αναλύουν τις καταστάσεις. Μαθαίνοντας από το περιβάλλον τους να μεταβάλλουν δυναμικά τα αποτελέσματα που υπολογίζουν, θα μπορούν να μεταδίδουν δεδομένα με ακρίβεια και αμεσότητα [30].

Γενικότερα, οι εφαρμογές που μπορούν να αξιοποιήσουν καλύτερα τις δυνατότητες των δικτύων 6ης γενιάς έχουν ως κοινό χαρακτηριστικό τους την ανάγκη για αξιόπιστη μεταφορά μεγάλου όγκου δεδομένων, χωρίς διακοπές ή αποσυνδέσεις, στον λιγότερο δυνατό χρόνο με την καλύτερη δυνατή απόδοση. Η υψηλή απόδοση δικτύου απαιτείται για τη μεταφορά εικόνας, ήχου ή τον συνδυασμό και των δύο, την real time απόκριση σε ενέργειες, κινήσεις ή εντολές, την ανάδραση σε μέσα που χρειάζονται input αλλά και σε output αποτελέσματα όπου πρέπει να παρθούν κρίσιμες αποφάσεις καθώς τα χρονικά πλαίσια είναι περιορισμένα (AR/VR εφαρμογές). Για να ικανοποιηθούν όλες αυτές οι απαιτήσεις, σημαντικό ρόλο θα διαδραματίσουν τεχνολογίες κλειδιά, όπως οι terahertz (THz) συχνότητες εκπομπής, η ανάπτυξη αλγορίθμων τεχνητής νοημοσύνης (AI) για την καλύτερη διαχείριση των πόρων αλλά και οι μη επίγειες συνδέσεις με δορυφόρους ή εναέριες συσκευές εκπομπής (για παράδειγμα, μη επανδρωμένα

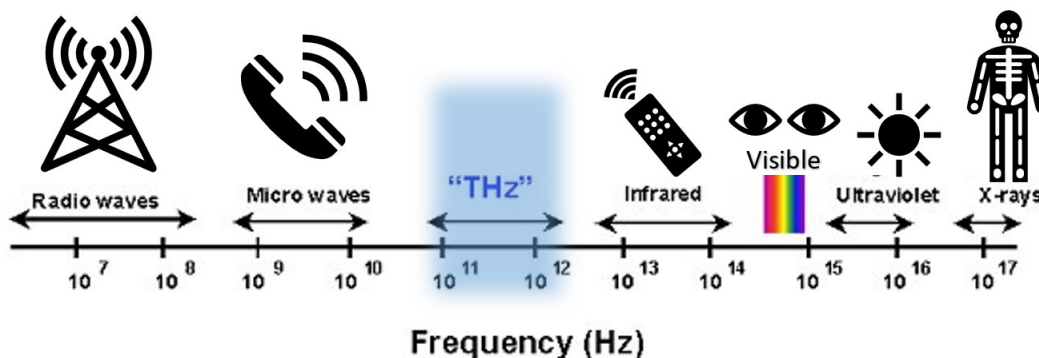
οχήματα) [31].

Τα συστήματα 6G χρειάζονται την υποστήριξη καινοτόμων τεχνολογιών για να εκτελέσουν την πληθώρα νέων εφαρμογών που σχετίζονται με εξαιρετικά αυστηρές απαιτήσεις όσον αφορά την καθυστέρηση, την αξιοπιστία, την ενέργεια, την απόδοση και τη χωρητικότητα. Παρακάτω αναλύουμε μερικές από τις τεχνολογίες-κλειδιά (enabling technologies), όπου αναμένεται να παίξουν καθοριστικό ρόλο στην υποστήριξη των μελλοντικών εφαρμογών και τεχνολογιών.

1.8.2 Τεχνολογίες κλειδιά

• Terahertz Επικοινωνίες

Με την εκθετική αύξηση της κίνησης των δεδομένων στα συστήματα ασύρματων επικοινωνιών, η ζώνη συχνοτήτων terahertz (THz) θεωρείται ως μια πολλά υποσχόμενη τεχνολογία για υποστήριξη υπερευρυζωνικής ζώνης για το μέλλον των επικοινωνιών, γεφυρώνοντας το χάσμα μεταξύ των κυμάτων χιλιοστού (mmWave) και του φάσματος των οπτικών συχνοτήτων. Μία από τις τεχνολογίες για τα συστήματα κινητής επικοινωνίας πέμπτης γενιάς (5G) είναι το σχήμα επικοινωνίας mmWave, το οποίο έχει τη δυνατότητα να παρέχει μεγάλο εύρος ζώνης από εκατοντάδες MHz έως αρκετά GHz.



Σχήμα 1.8: Το φάσμα εκπομπής σε THz.

Με αυτό το διαθέσιμο εύρος ζώνης, τα συστήματα επικοινωνίας mmWave είναι σε θέση να προσφέρουν πολύ μεγαλύτερο εύρος σε σχέση με τα παραδοσιακά συστήματα επικοινωνίας μικροκυμάτων κάτω των 5 GHz. Αν και ο ρυθμός δεδομένων στη ζώνη mmWave μπορεί να φτάσει αρκετά Gbps, εξακολουθεί να μην επαρκεί για να ικανοποιήσει τις απαιτήσεις της αυξανόμενης διακίνησης δεδομένων στις μελλοντικές ασύρματες επικοινωνίες. Για παράδειγμα, τα μελλοντικά ασύρματα τοπικά δίκτυα (WLAN) και τα ασύρματα προσωπικά δίκτυα περιοχής (WPANs) αναμένεται να απαιτούν ρυθμό δεδομένων τουλάχιστον 10Gbps. Επιπλέον, ο ελάχιστος ρυθμός δεδομένων των συσκευών εικονικής πραγματικότητας (VR) αναμένεται στα 10 Gbps, ενώ ο ρυθμός δεδομένων των ασυμπιεστών βίντεο εξαιρετικά υψηλής ευκρίνειας (UHD) και των βίντεο 3D, θα φτάσει τα 24 Gbps και 100 Gbps αντίστοιχα [32]. Επομένως, υπάρχει μια διαρκής αναζήτηση για την εύρεση πόρων υψηλότερης συχνότητας. Η ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία Terahertz (THz) (από 100 GHz

έως 10 THz) που βρίσκεται στην οριακή περιοχή μεταξύ της οπτικής συχνότητας και της ραδιοσυχνότητας (RF) όπως φαίνεται και στο Σχήμα 1.5, θεωρείται μια από τις πιο υποσχόμενες ζώνες φάσματος που θα επιτρέψουν επικοινωνίες εξαιρετικά υψηλής ταχύτητας για τις επικοινωνίες της επόμενης γενιάς. Τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα συνοψίζονται στον Πίνακα 1.5.

Πιο αναλυτικά, η ζώνη THz προσελκύει μεγάλη προσοχή λόγω της ικανότητάς της να επιτυγχάνει υψηλότερους ρυθμούς δεδομένων από δεκάδες Gbps έως αρκετά Tbps από την επικοινωνία σε συχνότητες mmWave. Σε σύγκριση με την ασύρματη οπτική επικοινωνία, το σύστημα επικοινωνίας THz δεν είναι ευαίσθητο στις ατμοσφαιρικές επιδράσεις στις ασύρματες επικοινωνίες εξωτερικού χώρου. Πέρα από αυτό, τα συστήματα επικοινωνίας THz έχουν τη δυνατότητα να χρησιμοποιούν τις διαδρομές ανάκλασης για να ενισχύσουν τις συνδέσεις σε εφαρμογές εσωτερικού χώρου. Οι συχνότητες THz προσφέρουν τη δυνατότητα για εξαιρετικά υψηλούς ρυθμούς δεδομένων, επιτρέποντας την ασύρματη επικοινωνία πολλών terabit ανά δευτερόλεπτο. Αυτό επιτρέπει την απρόσκοπτη ροή περιεχομένου υψηλής ανάλυσης, τις μαζικές μεταφορές δεδομένων και τη μετάδοση μεγάλων συνόλων δεδομένων σε πραγματικό χρόνο. Ταυτόχρονα, παρέχουν πρόσβαση σε ένα τεράστιο ποσό διαθέσιμου εύρους ζώνης λόγω του υψηλού εύρους συχνοτήτων τους. Το εύρος αυτό μπορεί να υποστηρίξει τη μετάδοση μεγάλων ποσοτήτων δεδομένων ταυτόχρονα, καλύπτοντας τις απαιτήσεις μελλοντικών εφαρμογών όπως η ροή βίντεο 8K/16K, η εικονική πραγματικότητα και η ολογραφική επικοινωνία.

Πλεονεκτήματα	Μειονεκτήματα
Εξαιρετικά υψηλοί ρυθμοί δεδομένων	Υψηλή απώλεια εξασθένησης και διείσδυσης
Μεγάλο εύρος ζώνης	Περιορισμένη περιοχή κάλυψης
Επικοινωνία μικρής εμβέλειας	Σύνθετος σχεδιασμός συστήματος

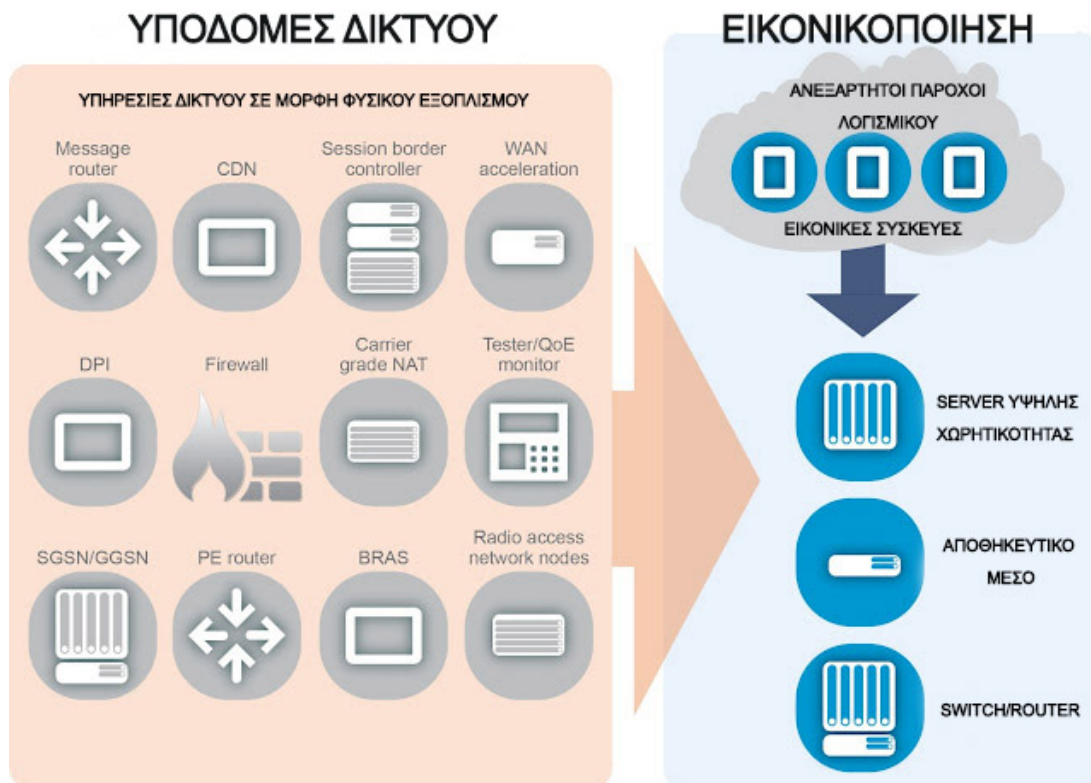
Πίνακας 1.5: THz Επικοινωνίες.

Τέλος, τα σήματα THz εξασθενούν γρήγορα από ατμοσφαιρικά αέρια και φυσικά εμπόδια, με αποτέλεσμα να ευνοούν τις επικοινωνίες μικρής εμβέλειας. Αυτό το χαρακτηριστικό μπορεί να προσφέρει βελτιωμένη ασφάλεια και απόρρητο, καθώς τα σήματα THz είναι λιγότερο επιρρεπή σε υποκλοπές και παρεμβολές από γειτονικά δίκτυα.

- **Network Function Virtualization (NFV)**

Το Network Function Virtualization (NFV) είναι μια τεχνολογία που μετατρέπει τις απτές λειτουργίες ενός δικτύου σε λογισμικό που βασίζεται στην τεχνολογία εικονικοποίησης (virtualization). Με τον τρόπο αυτόν διαχωρίζεται ο υπάρχοντας δικτυακός εξοπλισμός, σε τμήμα υλικού και σε τμήμα λογισμικού. Μία από τις τεχνολογίες που σχετίζονται με το NFV είναι αυτή του Virtual Network Function (VNF) και ειδικότερα, η έρευνα σχετικά με τον τρόπο αποτελεσματικής τοποθέτησης του VNF συζητείται ενεργά στην ερευνητική κοινότητα. Η βέλτιστη τοποθέτηση VNF στοχεύει στη μέγιστη σταθερή απόδοση λαμβάνοντας υπόψιν τους περιορισμένους διαθέσιμους πόρους. Αυτό επιτυγχάνεται με διάφορους τρόπους εφαρμόζοντας πολλούς αλγόριθμους βελτι-

στοποίησης [33]. Τα VNF παρέχουν τη δυνατότητα δυναμικής ανάπτυξης λειτουργιών δικτύου σε ένα εικονικό περιβάλλον. Αυτή η ευελιξία επιτρέπει στους χειριστές του δικτύου να κατανέμουν αποτελεσματικά τους πόρους και να προσαρμόζονται στις μεταβαλλόμενες απαιτήσεις του δικτύου, επιτρέποντας την ταχεία παροχή υπηρεσιών. Με την εικονικοποίηση των λειτουργιών του δικτύου, οι χειριστές μπορούν να μοιράζονται φυσικούς πόρους και να αξιοποιούν τον εμπορικό εξοπλισμό, με αποτέλεσμα χαμηλότερα λειτουργικά έξοδα συμβάλλοντας στην εξοικονόμηση κόστους.

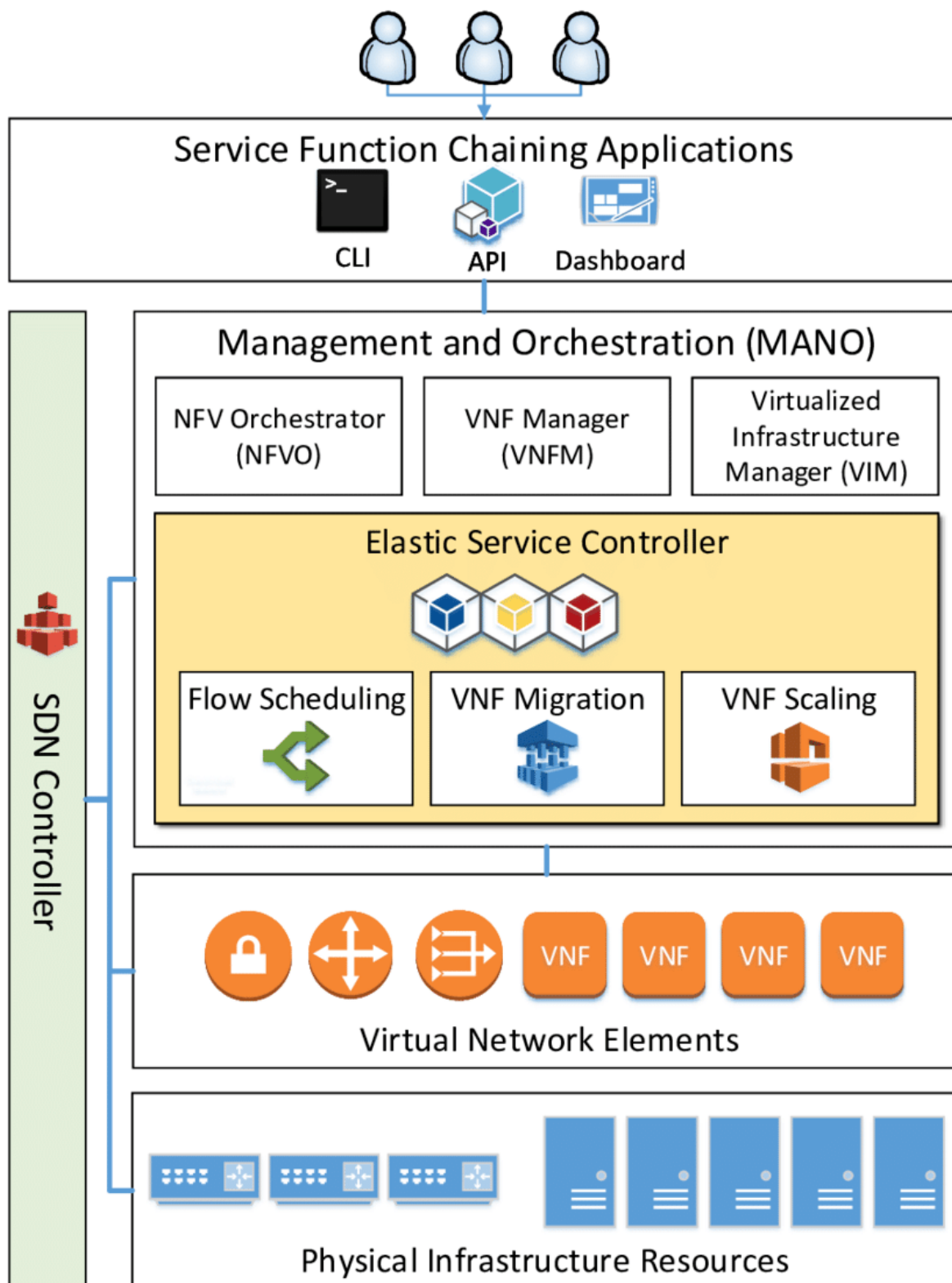


Σχήμα 1.9: Διάγραμμα μετατροπής φυσικών υπηρεσιών διαδικτύου σε εικονικοποιημένα συστήματα VNF.

Ακόμη, τα VNF επιτρέπουν την ενοποίηση πολλαπλών λειτουργιών δικτύου, όπως αυτών στο Σχήμα 1.9, σε μια κοινή υποδομή υλικού. Αυτή η ενοποίηση απλοποιεί τη διαχείριση του δικτύου βελτιστοποιώντας τη χρήση των πόρων και διευκολύνοντας όλες τις προσφερόμενες τις λειτουργίες. Τέλος, με τα VNF οι πάροχοι υπηρεσιών μπορούν να εισάγουν νέες υπηρεσίες και λειτουργίες δικτύου πιο γρήγορα. Η φύση των VNF βασίζεται σε λογισμικό, επομένως επιτρέπει ευκολότερες αναβαθμίσεις υπηρεσιών, προσαρμογή και ενσωμάτωση με εφαρμογές τρίτων, ικανοποιώντας τις εξελισσόμενες απαιτήσεις των πελατών κάθε υπηρεσίας.

Παρά τα πολλαπλά οφέλη και τις καινοτομίες που προσφέρουν τα VNF, υπάρχουν και ορισμένοι παράγοντες που δυσκολεύουν την εφαρμογή τους. Η εικονικοποίηση εισάγει πρόσθετα επίπεδα λογισμικών εφαρμογών, τα οποία μπορούν να οδηγήσουν σε επιβάρυνση επιδόσεων σε σύγκριση με υλοποιήσεις υλικού. Ο επιπλέον φόρτος επεξεργασίας των VNF που εκτελούνται σε εικονικά περιβάλλοντα μπορεί να επηρεάσει την καθυστέρηση, την απόδοση και τη συνολική απόδοση του δικτύου. Ακόμη, η ανάπτυξη και η διαχείριση των VNF μπορεί να είναι περίπλοκη, απαιτώντας εξειδίκευση στις τεχνολογίες εικονικοποίησης, την οργάνωση και το Service Function Chaining

(Αλυσίδα λειτουργιών του δικτύου), όπως φαίνεται στο Σχήμα 1.10 [34].



Σχήμα 1.10: Παράδειγμα δικτύου που ενσωματώνει SFC [35].

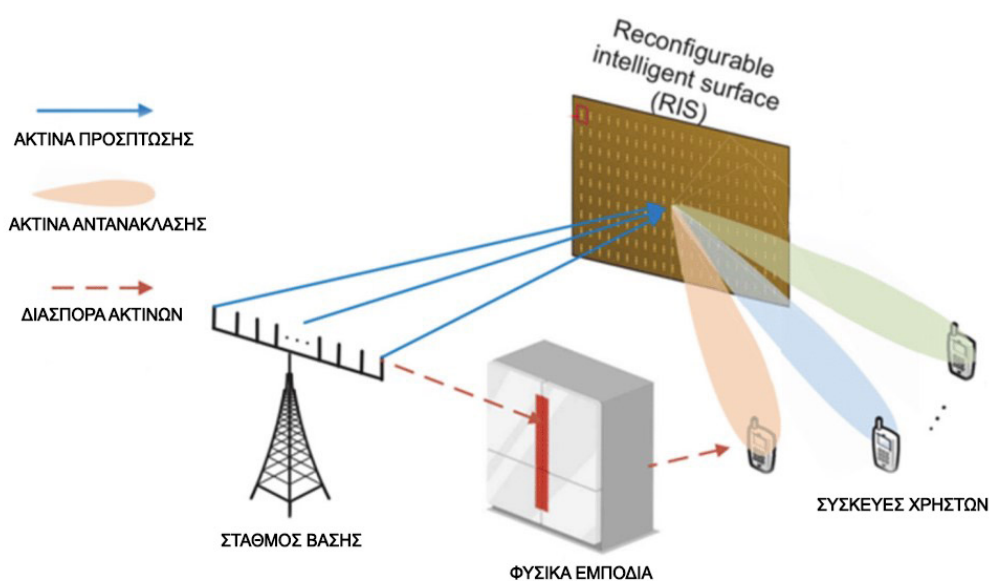
Η διασφάλιση της αποτελεσματικής κατανομής πόρων, η ορθή τοποθέτηση των λειτουργιών VNF και η αντιμετώπιση προβλημάτων, μπορεί να επιβάλλουν πρόσθετα έξοδα διαχείρισης. Ταυτό-

χρονα, εικονική φύση των VNF δημιουργεί νέες προκλήσεις ασφαλείας. Τα τρωτά σημεία της εικονικοποίησης μπορεί να θέτουν κινδύνους για την υποδομή. Η διασφάλιση ισχυρών μέτρων ασφαλείας και μηχανισμών παρακολούθησης είναι ζωτικής σημασίας για την ανάπτυξη VNF. Τέλος, η επίτευξη διαλειτουργικότητας μεταξύ VNF από διαφορετικούς προμηθευτές μπορεί να είναι μια πρόκληση λόγω ιδιόκτητων εφαρμογών και διαφορετικών προτύπων. Το κλείδωμα προμηθευτή (vendor lock), εξαναγκάζει τους χειριστές του δικτύου να εξαρτώνται σε έναν συγκεκριμένο προμηθευτή, περιορίζοντας με αυτόν τον τρόπο την ευελιξία του δικτύου.

Ο αντίκτυπος των VNF στα δίκτυα 6G θα εξαρτηθεί από τον τρόπο αντιμετώπισης και διαχείρισης αυτών των πλεονεκτημάτων και μειονεκτημάτων. Η χρήση των VNF μπορεί να συμβάλει στην ευελιξία, την επεκτασιμότητα και την εξοικονόμηση κόστους των δικτύων 6G, επιτρέποντας καινοτόμες υπηρεσίες και ευέλικτη ανάπτυξη. Ωστόσο, ο μετριασμός των γενικών εξόδων απόδοσης, η ενσωμάτωση ισχυρής ασφάλειας και η αντιμετώπιση των προκλήσεων μεταξύ των προμηθευτών, πρέπει να ληφθούν σοβαρά υπόψη για την ορθή αξιοποίηση του VNF στα δίκτυα 6G.

- **Αναδιαμορφώσιμες Ευφυείς Επιφάνειες (RIS)**

Όπως αναπτύχθηκε και παραπάνω, για την επίτευξη των επιδόσεων του 6G, είναι αναγκαία η εκπομπή σε συχνότητες mmWave ή ακόμη και κάτω από THz. Όμως, λόγω της φύσης των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων, η εξασθένηση λόγω της σκίασης (shadowing) και απώλειας διαδρομής (path loss) είναι πολύ πιο σοβαρή σε αυτές τις ζώνες συχνοτήτων. Επιπροσθέτως, η απόδοση του 6G περιορίζεται θεμελιωδώς από το ανεξέλεγκτο και τυχαίο κανάλι ασύρματης επικοινωνίας. Οι αναδιαμορφώσιμες ευφυείς επιφάνειες (Reconfigurable intelligent surfaces - RIS) έχουν αναδειχθεί ως μία από τις πολλά υποσχόμενες τεχνολογίες για την υποστήριξη μελλοντικών κινητών επικοινωνιών. Ένα RIS περιλαμβάνει μεγάλο αριθμό διηλεκτρικών επιφανειών, καθένα από τα οποία μπορεί να ρυθμιστεί για να χειριστεί τα προσπίπτοντα σε αυτά ηλεκτρομαγνητικά κύματα [36]. Το RIS μπορεί να μετατοπίσει τη φάση, το μέγεθος, τη συχνότητα ή ακόμα και την πόλωση του κύματος, όπως φαίνεται στο Σχήμα 1.11.



Σχήμα 1.11: Διαγραμματική εκπομπή των συστημάτων RIS [36].

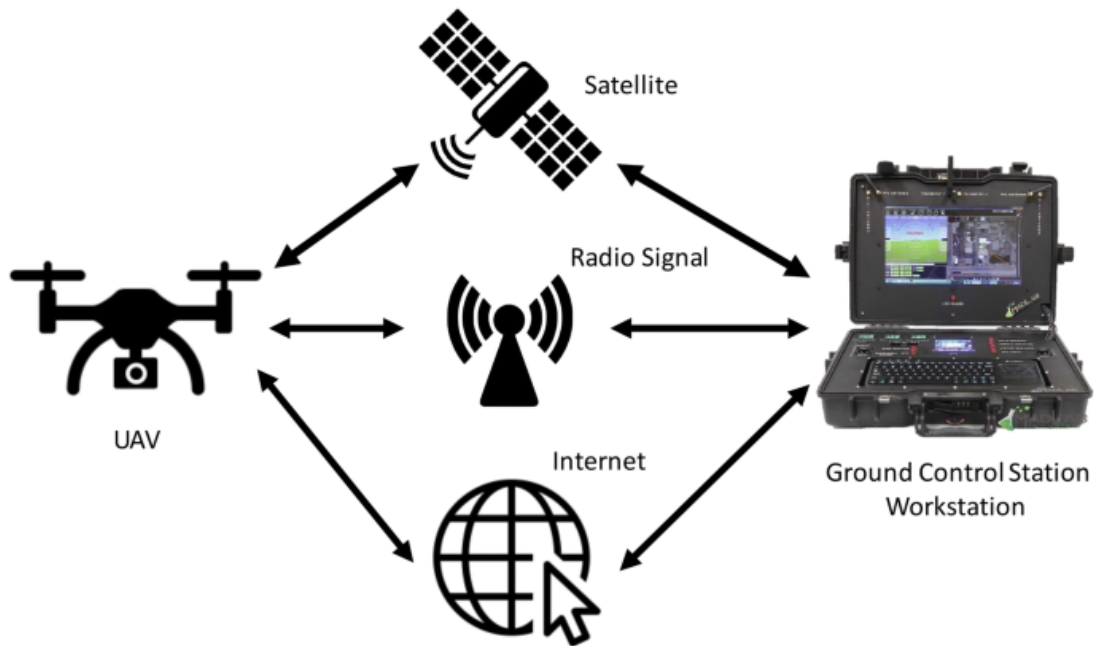
Μεταβάλλοντας κατάλληλα τις ανακλαστικές επιφάνειες, το σήμα μπορεί να κατευθυνθεί σε οποιαδήποτε είναι η επιθυμητή κατεύθυνση. Μάλιστα, οι μετακινήσεις μπορούν να γίνουν real-time εξυπηρετώντας έτσι ένα ασύρματο περιβάλλον στο οποίο χρειάζεται να γίνονται διαρκώς μεταβολές. Ταυτόχρονα, τα πλεονεκτήματά τους είναι και πρακτικά καθώς ανακλούν παθητικά κάθε κύμα χωρίς να χρειάζεται να παραχθεί επιπλέον ενέργεια ή πόροι για να λειτουργήσουν. Ακόμη, για την κατασκευή τους χρησιμοποιούνται υλικά χαμηλού κόστους και ελαφριά κάτι το οποίο τα κάνει άμεσα ευέλικτα για εγκατάσταση σε πολλούς τύπους επιφανιών [37]. Πιο συγκεκριμένα, μπορούν να εγκατασταθούν σε σημεία όπου χρειάζεται να παρακαμφθούν φυσικά εμπόδια και να δημιουργηθεί μια σύνδεση LOS (Line Of Sight) μεταξύ του σημείου πρόσβασης (AP) και των χρηστών. Επιπλέον, τα RIS μπορούν να καταστέλλουν τις παρεμβολές που προκαλούνται από την εκπομπή καναλιών από γειτονικές κυψέλες και να βελτιώσουν την επιθυμητή ισχύ σήματος. Επιπλέον, σε εσωτερικούς χώρους, μπορούν να εφαρμοστούν σε επιφάνειες όπως στους τοίχους, την οροφή και τα έπιπλα για να ενισχύσουν τη χωρητικότητα και την κάλυψη, ώστε να ικανοποιηθούν οι εφαρμογές με αυστηρές απαιτήσεις. Τέλος, μπορούν να τοποθετηθούν και σε οχήματα υψηλής ταχύτητας, μη επανδρωμένα οχήματα (UAVs), δορυφόρους και στο εξωτερικό των κτιρίων, για την επίτευξη υψηλής φασματικής απόδοσης.

- **Ενοποιημένα επίγεια, εναέρια και διαστημικά δίκτυα**

Το μέλλον των 6G δικτύων χρειάζεται να χαρακτηρίζεται από ευελιξία, με αξιόπιστες συνδέσεις, και χαμηλή καθυστέρηση, ώστε να μπορεί να εξυπηρετήσει κάθε είδους εξοπλισμό όπως αισθητήρες και αυτόνομα οχήματα. Οι υπάρχουσες υποδομές κεραιών και σταθμών βάσεων, είναι, κατά κόρον, εγκατεστημένοι σε συγκεκριμένες τοποθεσίες, με ελάχιστες έως καθόλου δυνατότητες μετακίνησης. Με αυτή την αρχιτεκτονική είναι αδύνατον να διατηρηθεί αδιάλειπτη σύνδεση για τις εφαρμογές που μπορεί να υποστηρίξει το 6G. Η ταχύτερη ανάπτυξη των μη-επανδρωμένων οχημάτων (UAVs), γνωστά και ως drones, δημιουργεί καινοτόμες ευκαιρίες για τον τομέα των ασύρματων δικτύων για τη βελτίωση της αποδοτικότητας, την καλύτερη κάλυψη και την ποιότητα των υπηρεσιών προς τους τελικούς χρήστες. Πιο συγκεκριμένα, καθώς τα UAVs μπορούν να μετακινηθούν μεταβάλλοντας την τοποθεσία τους για να βελτιώσουν την περιοχή κάλυψής τους. Ένα παράδειγμα επικοινωνίας μιας συσκευής UAV, παρουσιάζεται στο Σχήμα 1.12.

Μερικά από τα προτερήματα που προσφέρει η εφαρμογή τους είναι η μεταβολή της τοποθεσίας τους σε οποιαδήποτε κατεύθυνση, ο εύκολος χειρισμός τους (αυτόματα ή και με απομακρυσμένο πιλότο-χειριστή), η γρήγορη μετακίνηση τους χωρίς περιορισμούς με τη δυνατότητα να αποφεύγουν εμπόδια και το χαμηλό κόστος εφαρμογής και συντήρησης. Επομένως, μπορούν να επεκτείνουν άμεσα την προσβασιμότητα του δικτύου ακόμη και σε δύσβατες περιοχές όπου η εγκατάσταση συμβατικού εξοπλισμού είναι δύσκολο να επιτευχθεί.

Οι περιπτώσεις εφαρμογής τους ποικίλουν, καθώς μπορούν να συμβάλλουν στην άμεση ανταπόκριση για περιπτώσεις έκτακτης ανάγκης, στην γεφύρωση της επικοινωνίας με μία πληγείσα περιοχή από μία φυσική καταστροφή όπου η παροχή του παραδοσιακού δικτύου δεν είναι διαθέσιμη επιλογή. Επίσης, σε συνδυασμό με μετρήσεις από αισθητήρες και πολυμέσα από κάμερες, μπορούν να συμβάλλουν στην περιβαλλοντική προστασία ανακτώντας πληροφορίες για την ατμοσφαιρική ρύπανση, τις καιρικές συνθήκες προσφέροντας πληροφορίες για τις αγροκαλλιέργειες, την καταγραφή και παρακολούθηση της άγριας φύσης για την προστασία των ειδών προς εξαφάνιση. Ακόμη, για την κάλυψη μεγαλύτερης κάθετης απόστασης από 15χλμ έως 25χλμ από το

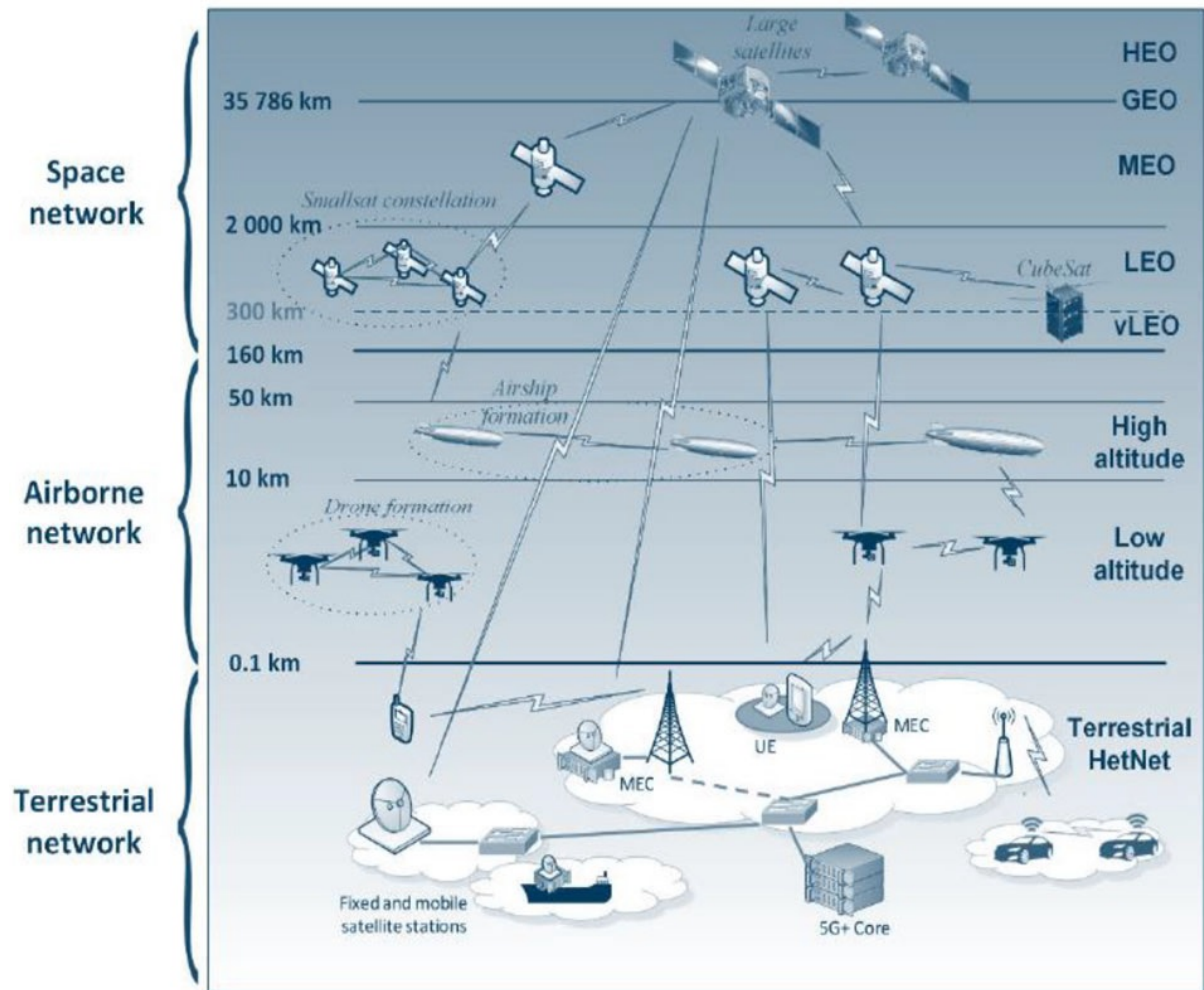


Σχήμα 1.12: Μετάδοση σήματος σε συσκευές UAV [38].

έδαφος, γίνεται η εφαρμογή των HAPS (High Altitude Platform Systems) τα οποία αποτελούν επανδρωμένα ή μη ιπτάμενα οχήματα που μπορούν να μεταφέρουν μέχρι τόνους βάρους και μπορούν να παραμείνουν σε τροχιά για πολλές μέρες ή και χρόνια ανάλογα με την κατανάλωση και τις ενεργειακές τους ικανότητες. Η εφαρμογή τους γίνεται στην περιοχή της στρατόσφαιρας και σε συνεργασία με τα UAV και μεταξύ τους ανταλλαγή δεδομένων μπορούν να εγγυηθούν διαρκή και αδιάκοπη εναέρια κάλυψη [39].

Επεκτείνοντας την λογική της αδιάλειπτης και οικουμενικής κάλυψης, η συνδεσιμότητα συνεχίζεται και πέρα από τον πλανήτη μας. Πέρα από τα UAVs και τα HAPS, όπως φαίνεται και στο Σχήμα 1.13, προστίθενται στην συνδεσιμότητα και οι δορυφόροι LEO (χαμηλής τροχιάς), MEO (μεσαίας τροχιάς) και GEO (γεωστατικοί δορυφόροι), κάνοντας την αρχιτεκτονική πολυεπίπεδη με το προτέρημα ότι μπορούν να διαχωριστούν οι λειτουργίες του δικτύου σε κάθε διαφορετικό παράγοντα [41].

Πιο συγκεκριμένα, οι **LEO (Low Earth Orbit)** δορυφόροι, είναι τοποθετημένοι σε υψόμετρα από 160 έως 2000 χιλιόμετρα πάνω από την επιφάνεια της Γης. Προσφέρουν διάφορα πλεονεκτήματα όπως χαμηλή καθυστέρηση και υψηλούς ρυθμούς μετάδοσης δεδομένων. Προσφέρουν επικοινωνία χαμηλής καθυστέρησης λόγω της μικρότερης απόστασής τους από την επιφάνεια της Γης σε σύγκριση με δορυφόρους σε υψηλότερες τροχιές. Η μειωμένη απόσταση οδηγεί σε μικρότερους χρόνους μεταφοράς του σήματος, καθιστώντας τους δορυφόρους LEO κατάλληλους για εφαρμογές που απαιτούν επικοινωνία σε πραγματικό ή σχεδόν πραγματικό χρόνο, όπως φωνητικές κλήσεις και βιντεοκλήσεις, παιχνίδια και διαδραστικές υπηρεσίες. Επιπλέον, η ισχύς του εκπεμπόμενου σήματος είναι υψηλότερη, ελαχιστοποιούνται οι απώλειες και γίνεται δυνατή η αποστολή αυξημένου όγκου δεδομένων για υπηρεσίες όπως το video streaming, η μεταφορά αρχείων και γενικότερα η περιήγηση στο διαδίκτυο. Οι LEO χρησιμοποιούνται όλο ένα και περισσότερο για να προσφέρουν πρόσβαση στο διαδίκτυο. Εταιρείες όπως η SpaceX προσφέρουν ήδη LEO υπηρεσίες χρησιμοποιώντας μεγάλο αριθμό διασυνδεδεμένων δορυφόρων για να παρέχουν χαμηλού



Σχήμα 1.13: Επίγειες, εναέριες και διαστημικές συνδέσεις [40].

κόστους, υψηλής ταχύτητας σύνδεση στο διαδίκτυο παγκοσμίως [42].

Οι δορυφόροι **MEO (Medium Earth Orbit)**, λειτουργούν σε υψόμετρα μεταξύ 2000 και 36000 χιλιομέτρων από την επιφάνεια της Γης. Χρησιμοποιούνται συνήθως για συστήματα πλοήγησης όπως το GPS (Global Positioning System) καθώς παρέχουν καλύτερη κάλυψη και ακρίβεια σε σχέση με τους δορυφόρους LEO. Οι δορυφόροι MEO μπορούν να καλύψουν μεγαλύτερη έκταση στην επιφάνεια της Γης σε σύγκριση με τους δορυφόρους LEO, συμπεριλαμβανομένων απομακρυσμένων και λιγότερο κατοικημένων περιοχών. Αυτή η εκτεταμένη κάλυψη είναι ιδιαίτερα επωφελής για εφαρμογές που απαιτούν παγκόσμια ή περιφερειακή κάλυψη, όπως συστήματα πλοήγησης και χρονισμού. Ενώ οι δορυφόροι MEO έχουν υψηλότερο χρόνο καθυστέρησης σε σύγκριση με τους δορυφόρους LEO, προσφέρουν χαμηλότερη καθυστέρηση σε σύγκριση με τους δορυφόρους GEO. Η “μεσαία” αυτή καθυστέρηση, τους καθιστά κατάλληλους για εφαρμογές που απαιτούν επικοινωνία σχεδόν σε πραγματικό χρόνο, όπως η πλοήγηση και ο συγχρονισμός χρόνου. Η μειωμένη καθυστέρηση διευκολύνει ταχύτερους χρόνους μετάδοσης δεδομένων και απόκρισης, βελτιώνοντας τη συνολική εμπειρία του χρήστη [43].

Τέλος, οι **GEO (Geostationary Orbit)** δορυφόροι, βρίσκονται σε υψόμετρα άνω των 36000 χιλιομέτρων. Είναι γνωστά για την διατήρηση σταθερής θέσης πάνω από την επιφάνεια της Γης, καθιστώντας τα ιδανικά για υλοποιήσεις που απαιτούν συνεχή κάλυψη σε μεγάλες γεωγραφικές

περιοχές, σταθερές και αδιάλειπτες συνδέσεις χωρίς να απαιτείται η μεταφορά της κίνησης από έναν δορυφόρο σε άλλον, κάτι που τους καθιστά ιδανική επιλογή για εφαρμογές για επείγουσες επικοινωνίες και τηλεπικοινωνίες γενικότερα. Έχουν καλύτερη αντοχή στον χρόνο σε σχέση με τους LEO και MEO, καθώς βρίσκονται σε τροχιά σε μεγαλύτερο υψόμετρο, γεγονός που οδηγεί σε μειωμένη ατμοσφαιρική αντίσταση και χαμηλότερη κατανάλωση καυσίμου για ελιγμούς για την διατήρηση σωστής τοποθεσίας. Η εκτεταμένη λειτουργική περίοδος των δορυφόρων GEO διασφαλίζει τη συνέχεια και την αξιοπιστία των υπηρεσιών που παρέχουν, ενώ ταυτόχρονα μειώνει τη συχνότητα για αντικατάσταση [44].

1.8.3 Προκλήσεις

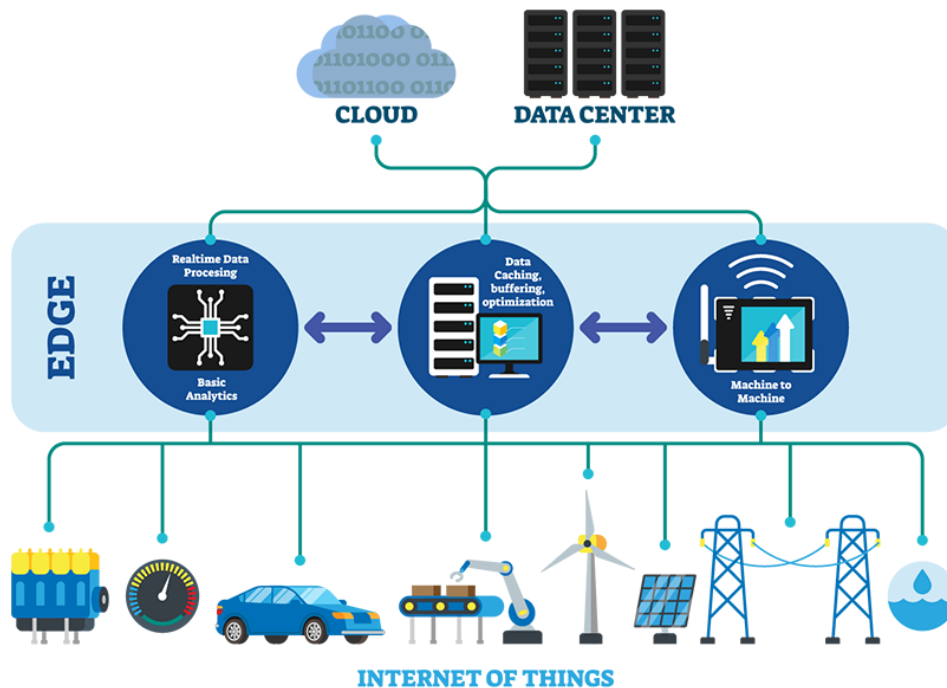
Οι βελτιωμένες επιδόσεις αποτελούν χαρακτηριστικό γνώρισμα κάθε επόμενης γενιάς τεχνολογιών επικοινωνίας. Όπως αναφέρθηκε, τα δίκτυα 6G έχουν υψηλότερη χωρητικότητα συστήματος, ταχύτητες δεδομένων, ασφάλεια και QoS από τις προηγούμενες γενιές. Όμως προτού γίνει ευρεία υλοποίησή τους, η ερευνητική κοινότητα εξετάζει ήδη διάφορα ζητήματα και εμπόδια.

- Οι terahertz συνδέσεις αποτελούν μία καινοτομία για τα δίκτυα έκτης γενιάς, όμως ταυτόχρονα η υλοποίησή τους αποτελεί μία πρόκληση. Το φάσμα εκπομπής τους περιορίζει το εύρος επικοινωνίας και απαιτεί την ανάπτυξη ενός πυκνού δικτύου σταθμών βάσης ή αναμεταδοτών για να ξεπεραστούν οι προκλήσεις που σχετίζονται με τη διάδοση του σήματος. Επιπροσθέτως, λόγω της υψηλής εξασθένησης και του περιορισμένου εύρους κάλυψης, οι επικοινωνίες THz μπορεί να είναι κατάλληλες μόνο για τοπικές εφαρμογές υψηλής χωρητικότητας σε μια μικρή περιοχή κάλυψης. Για την επέκταση της κάλυψης απαιτείται η ανάπτυξη μιας πυκνής υποδομής δικτύου, αυξάνοντας την πολυπλοκότητα και το κόστος της ανάπτυξης, καθώς τα συστήματα επικοινωνίας THz απαιτούν πολύπλοκες συστοιχίες κεραιών, εξαρτήματα υψηλής συχνότητας και προηγμένες τεχνικές επεξεργασίας σήματος. Η υπέρβαση των τεχνικών προκλήσεων που σχετίζονται με το σχεδιασμό του συστήματος THz, όπως η διαμόρφωση δέσμης κεραιάς, ο συγχρονισμός και η παραμόρφωση σήματος, θέτει σημαντικά εμπόδια έρευνας και μηχανικής [45].
- Η ενσωμάτωση της τεχνητής νοημοσύνης (AI) και της μηχανικής μάθησης (ML) σε δίκτυα 6G αντιπροσωπεύει μια κομβική πρόοδο στον τομέα της ασύρματης επικοινωνίας. Αυτές οι τεχνολογίες θα διαδραματίσουν κεντρικό ρόλο στη βελτίωση της διαχείρισης, της βελτιστοποίησης και της ασφάλειας του δικτύου. Ωστόσο, η αξιοποίηση της τεχνητής νοημοσύνης και της ML σε δίκτυα 6G συνοδεύεται από υποσχέσεις αλλά και προκλήσεις [46].

1. **Ποιότητα και ποσότητα δεδομένων:** Τα μοντέλα AI και ML απαιτούν μεγάλους όγκους δεδομένων υψηλής ποιότητας για εκπαίδευση. Η συλλογή και η διατήρηση τέτοιων δεδομένων μπορεί να είναι δύσκολη, ειδικά σε δυναμικά και πολύπλοκα περιβάλλοντα 6G.
2. **Πολυπλοκότητα αλγορίθμων:** Η ανάπτυξη αλγορίθμων AI και ML που μπορούν να χειριστούν αποτελεσματικά την πολυπλοκότητα και την κλίμακα των δικτύων 6G είναι μια σημαντική πρόκληση. Αυτοί οι αλγόριθμοι πρέπει να επεξεργάζονται δεδομένα σε πραγματικό χρόνο και να προσαρμόζονται στις μεταβαλλόμενες συνθήκες δικτύου.

3. **Κίνδυνοι ασφάλειας:** Ενώ η τεχνητή νοημοσύνη μπορεί να ενισχύσει την ασφάλεια του δικτύου, μπορεί επίσης να είναι ευάλωτη σε αντίπαλες επιθέσεις. Η διασφάλιση των συστημάτων που βασίζονται σε τεχνητή νοημοσύνη αποτελεί προτεραιότητα.
 4. **Ηθικά ζητήματα:** Η χρήση της τεχνητής νοημοσύνης στη διαχείριση και την ασφάλεια δικτύου πρέπει να συμμορφώνεται με τους κανονισμούς και τα δεοντολογικά πρότυπα. Οι ανησυχίες για το απόρρητο, ο μετριασμός της μεροληψίας και η διαφάνεια αποτελούν σημαντικά ζητήματα. Γίνεται προσπάθεια να αντιμετωπιστούν αυτά τα ζητήματα με την βοήθεια του Explainable AI (XAI). Στόχος του είναι τα συστήματα AI να γίνουν πιο κατανοητά από τον άνθρωπο και να γεφυρωθεί το χάσμα μεταξύ των χρηστών και της AI, ώστε να κατανοούν και να εμπιστεύονται τις αποφάσεις που βασίζονται σε τέτοιου είδους συστήματα και υπολογισμούς [47].
 5. **Κατανάλωση ενέργειας:** Οι αλγόριθμοι AI και ML μπορεί να είναι απαιτητικοί υπολογιστικά, οδηγώντας δυνητικά σε αυξημένη κατανάλωση ενέργειας στην υποδομή δικτύου. Η εξισορρόπηση της ενεργειακής απόδοσης με δυνατότητες που τροφοδοτούνται από AI είναι ζωτικής σημασίας.
- Η κατανάλωση ενέργειας στο πλαίσιο των δικτύων 6G αποτελεί μία πρόκληση που εστιάζει στις απαιτήσεις ισχύος που σχετίζονται με αυτά. Μερικοί από τους παράγοντες που επιβαρύνουν την κατανάλωση ενέργειας αναλύονται παρακάτω.
 - **Υψηλές ταχύτητες δεδομένων:** Όπως αναφέρθηκε στα χαρακτηριστικά των δικτύων 6G, προβλέπεται να παρέχουν εξαιρετικά υψηλούς ρυθμούς δεδομένων, πιθανώς της τάξης των terabit ανά δευτερόλεπτο. Η επίτευξη αυτών των ταχυτήτων απαιτεί σημαντική υπολογιστική ισχύ, συμπεριλαμβανομένης της ενεργοβόρας επεξεργασίας δεδομένων, κωδικοποίησης και αποκωδικοποίησης [48].
 - **Edge computing:** Ακόμη, τα δίκτυα 6G θα βασίζονται σε μεγάλο βαθμό στο edge computing, όπου η επεξεργασία και η ανάλυση δεδομένων πραγματοποιούνται πιο κοντά στους τελικούς χρήστες ή τις συσκευές (Σχήμα 2.2). Ενώ το edge computing προσφέρει πλεονεκτήματα χαμηλής καθυστέρησης, απαιτεί επίσης περισσότερη ενέργεια λόγω της ανάπτυξης πρόσθετης υποδομής στην άκρη του δικτύου.
 - **Τεχνολογίες MIMO:** Επιπλέον, για την υποστήριξη της αναμενόμενης μαζικής συνδεσιμότητας και χωρικής πολυπλεξίας στο 6G, τα δίκτυα αναμένεται να χρησιμοποιήσουν τεράστια συστήματα πολλαπλής εισόδου - πολλαπλής εξόδου (MIMO) και προηγμένες τεχνικές διαμόρφωσης δέσμης. Αυτές οι τεχνολογίες βελτιώνουν την ποιότητα του σήματος, αξιοποιώντας υψηλότερο φάσμα συχνοτήτων με αποτέλεσμα την αύξηση του αριθμού μικρών κεραιών. Οι μικρές κεραιές μπορούν να στοιβαχτούν σε μία συστοιχία κεραιών, όμως καταναλώνουν σημαντική ισχύ. Ειδικότερα για τα δίκτυα 6G, το MIMO εξελίσσεται σε mMIMO (massive Multiple Input Multiple Output), καθώς αυξάνεται σημαντικά ο αριθμός των κεραιών στον πομπό και τον δέκτη. Ο ακριβής διαμοιρασμός των καναλιών, του φάσματος και ο συγχρονισμός τους, απαιτούν εξελιγμένους αλγορίθμους και τεχνικές [50]. Επιπλέον, ένα σύστημα με τόσο αυξημένο αριθμό κεραιών, καθίσταται υπολογιστικά απαιτητικό και χρειάζεται εξελιγμένο hardware για να το υποστηρίξει. Ταυτόχρονα, η ανάπτυξη τόσο εξεζητημένου υλικού, προσθέτει επιπλέον κόστος στην υλοποίηση της υποδομής.

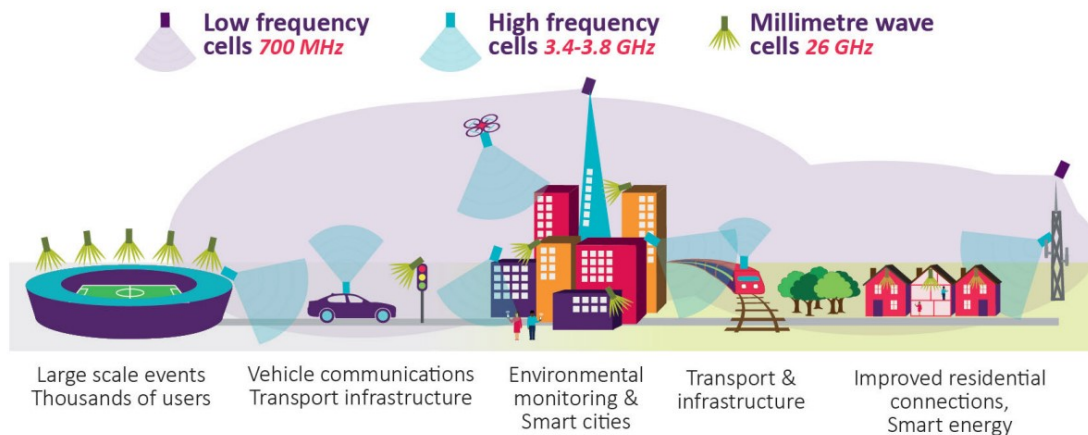
Edge Computing



Σχήμα 1.14: Απεικόνιση edge computing [49].

- **Αύξηση αισθητήριων συσκευών:** Τέλος, ο πολλαπλασιασμός των συσκευών IoT, αισθητήριων και αυτόνομων συστημάτων, σημαίνει περισσότερες συσκευές που πρέπει να τροφοδοτηθούν. Πολλές από αυτές τις συσκευές λειτουργούν με μπαταρία και η βελτιστοποίηση της κατανάλωσης ενέργειας είναι ζωτικής σημασίας για τη βιωσιμότητα του δικτύου.
- Τα 6G δίκτυα χαρακτηρίζονται από έντονη ετερογένεια αφού αναμένεται να αποτελούνται από ένα ευρύ φάσμα τεχνολογιών και τρόπων επικοινωνίας χρησιμοποιώντας συχνότητες που ανήκουν τόσο στην sub-6GHz ζώνη, όσο και κύματα χιλιοστόμετρου (mmWave), Terahertz (THz), ή και οπτικές επικοινωνίες, και καθιστούν δυνατή την επικοινωνία σε ένα τρισδιάστατο επίπεδο, περιλαμβάνοντας πέρα από τα επίγεια, τόσο τα εναέρια όσο και τα δορυφορικά δίκτυα. Σε ένα τέτοιο πολύπλοκο “δίκτυο από δίκτυα”, αν και η ενοποίηση των επιμέρους δικτύων είναι καθοριστικής σημασίας για την παροχή μιας απρόσκοπτης και ευέλικτης ασύρματης εμπειρίας, αποτελεί ένα από τα πιο δύσκολα σημεία της υλοποίησης των δικτύων 6ης γενιάς [51] λόγω των παρακάτω προκλήσεων:
 1. **Διαχείριση παρεμβολών:** Με πολλαπλές τεχνολογίες επικοινωνίας που λειτουργούν στο ίδιο περιβάλλον όπως σε αυτό του Σχήματος 1.15, η διαχείριση παρεμβολών αποτελεί ένα πολύπλοκο ζήτημα. Είναι απαραίτητη η ανάπτυξη νέων τεχνικών όπως η κοινή χρήση δυναμικού φάσματος και οι στρατηγικές μετριασμού των παρεμβολών.
 2. **Αδιάλειπτες συνδέσεις & περιαγωγή:** Η διασφάλιση ότι οι χρήστες μπορούν να μεταβαίνουν απρόσκοπτα μεταξύ διαφορετικών τρόπων επικοινωνίας (π.χ., από επίγεια δίκτυα σε δορυφόρους) χωρίς διακοπές, είναι μια πολύπλοκη πρόκληση. Προς αυτή την κατεύθυνση, είναι αναγκαίο να υπάρχουν ομαλές μεταπομπές, τόσο μεταξύ σταθμών βάσεων ίδιου επιπέ-

δου (Horizontal handover), όσο και μεταξύ διαφορετικών επιπέδων (Vertical handover). Στο ίδιο επίπεδο, κατά την μετακίνηση μίας συσκευής από την μία κυψέλη προς την άλλη, είναι αναγκαίο η μετάβαση να γίνεται τη σωστή χρονική στιγμή κρατώντας όσο το δυνατόν καλύτερη ποιότητα σήματος, χωρίς πρόπτωση σε παρεμβολές από γειτονικές κυψέλες και με την λιγότερη δυνατή καθυστέρηση. Αντίστοιχα και μεταξύ επιπέδων, η αδιάλειπτη σύνδεση κατά την μετάβαση από μία τεχνολογία στην άλλη, αυξάνει τις δυσκολίες [52].



Σχήμα 1.15: Απεικόνιση ετερογενούς δικτύου με διάφορες διασυνδέσεις και χρήση δυναμικού φάσματος [53].

3. **Ασφάλεια και απόρρητο:** Η ενσωμάτωση διαφόρων τεχνολογιών επικοινωνίας εγείρει ζητήματα ασφάλειας και απορρήτου, όπως η διασφάλιση κρυπτογράφησης από άκρο σε άκρο, έλεγχος ταυτότητας και έλεγχος πρόσβασης σε διαφορετικά τμήματα του δικτύου.
4. **Διαχείριση του φάσματος:** Είναι αναγκαία η δίκαιη κατανομή του φάσματος και των ρυθμιστικών πλαισίων σε διαφορετικές τεχνολογίες επικοινωνιών και γεωγραφικές περιοχές, για την αποφυγή συγκρούσεων και τη διασφάλιση της δίκαιης χρήσης.
5. **Επεκτασιμότητα:** Ακόμη, τα δίκτυα 6G πρέπει να είναι επεκτάσιμα (scalable) για να εξυπηρετούν τον αυξανόμενο αριθμό συσκευών και χρηστών. Αυτό απαιτεί σχεδιασμό για την επέκταση του δικτύου, με την υλοποίηση αλγόριθμων χαμηλής πολυπλοκότητας, για την προσαρμογή των νέων τεχνολογιών καθώς αυτές εμφανίζονται.
6. **Ενορχήστρωση πόρων:** Τέλος, είναι απαραίτητη η αποτελεσματική ενορχήστρωση πόρων. Λόγω της μεγάλης ετερογένειας του δικτύου σε πόρους (υπολογιστικούς, επικοινωνιακούς και πόρους αποθήκευσης), η από κοινού ανάθεσή τους πρέπει να γίνεται σε πολύ γρήγορο χρόνο. Απαιτούνται προηγμένες πλατφόρμες διαχείρισης και ενορχήστρωσης δικτύου [54], αλγόριθμοι χαμηλής πολυπλοκότητας που θα βελτιστοποιούν την ανάθεση των ετερογενών πόρων και την απόδοση του δικτύου από άκρη σε άκρη, λαμβάνοντας υπόψη κρίσιμους παράγοντες όπως η καθυστέρηση, η χωρητικότητα και η κατανάλωση ενέργειας.

1.9 Στόχος και σκοπός της πτυχιακής

Έπειτα από την ανάλυση των προκλήσεων που αφορούν την υλοποίηση των δικτύων 6ης γενιάς θεωρείται ίσως πιο σημαντική, αυτή της χαμηλής καθυστέρησης. Καθώς γίνεται λόγος για υψηλούς ρυθμούς δεδομένων, αυξημένο αριθμό χρηστών και συνδεδεμένων συσκευών, προκειμένου να αντιμετωπιστούν οι συνεχώς αυξανόμενες απαιτήσεις κίνησης και οι αυστηροί περιορισμοί καθυστέρησης, ειδικά όταν γίνεται αναφορά σε real-time κρίσιμες εφαρμογές, δίνεται βάση στον μηχανισμό του Network Function Virtualization (NFV) και στον συνδυασμό του με Multi-access Edge Computing (MEC), ώστε να υπάρχει μεγαλύτερη ευελιξία στο δίκτυο. Ταυτόχρονα, πρέπει να εξεταστεί το πώς θα γίνει σωστό user association και traffic routing ώστε να σημειωθούν τα μέγιστα δυνατά αποτελέσματα στον καλύτερο δυνατό χρόνο. Για να επιτευχθούν όλοι οι στόχοι, χρειάζεται να κατανεμηθούν σωστά οι υπολογιστικοί (computational) και οι επικοινωνιακοί (communication) πόροι, με συγκεκριμένη σειρά την οποία ορίζει το Service Function Chain (SFC) εξασφαλίζοντας την εξυπηρέτηση των αιτημάτων με βαθμό προτεραιότητας και ελάχιστη καθυστέρηση.

Στην παρούσα εργασία, εξετάζεται το πώς μπορεί να επιτευχθεί η γρήγορη ανάθεση χρηστών, η ικανοποίηση των απαιτήσεων τους, ενώ ταυτόχρονα εξασφαλίζεται η ενεργειακή απόδοση. Για τον σκοπό αυτό, υλοποιήθηκε ο αλγόριθμος ανάθεσης με όνομα HERA, τον οποίο εξετάζουμε και αναλύουμε, καθώς παρουσιάζει λιγότερη πολυπλοκότητα και καλύτερη ενεργειακή απόδοση σε σχέση με τους αλγορίθμους που προσεγγίζουν το ίδιο ζήτημα στην υπάρχουσα βιβλιογραφία. Αντλώντας τα αποτελέσματα που αποδίδει ο αλγόριθμος, εξετάζουμε περαιτέρω σενάρια σχετικά με την συμπεριφορά του HERA, ώστε να καταλάβουμε ποιοι παράγοντες επηρεάζουν και πώς την απόδοση του αλγορίθμου. Οι λύσεις που προτείνονται έως σήμερα στην υπάρχουσα βιβλιογραφία, εμφανίζουν αυξημένη πολυπλοκότητα, συνεπώς καταναλώνουν περισσότερη ενέργεια. Συγκεκριμένα, όσο μεγαλώνει η ανάγκη για την εξυπηρέτηση μεγαλύτερου φόρτου δεδομένων για υπηρεσίες όπως αυτές που προαναφέρθηκαν, οι πάροχοι βρίσκονται αντιμέτωποι με την πρόκληση να πετύχουν την καλύτερη δυνατή χωρητικότητα περιορίζοντας όσο το δυνατόν περισσότερο την κατανάλωση του ηλεκτρικού ρεύματος.

1.10 Δομή πτυχιακής

Η εργασία αναπτύσσεται στα εξής κεφάλαια:

Στο πρώτο κεφάλαιο έγινε μία εισαγωγή στις τηλεπικοινωνίες, τα δίκτυα τηλεπικοινωνιών μέχρι τώρα, γίνεται αναφορά στα δίκτυα 6ης γενιάς και αναλύονται τα χαρακτηριστικά τους, οι τεχνολογίες κλειδιά που τα απαρτίζουν και οι προκλήσεις που αντιμετωπίζουν. Στο δεύτερο κεφάλαιο παρουσιάζεται το ευρύτερο πρόβλημα, αυτό της ανάθεσης πόρων στα ετερογενή δίκτυα, αναλύεται ο τρόπος που προσεγγίζεται από την παρούσα εργασία, πώς αυτό συζητείται στην σύγχρονη βιβλιογραφία και τι λύσεις έχουν προταθεί έως τώρα. Στο τρίτο κεφάλαιο, παρουσιάζεται η λύση που προτείνεται, αναλύεται ο αλγόριθμος που επιλέχθηκε στα πλαίσια της εργασίας, τι προσπαθεί να επιλύσει, τα βήματα που ακολουθεί και το μαθηματικό μοντέλο της ενεργειακής απόδοσης που επιλέχθηκε. Στο τέταρτο κεφάλαιο, αναλύονται οι μεταβλητές και το περιβάλλον στο οποίο προσομοιώνεται ο αλγόριθμος, αντλούνται τα αποτελέσματα που φανερώνουν πώς επιλύεται το πρόβλημα, σε τι βαθμό και κατά πόσο αποτελεί καλύτερη λύση από τους υπάρχοντες στη βιβλιογραφία. Τέλος, η εργασία ολοκληρώνεται με τα συμπεράσματα που α-

Κεφάλαιο 1

ντλούνται από την έρευνα, καθώς επίσης αναφέρονται προτάσεις βελτίωσης για την έκβαση καλύτερων αποτελεσμάτων μέσω άλλων τεχνικών επίλυσης και την κάλυψη περιπτώσεων που δεν εξετάζονται στην παρούσα εργασία.

1.11 Επίλογος

Στο κεφάλαιο αυτό, έγινε μία εισαγωγή στις γενιές δικτύων έως το σήμερα, αναλύθηκαν τα δίκτυα έκτης γενιάς, οι τεχνολογίες, οι καινοτομίες, οι δείκτες επιδόσεών τους και οι προκλήσεις που αντιμετωπίζουν. Ακόμη, παρουσιάστηκε η δομή της εργασίας και το πρόβλημα στο οποίο εστιάζει.

Κεφάλαιο 2ο: Πρόβλημα υπό διερεύνηση και παρούσα βιβλιογραφία

2.1 Εισαγωγή

Σε αυτό το κεφάλαιο αναλύεται το πρόβλημα που εξετάζει η εργασία και συγκρίνονται οι ήδη υπάρχουσες βιβλιογραφικές αναφορές σε αυτό.

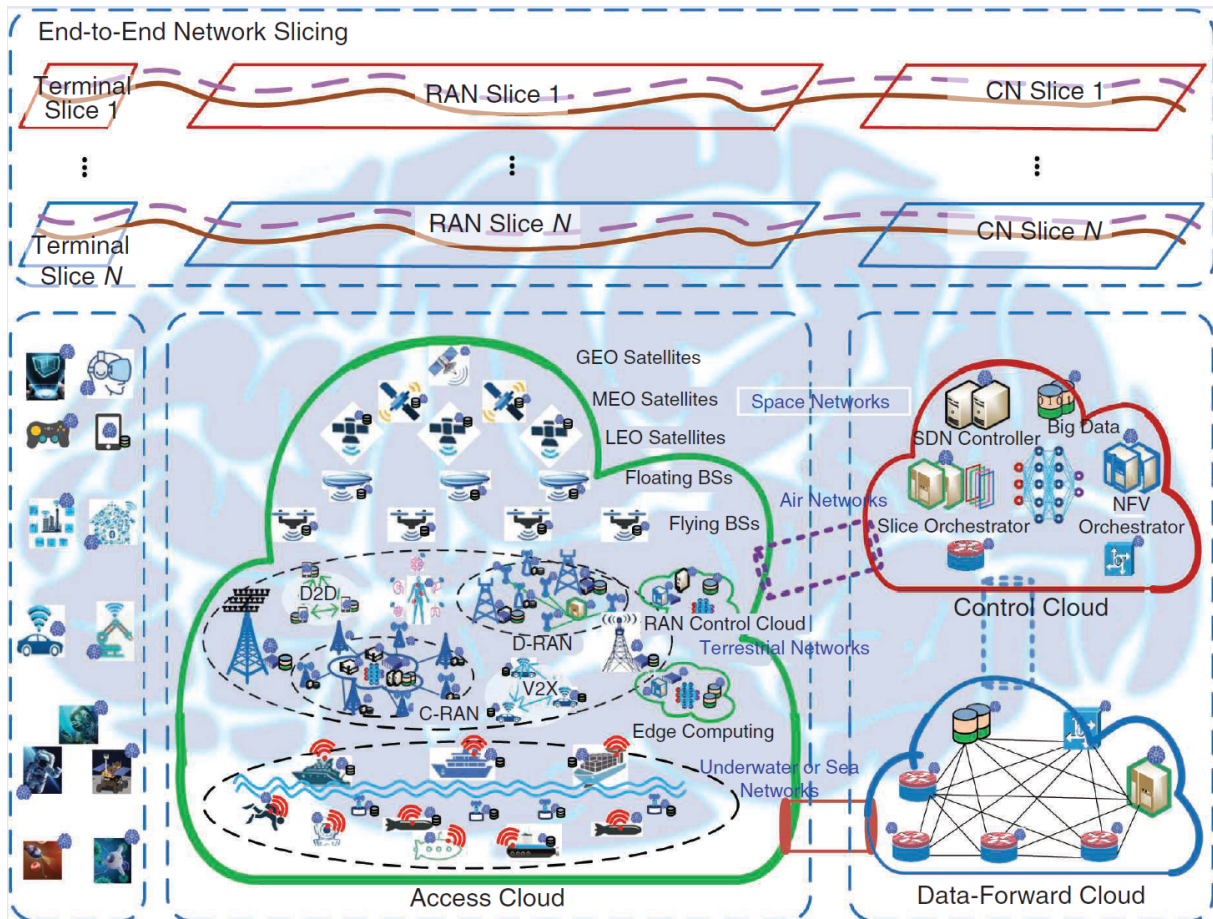
2.2 Ανάλυση προβλήματος: Ανάθεση πόρων στα ετερογενή δίκτυα

Στα προηγούμενα κεφάλαια, εξετάστηκαν εκτενώς οι δυνατότητες των δικτύων 6ης γενιάς. Όμως, με κάθε ευκαιρία παρουσιάζονται και οι αντίστοιχες δυσκολίες. Στην παρούσα πτυχιακή, μελετάται το πρόβλημα της από κοινού κατανομής πόρων (resource allocation) και ανάθεσης χρηστών (user association) και το πώς αυτά μπορούν να επιτευχθούν με τον βέλτιστο δυνατό τρόπο ώστε να υποστηρίξουν τον μεγάλο όγκο δεδομένων που μπορούν να μεταφέρουν τα δίκτυα 6ης γενιάς, γρήγορα και με την καλύτερη ενεργειακή απόδοση.

Το user association, ορίζει ένα σύνολο κανόνων για την ανάθεση χρηστών στα διαφορετικά BS που είναι διαθέσιμα στο σύστημα. Η απόφαση του να συσχετιστεί ένας χρήστης με ένα BS θα επηρεάσει την ρυθμιστική του συγκεκριμένου χρήστη, καθώς και τη διεκπεραίωση των άλλων χρηστών που σχετίζονται με αυτό το BS [55]. Το πρόβλημα συσχέτισης χρηστών στα δίκτυα κινητής τηλεφωνίας είναι ένα κρίσιμο ζήτημα που σχετίζεται με τον τρόπο με τον οποίο οι κινητές συσκευές (όπως smartphone, tablet, συσκευές IoT κ.λπ.) συνδέονται και διαχειρίζονται από διαφορετικές κυψέλες δικτύου, σταθμούς βάσης ή σημεία πρόσβασης εντός της υποδομής δικτύου. Είναι μια κρίσιμη πτυχή της διαχείρισης και της βελτιστοποίησης του δικτύου και περιλαμβάνει τον προσδιορισμό σε ποια κυψέλη ή σημείο πρόσβασης θα πρέπει να συνδεθεί μια συσκευή χρήστη ανά πάσα στιγμή.

Με τον όρο ετερογενή δίκτυα (Heterogeneous Networks), αναφερόμαστε στα δίκτυα που συνδέουν υπολογιστές και συσκευές με διαφορετική αρχιτεκτονική, λειτουργικά συστήματα και πρωτόκολλα επικοινωνίας [57]. Γεγονός το οποίο χαρακτηρίζει τα δίκτυα 6ης γενιάς, αφού αναμένεται να συνδέσουν περισσότερες συσκευές στο διαδίκτυο, οι οποίες θα επικοινωνούν διαρκώς μεταξύ τους μέσα από μία πληθώρα πρωτοκόλλων, ανταλλάσσοντας διαρκώς πληροφορίες. Αυτό σημαίνει ότι στις μεταξύ τους συνδέσεις, διαμοιράζονται περιεχόμενο διαφορετικού τύπου το οποίο πρέπει να αποστέλλεται σωστά και με συγκεκριμένη σειρά ώστε να επιτυγχάνεται ορθή μετάδοση χωρίς να αλλοιώνεται το μήνυμα, η λεγόμενη ποιότητα υπηρεσιών (QoS).

Η κατανομή πόρων στο πλαίσιο των δικτύων επικοινωνίας αναφέρεται στη διαδικασία εκχώρησης και διαχείρισης πόρων δικτύου, όπως το εύρος ζώνης, η ισχύς και οι υπολογιστικοί πόροι, σε διαφορετικούς χρήστες, συσκευές ή εφαρμογές. Διαδραματίζει κρίσιμο ρόλο στη διασφάλιση αποτελεσματικής και δίκαιης χρήσης των πόρων του δικτύου, ενώ πληροί τις απαιτήσεις ποιότητας υπηρεσίας (QoS) διάφορων χρηστών και εφαρμογών. Συνεπώς, τα δεδομένα που καταφθάνουν σε κάθε κόμβο, πρέπει να περνάνε από μία σειρά αξιολόγησης ώστε να απασχολούν τους πόρους του κόμβου με τέτοιο τρόπο που να μην υποβαθμίζει τις επιδόσεις του δικτύου. Να καταλαμβάνουν μόνο τον χρόνο και τους πόρους που τους αντιστοιχούν ανάλογα με την κρισιμότητά τους. Τα δίκτυα 6G, αναμένεται να έχουν μία τοπολογία



Σχήμα 2.1: Παράδειγμα συνδέσεων ενός ετερογενούς δικτύου 6G [56].

που μοιάζει με αυτή στο Σχήμα 2.1, έχοντας μεγάλη ετερογένεια στις συνδέσεις και στο δεδομένα που μεταφέρονται. Η κατανομή πόρων περιλαμβάνει διάφορους τύπους πόρων:

- **Φάσμα:** Εκχώρηση ζωνών ή καναλιών συχνοτήτων σε διαφορετικούς χρήστες ή υπηρεσίες.
- **Χρόνος:** Κατανομή χρονοθυρίδων ή πλαισίων για επικοινωνία, ιδιαίτερα σε συστήματα πολλαπλής πρόσβασης με διαίρεση χρόνου (TDMA).
- **Ισχύς:** Διαχείριση της ισχύος εκπομπής των συσκευών για τη βελτιστοποίηση της ποιότητας του σήματος και της ενεργειακής απόδοσης.
- **Ρυθμός δεδομένων:** Κατανομή ρυθμών δεδομένων ή σχημάτων διαμόρφωσης με βάση τις απαιτήσεις των χρηστών και τις συνθήκες του καναλιού.
- **Πόροι επεξεργασίας:** Κατανομή υπολογιστικών πόρων (π.χ. κύκλοι CPU, μνήμη) για επεξεργασία δεδομένων σε περιβάλλοντα υπολογιστών αιχμής ή υπολογιστικού νέφους.

Το πρόβλημα συναντάται ήδη από τις παλαιότερες γενιές δικτύων και προτείνεται η επίλυσή του σε πολλές βιβλιογραφικές έρευνες όπως για παράδειγμα στις [58], [59], [60], [61], όπου μελετάνε διάφορους στόχους βελτιστοποίησης, όπως ο συντονισμός παρεμβολών (interference coordination), η κατανομή πόρων, η εξισορρόπηση φορτίου, η συσχέτιση χρηστών και η χρησιμότητα απόδοσης. Ακόμη, οι λύσεις που

προτείνουν, επικεντρώνονται και στην επίτευξη βέλτιστων ορίων απόδοσης χρησιμοποιώντας τεχνικές βελτιστοποίησης με χαμηλή υπολογιστική πολυπλοκότητα.

Ειδικότερα για τα δίκτυα 6ης γενιάς, τα οποία αναμένεται να εξυπηρετούν αυξημένο όγκο δεδομένων δημιουργώντας μεγαλύτερη κίνηση στο δίκτυο ενώ ταυτόχρονα μεταφέρουν πληροφορίες κρίσιμων εφαρμογών, πρέπει η διαχείριση της κίνησης να γίνεται με τον βέλτιστο δυνατό τρόπο, με ταχύτητα και αξιοπιστία. Επομένως, πρωτίστως μας ενδιαφέρει η δομή του δικτύου, ώστε κάθε κόμβος να μπορεί να εξυπηρετήσει τους περισσότερους χρήστες, να δίνεται προτεραιότητα με έξυπνο τρόπο αναγνωρίζοντας τον τύπο των δεδομένων που χρειάζεται να αποσταλούν, η διαδρομή που θα ακολουθούν τα δεδομένα να είναι η συντομότερη ώστε να επιτυγχάνεται η αμεσότητα και η ταχύτητα και όλα αυτά, με την λιγότερη δυνατή κατανάλωση ενέργειας.

Για την επίλυση των προβλημάτων καλύτερης κατανομής των πόρων (Resource Allocation), χρειάζεται να εφαρμοστούν αρχιτεκτονικές διαχείρισης της κίνησης αλλά και του δικτύου σαν σύνολο, όπως το User Association (UA) για να οριστούν τους κόμβους στους οποίους θα συνδέονται οι χρήστες, το Network Function Virtualization (NFV) για να διαχωριστούν οι λειτουργίες του δικτυακού εξοπλισμού και να απελευθερωθεί το κομμάτι του hardware το οποίο επιβαρύνεται με τους υπολογισμούς που καλείται να εκτελέσει και ταυτόχρονα να γίνεται σωστή δρομολόγηση της κίνησης (Traffic Routing) για να βρεθεί η συντομότερη διαδρομή μεταξύ των κόμβων έως ότου να φτάσει η μεταδιδόμενη κίνηση στον παραλήπτη, χωρίς διακοπές αλλά και χωρίς τον κίνδυνο να μην εξυπηρετηθεί ποτέ από κάποιο κόμβο [33]. Κατά βάση, οι δικτυακοί πάροχοι υιοθετούν εμπορικό hardware εξοπλισμό για να προσφέρουν τις υπηρεσίες τους (middle-boxes).

Όμως, ο εξοπλισμός αυτός τους επιβαρύνει με σημαντικό κόστος καθώς και με επιπλέον λειτουργικό κόστος και συντήρησης, με αποτέλεσμα να εγκαθίστανται μόνο συγκεκριμένος αριθμός συσκευών. Το NFV έχει μετατρέψει πολλές από τις hardware-based λειτουργίες ενός δικτύου (πχ NAT, firewalls, load balancing) σε εικονικές λειτουργίες VNF (Virtual Network Functions), οι οποίες μπορούν να εφαρμοστούν σε μία υποδομή χωρίς να απαιτείται να υπάρχουν ιδιαίτερες επιδόσεις από το υλικό μέρος. Στον Πίνακα 2.1, αναλύονται μερικά από τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα που προσφέρει το NFV.

Πλεονεκτήματα	Μειονεκτήματα
<p>Ευελιξία: Το NFV επιτρέπει την ταχεία ανάπτυξη και κλιμάκωση των λειτουργιών του δικτύου, επιτρέποντας στους παρόχους κινητής τηλεφωνίας να ανταποκρίνονται γρήγορα στις μεταβαλλόμενες απαιτήσεις δικτύου. Μπορούν να εισαχθούν νέες υπηρεσίες και δυνατότητες χωρίς την ανάγκη φυσικών αλλαγών υλικού, μειώνοντας το χρόνο διάθεσης στην αγορά.</p>	<p>Επιβάρυνση απόδοσης: Η εικονικοποίηση ενέχει κάποια επιβάρυνση απόδοσης σε σύγκριση με τις αποκλειστικές λύσεις υλικού. Οι κρίσιμες λειτουργίες δικτύου, ειδικά εκείνες με αυστηρές απαιτήσεις καθυστέρησης, ενδέχεται να επηρεαστούν αρνητικά.</p>
<p>Εξοικονόμηση κόστους: Με την εικονικοποίηση των λειτουργιών δικτύου σε κοινόχρηστο υλικό, το NFV βοηθά τις εταιρείες κινητής τηλεφωνίας να μειώσουν τις κεφαλαιουχικές δαπάνες για εξειδικευμένο υλικό. Βελτιστοποιεί επίσης τη χρήση των πόρων, οδηγώντας σε χαμηλότερα λειτουργικά έξοδα, επομένως σε συνολική εξοικονόμηση κόστους.</p>	<p>Πολυπλοκότητα και προβλήματα ενοποίησης: Η ενσωμάτωση του NFV με την υπάρχουσα υποδομή δικτύου και συστήματα διαχείρισης μπορεί να είναι πολύπλοκη και χρονοβόρα. Μπορεί να απαιτήσει σημαντικές αλλαγές στην αρχιτεκτονική και τις λειτουργίες του δικτύου.</p>
<p>Επεκτασιμότητα: Το NFV επιτρέπει στα δίκτυα κινητής τηλεφωνίας να διαμορφώνουν τις υπηρεσίες τους με βάση τις απαιτήσεις κυκλοφορίας σε πραγματικό χρόνο. Αυτή η δυναμική επεκτασιμότητα διασφαλίζει ότι οι πόροι του δικτύου κατανέμονται αποτελεσματικά, αποφεύγοντας την υπερβολική παροχή ή την υποχρησιμοποίηση.</p>	<p>Κίνδυνοι ασφάλειας: Η κεντροποίηση και η εικονικοποίηση δημιουργούν πιθανές προκλήσεις ασφάλειας. Οι επιθέσεις σε μια συγκεκριμένη λειτουργία θα μπορούσαν να οδηγήσουν στην κατάρρευση και άλλων λειτουργιών εάν δεν απομονωθούν και προστατευθούν επαρκώς.</p>
<p>Καινοτομία υπηρεσιών: Οι εικονικές λειτουργίες δικτύου βασίζονται σε λογισμικό, διευκολύνοντας την εισαγωγή και τη δοκιμή νέων υπηρεσιών και εφαρμογών. Αυτό ενισχύει την καινοτομία, ενθαρρύνει τη διαφοροποίηση των υπηρεσιών, με αποτέλεσμα την καλύτερη εμπειρία για τον χρήστη.</p>	<p>Σταθερότητα και αξιοπιστία δικτύου: Η εισαγωγή νέων τεχνολογιών και εικονικοποιημένων στοιχείων μπορεί να δημιουργήσει προκλήσεις για τη σταθερότητα και την αξιοπιστία του δικτύου κάτι που απαιτεί προσεκτικό σχεδιασμό και δοκιμές για κάθε ενδεχόμενο σενάριο.</p>
<p>Κεντρική διαχείριση: Ο κεντρικός έλεγχος απλοποιεί τη διαχείριση του δικτύου, βελτιώνει την αποδοτικότητα και διευκολύνει την αυτοματοποίηση.</p>	<p>Διαλειτουργικότητα και πρότυπα: Η υιοθέτηση του NFV έχει οδηγήσει σε λύσεις πολλαπλών προμηθευτών, οι οποίες ενδέχεται να μην είναι πλήρως διαλειτουργικές. Η έλλειψη τυποποιημένων διεπαφών και πρωτοκόλλων μπορεί να έχει ως αποτέλεσμα το κλείδωμα του προμηθευτή (vendor lock) και να εμποδίσει την απρόσκοπτη ενσωμάτωση διαφορετικών στοιχείων NFV.</p>

Πίνακας 2.1: Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα του NFV [62].

Επομένως, μία real-time ανάθεση πόρων θα πρέπει να ικανοποιεί όλες τις τεχνολογίες με τα πλεονεκτήματα αλλά και τους περιορισμούς που αυτά επιφέρουν. Ταυτόχρονα να λαμβάνονται υπόψιν όλοι οι τύποι των πόρων. Οι υπολογιστικοί (computational) στους οποίους λαμβάνουν χώρα όλες οι πράξεις για την ομαλή ροή της κίνησης, επικοινωνιακοί (communication) που περιέχουν τα πακέτα φωνής και δεδομένων που μετακινούνται και η χωρητικότητα (storage) που αφορά το caching το οποίο βοηθά τους χρήστες να μπορούν να ανακτούν άμεσα ένα περιεχόμενο το οποίο χρειάζονται συχνά χωρίς να γίνεται εκ νέου αίτημα κάθε φορά από τον απομακρυσμένο server. Για την χωρητικότητα ισχύουν οι ίδιες προϋποθέσεις όπως για τους υπολογιστικούς πόρους. Εν συνεχεία, πρέπει να υπάρχει ομαλή ροή της κίνησης από την πηγή μέχρι τον τελικό χρήστη/user equipment, ικανοποιώντας στην πορεία τους περιορισμούς καθυστέρησης που υπαγορεύει κάθε τύπος δεδομένων. Παράλληλα, γίνεται προσπάθεια για την καλύτερη δυνατή εξοικονόμηση χρηματικών αλλά και ενεργειακών πόρων. Και τέλος, να βρεθεί η σωστή σειρά με την οποία θα εκτελεστούν το user association, η σειρά του VNF να αντιστοιχεί με αυτή που ορίζει το SFC Chaining και το traffic routing.

2.3 Σύγχρονες βιβλιογραφικές αναφορές

Αναζητώντας σχετικές έρευνες στη βιβλιογραφία οι οποίες να αφορούν την από κοινού μελέτη του user association, την τοποθέτηση του VNF και το traffic routing, γίνεται αντιληπτό πως η πλειονότητα των εργασιών επικεντρώνονται σε συγκεκριμένες υλοποιήσεις, εξαιρώντας κάποιους σημαντικούς παράγοντες με αποτέλεσμα να μην καλύπτουν επαρκώς όλες τις απαιτήσεις που αναφέρθηκαν στο προηγούμενο κεφάλαιο. Παρακάτω παρατίθενται εν συντομία το περιεχόμενο μερικών αξιόλογων εργασιών που αναφέρονται στην ίδια θεματολογία. Το τι εξετάζει κάθε έρευνα, αναπαριστάται συνοπτικά στον Πίνακα 2.2.

Άρθρο	Συσχέτιση Χρηστών	Δρομολόγηση Κίνησης	Τοποθέτηση του VNF	Ενεργειακή Αποδοτικότητα
[63]	-	✓	✓	-
[64]	-	-	✓	-
[65]	-	✓	✓	-
[66]	-	✓	✓	-
[67]	-	-	✓	✓
[68]	-	✓	✓	✓
[69]	-	✓	✓	-
[70]	✓	✓	✓	✓

Πίνακας 2.2: Τομείς που εξετάζει κάθε άρθρο της βιβλιογραφίας

Συγκεκριμένα, το [63] μελετά το πρόβλημα δρομολόγησης για τα SFC αιτήματα εξετάζοντας από κοινού την δυναμική τοποθέτηση του VNF και τους περιορισμούς QoS σε NFV-enabled SDN. Αρχικά ορίζονται τα προβλήματα δρομολόγησης με και χωρίς τους περιορισμούς καθυστέρησης E2E (από άκρο σε άκρο) και το packet loss rate. Έπειτα ορίζεται το κόστος δρομολόγησης το οποίο υπολογίζεται με βάση τους πόρους της CPU στους κόμβους, το bandwidth των ζεύξεων, τον πίνακα ροής στα switch και το VNF. Προκειμένου να ελαχιστοποιηθεί το κόστος δρομολόγησης προτείνεται μια γενική δομή βελτιστοποίησης

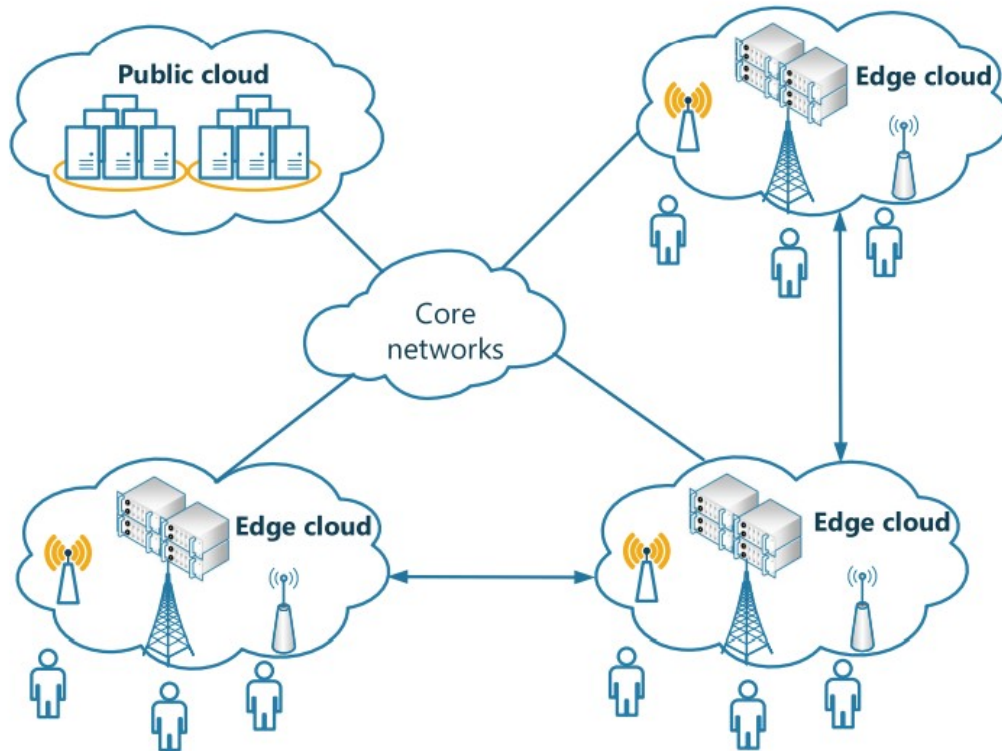
και γίνεται αποτελεσματικό VNF placement με αλγόριθμους δυναμικής τοποθέτησης και δρομολόγησης και ειδικότερα χρησιμοποιείται η μέθοδος Lagrange.

Στο [64] η εργασία μελέτησε το πρόβλημα για υπηρεσίες δικτύου που παρουσιάζουν ιδιαίτερη ευαισθησία στους χρόνους καθυστέρησης, καθώς έχουν σημαντικό αντίκτυπο στις προθεσμίες εξυπηρέτησης. Ενώ η επαναχρησιμοποίηση ήδη υπάρχοντων VNF μπορεί να μειώσει το κόστος, μπορεί να μην είναι κατάλληλο για υπηρεσίες με αυστηρές προθεσμίες εξυπηρέτησης. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι τα ήδη υπάρχοντα VNF μπορούν να μοιραστούν σε πολλές υπηρεσίες, γεγονός που μπορεί να οδηγήσει σε μεγάλους χρόνους αναμονής μέχρι να εξυπηρετηθούν όλες. Από την άλλη πλευρά, παρόλο που η τοποθέτηση νέων VNF μπορεί να προσφέρει έναν πιο αποτελεσματικό τρόπο για να ικανοποιηθούν οι αυστηρές προθεσμίες, επιβαρύνει την υλοποίηση με επιπλέον κόστος νέας εγκατάστασης. Επομένως, για να μεγιστοποιηθούν τα κέρδη ενώ παράλληλα εγγυάται η επίτευξη των αυστηρών προθεσμιών εξυπηρέτησης, οι αποφάσεις για την τοποθέτηση νέων VNF ή την επαναχρησιμοποίηση των ήδη υπάρχοντων, πρέπει να λαμβάνονται αποτελεσματικά και κατά περίπτωση. Για την αντιμετώπιση του ζητήματος, διατύπωσαν το πρόβλημά με στόχο τη μεγιστοποίηση των κερδών. Προτάθηκαν δύο ευρετικοί αλγόριθμοι και έγιναν προσομοιώσεις τόσο σε σεναρία εκτός σύνδεσης όσο και σε online σεναρία για να την αποτελεσματικότητα των προτεινόμενων αλγορίθμων έναντι των υπάρχοντων οι οποίοι επιλύουν χωριστά τα προβλήματα τοποθέτησης VNF.

Στο [65], τίθεται το πρόβλημα της real-time ενημέρωσης του δικτύου με στόχο την βελτιστοποίηση του SFC και της δρομολόγησης. Προτείνεται το πρόβλημα ενημέρωσης δικτύου με δυνατότητα NFV (DSNU: delay-satisfied NFV-enabled network update) και αναπτύσσεται ένας αλγόριθμος με που έχει ως παράγοντα την αναλογία μεταξύ του αποτελέσματος που προκύπτει από τον αλγόριθμο και του βέλτιστου αποτελέσματος. Επιπροσθέτως, αναπτύχθηκε ένας αλγόριθμος για την μείωση της περαιτέρω καθυστέρησης κάνοντας τον προγραμματισμό των ενημερώσεων.

Στο [66] μελετάται το πρόβλημα της από κοινού βέλτιστης τοποθέτησης του SFC και της δρομολόγησης, με στόχο την οικονομική αποδοτικότητα και έλεγχο συμφόρησης στο VNF. Προτείνεται ένας προσεγγιστικός αλγόριθμος για την επίλυση του προβλήματος εκτός σύνδεσης με αργές διακυμάνσεις ζήτησης. Για το online σεναριο, με τις γρήγορες διακυμάνσεις ζήτησης, προτείνεται ένας άλλος αλγόριθμος που μπορεί να χειριστεί τις διαφορετικές μετακινήσεις στο VNF, επιτυγχάνοντας συγκρίσιμες επιδόσεις με τη βέλτιστη λύση εκτός σύνδεσης.

Στο [67], μελετάται η από κοινού βελτιστοποίηση της τοποθέτησης του VNF και της δρομολόγησης της κίνησης, με στόχο την ενεργειακή απόδοση σε δίκτυα τηλεπικοινωνιών. Αρχικά παρουσιάζεται το μοντέλο κατανάλωσης ενέργειας των διακομιστών (servers) και των φυσικών συνδέσμων (physical links) και στη συνέχεια διατυπώνεται το πρόβλημα ως μοντέλο ILP (Integer Linear Programming). Ο Ακέραιος Γραμμικός Προγραμματισμός (ILP) είναι μια μαθηματική τεχνική βελτιστοποίησης που χρησιμοποιείται για την επίλυση προβλημάτων στα οποία ο στόχος είναι να βρεθεί το καλύτερο δυνατό αποτέλεσμα από ένα σύνολο επιλογών, με την επιφύλαξη ορισμένων περιορισμών, όπου ορισμένες ή όλες οι μεταβλητές απόφασης απαιτείται να είναι ακέραιοι. (ολόκληροι αριθμοί). Είναι ένας συγκεκριμένος τύπος γραμμικού προγραμματισμού όπου οι μεταβλητές απόφασης περιορίζονται σε ακέραιες τιμές. Στη συνέχεια, προτείνεται ένας πολυωνυμικός αλγόριθμος χρησιμοποιώντας την τεχνική προσέγγισης Markov για την εύρεση της σχεδόν βέλτιστης λύσης.



Σχήμα 2.2: Σχηματική απεικόνιση του edge computing από το [69].

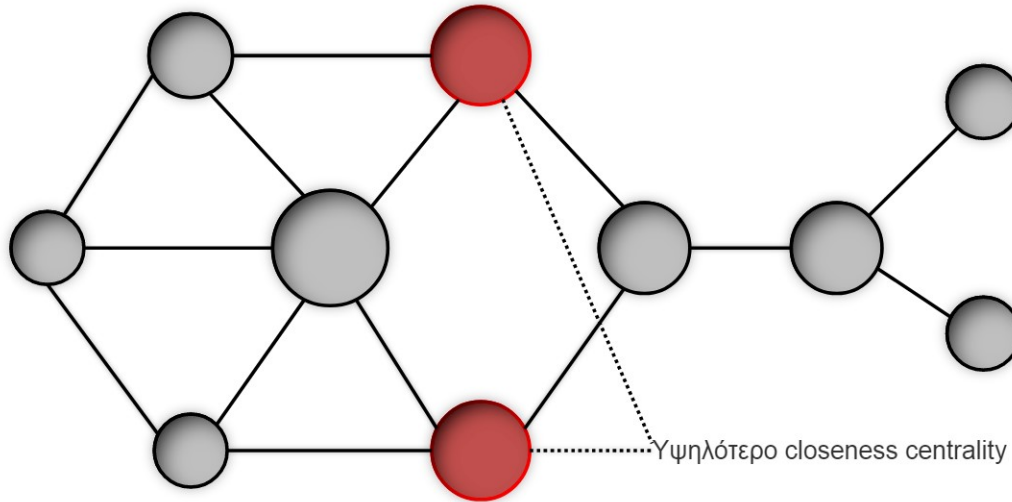
Στο [68] δίνεται έμφαση στα μοντέλα κατανάλωσης ενέργειας των μηχανημάτων (physical machines) και των μεταγωγών (switches) και στους περιορισμούς πόρων τους. Διατυπώνεται το πρόβλημα τοποθέτησης του VNF και της δρομολόγησης ως μοντέλο ILP. Προτείνεται ο Holu, ένας γρήγορος ευριστικός αλγόριθμος που επιλύει αποτελεσματικά το πρόβλημα σε online σενάρια, αποσυνθέτει το πρόβλημα σε δύο ξεχωριστά υποπροβλήματα και τα λύνει διαδοχικά. Ο Holu αποτελεί έναν από τους αλγορίθμους με τον οποίο συγκρίνεται η προτεινόμενη λύση που υλοποιήθηκε και αναφέρεται περαιτέρω στην συνέχεια.

Στο [69], μελετάται το πρόβλημα τοποθέτησης του VNF και της δρομολόγησης στο cloud edge, μία τοπολογία που περιγράφεται στο Σχήμα 2.2. Η επίλυση δίνεται τοποθετώντας τα VNF που ζητήθηκαν από κάθε τελικό χρήστη στους κόμβους και βρίσκοντας διαδρομές μεταξύ κάθε γειτονικού ζεύγους VNF έτσι ώστε το μέγιστο φορτίο της ζεύξης να ελαχιστοποιείται και η συνολική καθυστέρηση διέλευσης να μην είναι μεγαλύτερη από την καθορισμένη τιμή.

Στο [70], μελετήθηκε το πρόβλημα της από κοινού τοποθέτησης VNF, του user association και της δρομολόγησης της κυκλοφορίας σε δίκτυα B5G με στόχο τη μεγιστοποίηση της ενεργειακής απόδοσης, διασφαλίζοντας παράλληλα υψηλό ποσοστό αποδοχής χρηστών, σε offline παραδείγματα. Για την αντιμετώπιση της πολυπλοκότητας του προβλήματος, προτάθηκε ένα ενεργειακά αποδοτικός ευρετικός αλγόριθμος με χαμηλότερη πολυπλοκότητα.

Οι αλγόριθμοι που επιλέχθηκαν για την σύγκριση με την προτεινόμενη λύση, προσεγγίζουν το ίδιο ζήτημα με διαφορετικές τακτικές. Μία από τις βασικές τους διαφορές αφορά την αρχιτεκτονική του δικτύου και πιο συγκεκριμένα τον παράγοντα που ονομάζουμε node centrality. Η εκτίμηση της σημαντικότητας που διαδραματίζει η τοποθεσία των κόμβων (nodes) σε ένα περίπλοκα δομημένο δίκτυο, αποτελεί βα-

σικό δίλημμα στην ερευνητική κοινότητα [71]. Είναι σημαντική η επιλογή της σωστής αρχιτεκτονικής καθώς σε αυτή βασίζονται η απόδοση και η αξιόπιστη λειτουργία του δικτύου.

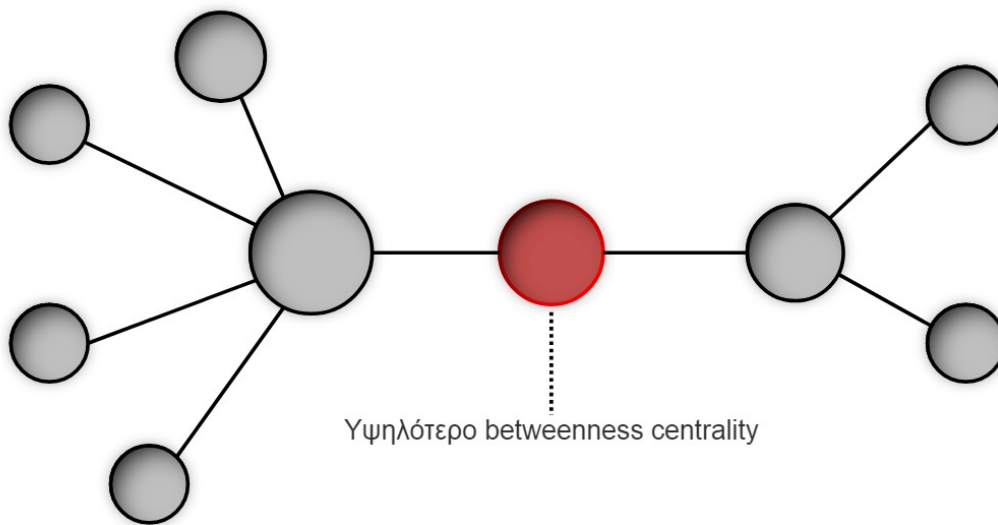


Σχήμα 2.3: Παράδειγμα κόμβου με το μεγαλύτερο closeness centrality [72].

Επομένως, αναφερόμαστε σε *se closeness* και *se betweenness centrality* τεχνικές, οι οποίες βασίζονται στην αναγνώριση και το μήκος της συντομότερης διαδρομής ανάμεσα στα nodes εντός του δικτύου. Η συντομότερη διαδρομή υπολογίζεται μειώνοντας τον αριθμό των ενδιάμεσων κόμβων και το μήκος της ορίζεται ως ο ελάχιστος αριθμός των συνδέσμων που ενώνουν τα nodes απευθείας ή όχι. Θεωρώντας ότι οι ενδιάμεσοι κόμβοι συμβάλλουν αρνητικά στο δίκτυο, αυξάνοντας την καθυστέρηση καθώς αυξάνουν τον χρόνο που χρειάζεται για να αλληλεπιδράσουν ο αποστολέας με τον παραλήπτη, η συντομότερη διαδρομή θα αποτελεί αυτή με τα λιγότερα ενδιάμεσα nodes. Πιο συγκεκριμένα, το *se closeness*, όπως φαίνεται και στο Σχήμα 2.3 βασίζεται στο μήκος των διαδρομών από ένα node προς όλα τα υπόλοιπα nodes εντός του δικτύου και ορίζεται ως το αντίστροφο συνολικό μήκος. Το *se betweenness* βασίζεται στην αναγνώριση της συντομότερης διαδρομής και υπολογίζει τον αριθμό των διαδρομών με τις οποίες συνδέεται κάθε κόμβος [73]. Ένας κόμβος με υψηλό *se betweenness centrality* απεικονίζεται στο Σχήμα 2.4.

Σύμφωνα με το [74], ο αλγόριθμος BCSP λειτουργεί βασιζόμενος στο *se betweenness centrality* για την τοποθέτηση του VNF και την εύρεση της συντομότερης διαδρομής για το routing. Πρώτα υπολογίζει τις τιμές του *se betweenness* για κάθε κόμβο και έπειτα για κάθε αίτημα που δέχεται, υπολογίζει την συντομότερη διαδρομή μεταξύ του αποστολέα και του παραλήπτη, χρησιμοποιώντας τον αλγόριθμο Dijkstra και ορίζοντας σαν παράμετρο του κόστους την καθυστέρηση. Έπειτα ο αλγόριθμος προσπαθεί να τοποθετήσει τα απαιτούμενα VNF στα nodes με την υψηλότερη τιμή του *se betweenness* με βάση την συντομότερη διαδρομή. Υψηλότερος αριθμός του *se betweenness*, σημαίνει περισσότερες σύντομες διαδρομές οι οποίες διαπερνούν από ένα node, επομένως υψηλότερη πιθανότητα για την επαναχρησιμοποίηση ενός VNF σε μελλοντική απαίτηση, γεγονός που συμβάλλει θετικά στην ενεργειακή απόδοση.

Από την άλλη, στο [68] ο αλγόριθμος Holu λειτουργεί βασιζόμενος στο *se closeness centrality*. Πρώτα



Σχήμα 2.4: Παράδειγμα κόμβου με το μεγαλύτερο betweenness centrality [72] .

εκτελεί την τοποθέτηση του VNF στα nodes με το υψηλότερο closeness centrality και έπειτα επιλέγει την συντομότερη διαδρομή για την δρομολόγηση, με γνώμονα την λιγότερη κατανάλωση ενέργειας, ικανοποιώντας ταυτόχρονα όλους τους περιορισμούς των E2E καθυστερήσεων.

Η λύση που προτείνεται στην παρούσα εργασία, εμπεριέχει στοιχεία που δεν καλύπτει ταυτόχρονα καμία από τις λύσεις της βιβλιογραφίας, όπως την online από κοινού τοποθέτηση του VNF και του routing σε περιβάλλοντα MEC/cloud-enabled ετερογενών δικτύων, συμπεριλαμβάνει τα AN, τις ασύρματες X-haul ζεύξεις, ενώ ταυτόχρονα στοχεύει για την ελαχιστοποίηση της κατανάλωσης ενέργειας.

2.4 Επίλογος

Στο κεφάλαιο αυτό, αναλύθηκε το πρόβλημα που διερευνάται καθώς και τι πληροφορίες αντλήθηκαν από την υπάρχουσα βιβλιογραφία ώστε να εξελιχθεί περαιτέρω η παρούσα έρευνα.

Κεφάλαιο 3ο: Μεθοδολογία και ανάπτυξη λύσης

3.1 Εισαγωγή

Το παρακάτω κεφάλαιο αναφέρεται στην λύση που φαίνεται να ανταποκρίνεται καλύτερα στο υπό εξέταση πρόβλημα, γίνεται η ανάλυση του αλγορίθμου που επιλέχθηκε καθώς και η επεξήγηση του μοντέλου για τον υπολογισμό ισχύος.

3.2 Μοντέλο υπολογισμού της ενεργειακής απόδοσης

Για τον υπολογισμό της ενεργειακής απόδοσης του αλγορίθμου χρησιμοποιήθηκε το παρακάτω system model. Το πλαίσιο στο οποίο εστιάζουμε, αφορά ένα ετερογενές δίκτυο 6G (HetNet), όπως αυτό στο Σχήμα 3.1, που αποτελείται από ένα σύνολο gNodeBs (gNBs) που επικαλύπτονται με Small Cells (SCs), που συμβολίζονται με E και S , αντίστοιχα, όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα. Τα gNBs και SC, αναφέρονται από κοινού ως σταθμοί βάσης (BS), διασυνδέονται είτε με ασύρματες συνδέσεις X-haul, είτε με ενσύρματες/οπτικές συνδέσεις χρησιμοποιώντας μεταγωγείς/δρομολογητές. Επίσης θέτουμε το σύνολο κόμβων με υπολογιστικούς πόρους που συμβολίζονται ως Vc όπου γίνονται οι Λειτουργίες Εικονικού Δικτύου (VNF), όπου ο κόμβος $y \in Vc$ έχει ένα ποσό c_y υπολογιστικών πόρων (το οποίο μετράμε σε Λειτουργίες κινητής υποδιαστολής Giga ανά δευτερόλεπτο, GFLOPS). Παρακάτω αναλύονται οι υπολογισμοί για κάθε περίπτωση χρήσης.

3.2.1 Access Network

Για τη συνολική κατανάλωση ενέργειας κάθε σταθμού βάσης (BS) i (gNB ή SC), δηλ. για το μοντέλο ισχύος που χρησιμοποιείται για τις συνδέσεις δικτύου πρόσβασης (Access Network), λαμβάνεται υπόψη η γραμμική προσέγγιση (4.14) από το [75], για την οποία η σχέση μεταξύ της μεταβλητής ισχύος εξόδου $p_{out_i}^{AN}$ και η κατανάλωση ισχύος των BS i είναι σχεδόν γραμμικές ως εξής

$$p_i^{AN} = N_{TRX_i}^{AN} (p_{0i}^{AN} + \Delta_{p_i}^{AN} p_{out_i}^{AN}), \forall i \in E \cup S, \quad (4.1)$$

όπου το $N_{TRX_i}^{AN}$ είναι ο αριθμός της αλυσίδας πομποδεκτών των BS i , και το p_{0i}^{AN} αντιπροσωπεύει την μικρότερη μη μηδενική τιμή της ισχύος ενός AN πομποδέκτη του BS i . $\Delta_{p_i}^{AN}$ είναι η κλίση της κατανάλωσης ισχύος που εξαρτάται από το φορτίο, η οποία παίρνει διαφορετικές τιμές με βάση τον τύπο της κεραίας που χρησιμοποιείται. Το $p_{out_i}^{AN}$ αντιπροσωπεύει την κατανάλωση ενέργειας του πομποδέκτη για τα AN μεταξύ του BS i και όλων των συσχετισμένων UE, το οποίο δίνεται από την παρακάτω σχέση:

$$p_{out_i}^{AN} = p_{max_i}^{AN} / c_{i_{max}} \sum_{u \in U} (x_{(i,u)} c_{(i,u)}), \quad (4.2)$$

όπου το $p_{max_i}^{AN}$ είναι η μέγιστη ισχύς εκπομπής των AN του BS i . Η παράμετρος $c_{(i,u)}$ αναφέρεται στον

αριθμό των μπλοκ φυσικών πόρων (PRB) που έχουν εκχωρηθεί σε κάθε χρήστη u όταν συσχετίζονται με το BS i . Αυτή η τιμή εξαρτάται από τη ζήτηση των UE και τη διαθεσιμότητα των BS, η οποία υπολογίζεται:

$$(x_{(i,u)} c_{(i,u)}) = \left[\frac{r_u}{BW_{PRB} SE_{(i,u)}} \right], \quad (4.3)$$

όπου r_u είναι ο ρυθμός που απαιτεί ο UE u , το BW_{PRB} υποδηλώνει το εύρος ζώνης ενός PRB. Τότε, $SE_{(i,u)}$ είναι η μέγιστη εφικτή απόδοση φάσματος με αποτελεσματικό $SINR_{(i,u)}$, όπως φαίνεται παρακάτω:

$$SE_{(i,u)} = \min(N_{TX_i}, N_{RX_u}) \log_2 \left(1 + \frac{N_{RX_u} SINR_{(i,u)}}{\min(N_{TX_i}, N_{RX_u})} \right), \quad (4.4)$$

με τα N_{TX_i}, N_{RX_u} να αντιπροσωπεύουν τον αριθμό των κεραιών εκπομπής και λήψης των BS i και UE u , αντίστοιχα. Τέλος, το $x_{(i,u)}^u$ είναι το διάνυσμα σύνδεσης (σε αυτήν την περίπτωση σύνδεσης AN) και ισούται με 1, όταν το UE u συσχετίζεται με το BS i , διαφορετικά παίρνει την τιμή 0.

Το SNR που λαμβάνεται από το UE u από το BS i δίνεται από την παρακάτω συνάρτηση:

$$SNR_{ui(dB)} = P_{isub(dBm)} + G_{T_{xi}(dB)} - L_{cb_i(dB)} - L_{p_{ui}(dB)} - L_{f_{ui}(dB)} - N_{th(dBm)} - NF_{(dB)}, \quad (4.5)$$

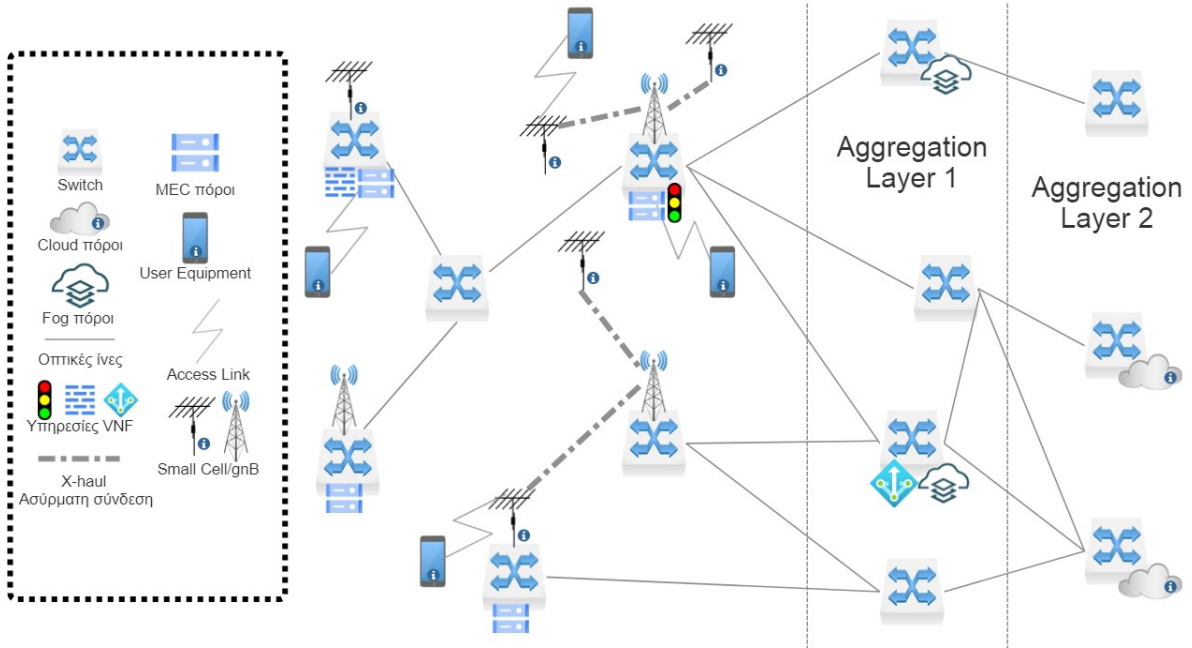
όπου $P_{isub} = 10 \log_{10}(P_{imax}/(12N_i N_{PRB_{i,max}}))$ είναι η ισχύς που κατανέμεται από το BS i σε κάθε υποπάρχο, με το P_{imax} να δηλώνει τη μέγιστη ισχύ εκπομπής του σε mW, το N_i δηλώνει τον αριθμό των κεραιών των BS i και το $N_{PRB_{i,max}}$ δηλώνει τον μέγιστο αριθμό PRB που μπορούν να εκχωρηθούν σε αυτό (θεωρώντας ότι 1 PRB ισούται με 12 υποπαρόχους στον τομέα συχνότητας και 0,5 ms στον τομέα του χρόνου). Η παράμετρος $G_{T_{xi}}$ αντιπροσωπεύει το κέρδος της κεραίας και το L_{cb_i} την απώλεια καλωδίου μεταξύ της ραδιοφωνικής ζεύξης RF και της κεραίας, ενώ το $L_{p_{ui}}$ μας δείχνει την απώλεια μεταξύ UE u και BS i , ενώ το $L_{f_{ui}}$ αφορά τις απώλειες που υπάρχουν λόγω της αργής εξασθένησης. Εν συνεχεία, το N_{th} αναφέρεται στον θερμικό θόρυβο και το NF στο θόρυβο του μέσου. Ως εκ τούτου, το SINR που λαμβάνεται από τον χρήστη u από το BS i μπορεί να εκφραστεί με την παρακάτω συνάρτηση:

$$SINR_{ui(dB)} = SNR_{ui(dB)} - 10 \log_{10} \left(\frac{I}{N} + 1 \right), \quad (4.6)$$

όπου το I αντιστοιχεί στην συνολική παρεμβολή (σε watt), που αντιμετωπίζει ο UE u από τα παρεμβαλλόμενα BS στον τομέα eNB, η οποία εξαρτάται από το εφαρμοσμένο σχήμα κατανομής της συχνότητας. Τέλος, το N υποδηλώνει τη συνολική ισχύ θορύβου (σε watt) που λαμβάνεται από το UE u . Επιπροσθέτως, πρέπει να ικανοποιείται και ο περιορισμός χωρητικότητας για το AN, όπως:

$$\sum_{u \in U} (x_{(i,u)}^u c_{(i,u)}) \leq c_{i,max}, \forall i \in E \cup S, \quad (4.7)$$

όπου $c_{i,max}$ είναι ο μέγιστος αριθμός των PRB του BS i .



Σχήμα 3.1: Παράδειγμα τοπολογίας ετερογενούς δικτύου.

3.2.2 X-haul συνδέσεις

- Ασύρματες X-Haul ζεύξεις

Μία παρόμοια τακτική ακολουθείται και για το μοντέλο ισχύος του BH όπου και πάλι, η ισχύς κάθε πομποδέκτη BH έχει δύο μέρη: ένα σταθερό ($p_{0(i,j)}^{BH}$) και ένα μεταβλητό το οποίο κλιμακώνεται ανάλογα με το συνολικό ρυθμό της σύνδεση BH. Η ισχύς όλων των συνδέσεων BH που εξέρχονται από το BS i δίνεται από την παρακάτω σχέση:

$$p_i^{BH} = \sum_{(i,j) \in LBL} N_{TRX_{i,j}}^{BH} (p_{0(i,j)}^{BH} + p_{out(i,j)}^{BH} \Delta_p^{BH}), \quad (4.8)$$

όπου παρόμοια και με την περίπτωση του μοντέλου του AN, το $N_{TRX_{i,j}}^{BH}$ είναι ο αριθμός των αλυσίδων πομποδέκτη των συνδέσεων (i, j) του BH, Δ_p^{BH} είναι η κλίση της κατανάλωσης ισχύος BH εξαρτώμενη από το φορτίο, $p_{0(i,j)}^{BH}$ είναι η μικρότερη μη μηδενική τιμή ισχύος και το $p_{out(i,j)}^{BH}$ είναι η ισχύς εξόδου ενός πομποδέκτη RF της ζεύξης BH (i, j) στο BS i . Έπειτα, έχουμε το $p_{max(i,j)}^{BH}$ όπου αντιστοιχεί στη μέγιστη ισχύ μετάδοσης της ζεύξης BH (i, j) στον BS i για το οποίο ισχύει:

$$0 \leq p_{out(i,j)}^{BH} \leq p_{max(i,j)}^{BH}. \quad (4.9)$$

Τέλος, το $p_{out(i,j)}^{BH}$ υπολογίζεται από την σχέση:

$$p_{out(i,j)}^{BH} = \left(2 \frac{\sum_{u \in U} x_{(i,j)}^u du}{BW_{(i,j)}} - 1 \right) \beta_{(i,j)}, \quad (4.10)$$

όπου το $BW_{(i,j)}$ αντιστοιχεί στο εύρος ζώνης της BH ζεύξης (i, j) και $\sum_{u \in U} x_{(i,j)}^u du$ είναι η συγκεντρωτική κίνηση που διέρχεται από αυτή. Επιπροσθέτως, η παράμετρος $\beta_{(i,j)}$ που μετράται σε Watt, υπολογίζεται αφαιρώντας από τις συνολικές απώλειες, τα κέρδη του πομπού και του δέκτη της ζεύξης BH (i, j) . Συγκεκριμένα, στην περίπτωση μίας ζεύξης mmWave το $\beta_{(i,j)}$ υπολογίζεται από την παρακάτω σχέση:

$$\begin{aligned} \beta_{(i,j)(dBm)} &= (L_{TX(i,j)} + L_{RX(i,j)} + PL_{(i,j)} + LM + NF)_{dB} \\ &+ N_{TH(dBm)} - G_{TX(i,j)(dB)} - G_{RX(i,j)(dB)}, \end{aligned} \quad (4.11)$$

όπου $L_{TX(i,j)}$, $L_{RX(i,j)}$ και $G_{TX(i,j)(dB)}$, $G_{RX(i,j)(dB)}$ είναι οι απώλειες και τα κέρδη κεραίας αντίστοιχα, της BH ζεύξης (i, j) . Η παράμετρος $PL_{(i,j)}$ αντιπροσωπεύει την απώλεια διαδρομής (path loss) της ζεύξης, LM είναι το χωρικό περιθώριο της ζεύξης, N_{TH} είναι ο θερμικός θόρυβος και NF είναι ο αριθμός θορύβου του δέκτη.

- Ενσύρματες X-Haul ζεύξεις

Για τις ενσύρματες συνδέσεις είτε απλές, είτε μέσω οπτικής, υποθέτουμε ότι κάθε μεταγωγέας (switch) n καταναλώνει ενέργεια ίση με:

$$P_n^{sw} = P_{idle}^{sw} \psi_n + P_{port} \sum_{m \in V_{sw}: (n,m) \in E_f} z_{n,m}, \quad (4.12)$$

όπου P_{idle}^{sw} είναι η ισχύς που καταναλώνει ο μεταγωγέας σε κατάσταση αδράνειας και το άθροισμα αντιστοιχεί στις ενεργές οπτικές συνδέσεις του. Το P_{port} αντιστοιχεί στην ισχύ που καταναλώνει κάθε ενεργή θύρα του switch. Η παράμετρος ψ_n είναι ίση με 1 σε περιπτώσεις όπου το switch έχει ενεργές συνδέσεις με κίνηση, σε άλλη περίπτωση ισούται με 0. Κατά τον ίδιο τρόπο γίνονται οι υπολογισμοί και για μία οπτική ζεύξη με την Boolean παράμετρο $z_{n,m}$ να υποδηλώνει εάν υπάρχει κίνηση στην ζεύξη από οποιαδήποτε κατεύθυνση [68].

- Υπολογιστικοί κόμβοι

Ορίζουμε ως F το σύνολο των διαθέσιμων VNF, όπου επιτρέπεται η ύπαρξη των ίδιων VNF υπηρεσιών αλλά σε διαφορετικούς κόμβους (βασισμένοι στην εκάστοτε κίνηση του δικτύου). Κάθε VNF $f \in F$ μεταφράζεται ως $f \triangleq (I_f, \pi_f, w_f, D_f)$, όπου το I_f δείχνει την χρηστικότητα του VNF, το $\pi_f > 0$ αντιστοιχεί στην χωρητικότητα της υπολογιστική ικανότητας του VNF και μετράται σε Mbps, το $w_f > 0$ είναι ο αριθμός των επεξεργαστικών πόρων που απαιτούνται για την λειτουργία του VNF και μετράται σε GFLOPS και το $D_f > 0$ αφορά την καθυστέρηση που προκύπτει σε ένα μεμονωμένο πακέτο δεδομένων κατά την επεξεργασία από το VNF. Με ξ_y δηλώνεται η Boolean

παράμετρος όπου μας δείχνει εάν ο υπολογιστικός κόμβος ψ τρέχει τα VNF που του έχουν ανατεθεί. Η κατανάλωση ισχύος από την CPU του κόμβου ψ υπολογίζεται:

$$P_{\psi}^{(CPU)} = P_{\psi}^{(CPU,i)} \xi_{\psi} + (P_{\psi}^{(CPU,m)} - P_{\psi}^{(CPU,i)}) U_{\psi}, \quad (4.13)$$

όπου $(P_{\psi}^{(CPU,m)}, P_{\psi}^{(CPU,i)})$ είναι η ισχύς στο μέγιστο και σε αδράνεια. Το U_{ψ} υποδηλώνει τον συντελεστή φορτίου της CPU και μας δίνεται από την συνάρτηση:

$$U_{\psi} \triangleq \sum_{f \in F} \frac{N_{f,\psi} W_f}{C_{\psi}}, \quad (4.14)$$

όπου το $N_{f,\psi}$ αντιστοιχεί στον αριθμό των ενεργών υπηρεσιών VNF f του κόμβου ψ και C_{ψ} είναι η μέγιστη χωρητικότητα του υπολογιστικού κόμβου.

3.3 Ανάλυση αλγορίθμου HERA

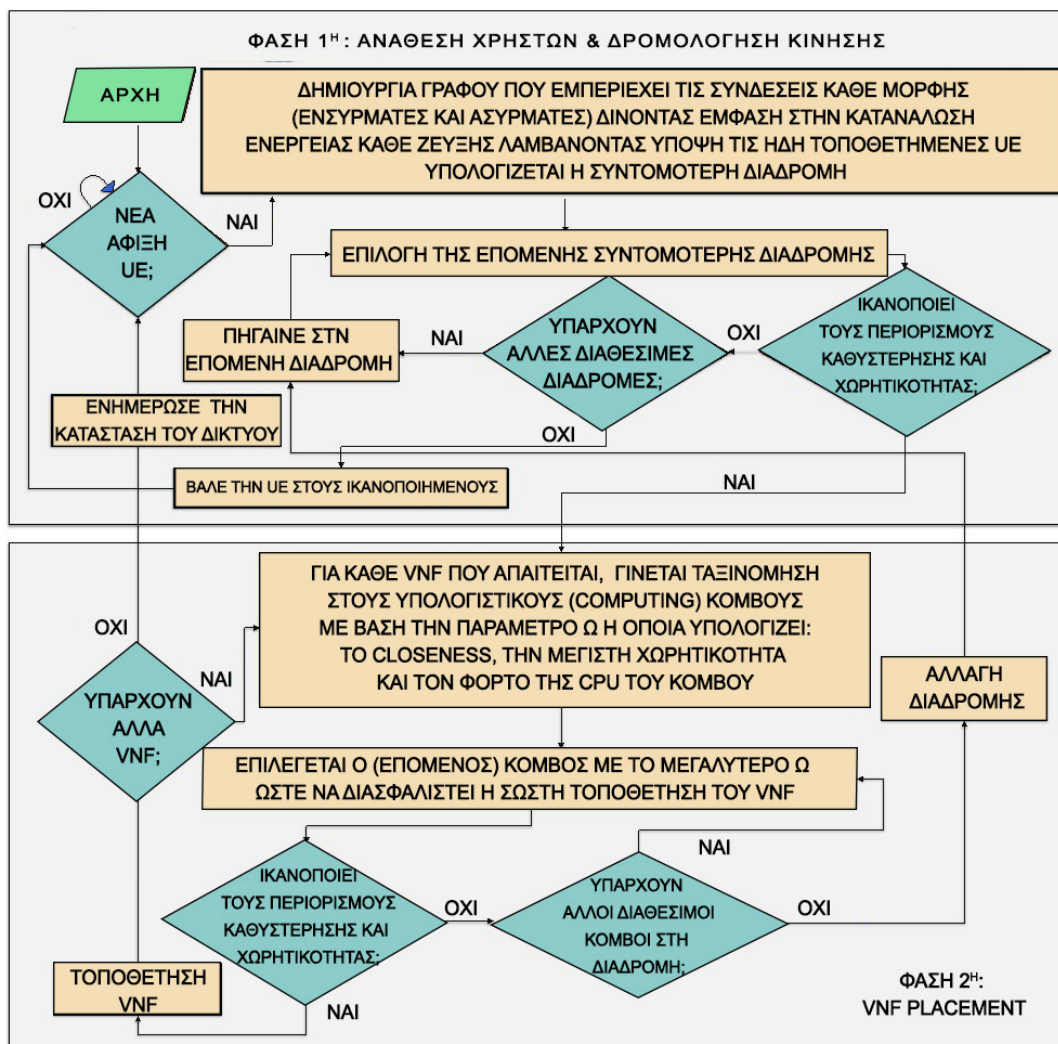
Ο αλγόριθμος που επιλέχθηκε προς ανάλυση και περαιτέρω επεξεργασία, επεκτείνει ουσιαστικά το State-of-the-Art (SoA) μελετώντας από κοινού τη συσχέτιση χρηστών (user association), τη δρομολόγηση κυκλοφορίας (traffic routing) και την τοποθέτηση VNF σε ένα Ετερογενές Δίκτυο (HetNet), που αποτελείται από gNB σταθμούς (συνδέσεις μεταξύ εξοπλισμού χρήστη και κεντρικού δικτύου) και SC (small cells) σε μία κατανεμημένη υποδομή δικτύου υπολογιστών (όπως Multi-Access Edge Computing (MEC), fog, cloud) και ενσωματώνει AN και ασύρματες συνδέσεις X-haul ενώ ταυτόχρονα υπολογίζει και τους αντίστοιχους περιορισμούς ισχύος και χωρητικότητας.

Ο προτεινόμενος αλγόριθμος ονομάστηκε HERA (Heuristic Algorithm) και αποτελεί μία εκτενέστερη και παραμετροποιημένη μορφή του αλγορίθμου που αναπτύσσεται στο [70] και έχει ως στόχο τη μεγιστοποίηση της ενεργειακής απόδοσης του δικτύου διασφαλίζοντας παράλληλα χαμηλή πιθανότητα αποκλεισμού των UE ενώ ταυτόχρονα ικανοποιεί τους παρακάτω περιορισμούς:

1. Κάθε χρήστης που καταφθάνει, πρέπει να αντιστοιχίζεται με ακριβώς ένα BS (base station).
2. Για κάθε BS: ο συνολικός αριθμός των αιτούμενων RB (resource block) πρέπει να είναι μικρότερος από τον αριθμό των διαθέσιμων χρηστών.
3. Κάθε VNF από ένα καινούριο αίτημα πρέπει να εξυπηρετηθεί από κάποιο κόμβο.
4. Για κάθε VNF πρέπει να υπάρχει επαρκής αριθμός instances, καθώς κάθε instance έχει συγκεκριμένο processing capacity.
5. Οι απαιτήσεις CPU για όλα τα VNF στον κόμβο πρέπει να είναι μικρότερες από το ποσό των υπολογιστικών πόρων του κόμβου.
6. Η σειρά που θα εκτελεστούν τα VNF πρέπει να είναι ακριβώς η ίδια με αυτή στο SFC.
7. Διατήρηση της ροής για κάθε SFC.

8. Κάθε ζεύξη δεν μπορεί να υποστηρίξει παραπάνω κίνηση από την μέγιστη χωρητικότητα που έχει.
9. Η καθυστέρηση E2E για κάθε SFC που ζητήθηκε πρέπει να είναι λιγότερη από το μέγιστο που μπορεί να υποστηρίξει ο χρήστης.
10. Δεν επιτρέπεται το migration. Οι πόροι που διατέθηκαν για προηγούμενα SFC, τα οποία ακόμα εκτελούνται, δεν επηρεάζονται και δεν μετακινούνται.

Ο HERA αποτελείται από δύο στάδια τα οποία απεικονίζονται και διαγραμματικά στο Σχήμα 3.2. Στο πρώτο στάδιο επιλέγεται η διαδρομή που θα ακολουθηθεί (δηλαδή το user association και το routing), ενώ στο δεύτερο στάδιο πραγματοποιείται η τοποθέτηση VNF, διασφαλίζοντας τη σωστή σειρά εξυπηρέτησης.



Σχήμα 3.2: Το διάγραμμα ροής του HERA.

Για να περιγράψουμε καλύτερα τις λειτουργίες του αλγορίθμου HERA, μπορούμε να τον χωρίσουμε στα εξής παρακάτω μέρη:

- Αρχικοποίηση:

Ο κώδικας ξεκινά ορίζοντας και αρχικοποιώντας διάφορες παραμέτρους που σχετίζονται με την τοπολογία του δικτύου, τις απαιτήσεις χρήστη, τα VNF, τους συνδέσμους κ.λπ. Ρυθμίζει δομές δεδομένων για τη διατήρηση πληροφοριών σχετικά με το δίκτυο, την τοποθέτηση VNF, τις συσχετίσεις συνδέσεων και τις ειδικές απαιτήσεις του χρήστη.

- Κύριος βρόγχος βελτιστοποίησης:

Ο κώδικας εισέρχεται σε έναν βρόγχο που επαναλαμβάνεται για πολλά σενάρια και στιγμιότυπα. Οι επαναλήψεις στοχεύουν στη βελτιστοποίηση της κατανομής πόρων υπό διαφορετικές συνθήκες. Για κάθε σενάριο και στιγμιότυπο, ο βρόγχος επεξεργάζεται το αίτημα SFC κάθε χρήστη και κατανέμει πόρους ανάλογα.

- Κατανομή πόρων για κάθε χρήστη:

Για το αίτημα SFC κάθε χρήστη, ο κώδικας εκτελεί τα ακόλουθα βήματα: Υπολογίζει το διαθέσιμο και το απαιτούμενο εύρος ζώνης (BW) για τη μετάδοση δεδομένων του χρήστη. Υπολογίζει την κατανάλωση ενέργειας για διάφορα στοιχεία δικτύου όπως μεταγωγείς, συνδέσμους και κόμβους επεξεργασίας (PMs). Αναλύει τη διαθεσιμότητα των πόρων επεξεργασίας (GFLOPS) σε κάθε PM και καθορίζει εάν τα VNF μπορούν να τοποθετηθούν ανάλογα. Επιλέγει την κατάλληλη διαδρομή για τη μετάδοση δεδομένων λαμβάνοντας υπόψη τους περιορισμούς χωρητικότητας των συνδέσμων. Τοποθετεί τα VNF σε PM για να χειριστεί το αίτημα του κάθε χρήστη. Ελέγχει εάν η επιλεγμένη διαδρομή ικανοποιεί τον περιορισμό καθυστέρησης του χρήστη. Ενημερώνει τις καταστάσεις στοιχείων δικτύου με βάση τις αποφάσεις κατανομής πόρων.

- Συνολικές μετρικές απόδοσης:

Ο κώδικας υπολογίζει διάφορες μετρικές απόδοσης, συμπεριλαμβανομένης της απόδοσης δικτύου (throughput), της κατανάλωσης ενέργειας και του αριθμού των μη ικανοποιημένων χρηστών.

- Έλεγχος ανέφικτης λύσης:

Ο κώδικας ελέγχει εάν υπάρχουν ανέφικτες λύσεις, όπου το σύνολο των απαιτούμενων GFLOPS για ορισμένους κόμβους υπερβαίνει τη χωρητικότητά τους.

3.4 Επίλογος

Σε αυτό το κεφάλαιο παρουσιάστηκε η λύση που επιλέχθηκε για το υπό εξέταση πρόβλημα, έγινε ανάλυση του αλγορίθμου και του τρόπου με τον οποίο υπολογίστηκε η κατανάλωση ισχύος.

Κεφάλαιο 4ο: Προσομοίωση και αποτελέσματα

4.1 Εισαγωγή

Στο κεφάλαιο αυτό, παρουσιάζεται η δοκιμή του επιλαχόντος αλγορίθμου μέσα στο περιβάλλον προσομοιώσεων του MATLAB, συγκρίνονται τα αποτελέσματα που επιφέρει σε σχέση με τους αλγόριθμους που υπάρχουν στην βιβλιογραφία και εξετάζονται επιπλέον τρόποι με τους οποίους φαίνεται να επηρεάζονται οι παράμετροι του περιβάλλοντος σε κάθε σενάριο.

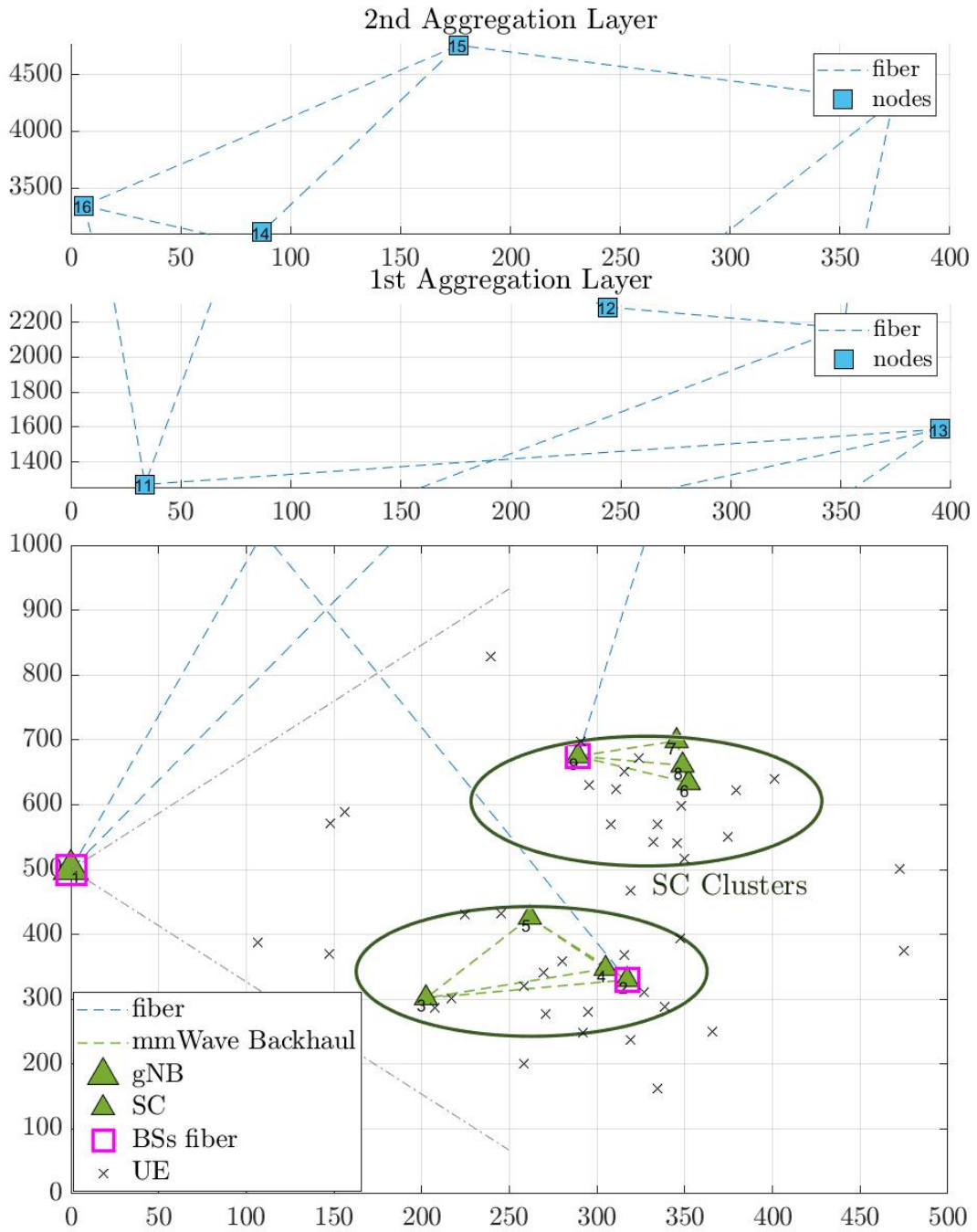
4.2 HERA vs SoA

Όπως αναφέρθηκε και στα προηγούμενα κεφάλαια, κύριος στόχος του κώδικα είναι να βελτιστοποιήσει την κατανομή πόρων για ένα τηλεπικοινωνιακό δίκτυο. Στοχεύει στην αποτελεσματική αντιστοίχιση SFC κάθε χρήστη στο κατάλληλο VNF, λαμβάνοντας παράλληλα υπόψη τους περιορισμούς χωρητικότητας και ισχύος των κόμβων του δικτύου. Ο απώτερος στόχος είναι να μεγιστοποιηθεί η συνολική απόδοση του δικτύου και να ελαχιστοποιηθεί η κατανάλωση ενέργειας. Η προτεινόμενη λύση συγκρίθηκε με τους αλγορίθμους [74] και [68] της βιβλιογραφίας.

Για τον υπολογισμό και την σύγκριση των αποτελεσμάτων, χρησιμοποιήθηκε το πρόγραμμα MATLAB, συγκεκριμένα η έκδοση R2020b σε σύστημα Windows 8.1 64 bit, 8Gb μνήμης ram και επεξεργαστή AMD A10 5750m τεσσάρων πυρήνων χρονισμένων στα 2,5GHz, στον οποίο εισήχθησαν οι τρεις προαναφερθέντες αλγόριθμοι (BCSP, HOLU, HERA).

Το περιβάλλον της προσομοίωσης μοιάζει με αυτό στο Σχήμα 4.1, χωρίζεται 2 τομείς (clusters) μικροκυψελών (SC) που επικαλύπτουν έναν κόμβο gNB ακτίνας 500 m. Σε κάθε cluster, είναι ομοίμορφα κατανομημένα 4 SC σε ακτίνα 100 m από τα κέντρο τους. Υποθέτουμε ότι σε κάθε cluster υπάρχουν ένας gNB και ένα τυχαία επιλεγμένο SC, τα οποία συνδέονται μεταξύ τους μέσω οπτικής ίνας με το 1ο και το 2ο Aggregation Layer (ALs) και ταυτόχρονα, υπάρχουν ζεύξεις mmWave Xhaul μεταξύ των BS που χωρίζονται από απόσταση ≤ 200 m. Σε κάθε AL, 4 τυχαία επιλεγμένοι κόμβοι συνδέονται μεταξύ τους μέσω οπτικής ίνας και με τα ταυτόχρονα, με τα συνδεδεμένα με οπτικές ίνες BS, έτσι ώστε κανένας κόμβος να μην είναι αποκομμένος. Λαμβάνονται υπόψη 5SFC (Service Function Chain), τα οποία αποτελούνται από τις εξής VNF (Virtual Network Function) υπηρεσίες: NAT (Network Address Translation), FW (Firewall), TM (Traffic Monitor), WOC (WAN Optimization Controller), IDPS (Intrusion Detection/Prevention System) και VOC (Video Optimization Controller), όπως αναλύονται στον Πίνακα 4.1. Για κάθε SFC εξετάζονται το αντίστοιχο VNF, η E2E καθυστέρηση, ο συνολικός αριθμός που αιτήθηκε η κάθε υπηρεσία και η διάρκεια της, μαζί με τις δυνατότητες επεξεργασίας κάθε VNF και τις απαιτήσεις του σε GFLOPS.

Αρχικά, για να εξασφαλιστεί υψηλός ρυθμός αποδοχής UE, οι UE ταξινομούνται με βάση τις απαιτήσεις υπηρεσιών τους, δίνοντας προτεραιότητα στις UE οι οποίες λόγω κρισιμότητας ή λόγω απλότητας, απαιτούν τη μικρότερη καθυστέρηση. Για UE με τις ίδιες απαιτήσεις καθυστέρησης, δίνεται προτεραιότητα στους UE με υψηλότερες απαιτήσεις ρυθμού ζήτησης. Στη συνέχεια, για κάθε UE, κατασκευάζεται ένα διάγραμμα απεικονίζοντας από την πηγή της κίνησης έως το UE με όλους τους εφικτές διαδρομές και



Σχήμα 4.1: Σχηματική απεικόνιση της τοπολογίας του δικτύου το οποίο εξετάζει ο αλγόριθμος HERA.

την αντίστοιχη κατανάλωση ενέργειας να λειτουργεί ως βασικός υπολογιστικός παράγοντας. Ο HERA υπολογίζει τα k συντομότερα μονοπάτια και ξεκινά με το πρώτο, εφόσον ικανοποιεί τους περιορισμούς χωρητικότητας, καθυστέρησης και σύνδεσης, λαμβάνοντας υπόψη και τις αποφάσεις για τους προηγούμενους χρήστες που έχουν ήδη εξυπηρετηθεί. Διαφορετικά, επιλέγεται η επόμενη διαδρομή, είτε μέχρι να βρεθεί μια διαδρομή που να ικανοποιεί όλους τους περιορισμούς, είτε έως ότου να μην υπάρχουν άλλες διαθέσιμες διαδρομές. Στην τελευταία περίπτωση, ο UE μπλοκάρεται και ο HERA προχωρά στην εξυπηρέτηση του επόμενου χρήστη εφόσον υπάρχει.

Τύπος VNF	NAT	FW	TM	VOC	WOC	IDPS
Επεξεργαστική χωρητικότητα σε Mbps	500	400	200	578	300	600
GFLOPS που απαιτούνται	110	440	55	110	110	440

Πίνακας 4.1: Παράμετροι του VNF.

Αφού βρεθεί μια έγκυρη διαδρομή για τον τρέχον UE, ο αλγόριθμος προχωρά στο δεύτερο στάδιο, όπου τοποθετούνται τα UE VNF. Για το σκοπό αυτό, για κάθε VNF, ακολουθώντας τη σειρά του UE SFC, δημιουργείται μια λίστα με όλους τους διαθέσιμους υπολογιστικούς κόμβους με βάση μία παράμετρο που συμβολίζεται με H . Αυτή η παράμετρος ισούται με το άθροισμα της κεντρικότητας κόμβου (centrality), τις υπολογιστικές δυνατότητες κόμβου (cy), και τη χρήση της CPU του κόμβου. Το τελευταίο είναι ίσο με (α) 1 όταν το μελετημένο VNF μπορεί να τοποθετηθεί στον εξεταζόμενο κόμβο χωρίς να ξεκινήσει ένα νέο VNF, (β) 0,1 όταν υπάρχει αρκετή υπολογιστική ικανότητα για να φιλοξενήσει το μελετημένο VNF στον εξεταζόμενο κόμβο, αλλά απαιτείται η δημιουργία ενός νέου VNF και (γ) 0 σε διαφορετική περίπτωση. Επομένως, επιλέγεται ο κόμβος με το υψηλότερο H για το επιλεγμένο VNF, εφόσον διαθέτει επαρκείς υπολογιστικούς πόρους για να το φιλοξενήσει. Διαφορετικά, επιλέγεται ο κόμβος με το επόμενο υψηλότερο H , έως ότου είτε τοποθετηθεί το VNF είτε δεν υπάρχει άλλος κόμβος προς εξέταση στην επιλεγμένη διαδρομή. Στην τελευταία περίπτωση, ο αλγόριθμος επιστρέφει στο πρώτο στάδιο και εξετάζεται η επόμενη διαδρομή από το k που υπολογίστηκε. Η διαδικασία επαναλαμβάνεται για τη νέα διαδρομή έως ότου είτε τοποθετηθούν όλα τα VNF του UE είτε δεν υπάρχει άλλη διαδρομή να εξεταστεί και ο UE έχει μπλοκαριστεί. Στην περίπτωση που τοποθετούνται όλα τα UE VNF, οι παράμετροι του δικτύου ενημερώνονται και ο αλγόριθμος προχωρά στον επόμενο χρήστη. Τα προαναφερθέντα βήματα επαναλαμβάνονται μέχρι να εξεταστούν όλοι οι UE. Η προσομοίωση εξελίσσεται ως εξής:

Για κάθε UE, εξετάζονται 10 σενάρια κάθε ένα από τα οποία παρουσιάζει διαφορετικές παραμέτρους κίνησης (traffic). Μεταξύ των gNB και των SC, θεωρούμε ότι υπάρχουν κανάλια επικοινωνίας τα οποία δεν παρουσιάζουν παρεμβολές στις μεταξύ τους συνδέσεις. Ωστόσο αυτό δεν συμβαίνει σε συνδέσεις SC από διαφορετικά clusters. Το mmWave Xhaul bandwidth ορίζεται στα 200MHz και η χωρητικότητα των ζεύξεων οπτικών ινών στα 10Gbps. Κάθε υπολογιστικός κόμβος αποτελείται από 8 πυρήνες CPU, ενώ οι υπολογιστικοί κόμβοι στα επίπεδα 1 και 2 του AL, έχουν 24 και 48 πυρήνες αντίστοιχα. Αυτές και άλλες παράμετροι της προσομοίωσης παρουσιάζονται στον Πίνακα 4.2. Με βάση τα αποτελέσματα των συγκρίσεων, παρατηρείται ότι ο Holu, αρχικά τοποθετεί τα VNF στον computational κόμβο με βάση το closeness και την χρήση που γίνεται στην CPU και έπειτα επιλέγει την διαδρομή της κίνησης με την μικρότερη κατανάλωση ενέργειας, ενώ ταυτόχρονα ικανοποιούνται οι περιορισμοί που αφορούν την E2E καθυστέρηση κάθε αιτήματος. Από την άλλη, ο BCSP τοποθετεί τα VNF στον κόμβο με βάση το betweenness και επιλέγει την διαδρομή με την μικρότερη δυνατή καθυστέρηση που ικανοποιεί τους E2E περιορισμούς κάθε αιτήματος. Καθότι οι αλγόριθμοι αυτοί δεν κάνουν κάποια σχετική ενέργεια για το user association, θεωρούμε και για τους δύο ότι το κριτήριο για την επιλογή σε ποιο BS θα συνδεθεί κάθε χρήστης, είναι το πιο υψηλό σήμα (SINR).

Τα αποτελέσματα που παρουσιάζονται από την προσομοίωση του υπό εξέταση αλγορίθμου (HERA) μας

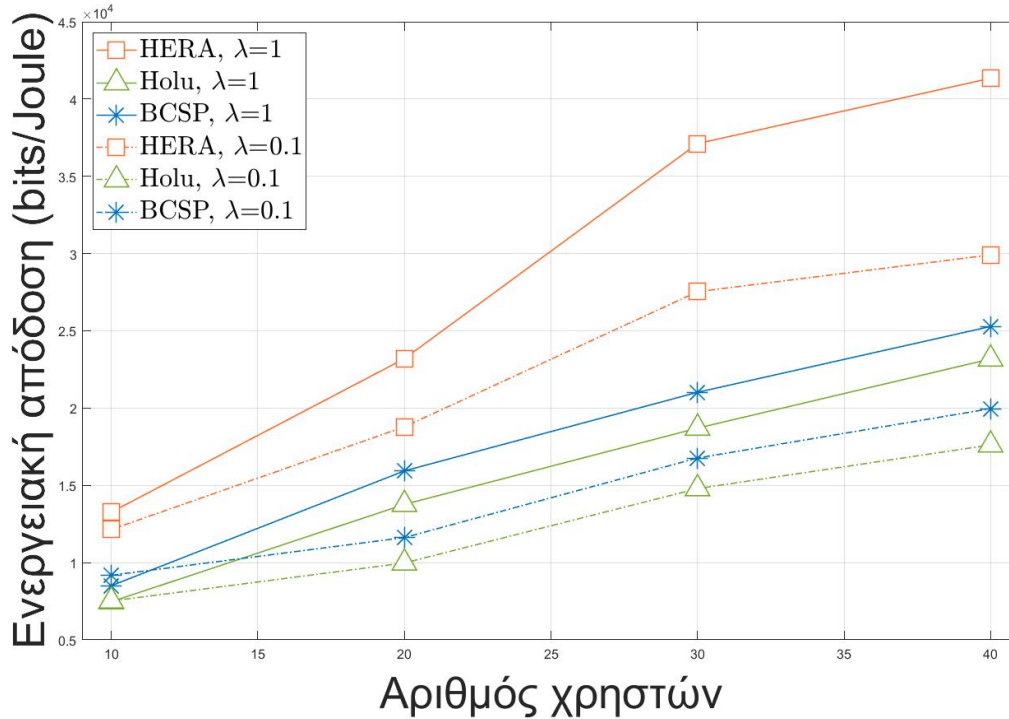
Παράμετρος	Τιμή
$P_{idle}^{(sw)}$ Κατανάλωση ρεύματος του SW σε αδράνεια	315 W
$N_{RF}^{(gNB)}$ Αριθμός αλυσίδων ραδιοσυχνοτήτων (RF) για gNB	8
$\Delta_{\alpha}^{(gNB)}$ Δ σε gNB BS	4.7
$P_{\alpha}^{(gNB,i)}$ Κατανάλωση ισχύος gNB α	6.8 W
f_{AN} Συχνότητα λειτουργίας για το AN	2 GHz
P_{port} Κατανάλωση ενέργειας port	7 W
$N_{RF}^{(SC)}$ Αριθμός αλυσίδων ραδιοσυχνοτήτων (RF) για SC	4
$\Delta_{\alpha}^{(SC)}$ Δ σε SC	4
$P_{\alpha}^{(SC,i)}$ Κατανάλωση ισχύος SC	130 W
f_{X-HAUL} Συχνότητα λειτουργίας για X-HAUL	60 GHz
$Packetlength$ Μήκος πακέτου	1.5 KB
$N_{RF}^{(mmW)}$ Αριθμός αλυσίδων ραδιοσυχνοτήτων (RF) για mmW	64
$\Delta_e^{(mmW)}$ Δ σε mmW	100
$P_e^{(mmW,i)}$ Κατανάλωση ισχύος mmW	3.9 W
$N_{\alpha}^{(RB)}$ Αριθμός RB	100 RBs

Πίνακας 4.2: Τιμές των μεταβλητών στην προσομοίωση.

οδηγούν στα παρακάτω συμπεράσματα.

Αρχικά, υπό συνθήκες υψηλού κυκλοφοριακού φόρτου όσο αυξάνεται ο ρυθμός άφιξης των χρηστών, μειώνεται η ενεργειακή απόδοση όλων των αλγορίθμων. Αυτό γίνεται διότι είναι πιθανόν να καταφθάσουν στον κόμβο νέοι χρήστες ενώ ακόμα υπάρχουν δεσμευμένοι πόροι από προηγούμενες συνδεδεμένες συσκευές. Επομένως αυξάνεται ο αριθμός των συσκευών όπου πρέπει να εξυπηρετηθούν ταυτόχρονα, καταναλώνοντας περισσότερη ενέργεια. Έπειτα, όσον αφορά τον χρόνο που δαπανάται για τον υπολογισμό των αιτημάτων, παρατηρείται και σε αυτόν αύξηση όσο μεγαλώνει ο ρυθμός άφιξης των χρηστών σε όλους τους αλγορίθμους. Αυτό συμβαίνει διότι, ενώ τα αιτήματα έρχονται με ρυθμό του ενός χρήστη ανά αίτημα, δεν απορρίπτονται σε περιπτώσεις υψηλού φόρτου με αποτέλεσμα να επιβαρύνονται υπολογιστικά οι κόμβοι για το πώς θα διαμοιραστεί η κίνηση ενώ υπάρχουν εκκρεμότητες από άλλα αιτήματα, αυξάνοντας έτσι τον χρόνο υπολογισμού.

Όλοι οι αλγόριθμοι επιτυγχάνουν την εξυπηρέτηση όλων των αιτημάτων, εκτός από τον BCSP, όπου στη χειρότερη περίπτωση με αυξημένο ρυθμό άφιξης των χρηστών, επιτυγχάνει κάτι λιγότερο του 100% της απόδοσης του, δηλαδή 99,5%. Αυτό το συμπέρασμα προκύπτει καθώς, ο BCSP δεν λαμβάνει υπόψιν το φόρτο της CPU του κόμβου, κάνοντας λιγότερο αποτελεσματική την τοποθέτηση του VNF κάτι που αναπόφευκτα οδηγεί στο μπλοκάρισμα μερικών χρηστών. Παρόλα αυτά, ο HERA καταφέρνει να επιτύχει

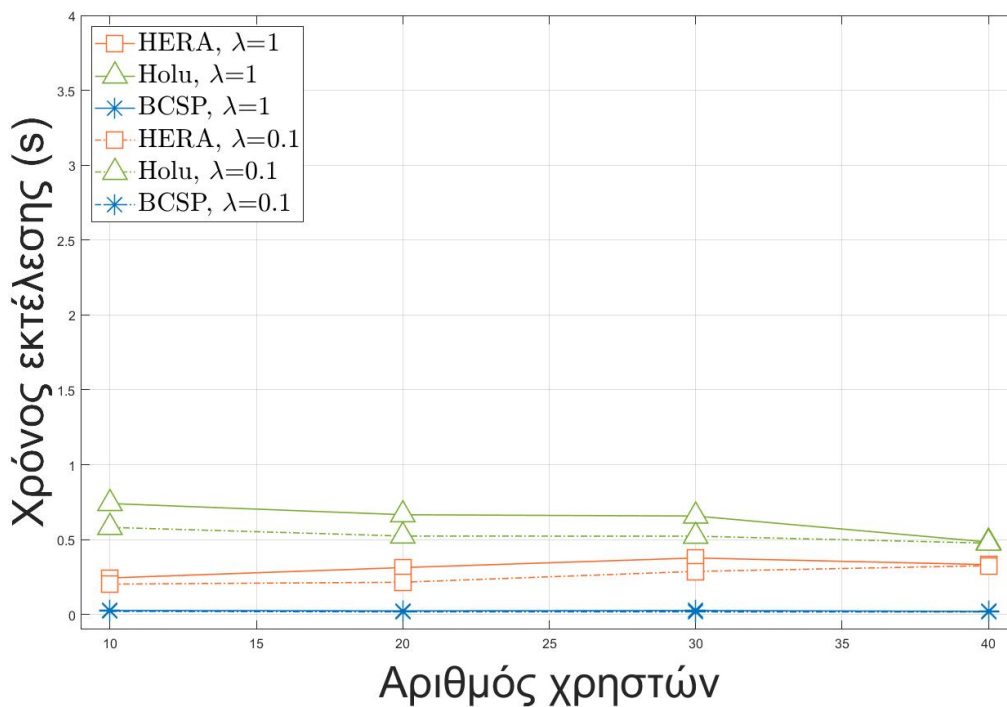


Σχήμα 4.2: Μεταβολές του Energy Efficiency για τους όλους τους αλγόριθμους.

μία σημαντική αντιστάθμιση μεταξύ ενεργειακής απόδοσης και πολυπλοκότητας. Μάλιστα η απόδοση του στην παρούσα προσομοίωση φανερώνει μόνο το ελάχιστο επιτεύξιμο αποτέλεσμα που μπορεί να παράξει, καθώς έχουμε σε όλους τους αλγόριθμους τον συμβιβασμό του ενός χρήστη ανά αίτημα. Εάν οι υπολογισμοί αφορούσαν αιτήματα για χρήστες άνω του ενός, τα υπολογιστικά οφέλη θα εμφανίζονταν πολύ πιο σημαντικά.

Όπως φαίνεται και στο Σχήμα 4.2, η ενεργειακή απόδοση του HERA συγκριτικά με τον HONU και τον BCSP, υπολογίζεται στο 90% και 60% αντίστοιχα και με μικρότερους υπολογιστικούς χρόνους. Αυτό επιτυγχάνεται καθώς σε αντίθεση με τους αλγόριθμους της βιβλιογραφίας, ο HERA εξετάζει από κοινού και το user association στους, γεγονός που έχει ως αποτέλεσμα μεγαλύτερη ευελιξία των υπολογισμών, εις βάρος όμως της πολυπλοκότητας εν αντιθέση του BCSP. Σε σύγκριση με τον HONU, ο HERA επιτυγχάνει μέχρι και 70% λιγότερη υπολογιστικό χρόνο όπως φαίνεται και παρακάτω στο Σχήμα 4.3. Ο HONU υστερεί σε αυτό το κομμάτι καθώς οι προκαθορισμένοι κόμβοι εξυπηρέτησης σε συνδυασμό με την επιλογή του closeness centrality οδηγούν στον υπολογισμό πολλών εναλλακτικών διαδρομών στις περιπτώσεις αυξημένου φόρτου, γεγονός που επηρεάζει αρνητικά τους υπολογιστικούς χρόνους του αλγορίθμου.

Οι προκαθορισμένες διαδρομές στον HONU και τον BCSP, λόγω της επιλογής τους να συνδέονται στους κόμβους με βάση το καλύτερο SINR τους επιβάλλει να επιλέγουν gNB. Εν αντιθέσει, στον HERA οι χρήστες συνδέονται πάντοτε στα SC και όχι στα gNB, επιτυγχάνοντας έτσι μικρότερη κατανάλωση ενέργειας. Επομένως, μπορούμε να συμπεράνουμε ότι με την από κοινού μελέτη του user association, του traffic routing και της τοποθέτησης του VNF μπορεί να επιτευχθεί βέλτιστη απόδοση για την κίνηση ενός δικτύου.



Σχήμα 4.3: Μεταβολές του χρόνου υπολογισμού για τους όλους τους αλγόριθμους.

4.3 Ανάλυση των αποτελεσμάτων

Με βάση το συγκεκριμένο μοντέλο που αναπτύχθηκε, μπορούν να υπολογιστούν οι βασικές μετρικές που επηρεάζουν την απόδοση του δικτύου υπό διαφορετικές συνθήκες. Πιο συγκεκριμένα, παρατηρώντας τις μεταβλητές οι οποίες φαίνεται να επηρεάζουν κυρίως την κατανομή των πόρων στο δίκτυο, ελέγχθηκαν υπολογιστικά τα παρακάτω:

Έστω η μεταβλητή που θα ονομάζουμε α , η οποία υπολογίζει το centrality του δικτύου αν πρόκειται για closeness ή για betweenness. Αντιπροσωπεύει τη σημαντικότητα του υπολογιστικού κόμβου με βάση τους διαθέσιμους υπολογιστικούς πόρους και την κεντρικότητα της θέσης του. Υψηλότερες τιμές για την μεταβλητή α υποδεικνύουν μεγαλύτερη κεντρικότητα του κόμβου. Έπειτα, έχουμε την μεταβλητή που θα ονομάζουμε β , η οποία υπολογίζει εάν μία συγκεκριμένη VNF οντότητα, μπορεί να εξυπηρετήσει τις απαιτήσεις του χρήστη. Αυτό πραγματοποιείται καθώς ελέγχονται οι υπάρχουσες και ενεργές VNF οντότητες, για το εάν έχουν επαρκή υπολογιστική χωρητικότητα ώστε να εξυπηρετήσουν το αίτημα ή εάν χρειάζεται να δημιουργηθεί μία καινούρια από την αρχή. Εάν προσθέσουμε τις δύο αυτές μεταβλητές σε μία τρίτη που θα ονομάζουμε γ , όπου $\gamma = \alpha + \beta$ μπορούμε να συμπεράνουμε για το γ ότι η σημαντικότητα ενός κόμβου εξαρτάται από το closeness του και την δυνατότητα του SFC να ικανοποιήσει το πλήθος του VNF κάθε χρήστη. Μένει κανείς να αναρωτηθεί το ποια από τις δύο μεταβλητές έχουν μεγαλύτερο αντίκτυπο.

Πιο αναλυτικά, εάν μηδενίζουμε κάθε φορά μία παράμετρο του γ , έχουμε τα παρακάτω σενάρια:

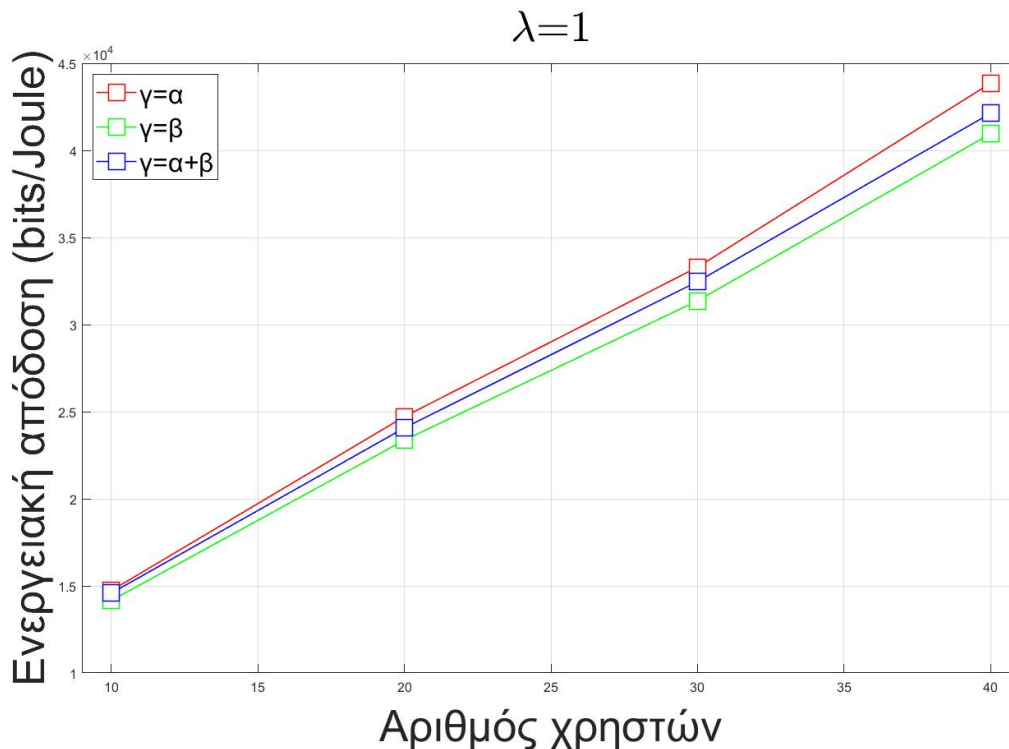
- Εάν το β είναι ίσο με 0:

Σε αυτήν την περίπτωση, το β δεν επηρεάζει την προτεραιότητα και αυτή θα καθορίζεται αποκλειστικά από τις τιμές του α . Εάν οι τιμές του α αντιπροσωπεύουν τη σημαντικότητα ή την προτίμηση κάθε κόμβου, τότε η προτεραιότητα θα εξαρτηθεί αποκλειστικά από αυτές τις προτιμήσεις. Εάν ορισμένοι κόμβοι έχουν σημαντικά υψηλότερες τιμές α από άλλους, αυτοί οι κόμβοι θα έχουν μεγαλύτερη προτεραιότητα σε σύγκριση με τους κόμβους με χαμηλότερες τιμές α .

- Εάν το α είναι ίσο με 0:

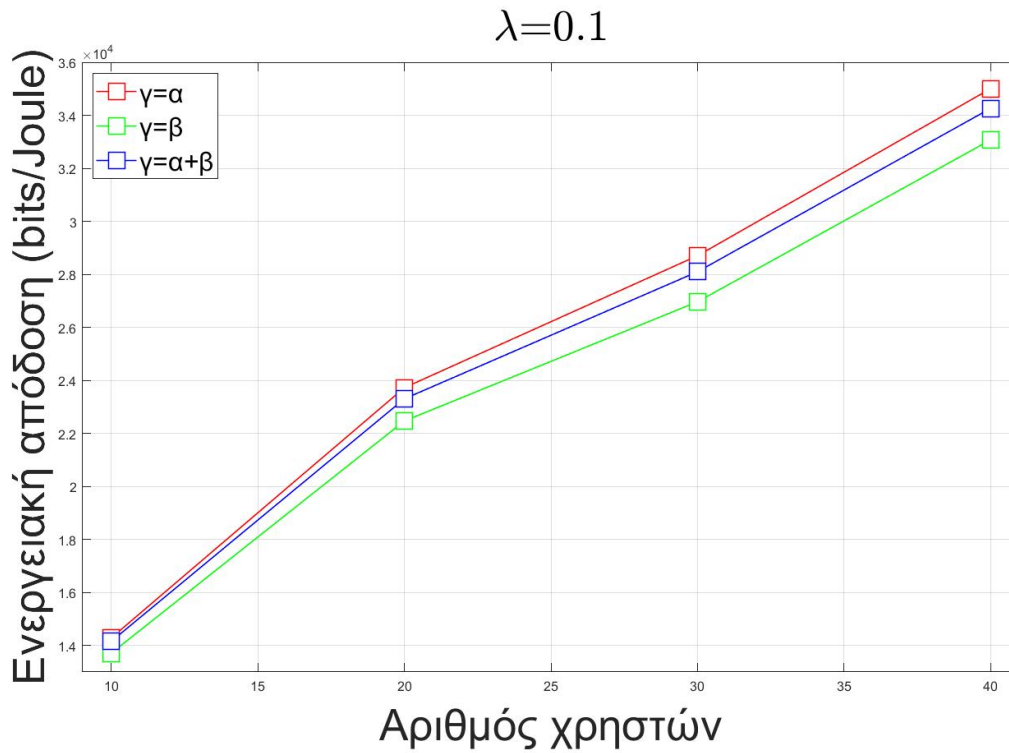
Σε αυτήν την περίπτωση, το α δεν επηρεάζει την προτεραιότητα και αυτή θα καθορίζεται αποκλειστικά από τις τιμές β . Εάν οι τιμές β αντιπροσωπεύουν τη διαθεσιμότητα πόρων και χωρητικότητας για κάθε κόμβο, τότε η προτεραιότητα θα βασίζεται αποκλειστικά στη διαθεσιμότητα των πόρων. Οι κόμβοι με υψηλότερες τιμές β θα έχουν μεγαλύτερη προτεραιότητα λόγω της υψηλότερης χωρητικότητας πόρων τους.

Στα παρακάτω διαγράμματα, απεικονίζεται για κάθε περίπτωση του γ , τα αποτελέσματα που φανερώνουν πώς επηρεάζονται μετρικές του δικτύου όπως η ενεργειακή αποδοτικότητα του αλγορίθμου HERA, ο χρόνος εκτέλεσης του αλγορίθμου και η συνολική κατανάλωση ενέργειας του δικτύου σε σενάρια από 10 έως και 40 χρήστες, με τους χρήστες να καταφτάνουν στο σύστημα σε ρυθμό, που συμβολίζεται με λ , 1 χρήστη ανά δευτερόλεπτο και 10 χρήστες ανά δευτερόλεπτο.

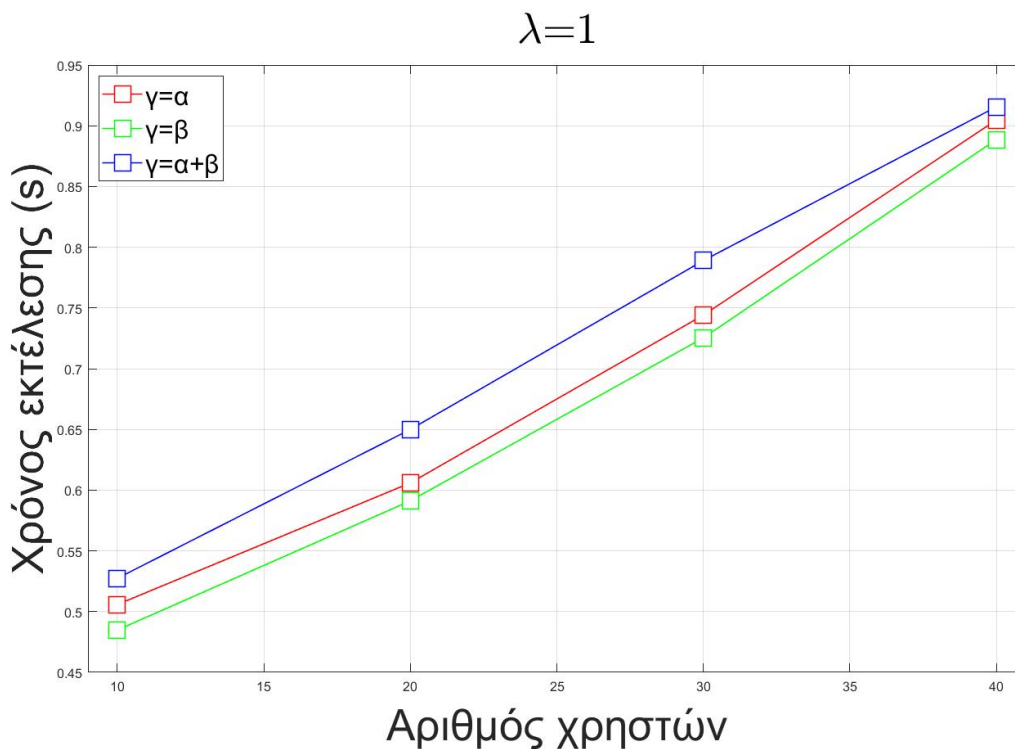


Σχήμα 4.4: Μεταβολές τιμής του Energy Efficiency για $\lambda=1$.

Από τα διαγράμματα συμπεραίνονται τα εξής:

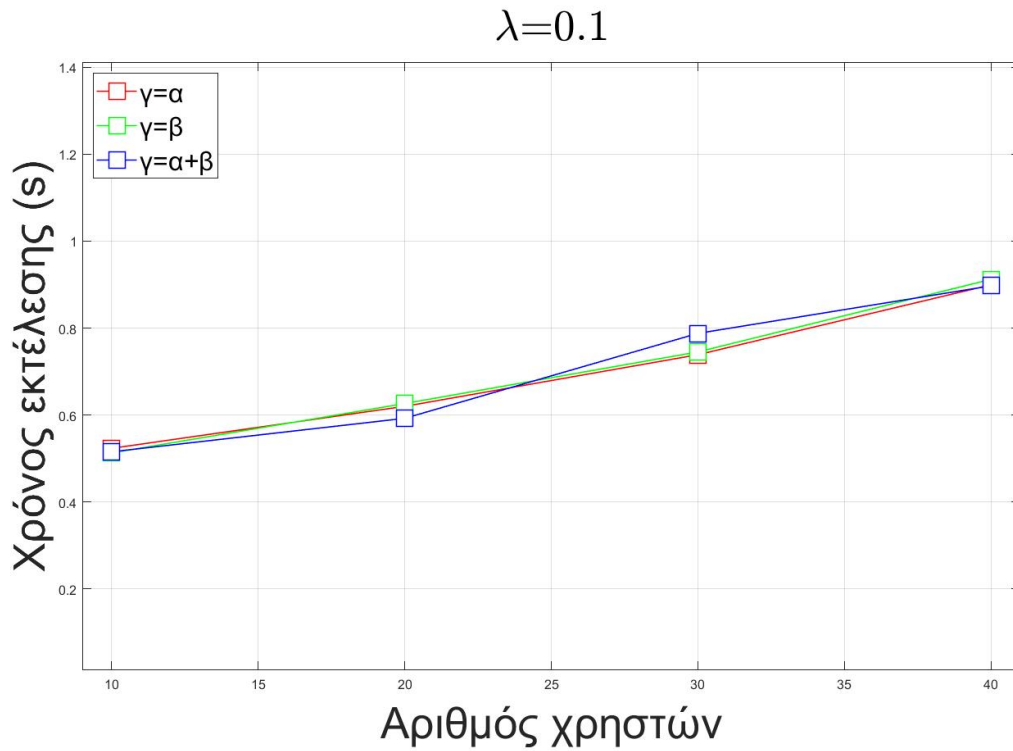
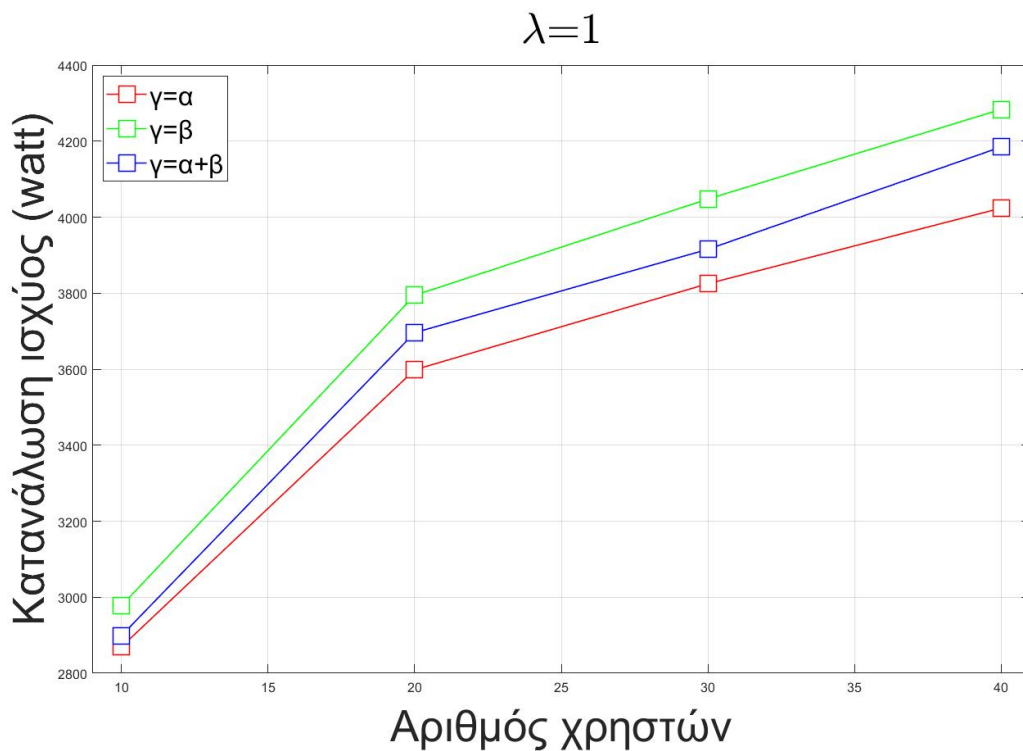


Σχήμα 4.5: Μεταβολές τιμής του Energy Efficiency για $\lambda=0.1$.

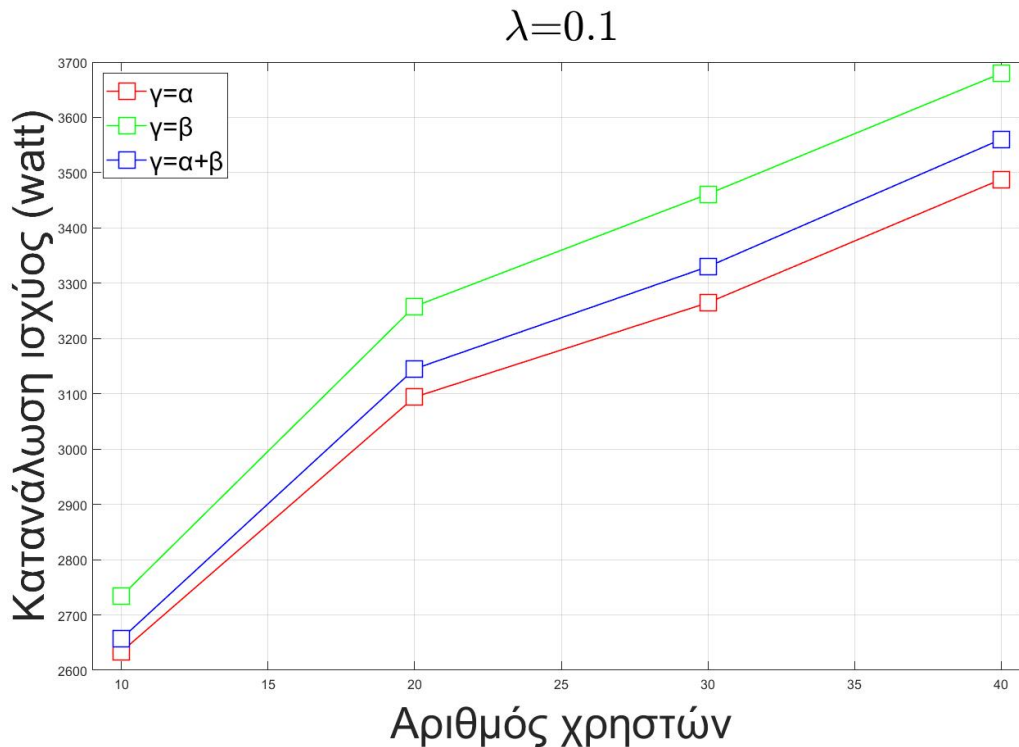


Σχήμα 4.6: Μεταβολές τιμής του χρόνου εκτέλεσης για $\lambda=1$.

Όσον αφορά την ενεργειακή αποδοτικότητα και στις δύο περιπτώσεις ρυθμού άφιξης των χρηστών στο σύστημα, το $\gamma = \alpha$ είναι πιο σημαντικό απ'ότι το $\gamma = \beta$, δηλαδή η κεντρικότητα του κόμβου διαδραματίζει καθοριστικό ρόλο στο vnf placement σε σχέση με την υπολογιστική του χωρητικότητά του. Στο

Σχήμα 4.7: Μεταβολές τιμής του χρόνου εκτέλεσης για $\lambda=0.1$.Σχήμα 4.8: Συνολική κατανάλωση ενέργειας του δικτύου για $\lambda=1$.

Σχήμα 4.4, φαίνεται πώς το $\gamma = \alpha$ υπερτερεί του $\gamma = \beta$, έως και 7.09% για τα σενάρια με $\lambda = 1$, ενώ στο Σχήμα 4.5, για σενάρια για $\lambda = 0.1$ υπερτερεί μέχρι και 4.72%. Αντίθετα όσον αφορά τον χρόνο εκτέλεσης, το $\gamma = \beta$ κάνει λιγότερο χρόνο απ'ότι το $\gamma = \alpha$, όπως φαίνεται στο Σχήμα 4.6, με την μέγιστη



Σχήμα 4.9: Συνολική κατανάλωση ενέργειας του δικτύου για $\lambda=0.1$.

τιμή της διαφοράς τους να φτάνει το 2.05% για σενάρια με χαμηλό ρυθμό άφιξης των χρηστών, ενώ για υψηλότερο ρυθμό άφιξης, οι τιμές πλησιάζουν αρκετά και στις δύο περιπτώσεις με την μέγιστη τιμή του ποσοστού να φτάνει το 1.16% , στο Σχήμα 4.7. Τέλος, σχετικά με την κατανάλωση ισχύος, το $\gamma = \beta$ καταναλώνει περισσότερο ρεύμα απ'ότι το $\gamma = \alpha$, όπως φαίνεται ευδιάκριτα στο Σχήμα 4.8, για $\lambda = 1$ σε ποσοστό που φτάνει έως και το 6.07% ενώ όσο αυξάνεται ο ρυθμός άφιξης των χρηστών για $\lambda = 0.1$, το ποσοστό αυτό φτάνει μέχρι το 4.59% στο Σχήμα 4.9 με τους χρήστες να εξυπηρετούνται όλοι χωρίς να μένει κάποιος εκτός του συστήματος.

Όσο για το ποια περίπτωση είναι «χειρότερη», εξαρτάται από το συγκεκριμένο σενάριο και τις απαιτήσεις της προτεραιότητας που θέτουμε. Εάν το σύστημα στοχεύει να δώσει προτεραιότητα στους χρήστες με βάση τις προτιμήσεις και τις προτεραιότητές τους (π.χ. quality of service), ο μηδενισμός του β δεν είναι ιδανική επιλογή, καθώς αγνοεί εντελώς τους περιορισμούς πόρων. Από την άλλη πλευρά, θέτοντας το α ως 0, μπορεί να μην είναι ιδανική λύση εάν οι περιορισμοί πόρων είναι ζωτικής σημασίας για τη λειτουργία του συστήματος. Στην ιδανική περίπτωση, οι παράμετροι θα μπορούσαν να επηρεάζουν το γ σε ένα συγκεκριμένο ποσοστό, ανάλογα με τα σενάρια που δίνονται. Για παράδειγμα, το β θα ήταν πιο αποδοτικό να επηρεάζει σε μεγαλύτερο ποσοστό το vnf placement σε ένα σενάριο όπου ο κόμβος έχει επαρκή χωρητικότητα για τον αριθμό των χρηστών που καταφτάνουν ταυτόχρονα και επομένως οι χρήστες μπορούν να εξυπηρετηθούν άμεσα από τον ίδιο κόμβο, με αποτέλεσμα να μη χρειάζεται να είναι ενεργός και κάποιος άλλος κόμβος μέσα στο δίκτυο. Εάν οι κόμβοι είναι μικρότερης χωρητικότητας και οι χρήστες δεν μπορούν να εξυπηρετηθούν όλοι από τον ίδιο, θα χρειαζόταν να ενεργοποιηθούν και οι υπόλοιποι μέσα στο δίκτυο κάτι που θα μείωνε αρκετά την ενεργειακή απόδοση του δικτύου.

4.4 Επίλογος

Σε αυτό το κεφάλαιο, έγινε αναφορά στον αλγόριθμο που επιλέχθηκε και στα αποτελέσματα που προσκομίσαμε ύστερα από προσομοιώσεις στο MATLAB, έγινε παράθεση των αποτελεσμάτων του με αυτά των αλγορίθμων που υπάρχουν στην βιβλιογραφία και έγινε επέκταση της έρευνα ώστε να είναι καλύτερα αντιληπτή η επιρροή των μεταβλητών στο υπό εξέταση σενάριο.

Κεφάλαιο 5ο: Συμπεράσματα και προτάσεις βελτίωσης

5.1 Εισαγωγή

Στο κεφάλαιο αυτό, γίνεται αναφορά στο πώς μπορεί να επεκταθεί η παρούσα έρευνα, τι βελτιώσεις ή αλλαγές προτείνονται.

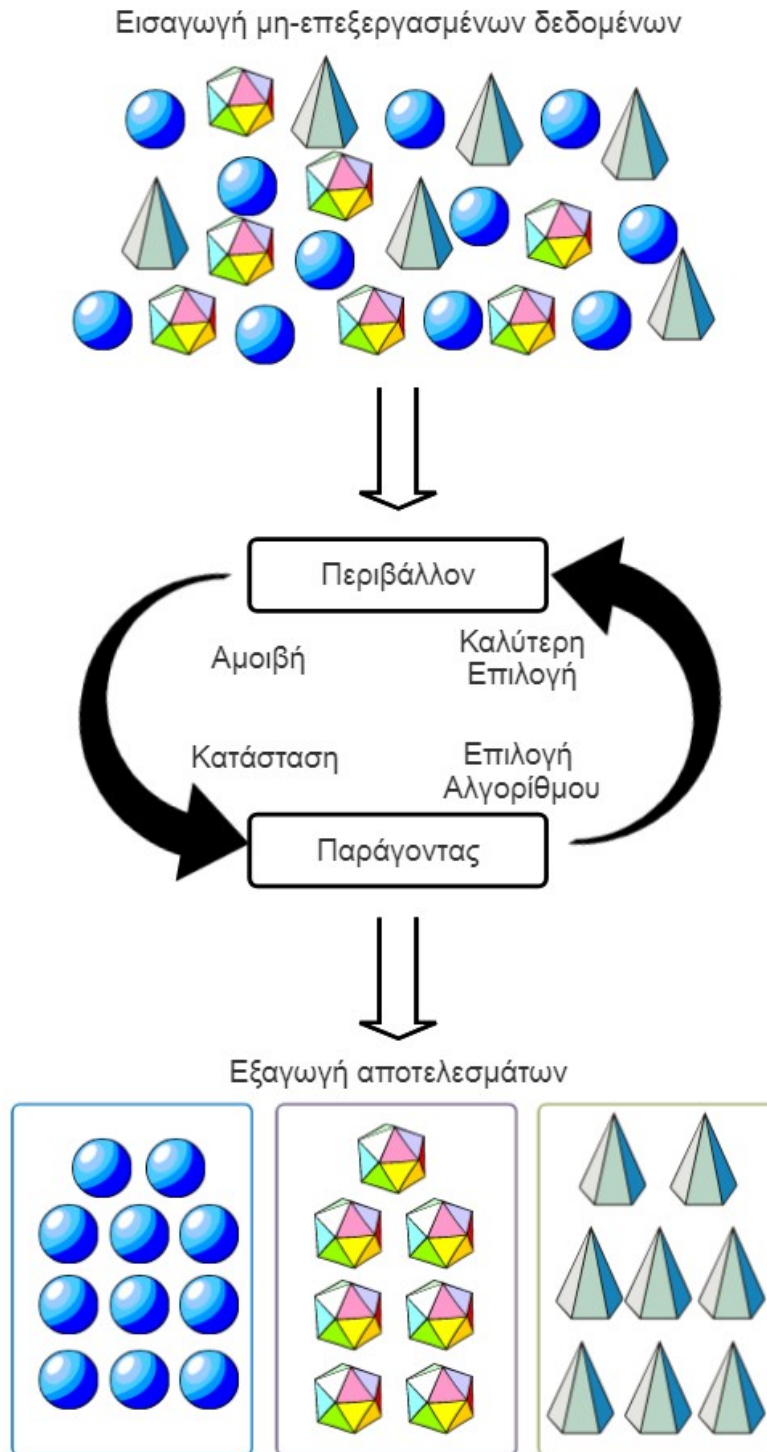
5.2 Επέκταση της έρευνας

Σύμφωνα με όσα εξετάστηκαν, μπορούμε να συμπεράνουμε ότι το πρόβλημα που μελετάται είναι από τα βασικότερα στον τομέα των τηλεπικοινωνιών και χρήζει επιπλέον εξέταση για την καλύτερη εφαρμογή του στα δίκτυα έκτης γενιάς. Παρακάτω γίνονται μερικές προτάσεις στο πώς μπορεί να επεκταθεί η έρευνα ώστε να ανταποκρίνεται καλύτερα στις μετρικές του δικτύου, με λιγότερη πολυπλοκότητα και εκμεταλλευόμενη τις σύγχρονες τεχνολογικές δυνατότητες.

Αναπόφευκτα, η μηχανική μάθηση (Machine Learning) μπορεί να προσφέρει καινοτομίες στις υπάρχουσες υλοποιήσεις με την αυτοματοποίηση των διαδικασιών. Μία πρόταση για την επέκταση/βελτίωση της προτεινόμενης λύσης, είναι η χρήση αλγορίθμων μηχανικής μάθησης και συγκεκριμένα της κατηγορίας του Reinforcement Learning (RL). Εμπλουτίζοντας τον αλγόριθμο με τις δυνατότητες που προσφέρει το RL, μπορούν να γίνονται αυτόματα οι υπολογισμοί, σε real-time, για την καλύτερη επιλογή της ανάθεσης, καθώς το σύστημα θα μπορεί μέσω της τεχνικής του trial-and-error, να μαθαίνει από τα αποτελέσματα κάθε απόφασης που παίρνει και να βελτιώνεται διαρκώς. Το MATLAB, προσφέρει την δυνατότητα αυτής της υλοποίησης αφού παρέχει Reinforcement Learning Toolbox. Συνοπτικά, ορίζοντας το τι πρέπει να μάθει ο παράγοντας (agent), πώς θα αλληλεπιδρά με το περιβάλλον και τους στόχους που πρέπει να επιτύχει, του δίνεται αντίστοιχη αμοιβή όσο πλησιάζει πιο κοντά στο επιθυμητό αποτέλεσμα. Ένα τέτοιο σύστημα reinforcement learning, περιγράφεται στο Σχήμα 5.1.

Για παράδειγμα, βάζοντας ως στόχο την μείωση της κατανάλωσης ενέργειας, ο αλγόριθμος μας θα υπολογίζει διαρκώς τις κατάλληλες παραμέτρους έως ότου επιτύχει την καλύτερη δυνατή τιμή για την ζητούμενη μεταβλητή, κοκ για την κάθε συνιστώσα που αναζητάμε σε μία real-time υλοποίηση όπου δημιουργείται διαρκώς καινούρια κίνηση εντός του δικτύου, χωρίς να απαιτείται κάποια ανθρώπινη επέμβαση στον κώδικα, μιας και οποιαδήποτε αλλαγή χρειάζεται, εξυπηρετείται αυτόματα από το machine learning.

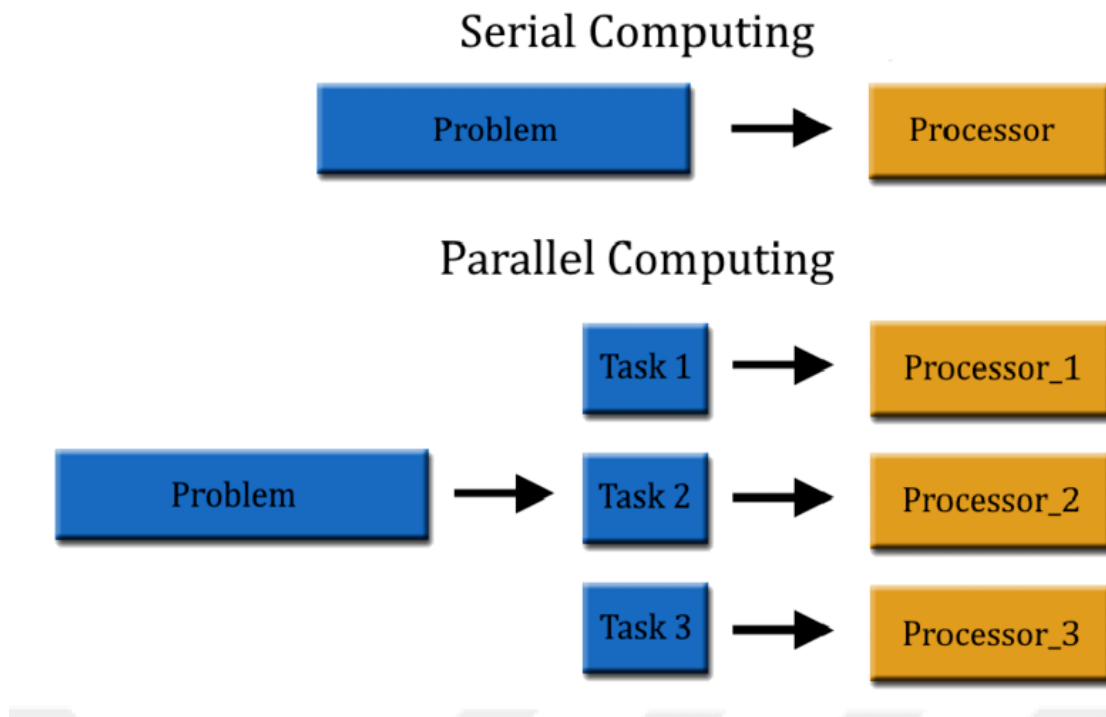
Ακόμη, η παρούσα υλοποίηση υπολογίζεται για την ακραία περίπτωση στην οποία κατά την άφιξη κάθε νέου χρήστη μελετάται ο αλγόριθμος εκ νέου, γεγονός που κάνει τον αλγόριθμο υπολογιστικά πολύ απαιτητικό. Δηλαδή, με την άφιξη ενός νέου χρήστη, δεν υπάρχει καμία χρονική καθυστέρηση και εξυπηρετείται άμεσα, κάτι που δεν συμβαίνει στην πραγματικότητα καθώς τέτοιου είδους συστήματα εφαρμόζουν ένα χρονικό παράθυρο το οποίο έχει μία συγκεκριμένη διάρκεια στην οποία μαζεύονται οι χρήστες και έπειτα εξετάζεται για αυτό το σετ χρηστών, το πώς θα κατανεμηθούν και θα εξυπηρετηθούν ομοιόμορφα. Επομένως, μία προσέγγιση όπου οι χρήστες καταφθάνουν ομαδοποιημένα σε batches και εξετάζονται σε συγκεκριμένα χρονικά time-slots, θα δώσει πιο ρεαλιστικά αποτελέσματα.



Σχήμα 5.1: Αναπαράσταση επεξεργασίας δεδομένων μέσω Reinforcement Learning.

Τα ευρήματα της έρευνας που περιγράφονται, προσφέρουν μια ενδιαφέρουσα ευκαιρία για την αξιοποίηση τεχνικών παράλληλων υπολογισμών (parallel computing) [76] για την αντιμετώπιση του βαθμού της πολυπλοκότητας που υπάρχει κατά την εύρεση της βέλτιστης λύσης. Αναπόφευκτα, ο συνδυασμός για την επίλυση από κοινού τόσων προβλημάτων και συγκεκριμένα του user association, του traffic routing και του VNF placement, είναι υπολογιστικά απαιτητική διαδικασία. Αξιοποιώντας τη δύναμη του παράλληλου υπολογισμού, αυτό το πρόβλημα θα μπορούσε να χωριστεί σε μικρότερα, πιο διαχειρίσιμα

υποπροβλήματα που μπορούν να υποβληθούν σε επεξεργασία ταυτόχρονα σε πολλαπλές υπολογιστικές μονάδες. Κάθε υποπρόβλημα θα μπορούσε να αντιπροσωπεύει μια συγκεκριμένη πτυχή της βελτιστοποίησης, όπως η συσχέτιση χρηστών ή η τοποθέτηση VNF, και θα μπορούσε να επιλυθεί ταυτόχρονα. Επιπλέον, ο παράλληλος υπολογισμός θα μπορούσε να επιταχύνει την απόδοση του προτεινόμενου αλγορίθμου, κατανέμοντας το υπολογιστικό φορτίο σε πολλούς επεξεργαστές ή πυρήνες. Μέσω αυτής της προσέγγισης παραλληλοποίησης, η διαδικασία βελτιστοποίησης θα μπορούσε να επιταχυνθεί σημαντικά, επιτρέποντας την ταχύτερη λήψη αποφάσεων για την κατανομή των πόρων. Στο Σχήμα 5.2, φαίνεται η διαφορά μεταξύ της παραδοσιακής σειριακής μορφής υπολογισμών σε σχέση με την παράλληλη διαδικασία.



Σχήμα 5.2: Σύγκριση σειριακών υπολογισμών με παράλληλους υπολογισμούς [77].

Τέλος, οι αρχές και οι μεθοδολογίες που διερευνήθηκαν σε αυτή την εργασία υπόσχονται πιθανή εφαρμογή πέρα από τα επίγεια δίκτυα, επεκτείνοντας την αποτελεσματικότητά τους στα εναέρια και διαστημικά δίκτυα, τα οποία αποτελούν κύριες τεχνολογίες εξέλιξης των 6G δικτύων όπως αναφέρθηκε και στην εισαγωγή. Θα μπορούσε να αναπτυχθεί ένα παρόμοιο πλαίσιο, λαμβάνοντας υπόψη τους εγγενείς περιορισμούς και τις ιδιαιτερότητες εξοπλισμού όπως τα HAPS, τα drones και οι δορυφόροι LEO, MEO και GEO. Σε ένα τέτοιο σύστημα όπου οι σταθμοί βάσης αλλά και οι υπολογιστικές δυνατότητες μπορούν να αναπτυχθούν και σε άλλες διαστάσεις, γίνεται λόγος για μία τρισδιάστατη τοπολογία δικτύου. Αξίζει να μελετηθεί το πώς μπορεί να επιλυθεί το πρόβλημα της ταυτόχρονης συσχέτισης χρηστών, της δρομολόγησης της κίνησης και της ανάθεσης των υπολογιστικών πόρων σε ένα τόσο περίπλοκο σύστημα.

5.3 Επίλογος

Στο κεφάλαιο αυτό, έγινε αναφορά στις δυνατότητες επέκτασης της παρούσας εργασίας, τα σημεία στα οποία υπάρχει χώρος για βελτίωση και εξέλιξη.

BIBΛIOΓΡΑΦΙΑ

- [1] G. Giambene, *Introduction to Telecommunication Networks*, pp. 3–63. Cham: Springer International Publishing, 2021.
- [2] A. T. Pascual, “The business model and political influence of the telephony across europe,” in *2010 Second Region 8 IEEE Conference on the History of Communications*, pp. 1–6, 2010.
- [3] A. Ghosh, N. Mangalvedhe, R. Ratasuk, B. Mondal, M. Cudak, E. Visotsky, T. A. Thomas, J. G. Andrews, P. Xia, H. S. Jo, H. S. Dhillon, and T. D. Novlan, “Heterogeneous cellular networks: From theory to practice,” *IEEE Communications Magazine*, vol. 50, no. 6, pp. 54–64, 2012.
- [4] H. Tataria, M. Shafi, A. F. Molisch, M. Dohler, H. Sjöland, and F. Tufvesson, “6g wireless systems: Vision, requirements, challenges, insights, and opportunities,” *Proceedings of the IEEE*, vol. 109, no. 7, pp. 1166–1199, 2021.
- [5] V. UK, “First ever mobile phone call made 50 years ago today,” 2023.
- [6] A. Solyman and K. Yahya, “Evolution of wireless communication networks: from 1g to 6g and future perspective,” *International Journal of Electrical and Computer Engineering (IJECE)*, vol. 12, p. 3943, 08 2022.
- [7] R. Kalavakunta and A. Kripalani, “Evolution of mobile broadband access technologies and services -considerations and solutions for smooth migration from 2g to 3g networks,” in *2005 IEEE International Conference on Personal Wireless Communications, 2005. ICPWC 2005.*, pp. 144–149, 2005.
- [8] M. Belleschi, “Cross-layer optimization protocols in ad-hoc networks: analysis and practical implementation of transport and network layers,” 09 2023.
- [9] P. Chitrapu and B. Aghili, “Evolution of gsm into the next generation wireless world,” in *2007 IEEE Long Island Systems, Applications and Technology Conference*, pp. 1–10, 2007.
- [10] S. Nashwan and A. Hamarsheh, “An extended approach for enhancing packet-loss of inter-sgsn in 3g mobile networks,” *International Journal of Computer Network and Information Security*, vol. 9, pp. 43–51, 11 2017.
- [11] O. Eluwole, N. Udoh, M. Ojo, C. Okoro, and A. Akinyoade, “From 1g to 5g, what next?,” *IAENG International Journal of Computer Science*, vol. 45, pp. 413–434, 08 2018.
- [12] L. Hsu, M. Cheng, and I. Niva, “Evolution towards simultaneous high-speed packet data and voice services: an overview of cdma2000 1/spl times/ev-dv,” in *10th International Conference on Telecommunications, 2003. ICT 2003.*, vol. 2, pp. 1313–1317 vol.2, 2003.
- [13] L. Liu and Y. Liang, “A new architecture design for wcdma and gsm dual-mode mobile phones,” in *2012 International Conference on Computer Science and Electronics Engineering*, vol. 2, pp. 157–160, 2012.

- [14] A. Watson, "The umts third generation market-structuring the service revenues opportunities," in *Second International Conference on 3G Mobile Communication Technologies*, pp. 144–146, 2001.
- [15] L. Siyu, B. Wenle, X. Shen, and Y. Fan, "Research of the comparative analysis of the frame structure of td-scdma and wcdma," in *2011 Global Mobile Congress*, pp. 1–3, 2011.
- [16] G. Barb and M. Ottesteanu, "4g/5g: A comparative study and overview on what to expect from 5g," in *2020 43rd International Conference on Telecommunications and Signal Processing (TSP)*, pp. 37–40, 2020.
- [17] S. Abeta, "Toward lte commercial launch and future plan for lte enhancements (lte-advanced)," in *2010 IEEE International Conference on Communication Systems*, pp. 146–150, 2010.
- [18] J. Jermyn, R. Piqueras Jover, I. Murynets, M. Istomin, and S. Stolfo, "Scalability of machine to machine systems and the internet of things on lte mobile networks," 07 2015.
- [19] D. Pareit, B. Lannoo, I. Moerman, and P. Demeester, "The history of wimax: A complete survey of the evolution in certification and standardization for ieee 802.16 and wimax," *IEEE Communications Surveys Tutorials*, vol. 14, no. 4, pp. 1183–1211, 2012.
- [20] M. H. Mahmud, M. M. Hossain, A. A. Khan, S. Ahmed, M. A. Mahmud, and M. H. Islam, "Performance analysis of ofdm, w-ofdm and f-ofdm under rayleigh fading channel for 5g wireless communication," in *2020 3rd International Conference on Intelligent Sustainable Systems (ICISS)*, pp. 1172–1177, 2020.
- [21] Y. Lee, "Performance analysis of ds-cdma and mc-cdma systems," in *2018 9th IEEE Annual Ubiquitous Computing, Electronics Mobile Communication Conference (UEMCON)*, pp. 842–846, 2018.
- [22] Q. Zhang and H. Liao, "Orthogonal multicarrier las-cdma system," in *2007 International Conference on Wireless Communications, Networking and Mobile Computing*, pp. 954–956, 2007.
- [23] I. Javid and S. Khara, "5g network: Architecture, protocols, challenges and opportunities," in *2022 International Conference on Computing, Communication, and Intelligent Systems (ICCCIS)*, pp. 1–5, 2022.
- [24] D. Sanyal, U. Kar, and M. Roy, *Mobile Communications and Computing: A Broad Review with a Focus on Smart Healthcare*, pp. 9–33. 02 2020.
- [25] M. Alsabab, M. A. Naser, B. M. Mahmmod, S. H. Abdulhussain, M. R. Eissa, A. Al-Baidhani, N. K. Noordin, S. M. Sait, K. A. Al-Utaibi, and F. Hashim, "6g wireless communications networks: A comprehensive survey," *IEEE Access*, vol. 9, pp. 148191–148243, 2021.
- [26] Q. K. Ud Din Arshad, A. U. Kashif, and I. M. Quershi, "A review on the evolution of cellular technologies," in *2019 16th International Bhurban Conference on Applied Sciences and Technology (IBCAST)*, pp. 989–993, 2019.
- [27] A. Mourad, R. Yang, P. H. Lehne, and A. de la Oliva, "Towards 6g: Evolution of key performance indicators and technology trends," in *2020 2nd 6G Wireless Summit (6G SUMMIT)*, pp. 1–5, 2020.

- [28] D. Mishra, A. M. Vegni, V. Loscrí, and E. Natalizio, “Drone networking in the 6g era: A technology overview,” *IEEE Communications Standards Magazine*, vol. 5, no. 4, pp. 88–95, 2021.
- [29] D. Miraz, M. Ali, P. Excell, and R. Picking, “A review on internet of things (iot), internet of everything (ioe) and internet of nano things (iont),” pp. 219–224, 09 2015.
- [30] Y. Liu, X. Yuan, Z. Xiong, J. Kang, X. Wang, and D. Niyato, “Federated learning for 6g communications: Challenges, methods, and future directions,” *China Communications*, vol. 17, no. 9, pp. 105–118, 2020.
- [31] E.-K. Hong, I. Lee, B. Shim, Y.-C. Ko, S.-H. Kim, S. Park, K. Lee, S. Kim, J.-H. Kim, Y. Shin, Y. Kim, and H. Jung, “6g rd vision: Requirements and candidate technologies,” *Journal of Communications and Networks*, vol. 24, no. 2, pp. 232–245, 2022.
- [32] T. S. Rappaport, Y. Xing, O. Kanhere, S. Ju, A. Madanayake, S. Mandal, A. Alkhateeb, and G. C. Trichopoulos, “Wireless communications and applications above 100 ghz: Opportunities and challenges for 6g and beyond,” *IEEE Access*, vol. 7, pp. 78729–78757, 2019.
- [33] S. I. Kim and H. S. Kim, “A vnf placement method based on vnf characteristics,” in *2021 International Conference on Information Networking (ICOIN)*, pp. 864–869, 2021.
- [34] R. Mijumbi, J. Serrat, J.-L. Gorricho, N. Bouten, F. De Turck, and R. Boutaba, “Network function virtualization: State-of-the-art and research challenges,” *IEEE Communications Surveys Tutorials*, vol. 18, no. 1, pp. 236–262, 2016.
- [35] A. Toosi, J. Son, Q. Chi, and R. Buyya, “Elasticfc: Auto-scaling techniques for elastic service function chaining in network functions virtualization-based clouds,” *Journal of Systems and Software*, vol. 152, 02 2019.
- [36] M. M. Amri, “Recent trends in the reconfigurable intelligent surfaces (ris): Active ris to brain-controlled ris,” in *2022 IEEE International Conference on Communication, Networks and Satellite (COMNETSAT)*, pp. 299–304, 2022.
- [37] C. Pan, H. Ren, K. Wang, J. F. Kolb, M. El Kashlan, M. Chen, M. Di Renzo, Y. Hao, J. Wang, A. L. Swindlehurst, X. You, and L. Hanzo, “Reconfigurable intelligent surfaces for 6g systems: Principles, applications, and research directions,” *IEEE Communications Magazine*, vol. 59, no. 6, pp. 14–20, 2021.
- [38] M. Aljehani, M. Inoue, A. Watanabe, *et al.*, “Uav communication system integrated into network traversal with mobility,” *SN Applied Sciences*, vol. 2, p. 1057, 2020.
- [39] R. Bajracharya, R. Shrestha, S. Kim, and H. Jung, “6g nr-u based wireless infrastructure uav: Standardization, opportunities, challenges and future scopes,” *IEEE Access*, vol. 10, pp. 30536–30555, 2022.
- [40] M. Höyhty, S. Boumard, A. Yastrebova, P. Jarvensivu, M. Kiviranta, and A. Anttonen, “Sustainable satellite communications in the 6g era: A european view for multi-layer systems and space safety,” *IEEE Access*, vol. PP, pp. 1–1, 01 2022.

- [41] B. Evans, “6g satellite communications,” in *2022 27th Asia Pacific Conference on Communications (APCC)*, pp. 175–177, 2022.
- [42] I. Leyva-Mayorga, B. Soret, M. Röper, D. Wübben, B. Matthiesen, A. Dekorsy, and P. Popovski, “Leo small-satellite constellations for 5g and beyond-5g communications,” *IEEE Access*, vol. 8, pp. 184955–184964, 2020.
- [43] T. Wikle, “The global positioning system and education in the 21(st) century,” vol. 19, pp. 37–54, 01 2000.
- [44] V. F. Milas, D. Vouyioukas, N. Moraitis, and P. Constantinou, “Spectrum planning and performance evaluation between heterogeneous satellite networks,” *European Journal of Operational Research*, vol. 191, no. 3, pp. 1132–1138, 2008.
- [45] Z. Chen, X. Ma, B. Zhang, Y. Zhang, Z. Niu, N. Kuang, W. Chen, L. Li, and S. Li, “A survey on terahertz communications,” *China Communications*, vol. 16, no. 2, pp. 1–35, 2019.
- [46] Y. Siriwardhana, P. Porambage, M. Liyanage, and M. Ylianttila, “Ai and 6g security: Opportunities and challenges,” in *2021 Joint European Conference on Networks and Communications 6G Summit (EuCNC/6G Summit)*, pp. 616–621, 2021.
- [47] M. Naiseh, R. S. Al-Mansoori, D. Al-Thani, N. Jiang, and R. Ali, “Nudging through friction: An approach for calibrating trust in explainable ai,” in *2021 8th International Conference on Behavioral and Social Computing (BESC)*, pp. 1–5, 2021.
- [48] N. Hu, Z. Tian, X. Du, and M. Guizani, “An energy-efficient in-network computing paradigm for 6g,” *IEEE Transactions on Green Communications and Networking*, vol. 5, no. 4, pp. 1722–1733, 2021.
- [49] “Real life edge computing use cases.” <https://innovationatwork.ieee.org/real-life-edge-computing-use-cases/>. Accessed: 2023-09-09.
- [50] M. I. Hasan, S. Nayemuzzaman, and M. Saquib, “Performance analysis of large aperture mmimo ucca arrays in a 5g user dense network,” in *2022 IEEE Future Networks World Forum (FNWF)*, pp. 526–531, 2022.
- [51] V. Ziegler, H. Viswanathan, H. Flinck, M. Hoffmann, V. Räsänen, and K. Hätönen, “6g architecture to connect the worlds,” *IEEE Access*, vol. 8, pp. 173508–173520, 2020.
- [52] D. Zhao, Z. Yan, M. Wang, P. Zhang, and B. Song, “Is 5g handover secure and private? a survey,” *IEEE Internet of Things Journal*, vol. 8, no. 16, pp. 12855–12879, 2021.
- [53] W. S. H. M. W. Ahmad, N. A. M. Radzi, F. S. Samidi, A. Ismail, F. Abdullah, M. Z. Jamaludin, and M. N. Zakaria, “5g technology: Towards dynamic spectrum sharing using cognitive radio networks,” *IEEE Access*, vol. 8, pp. 14460–14488, 2020.
- [54] M. Camelo, L. Cominardi, M. Gramaglia, M. Fiore, A. Garcia-Saavedra, L. Fuentes, D. De Vleeschauwer, P. Soto-Arenas, N. Slamnik-Krijestorac, J. Ballesteros, C.-Y. Chang, G. Baldoni, J. M. Marquez-Barja, P. Hellinckx, and S. Latré, “Requirements and specifications

- for the orchestration of network intelligence in 6g,” in *2022 IEEE 19th Annual Consumer Communications Networking Conference (CCNC)*, pp. 1–9, 2022.
- [55] D. Fooladivanda and C. Rosenberg, “Joint resource allocation and user association for heterogeneous wireless cellular networks,” *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol. 12, no. 1, pp. 248–257, 2013.
- [56] Z. Zhang, Y. Xiao, Z. Ma, M. Xiao, Z. Ding, X. Lei, G. K. Karagiannidis, and P. Fan, “6g wireless networks: Vision, requirements, architecture, and key technologies,” *IEEE Vehicular Technology Magazine*, vol. 14, no. 3, pp. 28–41, 2019.
- [57] Y. Xu, G. Gui, H. Gacanin, and F. Adachi, “A survey on resource allocation for 5g heterogeneous networks: Current research, future trends, and challenges,” *IEEE Communications Surveys Tutorials*, vol. 23, no. 2, pp. 668–695, 2021.
- [58] S. Corroy, L. Falconetti, and R. Mathar, “Cell association in small heterogeneous networks: Downlink sum rate and min rate maximization,” in *2012 IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC)*, pp. 888–892, 2012.
- [59] S. Borst, S. Hanly, and P. Whiting, “Throughput utility optimization in hetnets,” in *2013 IEEE 77th Vehicular Technology Conference (VTC Spring)*, pp. 1–5, 2013.
- [60] S. Borst, S. Hanly, and P. Whiting, “Optimal resource allocation in hetnets,” in *2013 IEEE International Conference on Communications (ICC)*, pp. 5437–5441, 2013.
- [61] S. Deb, P. Monogioudis, J. Miernik, and J. P. Seymour, “Algorithms for enhanced inter-cell interference coordination (eicic) in lte hetnets,” *IEEE/ACM Transactions on Networking*, vol. 22, no. 1, pp. 137–150, 2014.
- [62] B. Huberman and P. Sharma, “Compare: Comparative advantage driven resource allocation for virtual network functions,” pp. 212–218, 11 2016.
- [63] L. Liu, S. Guo, G. Liu, and Y. Yang, “Joint dynamical vnf placement and sfc routing in nfv-enabled sdns,” *IEEE Transactions on Network and Service Management*, vol. 18, no. 4, pp. 4263–4276, 2021.
- [64] N. Promwongsa, A. Ebrahimzadeh, R. H. Glitho, and N. Crespi, “Joint vnf placement and scheduling for latency-sensitive services,” *IEEE Transactions on Network Science and Engineering*, vol. 9, no. 4, pp. 2432–2449, 2022.
- [65] X. Fan, H. Xu, H. Huang, and X. Yang, “Real-time update of joint sfc and routing in software defined networks,” *IEEE/ACM Transactions on Networking*, vol. 29, no. 6, pp. 2664–2677, 2021.
- [66] X. Shang, Z. Liu, and Y. Yang, “Online service function chain placement for cost-effectiveness and network congestion control,” *IEEE Transactions on Computers*, vol. 71, no. 1, pp. 27–39, 2022.
- [67] X. Zhang, Z. Xu, L. Fan, S. Yu, and Y. Qu, “Near-optimal energy-efficient algorithm for virtual network function placement,” *IEEE Transactions on Cloud Computing*, vol. 10, no. 1, pp. 553–567, 2022.

- [68] A. Varasteh, B. Madiwalar, A. Van Bemten, W. Kellerer, and C. Mas-Machuca, “Holu: Power-aware and delay-constrained vnf placement and chaining,” *IEEE Transactions on Network and Service Management*, vol. 18, no. 2, pp. 1524–1539, 2021.
- [69] S. Yang, F. Li, S. Trajanovski, X. Chen, Y. Wang, and X. Fu, “Delay-aware virtual network function placement and routing in edge clouds,” *IEEE Transactions on Mobile Computing*, vol. 20, no. 2, pp. 445–459, 2021.
- [70] M. Gatzianas, A. Mesodiakaki, G. Kalfas, and N. Pleros, “Energy-efficient joint computational and network resource planning in beyond 5g networks,” in *2021 IEEE Global Communications Conference (GLOBECOM)*, pp. 1–6, 2021.
- [71] Y. Zhang, Y. Bao, S. Zhao, J. Chen, and J. Tang, “Identifying node importance by combining betweenness centrality and katz centrality,” in *2015 International Conference on Cloud Computing and Big Data (CCBD)*, pp. 354–357, 2015.
- [72] F. Farahani, W. Karwowski, and N. Lighthall, “Application of graph theory for identifying connectivity patterns in human brain networks: A systematic review,” *Frontiers in Neuroscience*, vol. 13, p. 585, 06 2019.
- [73] T. Opsahl, F. Agneessens, and J. Skvoretz, “Node centrality in weighted networks: Generalizing degree and shortest paths,” *Social Networks*, vol. 32, no. 3, pp. 245–251, 2010.
- [74] A. Varasteh, M. De Andrade, C. M. Machuca, L. Wosinska, and W. Kellerer, “Power-aware virtual network function placement and routing using an abstraction technique,” in *2018 IEEE Global Communications Conference (GLOBECOM)*, pp. 1–7, 2018.
- [75] G. Auer, V. Giannini, I. Gódor, O. Blume, A. Fehske, J. Rubio, P. Frenger, M. Olsson, D. Sabella, M. Gonzalez, M. Imran, and C. Desset, *How much energy is needed to run a wireless network?*, vol. 18. 07 2012.
- [76] D. Bertsekas, D. Castañon, J. Eckstein, and S. Zenios, “Chapter 5 parallel computing in network optimization,” in *Network Models*, vol. 7 of *Handbooks in Operations Research and Management Science*, pp. 331–399, Elsevier, 1995.
- [77] B. Hangün, “Performance evaluation of a parallel image enhancement technique for dark images on multithreaded cpu and gpu architectures,” 01 2022.
- [78] P. V. Klaine, M. A. Imran, O. Onireti, and R. D. Souza, “A survey of machine learning techniques applied to self-organizing cellular networks,” *IEEE Communications Surveys Tutorials*, vol. 19, no. 4, pp. 2392–2431, 2017.

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α Κώδικας

Κώδικας υπολογισμού κατανάλωσης ενέργειας

```
function [BH_throughput_link, P_BH_link_Watt, active_BH_link,
    BW_cell_need, P_BS_Watt, active_BS, active_pm, power_pm,
    FB_throughput_link, active_FB_link, power_FB_link, power_switch,
    ...
    EE, Total_power, Total_data_rate] = Joint_power_calculation(
    BW_need, N, N_gNB, Delta_p_AN_gNB, Delta_p_AN_SC,
    data_rate_user_DL, BW_BH, cells, breaking_point, coeff1, coeff2
    , a_L_BH_W, BH_link_user_assoc, N_TRX_BH, ...
    Delta_p_BH, static_ON, P_idle_BH, user_association, P_RB_pair,
    N_TRX_AN_gNB, N_TRX_AN_SC, P_idle_SC, P_idle_gNB, \
    N_total_c_nodes, GFLOPS_per_VNF, P_idle_pm_node, P_max_pm_node
    , GFLOPS, ...
    VNF_types, vnf_placement, VNF_process_capacity,
    num_instances_input, FB_link_user_assoc, P_port_switch,
    data_rate_switch, P_idle_switch)

%%% BH power calculation
active_BH_link=ones(cells,cells);
P_BH_link_Watt=zeros(cells,cells);
P_BH_control=deal(P_BH_link_Watt);
BH_throughput_link=zeros(cells,cells);

for i=1:N
    for j1=1:cells
        for j2=1:cells
            if BH_link_user_assoc(i,j1,j2)==1

                BH_throughput_link(j1,j2)=BH_throughput_link(j1,j2)+
                    data_rate_user_DL(i);
            end
        end
    end
end

[P_BH_control(:,,:), ~]=BH_power_calculation_new(BH_throughput_link,
    BW_BH, cells, breaking_point, coeff1, coeff2, a_L_BH_W);
for j1=1:cells
    for j2=1:cells
```

```

    if sum(BH_link_user_assoc(:,j1,j2))==0
        active_BH_link(j1,j2)=0;
    end

    P_BH_link_Watt(j1,j2)=active_BH_link(j1,j2)*static_ON*
        P_idle_BH* N_TRX_BH+ N_TRX_BH .*Delta_p_BH.*P_BH_control(
        j1,j2);%%Watt
    end
end

%%% AN power calculation
BW_cell_need=zeros(1,cells);
active_BS=ones(1,cells);
P_BS_Watt=zeros(1,cells);
Total_data_rate=0;

for i=1:N
    for j=1:cells
        if user_association(i,j)==1
            BW_cell_need(j)=BW_cell_need(j)+BW_need(i,j);
            Total_data_rate=Total_data_rate+data_rate_user_DL(i);
        end
    end
end

P_AN_Watt_out(:) =(BW_cell_need(:)).*P_RB_pair(:);

for j=1:cells
    if P_AN_Watt_out(j)==0
        active_BS(j)=0;
    end
    if ismember(j,1:N_gNB)
        P_BS_Watt(j)=active_BS(j)*N_TRX_AN_gNB*P_idle_gNB*static_ON+
            N_TRX_AN_gNB*Delta_p_AN_gNB*P_AN_Watt_out(j); %%% DL AN
            power consumption in each BS
    else

        P_BS_Watt(j)=active_BS(j)*N_TRX_AN_SC*P_idle_SC*static_ON+
            N_TRX_AN_SC*Delta_p_AN_SC*P_AN_Watt_out(j);

    end
end
end

```

```

%%% Power consumption per pm node
num_instances=zeros(cells+N_total_c_nodes,VNF_types);
for s=1:VNF_types
    for n=1:cells+N_total_c_nodes

        num_instances(n,s)= ceil((sum(data_rate_user_DL(:).*
            vnf_placement(:,s,n)))/(VNF_process_capacity(s)*10^6));

    end
end

active_pm=ones(1,cells+N_total_c_nodes);
util_CPU=zeros(1, cells+N_total_c_nodes);
power_pm=deal(util_CPU);

for n=1:cells+N_total_c_nodes
    if sum(num_instances(n,:))==0
        active_pm(n)=0;
    end
    util_CPU(n)=(sum(num_instances(n,:)*GFLOPS_per_VNF(:)))/GFLOPS(n)
    ;
    power_pm(n)=active_pm(n)*P_idle_pm_node(n)+(P_max_pm_node(n)-
        P_idle_pm_node(n))*util_CPU(n);

end

%%% Fiber link power consumption
FB_throughput_link=zeros(cells+N_total_c_nodes,cells+N_total_c_nodes)
;
for i=1:N
    for j1=1:cells+N_total_c_nodes
        for j2=1:cells+N_total_c_nodes
            if FB_link_user_assoc(i,j1,j2)==1
                FB_throughput_link(j1,j2)=FB_throughput_link(j1,j2)+
                    data_rate_user_DL(i);
            end
        end
    end
end

active_FB_link=ones(cells+N_total_c_nodes,cells+N_total_c_nodes);
power_FB_link=zeros(cells+N_total_c_nodes,cells+N_total_c_nodes);

```

```

P_port_switch_help=deal(power_FB_link);
for j1=1:cells+N_total_c_nodes
    for j2=1:cells+N_total_c_nodes
        if (FB_throughput_link(j1,j2))==0
            active_FB_link(j1,j2)=0;
        end
    end
end

for j1=1:cells+N_total_c_nodes
    for j2=1:cells+N_total_c_nodes
        k=2;

        P_port_switch_help(j1,j2)=P_port_switch(k);
        if active_FB_link(j1,j2)==1 && active_FB_link(j2,j1)==1
            power_FB_link(j1,j2)=P_port_switch_help(j1,j2)*active_FB_link
                (j1,j2);
        else
            power_FB_link(j1,j2)=2*P_port_switch_help(j1,j2)*
                active_FB_link(j1,j2);

        end

    end

end

%% Power consumption per switch
power_switch=zeros(1,cells+N_total_c_nodes);

for n=1:cells+N_total_c_nodes
    if any(active_FB_link(n,:)==1) || any(active_FB_link(:,n)==1)
        power_switch(n)=P_idle_switch;
    end
end

Total_power=sum(sum(P_BH_link_Watt))+sum(P_BS_Watt)+sum(power_pm)+sum
    (sum(power_FB_link))+sum(power_switch);

EE=Total_data_rate /Total_power;

end

```