



ΔΙΕΘΝΕΣ
ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ
ΤΗΣ ΕΛΛΑΔΟΣ

ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ
ΚΑΙ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ
«ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΚΑΙ ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΕΠΙΔΟΣΗΣ
ΤΕΧΝΙΚΩΝ ΣΥΝΔΕΣΗΣ ΧΡΗΣΤΗ (USER
ASSOCIATION) ΣΤΑ ΔΙΚΤΥΑ 6^{ης} ΓΕΝΙΑΣ (6G)»



Της φοιτήτριας
Θωμαΐδας Μαχαιρίδου
Αρ. Μητρώου: 022158

Επιβλέπουσα
Αγάπη Μεσοδιακάκη
Έκτακτο Διδακτικό Προσωπικό

19 Ιουνίου 2024

Σχεδιασμός και σύγκριση επίδοσης τεχνικών σύνδεσης χρήστη (User Association) στα δίκτυα 6^{ης} γενιάς (6G)

Κωδικός Π.Ε. 22132

Όνοματεπώνυμο Φοιτητή: Μαχαιρίδου Θωμαΐδα

Όνοματεπώνυμο επιβλέπων καθηγητή: Μεσοδιακάκη Αγάπη

Ημερομηνία ανάληψης: 02-04-2022

Ημερομηνία περάτωσης Δ.Ε.

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 διπλωματική εργασία, στο Τμήμα Μηχανικών Πληροφορικής και Ηλεκτρονικών Συστημάτων του ΔΙ.ΠΑ.Ε.

Η παρούσα εργασία αποτελεί πνευματική ιδιοκτησία της φοιτήτριας Μαχαιρίδου Θωμαΐδας που την εκπόνησε. Στο πλαίσιο της πολιτικής ανοικτής πρόσβασης, ο 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 του συγγραφέα/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 του συγγραφέα/δημιουργού.

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

«Today's scientists have substituted mathematics for experiments, and they wander off through equation after equation, and eventually build a structure which has no relation to reality.»

(Nikola Tesla)

Πρόλογος

Η παρούσα πτυχιακή εργασία έχει υλοποιηθεί στα πλαίσια προπτυχιακής φοίτησης στη Σχολή Μηχανικών στο τμήμα Μηχανικών Πληροφορικής και Ηλεκτρονικών Συστημάτων του Διεθνούς Πανεπιστημίου Ελλάδος παράρτημα Σίνδου Θεσσαλονίκης. Ο τίτλος της πτυχιακής εργασίας είναι « Σχεδιασμός και σύγκριση επίδοσης τεχνικών σύνδεσης χρήστη (User Association) στα δίκτυα 6^{ης} γενιάς (6G) ».

Περίληψη

Ο σύγχρονος τρόπος ζωής και οι ανάγκες που έχουν δημιουργηθεί για ταχύτερη, ποιοτικότερη και ασφαλέστερη διάδοση πληροφορίας, επικοινωνίας, μεταφοράς αγαθών και ενημέρωση στην καθημερινότητά μας, έχει σαν αποτέλεσμα την ραγδαία αύξηση του αριθμού των συσκευών που συνδέονται στο δίκτυο επικοινωνιών αυξάνοντας τον τηλεπικοινωνιακό φόρτο στα ασύρματα δίκτυα.

Ο κλάδος των ασύρματων δικτύων έχει κληθεί να αναλάβει το δύσκολο έργο της διαχείρισης και ανάπτυξης νέων τεχνολογιών όλων αυτών των απαιτήσεων με σκοπό την ταχύτερη ανταπόκριση, την βελτίωση του ρυθμού μετάδοσης δεδομένων, την εκτενέστερη γεωγραφική κάλυψη, αλλά και τη δικαιοσύνη μεταξύ των χρηστών. Έχοντας παράλληλα να λάβει υπόψιν του την ενεργειακή κρίση, την υπερθέρμανση του πλανήτη και την ανάγκη για περιορισμό της κατανάλωσης της ενέργειας στη μετάβαση μας σε πράσινες επικοινωνίες.

Στο πλαίσιο αυτό έχει ξεκινήσει ήδη η συζήτηση για την επόμενη γενιά ασύρματων δικτύων, την 6^η γενιά (6G), η οποία στοχεύει στην δυναμική και αποτελεσματική επέκταση του περιβάλλοντος επικοινωνίας που θα επιτρέψει την πρόσβαση σε όλους τους ανθρώπους, οπουδήποτε και οποτεδήποτε. Αυτό απαιτεί το σχεδιασμό και την ανάπτυξη μηχανισμών για τη δυναμική κάλυψη και επέκταση συνδεσιμότητας και μέσω της εκμετάλλευσης καινοτόμων συσκευών.

Στην παρούσα πτυχιακή εργασία θα μελετήσουμε την επίδοση των κυριότερων τεχνικών σύνδεσης χρήστη (User Association) που έχουν προταθεί και χρησιμοποιηθεί μέχρι σήμερα στα ασύρματα δίκτυα 5^{ης} γενιάς (5G) και την εφαρμογή τους στα δίκτυα 6^{ης} γενιάς (6G) ως προς τα διαφορετικά κριτήρια ποιότητας. Θα αναπτυχθεί κώδικας σε πρόγραμμα προσομοίωσης και πρόταση μιας τεχνικής η οποία θα συγκριθεί με τις ήδη υπάρχουσες.

«Design and performance comparison of user association techniques in 6th generation (6G) networks»

«Machairidou Thomaida»

Abstract

There is a rapid growth on the number of devices that are connected in the communication network that increases the telecommunications load on the wireless networks. This growth is due to the modern way of life and the needs that have been created for faster, more qualitative services and safer dissemination of information, communication, transfer of commodities and the information in our everyday lives.

The wireless network industry has been called upon to undertake the difficult task of managing and developing new technologies of all these requirements in order to provide faster response, improve data transmission rate, wider geographic coverage, and fairness among users. Taking into account the energy crisis, global warming and the need to limit energy consumption in our transition to green communications.

In this context, the discussion has already started on the next generation of wireless networks, the 6th generation (6G), which aims at the dynamic and efficient expansion of the communication environment that will allow access to all people, anywhere and anytime. This requires the design and development of mechanisms to dynamically cover and extend connectivity and through the exploitation of innovative devices.

In this thesis we will study the performance of the main user association techniques that have been proposed and used to date in 5th generation (5G) wireless networks and their application in 6th generation (6G) networks in terms of the different quality criteria. Code will be developed in a simulation program and a technique proposal will be developed which will be compared with the existing ones.

Ευχαριστίες

Πριν την παρουσίαση της εργασίας θα ήθελα να ευχαριστήσω την κα. Μεσοδιακάκη Αγάπη για την εμπιστοσύνη της στο πρόσωπό μου για την ανάληψη της εργασίας. Οι γνώσεις της, η καθοδήγηση και η υπομονή της στην διάρκεια της εκπόνησης της εργασίας ήταν οι σημαντικότεροι παράγοντες για την συγγραφή αυτής της πτυχιακής εργασίας.

Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω τα μέλη της οικογένειάς μου για την υπομονή κατανόηση και στήριξη κατά την διάρκεια συγγραφής της εργασίας αλλά και όλων των ετών των σπουδών μου.

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 Εισαγωγή στα κυβελωτά δίκτυα	1
1.3 Γενιές ασύρματων δικτύων από 0G έως 4G	4
1.3.1 Η Γενιά 0	4
1.3.2 Δίκτυα Πρώτης Γενιάς - 1G	4
1.3.3 Δίκτυα Δεύτερης Γενιάς - 2G	5
1.3.4 Δίκτυα Τρίτης Γενιάς - 3G	6
1.3.5 Δίκτυα Τέταρτης Γενιάς - 4G	6
1.4 Δίκτυα Πέμπτης Γενιάς - 5G	7
1.5 Δίκτυα έκκτης γενιάς - 6G	33
1.6 Θέμα και στόχοι παρούσας πτυχιακής εργασίας	37
1.7 Μεθοδολογία	37
1.8 Επίλογος	38
2 Σύγχρονη Βιβλιογραφική Έρευνα & Προσεγγίσεις	39
2.1 Εισαγωγή	39
2.2 Related Work	39
2.3 Ορισμοί	50
2.4 Επίλογος	52
3 Μοντέλο Συστήματος και Πρόβλημα προς Επίλυση	53
3.1 Εισαγωγή	53
3.2 Μοντέλο Συστήματος (System Model)	53
3.3 Πρόβλημα προς Επίλυση	54
3.4 Προτεινόμενος Αλγόριθμος	55
3.5 Επίλογος	59
4 Αριθμητικά Αποτελέσματα & Ανάλυση	60
4.1 Εισαγωγή	60
4.2 Περιβάλλον Προσομοίωσης	60
4.3 Αποτελέσματα	63
4.4 Επίλογος	70
5 Συμπεράσματα ή/και προτάσεις βελτίωσης	71
5.1 Εισαγωγή	71
5.2 Συμπεράσματα	71
5.3 Κατευθύνσεις για Περαιτέρω Έρευνα	71
5.4 Επίλογος	73
BIBΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	74
A□Κώδικας αρχείου UL_DL_with_interference_only_AN	79
A□Κώδικας αρχείου UL_DL_with_interference.m	113
A□Κώδικας αρχείου find_target_SNR_new.m	160

Κατάλογος Σχημάτων

1.1	Example of frequency reuse factor or pattern, with four frequencies (F1-F4) [1].	1
1.2	Wireless LANs are often used for connecting to local resources and to the Internet [2]	3
1.3	The evolution of cellphone network from 1G to 5G [3]	4
1.4	Κυψελοειδή ή Κυψελωτά Δίκτυα [4].	5
1.5	Αρχιτεκτονική Δικτύων GSM [5].	6
1.6	The architecture of a 3G Network [6].	6
1.7	4G System Architecture [7].	7
1.8	5G System Architecture [8].	8
1.9	Inter-HetNet / Intra-HetNet Architecture [9].	9
1.10	massive MIMO Architecture [10].	10
1.11	mmWave [11].	11
1.12	Energy Harvesting [12].	12
1.13	Centralized SONs Architecture [13].	15
1.14	Distributed-Hybrid SONs Architecture [13].	16
1.15	D2D [14].	17
1.16	CRAN Architecture [15].	19
1.17	HCRAN Architecture - FRAN Architecture [15].	20
1.18	Full Duplex Technology [10].	21
1.19	M2M communications Architecture [16] [29].	23
1.20	Small Cell based HetNet [17].	25
1.21	mmWave massive MIMO Beamforming application in 5G [18].	28
1.22	SDN-based MEC-NFV architectural framework [19].	30
1.23	MEC reference architecture in an NFV environment [19].	31
1.24	MEC reference architecture in an NFV environment [19].	32
1.25	enabling technologies, requirements and trends in 6G [20].	34
1.26	targets-intergrates network architecture [21].	35
1.27	targets-intergrates network architecture [21].	36
3.1	System Model.	53
3.2	Flowcharts PAOAN Algorithm.	55
3.3	Inputs of PAOAN Algorithm.	56
3.4	Outputs of PAOAN Algorithm.	56
3.5	Flowcharts NPA Algorithm.	57
3.6	Inputs of NPA Algorithm.	58
3.7	Outputs of NPA Algorithm.	58
4.1	Matlab Logo.	60
4.2	Παραθυρικό Περιβάλλον.	61
4.3	Γραμμή εργασιών.	61
4.4	Κύριο Παράθυρο εργασίας.	62
4.5	Ο αλγόριθμος PAOAN στο περιβάλλον του Matlab.	62
4.6	Ο αλγόριθμος NPA στο περιβάλλον του Matlab.	63
4.7	Η τοποθέτηση των SC και των UEs στο δίκτυο.	64
4.8	Μέση συνολική κατανάλωση ενέργειας.	64
4.9	Μέση συνολική ενεργειακή απόδοση.	65
4.10	Μέση συνολική φασματική απόδοση.	65
4.11	Μέση συνολική φασματική απόδοση.	66
4.12	Η τοποθέτηση των SC και των UEs στο δίκτυο.	67
4.13	Μέση συνολική κατανάλωση ενέργειας.	68
4.14	Μέση συνολική ενεργειακή απόδοση.	68
4.15	Μέση συνολική φασματική απόδοση.	69
4.16	Μέση συνολική φασματική απόδοση του δικτύου και στο UL και DL.	70
5.1	The system structure for future HetNets. [22]	72

Κατάλογος Πινάκων

2.1	summary of user association techniques in research projects	39
-----	---	----

Συντομογραφίες

Δ.Ε.	Διπλωματική Εργασία
ΔΙΠΙΑΕ	Διεθνές Πανεπιστήμιο Ελλάδος
Π.Ε.	Πτυχιακή Εργασία
BS	Base Station
FDMA	Frequency Division Multiple Access
GSM	Global System for Mobile Communications
RBS	Radio Base Station
MSC	Mobile Switching Center
PSTN	Public Switched Telephone Network
OSI	Open Systems Interconnection
WaveLAN	Wave Local Area Network
PCS	Personal Communications Services
WPANs	Wireless Personal Area Networks
WLAN	Wireless Local Area Network
WANET	Wireless ad hoc network
WirelessMAN	Wireless Metropolitan Area Networks
WirelessWAN	Wireless Wide Area Networks
PCS	Personal Communications Service
D-AMPS	Digital Advanced Mobile Phone Service
LTE	Long-Term Evolution
GAN	Global area network
PTT	Push To Talk ή Press To Transmit
CB	Citizens' Band
IMTS	International Manufacturing Technology Show
NTT	Nippon Telephone and Telegraph
NMT	Nordic Mobile Telephones
TACS	Total Access Communication Systems
AMPS	Advance Mobile Phone Service
GMSK	Gaussian minimum-shift keying
TDMA	Time-Division Multiple Access
GPRS	General Packet Radio Services
EDGE	Enhanced Data Rates for GSM Evolution
ITU	International Telecommunication Union
IMT-2000	International Mobile Telecommunications-2000
NTT DoCoMo	Nippon Telegraph and Telephone DoCoMo
Gbps	Gigabits per second
Mbps	Megabits per second
QoS	Quality of Service
HDTV	High-definition television
DVB	Digital Video Broadcasting
WiMAX	Worldwide Interoperability for Microwave Access
LTEA	Long Term Evolution Advanced
eMBB	Enhanced mobile broadband
URLLC	Ultra-reliable and low latency communications
mMTC	Massive machine type communication
HetNet	Heterogeneous Network
SCs	Small Cells
RAT	Radio Access Technologies
UMTS	Universal Mobile Telecommunications Service
HSPA	High Speed Packet Access
WMAN	Wireless Metropolitan Area Network
RANs	Radio Access Networks
MassiveMIMO	Massive Multiple Input Multiple Output
SU MIMO	Single-User MIMO
MU-MIMO	Multi-User MIMO

IoT	Internet of Things
IoE	Internet of Everything
mmWave	millimeter Wave
MW	MicroWave
EH	Energy Harvesting Networks
UE	User Equipment
DAS	Distributed Antenna Systems
D2D	Device-to-Device
ΑΠΕ	Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας
WBANs	Wireless Body Area Networks
WSNs	Wireless Sensor Networks
RF	Radio Frequency
AP	Access Point
UA	User Association
ABCN	Ambient Backscatter Communication Networks
WPCN	Wireless Powered Communication Networks
SWIPT	Simultaneous Wireless Information and Power Transfers
THz	Terahertz
SONs	Self-Organizing Networks
AI	Artificial Intelligence
ML	Machine Learning
NE	Network Element
eNB	enhanced Node Base Station
ANR	Automatic Neighbor Relations
PCI	Physical Cell Identity
HO	HandOver
CCO	Coverage and Capacity Optimization
MLB	Mobility Load Balancing
MRO	Mobility Robustness/ Handover Optimization
ICIC	Inter-Cell Interference Coordination
RACH	Random Access Channel
NGMN	Next Generation Mobile Networks
3GPP	3rd Generation Partnership Project
C-SON	Centralized SON
D-SON	Distributed SON
H-SON	Hybrid SON
V-SON	Virtual SON
NFV	Network Function Virtualization
SDN	Software Defined Networking
SSN	Self-Sustaining network
KPI	Key Performance Indicators
D2DD	D2D Direct
D2DSHR	D2D Single hop Relay
D2DMHR	D2D Multi hop Relay
D2DC	D2D Client
QoS	Quality of Service
QoE	Quality of Experience
RAN	Radio Access Network
BBU	Base Band Unit
CAPEX	Capital Expenditure
OPEX	Operational Expenditure
CN	Core Network
RRH	Remote Radio Heads
C-RAN	Cloud-RAN
H-CRAN	Heterogeneous CRAN
F-RAN	Fog-RAN
HPNs	High Power Nodes
F-UEs	fog-UEs

FAPs	fog Access Points
CRSP	Collaboration Radio Signal Processing
CRRM	Cooperative Radio Resource Management
FD	Full-Duplex
SI	Self Interference
MAC	Medium Access Control
DSS	Dynamic Spectrum Sharing
M2M	Machine to Machine
MTC	Machine Type Communication
NB-IoT	Narrowband – IoT
EC-GSMIoT	Enhanced Coverage GSM–IoT
PSM	Power Saving Mode
WRV	Wireless Resource Virtualization
SINR	Signal to Interference plus Noise Ratio
FFR	Fractional Frequency Reuse
SS	Spectrum Sharing
LSA	Licensed Shared Access
LAA	Licensed Assisted Access
ABS	Almost Blank Subframe
RRM	Radio Resource Management
AIS	Artificial Immune System
PoP	Point of Presence
LOS	Line of Sight
NLOS	non-LOS
P2P	point-to-point
P2MP	point-to-multipoint
SCD	SC Drone
UAVs	Unmanned Aerial Vehicles
SNR	Signal to Noise Ratio
SE	Spectrum Efficiency
APIs	Application Programming Interfaces
VMs	Virtual Machines
VNFs	Virtual Network Functions
NFVI	Network Functions Virtualization Infrastructure
MANO	Management and Orchestration
MEC	Multi-Access Edge Computing
IT	Information Technology
ETSI	European Telecommunications Standards Institute
SFC	Service Function Chaining
max-RSS	maximum Received Signal Strength
MMAP	Maximum Mean channel Access Probability
MRSP	Maximum Received Signal Power
RSRP	Reference Signal Received Power
RE	Range Expansion
MPL	Minimum Path Loss
CAPC	Channel Access Priority Class
CRE	Cell Range Expansion
TPC	Target Power Control
TPC-GR	TPC with Gradual Removal
OPC	Opportunistic Power Control
DTPC	Dynamic-SIR Tracking Power Control
FFR	Fractional Frequency Reuse
OSFFR	Optimal Static FFR
HPC	Hybrid Power Control
SIR	Signal-to-Interference Ratio
LPNs	Low Power Nodes
HPNs	High Power Nodes
EE	Energy Efficiency

MBS	macroBS
FAP	femto AP
SCAP	Small Cell Access Point
PBS	picoBS
RSs	Relay Stations
RSRQ	Reference Signal Received Quality
RSSI	Received Signal Strength Indicator
UL	uplink
DL	downlink
BH	backhaul
PRB	Physical Resource Block
Joint EE	Joint UL-DL Energy-Efficient
CA	Context-Aware
NTN	Terrestrial Network
TN	Terrestrial Network
RRUR	Radio Resource Utilization Ratio
HAP	High-Altitude Platforms
MBSs	BSs mmWave
UDHNs	Ultra-Dense Heterogeneous Networks
UABO	User Association and BS Operation
IHAS	Improved Hierarchical Adaptive Search
AMAR	Association with Maximizing Achievable Rate
AMSUER	Association with Maximizing the Sum of Utilities of Effective Rates
AMSWER	Association with Maximizing the Sum of Weighted Effective Rates
IOA	Interactive Optimization Algorithm
Max-RSRP	Max-Reference Signal Received Power
SCA	Successive Convex Approximation
FSPL	Free Space Path Loss
AN	Access Network
GBR	Guarded Bits Rate
RM	Resource Management
RL	Reinforcement Learning
CQI	Channel Quality Indicator

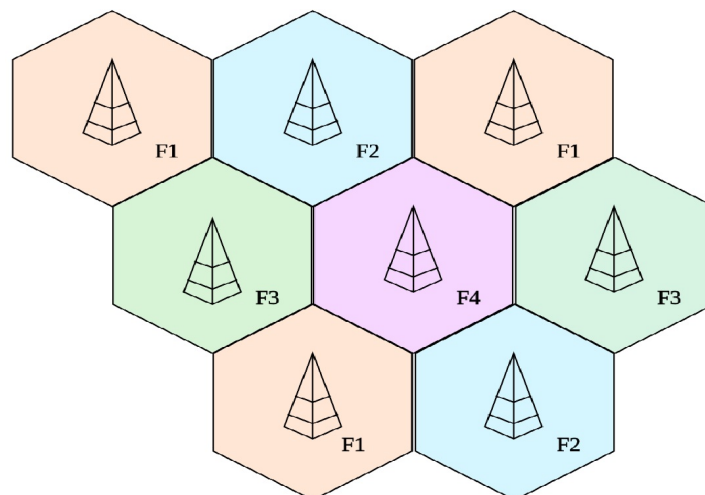
Κεφάλαιο 1ο: Εισαγωγή

1.1 Εισαγωγή

Στο παρόν κεφάλαιο θα παρουσιάσουμε τα κυψελωτά δίκτυα κινητής τηλεφωνίας, την εξέλιξη των γενεών σε αυτά καθώς και τα τεχνικά χαρακτηριστικά, τις τεχνολογίες και τις προκλήσεις που καλούνται να αντιμετωπίσουν κατά την διάρκεια της ανάπτυξής του με την πάροδο των ετών. Η αλματώδης ανάπτυξη των ασύρματων συσκευών που συνδέονται στο δίκτυο, ο πολλαπλασιασμός των δεδομένων που διαμοιράζονται σε αυτό και η ανάγκη για μεγαλύτερη ταχύτητα και όγκο δεδομένων έχει παροτρύνει και ωθήσει τους ερευνητές στο κομμάτι των δικτύων στην ανάπτυξη νέων τεχνολογιών και τεχνικών για την εξέλιξη.

1.2 Εισαγωγή στα κυψελωτά δίκτυα

Κυψελωτό δίκτυο είναι ένα δίκτυο τηλεπικοινωνιών όπου η σύνδεση από και προς του κόμβους είναι ασύρματη και το δίκτυο κατανέμεται σε χερσαίες περιοχές που ονομάζονται κυψέλες, κάθε μία από τις οποίες εξυπηρετείται από τουλάχιστον ένα πομποδέκτη σταθερής θέσης τους ονομαζόμενους σταθμούς βάσης (Base Station, BS) που παρέχουν στην κυψέλη την κάλυψη του δικτύου ώστε να μπορέσουν να μεταδοθούν η φωνή, τα δεδομένα και οποιοδήποτε άλλος τύπος περιεχομένου. Μια τυπική κυψέλη χρησιμοποιεί διαφορετικό σύνολο συχνοτήτων από γειτονικές κυψέλες για να αποφύγει τις παρεμβολές και να παρέχει εγγυημένη ποιότητα υπηρεσιών. Όταν ενώνονται οι κυψέλες μεταξύ τους παρέχουν ραδιοκάλυψη σε μια ευρεία γεωγραφική περιοχή δίνοντας την δυνατότητα σε φορητές ασύρματες συσκευές (κινητά τηλέφωνα, tablets, laptops, κτλ) να επικοινωνήσουν μεταξύ τους αλλά και με σταθερούς πομποδέκτες και τηλέφωνα οπουδήποτε στο δίκτυο μέσω των σταθμών βάσης ακόμα κι όταν οι πομποδέκτες κινούνται μέσα από περισσότερες από μια κυψέλες κατά την διάρκεια της μετάδοσης.



Σχήμα 1.1: Example of frequency reuse factor or pattern, with four frequencies (F1-F4) [1].

Τα κυψελωτά δίκτυα έχουν τα εξής χαρακτηριστικά : • Προσφέρουν περισσότερη χωρητικότητα από ένα μεγάλο πομπό λόγω του ότι η ίδια συχνότητα μπορεί να χρησιμοποιηθεί για πολλαπλούς συνδέσμους εφόσον βρίσκονται σε διαφορετικά κελιά. • Οι κινητές συσκευές καταναλώνουν λιγότερη ενέργεια γιατί

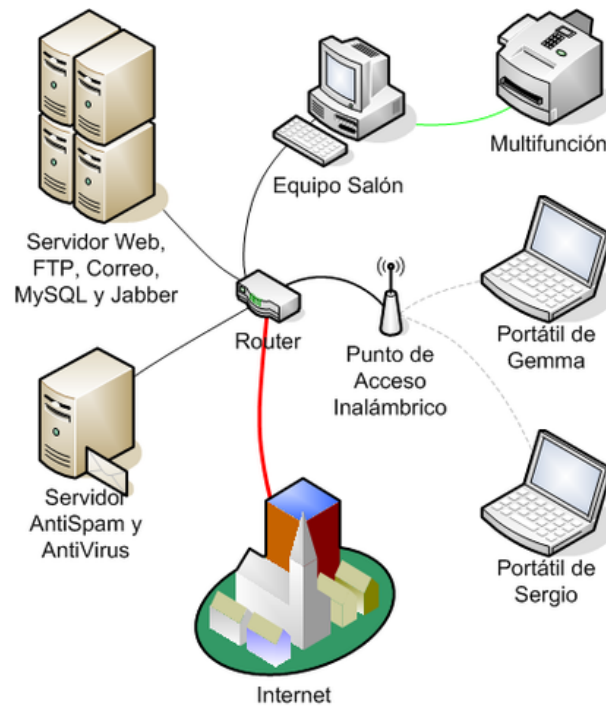
οι πύργοι της κινητής τηλεφωνίας είναι πιο κοντά απ' ό,τι σε σχέση με έναν μόνο πομπό ή με τον δορυφόρο. • Παρέχουν μεγαλύτερη περιοχή κάλυψης από ένα επίγειο πομπό, επειδή μπορούν να προστεθούν χωρίς αριθμητικό περιορισμό επιπλέον πύργοι κυψέλης καθώς δεν υπάρχει χωρικός περιορισμός στον ορίζοντα. • Δυνατότητα αξιοποίησης σημάτων υψηλής συχνότητας (περισσότερο διαθέσιμο bandwidth / ταχύτερο data rates) που δεν μπορούν να διαδοθούν σε μεγάλες αποστάσεις. • Με την συμπίεση δεδομένων και πολυπλεξίας, μπορούν να αποσταλούν πολλά κανάλια ήχου και βίντεο μέσω υψηλής συχνότητας με την χρήση ενός μόνο ευρυζωνικού φορέα [1].

Η αυξημένη χωρητικότητα ενός κυψελοειδούς δικτύου προέρχεται από το σύστημα μεταγωγής κινητής επικοινωνίας που αναπτύχθηκε από τον Amos Joel των Bell Labs, που επιτρέπει σε μια δεδομένη περιοχή κάλυψης, πολλαπλούς καλούντες να χρησιμοποιήσουν την ίδια συχνότητα με εναλλαγή στον πλησιέστερο πύργο κινητής τηλεφωνίας που έχει αυτήν την συχνότητα διαθέσιμη σε σύγκριση με την χρήση ενός πομπού όπου μια δεδομένη συχνότητα μπορεί να χρησιμοποιηθεί για μια μόνο μετάδοση. Αυτή η στρατηγική είναι βιώσιμη επειδή μια δεδομένη ραδιοσυχνότητα μπορεί να επαναχρησιμοποιηθεί σε διαφορετική περιοχή για μια άσχετη μετάδοση. Υπάρχουν παρεμβολές σημάτων από τα άλλα κελιά που χρησιμοποιούν την ίδια συχνότητα οπότε πρέπει να υπάρχει ένα τυπικό σύστημα FDMA (Frequency Division Multiple Access) στο οποίο υπάρχει τουλάχιστον μια κενή κυψέλη μεταξύ των κυψελών του επαναχρησιμοποιούν την ίδια συχνότητα [1].

Τέλος η δομή των κυψελωτών δικτύων κινητής τηλεφωνίας περιλαμβάνει: ένα δίκτυο ραδιοφωνικών BSs που δημιουργούν το υποσύστημα του BS, ένα δίκτυο μεταγωγής κυκλώματος για τον χειρισμό φωνητικών κλήσεων και κειμένου, ένα δίκτυο μεταγωγής πακέτων για τον χειρισμό δεδομένων κινητής τηλεφωνίας κι ένα δημόσιο τηλεφωνικό δίκτυο μεταγωγής για την σύνδεση των συνδρομητών στο ευρύτερο τηλεφωνικό δίκτυο. Αυτό το δίκτυο είναι η βάση του συστήματος GSM. Οποιοδήποτε τηλέφωνο συνδεθεί στο δίκτυο μέσω ενός Radio Base Station (RBS)(Ραδιοφωνικός Σταθμός Βάσης) σε μια γωνιά της αντίστοιχης κυψέλης, με τη σειρά του συνδέεται στο Mobile Switching Center (MSC) (Κέντρο μεταγωγής κινητής τηλεφωνίας). Το MSC παρέχει σύνδεση στο PSTN (Public Switched Telephone Network) (Δημόσιο Τηλεφωνικό Δίκτυο Μεταγωγής). Η σύνδεση από ένα τηλέφωνο προς το RBS ονομάζεται άνω ζεύξη ενώ η αντίστροφη σύνδεση κάτω ζεύξη [1].

Ως ασύρματο δίκτυο χαρακτηρίζεται το τηλεπικοινωνιακό δίκτυο, συνήθως τηλεφωνικό ή δίκτυο υπολογιστών, το οποίο χρησιμοποιεί, ραδιοκύματα ως φορείς πληροφορίας. Τα δεδομένα μεταφέρονται μέσω ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων, με συχνότητα φέροντος η οποία εξαρτάται κάθε φορά από τον ρυθμό μετάδοσης δεδομένων που υποστηρίζει το δίκτυο. Η ασύρματη επικοινωνία, σε αντίθεση με την ενσύρματη, δεν χρησιμοποιεί ως μέσο μετάδοσης κάποιον τύπο καλωδίου αλλά χρησιμοποιεί ασύρματες συνδέσεις δεδομένων μεταξύ κόμβων δικτύου. Τα διαχειριστικά δίκτυα τηλεπικοινωνιών γενικά υλοποιούνται και διαχειρίζονται χρησιμοποιώντας ραδιοεπικοινωνία. Αυτή η υλοποίηση λαμβάνει χώρα στο φυσικό επίπεδο της δομής δικτύου του μοντέλου OSI. Το πρώτο επαγγελματικό ασύρματο δίκτυο αναπτύχθηκε με την επωνυμία ALOHAnet το 1969 στο Πανεπιστήμιο της Χαβάης και τέθηκε σε λειτουργία τον Ιούνιο του 1971. Το πρώτο εμπορικό ασύρματο δίκτυο ήταν η οικογένεια προϊόντων WaveLAN, που αναπτύχθηκε από την NCR το 1986 [2].

Υπάρχουν κατηγορίες ασύρματων συνδέσεων οι οποίες είναι :



Σχήμα 1.2: Wireless LANs are often used for connecting to local resources and to the Internet [2]

- Επίγεια μικροκύματα (Terrestrial microwave)
- Επικοινωνιακοί δορυφόροι (Communications satellites)
- Κυψελωτά συστήματα και τα συστήματα PCS (Personal Communications Services) (Cellular and PCS Systems)
- Τεχνολογίες ραδιοφώνου και ευρέος φάσματος (Radio and Spread Spectrum Technologies)
- Οπτική επικοινωνία ελεύθερου χώρου (Free-space optical communication).

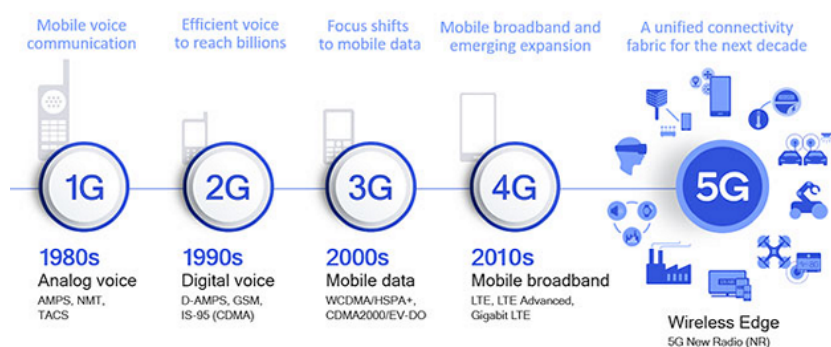
Τέλος έχουμε και τους τύπους των ασύρματων δικτύων που συναντούμε στην τεχνολογία οι οποίοι είναι:

- Ασύρματα Δίκτυα Προσωπικής Περιοχής (Wireless Personal Area Networks (WPANs))
- Ασύρματο Τοπικό Δίκτυο (Wireless Local Area Network (WLAN))
- Ασύρματο ad hoc Δίκτυο (Wireless ad hoc network)
- Ασύρματα Μητροπολιτικά Δίκτυα (Wireless metropolitan area networks (Wireless MAN))
- Ασύρματα Δίκτυα Ευρείας Περιοχής (Wireless wide area networks (Wireless WAN))
- Κυψελωειδή δίκτυα ή Δίκτυα Κινητής Τηλεφωνίας (Cellular network) : στα οποία έχουμε και τις εξής κατηγορίες :
 - Παγκόσμιο Σύστημα Κινητών Επικοινωνιών (Global System for Mobile Communications (GSM))
 - Υπηρεσία Προσωπικών Επικοινωνιών (Personal Communications Service (PCS))

– Προηγμένη Ψηφιακή Υπηρεσία Κινητής Τηλεφωνίας (D-AMPS) (Digital Advanced Mobile Phone Service)

- Ιδιωτικά Δίκτυα LTE/5G (Private LTE/5G networks)
- Ιδιωτικά Δίκτυα Ανοιχτού Κώδικα (Open Source)
- Παγκόσμιο Δίκτυο Περιοχής (Global area network (GAN))
- Διαστημικό Δίκτυο (Space network) [2].

1.3 Γενιές ασύρματων δικτύων από 0G έως 4G



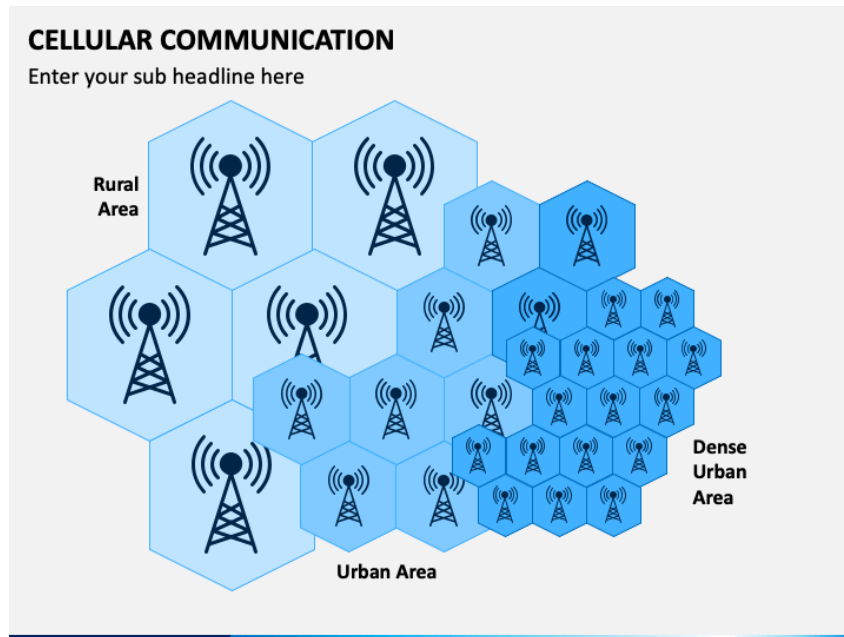
Σχήμα 1.3: The evolution of cellphone network from 1G to 5G [3]

1.3.1 Η Γενιά 0

Τα ασύρματα δίκτυα ξεκίνησαν από μια τηλεπικοινωνιακή δομή η οποία ήταν μια ραδιοτηλεφωνική υπηρεσία που εισήχθη την δεκαετία του 1940 στην Αμερική τα λεγόμενα ραδιοτηλέφωνα. Δεν έχουν καμία σχέση με τα κινητά τηλέφωνα που γνωρίζουμε σήμερα, υποστήριζε μόνο την φωνητική επικοινωνία και κατασκευάστηκαν κυρίως σε αυτοκίνητα ή φορτηγά. Σε αυτήν την ραδιοτηλεφωνία ο ένας μεγάλος πομπός τοποθετούταν στην κορυφή ενός ψηλού κτηρίου και το κανάλι χρησιμοποιείται για την μεταφορά και λήψη των δεδομένων. Για την Ενεργοποιημένη μετάδοση και την απενεργοποιημένη λήψη, ο χρήστης πάτησε ένα κουμπί για να μιλήσει από το ένα άκρο στο άλλο. Αυτό είναι γνωστό ως push to talk ή press to transmit (PTT) το 1950. Η τεχνολογία χρησιμοποιήθηκε από CB-ραδιόφωνο, ταξί, αυτοκίνητα της αστυνομίας. Η Bell Systems κυκλοφόρησε ένα σύστημα το 1960 το οποίο ονομάζεται Βελτιωμένη υπηρεσία κινητής τηλεφωνίας (IMTS). Μπορούν να γίνουν μερικές βελτιώσεις όπως η απευθείας κλήση και περισσότερο εύρος ζώνης. Στα τέλη της δεκαετίας του '60 και στις αρχές της δεκαετίας του '70 δημιουργήθηκαν τα πρώτα αναλογικά συστήματα που βασίστηκαν σε IMTS που χρησιμοποιήθηκαν 23 κανάλια από 150 MHz έως 450 MHz [23].

1.3.2 Δίκτυα Πρώτης Γενιάς - 1G

Το σύστημα κινητής επικοινωνίας πρώτης γενιάς εισήχθη στις αρχές του 1980 και χρησιμοποιεί την αναλογική μετάδοση για υπηρεσίες ομιλίας. Το 1979, το πρώτο κυψελοειδές σύστημα στον κόσμο τέθηκε

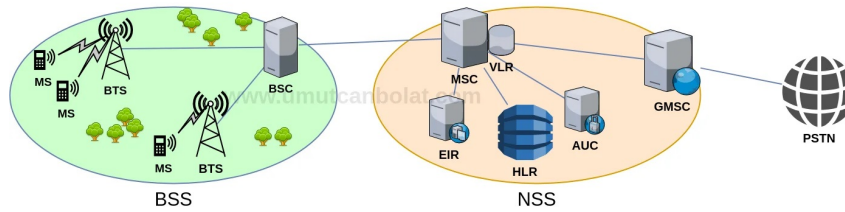


Σχήμα 1.4: Κυψελοειδή ή Κυψελωτά Δίκτυα [4].

σε λειτουργία από τη Nippon Telephone and Telegraph (NTT) στο Τόκιο της Ιαπωνίας. Δύο χρόνια αργότερα, η κυτταρική εποχή έφτασε στην Ευρώπη. Τα δύο πιο δημοφιλή αναλογικά συστήματα ήταν τα Nordic Mobile Telephones (NMT) και τα Total Access Communication Systems (TACS). Χρησιμοποιώντας την τεχνική διαμόρφωσης συχνότητας για ραδιομετάδοση χρησιμοποιώντας πολλαπλή πρόσβαση διαίρεσης συχνότητας (FDMA) με χωρητικότητα καναλιού 30 KHz και ζώνη συχνοτήτων ήταν 824-894 MHz, η οποία βασίστηκε σε μια τεχνολογία γνωστή ως Advance Mobile Phone Service (AMPS) [24].

1.3.3 Δίκτυα Δεύτερης Γενιάς - 2G

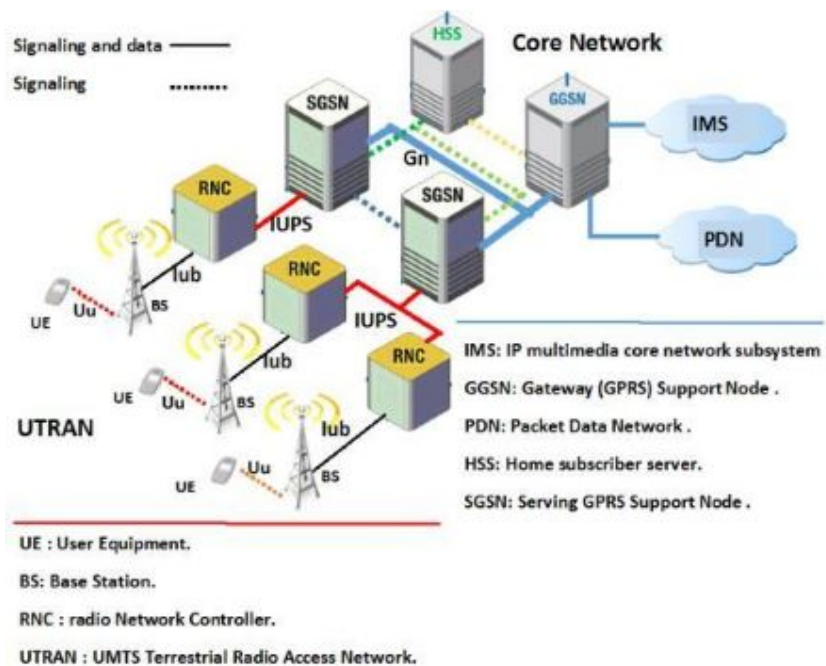
Μετά την πρώτη γενιά αναλογικού συστήματος κινητής επικοινωνίας, το κινητό σύστημα 2G εισήχθη γύρω στο 1991. Η ιδέα του 2G βασίζεται σε πολλαπλούς σταθμούς βάσης όπου κάθε σταθμός κατανέμεται ομοιόμορφα σε όλο τον κόσμο για την επικοινωνία με τους χρήστες. Το GSM (Global System For Mobile Communications) ήταν το πρώτο σύστημα 2G, υποστηρίζοντας ψηφιακή μετάδοση ήχου με data rates που έφταναν τα 9.6 kbps χρησιμοποιώντας, GMSK διαμόρφωση, TDMA τεχνολογία μετάδοσης και bandwidth 200kHz. Τα δίκτυα δεύτερης γενιάς λειτουργούσαν κάτω από ένα διεθνώς αναγνωρισμένο πρότυπο το οποίο έδωσε το έναυσμα για την τεχνολογική εξέλιξη των συστημάτων παγκοσμίως, διότι πλέον υπήρχε κοινό έδαφος, έτσι ώστε όλες οι χώρες να συμφωνήσουν σε ένα κοινό πρότυπο για την ανάπτυξη των συστημάτων τους. Επιπρόσθετα στα 2G δίκτυα, ενισχύθηκε η ασφάλεια του δικτύου με την ψηφιακή κωδικοποίηση των δεδομένων αλλά και αυξήθηκε η συνολική χωρητικότητα του. Ωστόσο επειδή το GSM εμφάνιζε ανεξήγητα χαμηλά data rates και σταδιακά αντικαταστάθηκε από την τεχνολογία GPRS (General Packet Radio Services). Το GPRS θεωρείται ότι ανήκει στη γενιά 2.5G και χρησιμοποιεί τεχνολογία ανταλλαγής πακέτων, την οποία και υιοθέτησε από το GSM, βελτιώνοντας το data rate, φτάνοντας μέχρι και στα 50 kbps, ενώ ταυτόχρονα χρησιμοποιούσε παρόμοια τεχνολογία αποστολής δεδομένων αλλά και το ίδιο bandwidth με το GSM. Στα μέλη της οικογένειας αυτής της γενιάς ανήκει και το 2,75G(EDGE)(Enhanced Data Rates for GSM Evolution) [24, 25].



Σχήμα 1.5: Αρχιτεκτονική Δικτύων GSM [5].

1.3.4 Δίκτυα Τρίτης Γενιάς - 3G

Μία δεκαετία αργότερα, το 2001 έκαναν την εμφάνισή τους τα δίκτυα 3ης γενιάς (3G). Η Διεθνής Ένωση Τηλεπικοινωνιών (International Telecommunication Union, ITU) στις αρχές της δεκαετίας του 1980 είχε ξεκινήσει ερευνητικές διαδικασίες που όμως χρησιμοποιήθηκαν 2 δεκαετίες αργότερα. Οι τεχνικές προδιαγραφές διατέθηκαν στο κοινό με το όνομα IMT-2000. Το 3G κυκλοφόρησε για πρώτη φορά από το NTT DoCoMo το 2001 και είχε ως στόχο την τυποποίηση του πρωτοκόλλου δικτύου που χρησιμοποιούν οι προμηθευτές. Βασικά χαρακτηριστικά της τεχνολογίας αποτέλεσαν οι ρυθμοί μετάδοσης που ήταν αρκετά υψηλοί καθώς και η περιαγωγή στο Internet με την δυνατότητα μεταφοράς δεδομένων, οι οποίες ήταν 4 φορές πιο γρήγορες απ' αυτές του 2G και έτσι οδήγησαν επίσης στην αύξηση νέων υπηρεσιών, όπως η μεταφορά δεδομένων και φωνής και η τηλεδιάσκεψη [26].

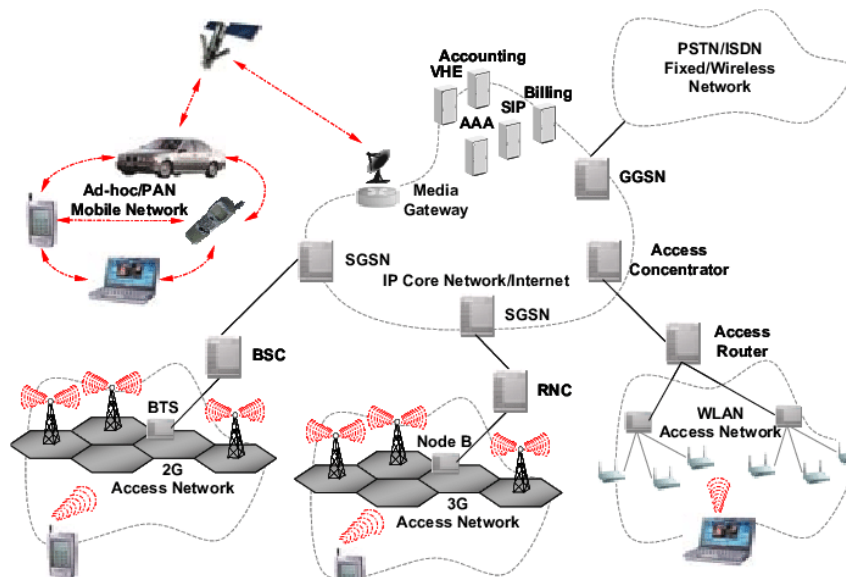


Σχήμα 1.6: The architecture of a 3G Network [6].

1.3.5 Δίκτυα Τέταρτης Γενιάς - 4G

Τα δίκτυα τέταρτης γενιάς ξεκίνησαν να αναπτύσσονται εμπορικά στις αρχές της δεκαετίας του 2010. Θεωρητικά, τα εν λόγω δίκτυα πετυχαίνουν ρυθμούς έως και 1 Gbps για χαμηλές ταχύτητες κίνησης του δέκτη και έως 100 Mbps για υψηλές [10]. Επίσης, τα δίκτυα αυτά μπορούν να διαχειριστούν μεγαλύτερο όγκο δεδομένων από τα δίκτυα 3G. Οι προσφερόμενες υπηρεσίες είναι παρόμοιες με αυτές

της τρίτης γενιάς. Συνεπώς, η γενιά αυτή έχει ως στόχο να βελτιώσει το Quality of Service (QoS) και να ικανοποιήσει τις υψηλές απαιτήσεις για εφαρμογές όπως High-definition television (HDTV), Digital Video Broadcasting (DVB), λήψη και μετάδοση βίντεο υψηλής ποιότητας σε ζωντανή ροή αλλά και άλλων υπηρεσιών που απαιτούν υψηλούς ρυθμούς δεδομένων [27]. Στα συστήματα 4G ανήκουν τα Worldwide Interoperability for Microwave Access (WiMAX) και Long Term Evolution Advanced (LTE-A) ενώ υπάρχει συμβατότητα με δίκτυα προηγούμενης γενιάς [10, 27]. Οι εξελίξεις της τεχνολογίας LTE οδήγησαν στο πρότυπο LTE-A Pro. Αυτό βελτιώνει ακόμα περισσότερο τις προσφερόμενες ταχύτητες ενώ ταυτόχρονα αυξάνει τη κάλυψη συνδεσιμότητας και διατηρεί την συμβατότητα με το πρότυπο LTE-A [27].



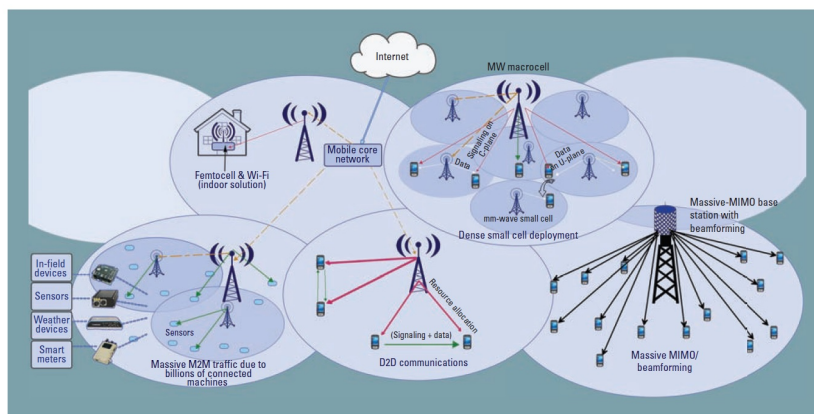
Σχήμα 1.7: 4G System Architecture [7].

1.4 Δίκτυα Πέμπτης Γενιάς - 5G

Η ταχεία ανάπτυξη των ηλεκτρονικών συσκευών που έχει σαν αποτέλεσμα την αύξηση του αριθμού των χρηστών, έφερε αύξηση στις απαιτήσεις των χρηστών για σύνδεση στο διαδίκτυο οποτεδήποτε και οπουδήποτε, μείωση την καθυστέρησης, ζήτηση για υψηλότερη ταχύτητα δεδομένων ανά συσκευή, τα οποία το LTE της 4ης γενιάς δεν μπορούσε πλέον να καλύψει. Οπότε μετά από σχεδόν μια δεκαετία από την εμφάνιση του 4G έκανα την εμφάνιση τους τα ασύρματα δίκτυα 5ης γενιάς με νέες αναδυόμενες τεχνολογίες στον τομέα της έρευνας, νέες υπηρεσίες, εφαρμογές που θα βελτιώσουν την ποιότητα και την χωρητικότητα του συστήματος εντός του φάσματος περιορισμένου εύρους ζώνης του οποίου η ζώνη συχνοτήτων είναι 3-300 GHz και το εύρος ζώνης δεδομένων θα είναι 1 Gbps και υψηλότερα (ανάλογα με τη ζήτηση), διαδοχικώς [24].

Έχουμε τρία κύρια σενάρια χρήσης με συγκεκριμένες δυνατότητες και απαιτήσεις: 1. Βελτιωμένη ευρυζωνική σύνδεση για κινητά (Enhanced mobile broadband - eMBB): κάλυψη ευρείας περιοχής και hotspots για απρόσκοπτη εμπειρία χρήστη και υψηλή απόδοση. 2. Εξαιρετικά αξιόπιστες και χαμηλής καθυστέρησης επικοινωνίες (Ultra-reliable and low latency communications - URLLC): υψηλή απόδοση, χαμηλή καθυστέρηση και υψηλή διαθεσιμότητα. 3. Επικοινωνίες τύπου μαζικής μηχανής (Massive machine type communication - mMTC): πολύ μεγάλη κάλυψη και αριθμός συνδεδεμένων συσκευών χαμηλού κόστους

με πολύ μεγάλη διάρκεια μπαταρίας [27].



Σχήμα 1.8: 5G System Architecture [8].

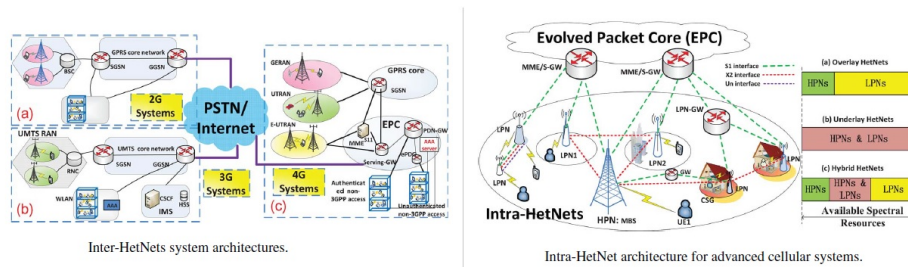
Τα τελευταία χρόνια έχουν προστεθεί στις απαιτήσεις των 5G δικτύων και η εύρεση τεχνικών μείωσης της ενεργειακής κατανάλωσης του δικτύου αλλά και γενικότερα της εξοικονόμησης ενεργειακών πόρων και την ανάγκη της μετάβασης μας σε πιο πράσινες επικοινωνίες. Αντιλαμβανόμαστε, λαμβάνοντας όλους αυτούς τους παράγοντες υπόψιν ότι το κύριο χαρακτηριστικών των δικτύων 5ης γενιάς είναι η ετερογένεια που θα περιλαμβάνει ένα σύνολο τεχνικών πρόσβασης σε κάθε επίπεδο μέσα στο δίκτυο παρέχοντας στον τελικό χρήστη την υλοποίηση όλων των αναγκών του για συνδεσιμότητα, ταχύτητα και ποιοτικές υπηρεσίες γενικότερα. Τεχνολογίες 5G δικτύων

Για να μπορέσουν να υποστηριχθούν όλες αυτές οι νέες απαιτήσεις στα ασύρματα δίκτυα 5ης γενιάς χρειαζόμαστε την περαιτέρω βελτίωση των ήδη υπάρχοντων τεχνολογιών, αλλά και την ανάπτυξη νέων για να μπορέσουν να υλοποιηθούν. Στο παρόν υποκεφάλαιο θα αναλύσουμε αυτές τις τεχνολογίες. [Παρακάτω αναλύουμε αυτές τις τεχνολογίες.]

HetNet (Heterogeneous Network)

Τα ετερογενή ασύρματα δίκτυα (εφεξής θα αναφέρονται ως HetNets) είναι ένα σύνολο συσκευών που χρησιμοποιούν διαφορετική επικαλυπτόμενη Τεχνολογία Ραδιοπρόσβασης (Radio Access Technologies, RAT) όπως και στα κυψελωτά δίκτυα (GSM, UMTS, HSPA, LTE, 4G WLAN: 802.11.x και WMAN: 802.16) μέσω μιας κοινής πλατφόρμας, στα οποία συνυπάρχουν σε πολλαπλά επίπεδα Μικρές Κυψέλες (εφεξής SCs: Small Cells) που βρίσκονται κάτω από μακρο-κυτταρικά δίκτυα με επικαλυπτόμενη κάλυψη σήματος. Τα SCs που περιλαμβάνουν τα picocells, femtocells και relays, μεταδίδουν σε χαμηλή ισχύ και χρησιμεύουν στην εκφόρτωση της κίνησης από τις μακροκυψέλες βελτιώνοντας την ποιότητα κάλυψης, ενισχύοντας την απόδοση των χρηστών στα άκρα της κυψέλης, ενισχύοντας παράλληλα την φασματική και ενεργειακή απόδοση της περιοχής. Είναι μια τεχνολογία που μπορεί να διαχειριστεί την ολοένα και αυξανόμενη κίνηση δεδομένων σε αυτά, καθώς τα σύγχρονα ασύρματα τερματικά παρέχουν πολλαπλές διεπαφές μεταξύ των επιπέδων. Αυτό δίνει την δυνατότητα σε οποιαδήποτε φορητή συσκευή να επιλέξει την καταλληλότερη τεχνολογία ασύρματης πρόσβασης με βάση τις ανάγκες και τις απαιτήσεις της ώστε οι χρήστες να μπορούν να απολαύσουν πολλαπλές ασύρματες υπηρεσίες με ομαλό τρόπο [28, 29].

Στα HetNets διακρίνουμε δύο κύριες κατηγορίες αρχιτεκτονικής, τα Inter-HetNets και Intra-HetNets. Τα Inter-HetNets είχαν χρησιμοποιηθεί για την ολοκλήρωση λειτουργιών διασυνεργασίας και συνεργασίας



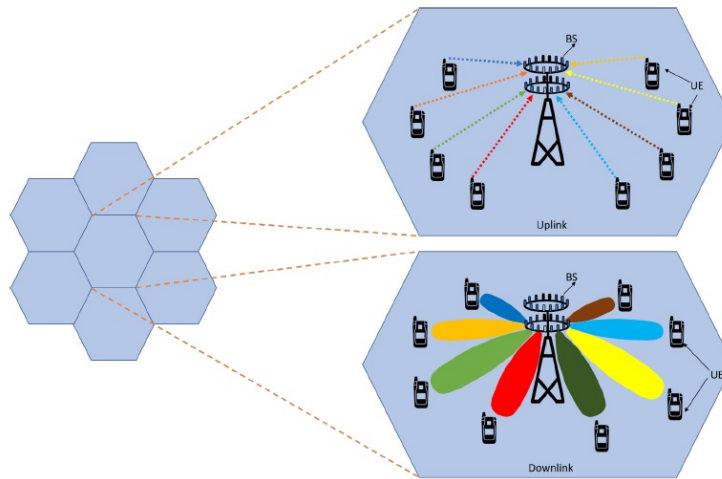
Σχήμα 1.9: Inter-HetNet / Intra-HetNet Architecture [9].

πολλαπλών Δικτύων ΡαδιοΠρόσβασης (RANs : Radio Access Networks). Έπειτα αξιοποίησαν το φάσμα συχνοτήτων και διευκόλυναν την ευέλικτη χρήση εναλλακτικών ζωνών συχνοτήτων σε διαφορετικά RAT, οι οποίες πρόσθεσαν ένα επιπλέον βαθμό ελευθερίας όσον αφορά τον ρυθμό μετάδοσης δεδομένων και την αξιοπιστία, χρησιμοποιώντας μηχανισμούς tight coupling ή loose coupling. Στα Intra-HetNets διακρίνουμε τρεις αρχιτεκτονικές κατανομής των φασματικών πόρων, την Overlay, την Underlay και την Mixed Overlay and Underlay αρχιτεκτονική [9].

Massive MIMO (Multiple Input Multiple Output)

Το Massive MIMO είναι μία επέκταση της τεχνολογία MIMO η οποία περιλαμβάνει τη χρήση εκατοντάδων ακόμα και χιλιάδων κεραιών που συνδέονται σε ένα σταθμό βάσης για την επίτευξη υψηλής φασματικής απόδοσης, ρυθμοαπόδοσης και ενεργειακής απόδοσης. Πριν την εισαγωγή της τεχνολογίας MIMO χρησιμοποιούνταν κυρίως συστήματα Μονής Εισόδου-Μονής Εξόδου τα οποία δεν μπορούσαν να υποστηρίξουν τον μεγάλο αριθμό χρηστών και την μαζική εισροή ασύρματης κίνησης δεδομένων με αξιοπιστία. Για να μπορέσει να εξυπηρετηθεί αυτός ο όγκος των χρηστών αναπτύχθηκαν διάφορες τεχνολογίες MIMO όπως MIMO ενός χρήστη (SU MIMO: Single-User MIMO), MIMO πολλών χρηστών (MU-MIMO: Multi-User MIMO) και network MIMO, οι οποίες όμως δεν κατέστησαν δυνατό να καλύψουν τις συνεχώς αυξανόμενες απαιτήσεις. Έτσι φτάσαμε στην τεχνολογία Massive MIMO η οποία συνδυάζει τις κεραιές, τις ραδιοσυχνότητες και το φάσμα του σήματος, για να επιτρέψει την μεγαλύτερη χωρητικότητα και ταχύτητα στα δίκτυα 5G. Τα δίκτυα 5G πέρα από την ταχύτητα, την απόδοση και την ικανοποίηση της ποιότητας των υπηρεσιών των νέων χρηστών, έχουν να διαχειριστούν και την τεράστια πλέον κίνηση δεδομένων με αποτελεσματικό και αξιόπιστο τρόπο, διότι υπάρχουν τρισεκατομμύρια δεδομένων χρηστών, δισεκατομμύρια συσκευές IoT (Internet of Things), έξυπνα σπίτια, αυτόνομα οχήματα, έξυπνα δίκτυα, έξυπνες κεραιές, έξυπνοι αυτοκινητόδρομοι, έξυπνη ενέργεια, εφαρμογές για έξυπνη υγειονομική περίθαλψη και οδηγούμαστε στο IoE (Internet of Everything) τα οποία τα παραδοσιακά σχήματα πολλαπλής πρόσβασης πρακτικά δεν μπορούν να τα εξυπηρετήσουν με αξιοπιστία. Έτσι το Massive MIMO μπορεί να ανιχνεύσει δεδομένα από ταυτόχρονη μετάδοση των αισθητήρων με πολύ χαμηλότερη καθυστέρηση και υψηλότερους ρυθμούς μετάδοσης δεδομένων σε πραγματικό χρόνο σε κεντρικές τοποθεσίες παρακολούθησης για τις εφαρμογές όλων αυτών των έξυπνων συστημάτων με τεράστιο κέρδος πολυπλεξίας και δυνατότητες beamforming [7, 10, 29].

Συμπερασματικά τα οφέλη της χρήσης της τεχνολογίας Massive MIMO είναι: η υψηλή φασματική απόδοση, η ενεργειακή απόδοση, ο υψηλός ρυθμός δεδομένων, η ακριβής και αξιόπιστη παρακολούθηση χρηστών, η χαμηλή κατανάλωση ενέργειας, το μειωμένο Fading λόγω πλήθος κεραιών στον δέκτη, το χαμηλό Latency, η ανθεκτικότητα σε παρεμβολές και εσωτερικές εμπλοκές στις κεραιές, η αξιοπιστί-



Massive MIMO uplink and downlink.

Σχήμα 1.10: massive MIMO Architecture [10].

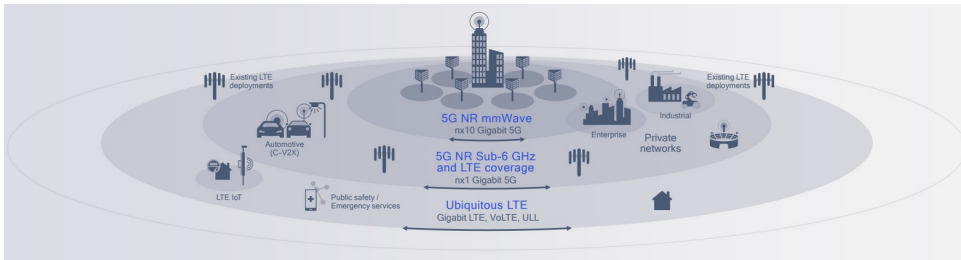
α, η ενισχυμένη ασφάλεια και το χαμηλό Complex Linear Processing λόγω του πλήθους των κεραιών στο Σταθμό Βάσης(εφεξής BS:Base Station) βελτιστοποιεί τους απλούς ανιχνευτές σήματος και τους precoders του συστήματος [10, 29].

Παρολα αυτά η τεχνολογία Massive MIMO αντιμετωπίζει σημαντικές προκλήσεις που πρέπει να υπερκεράσει όπως το Channel Estimation, το Pilot Contamination, το Precoding, τον προγραμματισμός χρήστη, τις βλάβες υλικού, την ενεργειακή απόδοση και την ανίχνευση σήματος, για να επιτύχει όλα αυτά τα πλεονεκτήματα της [10].

mmWave (Millimeter wave)

Το μεγαλύτερο μέρος των συστημάτων επικοινωνίας λειτουργούν ήδη στην ζώνη των μικροκυμάτων (MicroWave: MW) κάτω από τα 3 GHz λόγω καλύτερων χαρακτηριστικών διάδοσης πράγμα που την καθιστά σπάνια. Τα δίκτυα κινητής τηλεφωνίας έχουν βελτιώσει την ποιότητα των υπηρεσιών τους χρησιμοποιώντας πρόσθετο φάσμα (υψηλές συχνότητες και μεγαλύτερο εύρος ζώνης). Ένα από τα βασικά χαρακτηριστικά των δικτύων 5G είναι η ευελιξία τους, που τους επιτρέπει να υποστηρίζουν πολλές περιπτώσεις χρήσης με βελτιστοποιημένο τρόπο χρησιμοποιώντας φάσμα χαμηλής ζώνης κάτω από 1 GHz, συχνότητες μεσαίας ζώνης από 1 GHz έως 6 GHz ή φάσμα υψηλής ζώνης πάνω από 6 GHz. Το φάσμα χαμηλής ζώνης θεωρείται απαραίτητο για περιπτώσεις χρήσης που απαιτούν απρόσκοπτη κάλυψη και υψηλή κινητικότητα, όπως συμβαίνει με τις ultra Reliable Low Latency Communications (uRLLC) και τις Massive Machine Type Communications (mMTC). Το φάσμα της μεσαίας ζώνης μπορεί να χρησιμοποιηθεί από τα πρώτα δίκτυα 5G για την υποστήριξη της enhanced Mobile Broadband (eMBB) η οποία είναι ζωτικής σημασίας για την προώθηση των επενδύσεων στα δίκτυα 5G [8, 30].

Τέτοιες ταχύτητες μετάδοσης μπορούν να παραδοθούν μόνο με την χρήση καναλιών με μεγάλο εύρος ζώνης που υποστηρίζουν ασύρματες υπηρεσίες Gigabit οι οποίες είναι διαθέσιμες μόνο στην υψηλή ζώνη σε συχνότητες mmWave. Το εύρος ζώνης συχνοτήτων είναι περίπου 30-300 GHz σε ηλεκτρομαγνητικό φάσμα, μήκος κύματος 1-10 mm και εύρος ζώνης 252 GHz [31].



Σχήμα 1.11: mmWave [11].

Το mmWave μπορεί να είναι μια επεκτάσιμη λύση για μελλοντικά ασύρματα δίκτυα backhaul. Η μετάδοση MmWave έχει υιοθετηθεί σε πολλά πρότυπα όπως το IEEE 802.15.3c για εσωτερικά ασύρματα προσωπικά δίκτυα (WPAN) και το IEEE 802.11ad για WLAN. Ως μία από τις βασικές τεχνικές 5G, τα συστήματα mmWave παρουσιάζουν τα ακόλουθα χαρακτηριστικά:

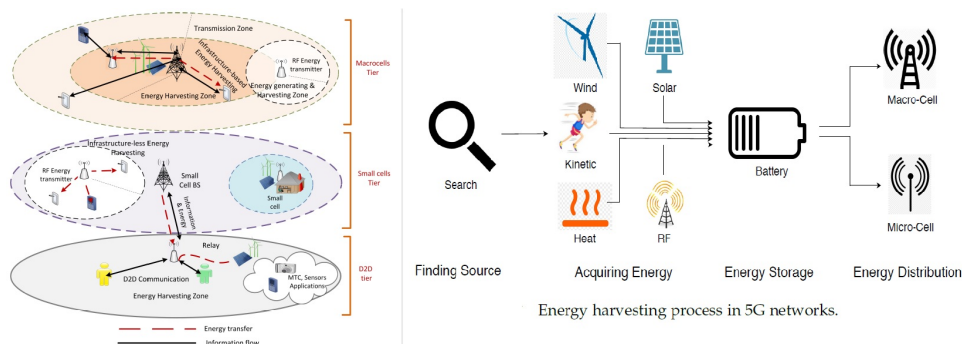
- σε σύγκριση με τα παραδοσιακά συστήματα επικοινωνίας χαμηλής συχνότητας, τα mmWave παρουσιάζουν κατά αρκετές τάξεις μεγέθους υψηλό path-loss, το οποίο τα καθιστά κατάλληλα μόνο για συστήματα μικρής εμβέλειας.
- στα συστήματα mmWaves χρησιμοποιείται επικοινωνία υψηλής κατεύθυνσης που βασίζεται σε στενές δέσμες για την επίτευξη υψηλού κέρδους διαμόρφωσης δέσμης για την καταστολή των παρεμβολών που προέρχονται από γειτονικές κυψέλες.
- για τα διαφράγματα σταθερής συστοιχίας, τα mmWave BSs ομαδοποιούν περισσότερες κεραίες σε ένα δεδομένο χώρο κι έτσι επιτυγχάνουν αυξημένο κέρδος συστοιχίας. Υιοθετούν χαμηλής πολυπλοκότητας αναλογικά beamforming/precoding σχήματα λόγω περιορισμών υλικού που αντιμετωπίζουν σε αυτές της υψηλές συχνότητες [29]. Κάποια από τα βασικά μειονεκτήματα είναι το path-loss, οι υψηλοί main and side lobes, η περίθλαση, η ανάκλαση, η υψηλή απώλεια διείσδυσης, η ατμοσφαιρική απορρόφηση και μεγαλύτερη εξασθένηση λόγω της βροχής και της ασθενούς διάχυσης. Επίσης, χρησιμοποιείται ως ασύρματο σύστημα μικρής εμβέλειας [31]. Αυτές οι συχνότητες υψηλής ζώνης έχουν μεγάλο path-loss οπότε η κάλυψη θα είναι περιορισμένη. Αυτό μπορεί να μετριαστεί με την χρήση κεραιών υψηλής ισχύος ή με συστοιχίες κεραιών. Αυτές οι κεραίες παρουσιάζουν στενό πλάτος δέσμης κάτι το οποίο είναι επιθυμητό καθώς επιτρέπει τον περιορισμό των παρεμβολών σε περιορισμένες περιοχές αλλά απαιτεί αλγορίθμους ακριβής διεύθυνσης δέσμης και προσεκτικό σχεδιασμό των απαραίτητων αριθμών δέσμης. Οπότε είναι κατάλληλα για χρήση σε εσωτερικά hotspot και σε συστοιχίες μικρών κυψελών σε εξωτερικούς χώρους [30].

Energy Harvesting Networks (EH)

Η ανάπτυξη των δικτύων 5G σε συνδυασμό με την κλιματική κρίση και την κρίση στον τομέα της ενέργειας έχουν καταστήσει επιτακτική την ανάγκη ανάπτυξης πιο πράσινων δικτύων τα οποία θα μπορούν να συλλέγουν ενέργεια από το περιβάλλον ή από ανανεώσιμες πηγές ενέργειας έτσι ώστε να είναι ενεργειακά πιο αποδοτικά. Οι εξελίξεις στον τομέα των τεχνολογιών συγκομιδής ενέργειας δίνουν ελπίδες ακόμα και για την δημιουργία αυτοσυντηρούμενων συσκευών και σταθμών βάσης. Μια ακόμη πρόκληση που έχουν να αντιμετωπίσουν τα δίκτυα 5G είναι και η βελτίωση της ενεργειακής απόδοσης των ασύρματων συσκευών με περιορισμένη μπαταρία, είτε μιλάμε για τον εξοπλισμό των χρηστών (User Equipment UE) του δικτύου, είτε μιλάμε για τους ίδιους τους BSs(σταθμούς βάσης) και τις μικροκυψέλες (Small Cells SCs) [12, 29, 32, 33].

Η πύκνωση του δικτύου με επιπλέον SCs, οπτικές ίνες, προσθήκη συσκευών DAS (Distributed Antenna

Systems) σε μια γεωγραφική περιοχή για την αύξηση της χωρητικότητας και της κάλυψης του δικτύου και την επικοινωνία Device-to-Device (D2D) έχουν σαν αποτέλεσμα την αύξηση της φασματικής απόδοσης και την μείωση της ισχύος μετάδοσης. Αυτό επιφέρει αύξηση της συνολικής κατανάλωσης ενέργειας των δικτύων η οποία πρέπει να διαχειριστεί από τα δίκτυα. Τα παραδοσιακά συστήματα ασύρματης επικοινωνίας χρησιμοποιούν ενέργεια από σταθερές πηγές ενέργειας των οποίων η αντικατάσταση, συντήρηση ή επαναφόρτισή τους δεν είναι εύκολη και παράλληλα είναι δαπανηρή. Αυτό οδήγησε την ερευνητική κοινότητα στο κομμάτι της ενεργειακής απόδοσης των δικτύων να προσανατολιστεί στον τομέα των Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας (ΑΠΕ) και πως αυτές θα μπορούσαν να εφαρμοστούν στα κυψελωτά δίκτυα 5G και ιδιαίτερα λόγω της χρήσης των HetNets σε πιο υπόστρωμα θα μπορούσαν να εφαρμοστούν [9, 12, 29].



Σχήμα 1.12: Energy Harvesting [12].

Οι δυνατότητες ΕΗ είναι ιδιαίτερα δελεαστικές σε ένα μεγάλο εύρος εφαρμογών, κυρίως σε διαδεδωμένες συσκευές όπως τα Wireless Body Area Networks (WBANs), Wireless Sensor Networks (WSNs) και το Διαδίκτυο Πραγμάτων Internet of Things (IoT). Στο πλαίσιο αυτό υπάρχουν κάποιες απαιτήσεις συλλογής ενέργειας για τα κυψελωτά δίκτυα 5G οι οποίες είναι: να υπάρχει συνεχής και ενιαία διαθεσιμότητα ενέργειας στο δίκτυο και να μην εξαρτάται από μια μόνο πηγή, θα πρέπει να γίνεται αποτελεσματικός διαμοιρασμός της ενέργειας συνολικά στο δίκτυο με την δημιουργία πρωτοκόλλων κοινής χρήσης της ενέργειας τα οποία θα πρέπει να ενσωματώνουν και τις παραμέτρους απόδοσης του δικτύου για να διαμοιράζεται η συλλεγόμενη ενέργεια, ανάπτυξη προσαρμοστικών μηχανισμών διαχείρισης της ενέργειας που θα παρέχουν δυναμική ισχύ από την ενέργεια που συλλέγεται ανάλογα με τις ενεργειακές απαιτήσεις οι κύριες πτυχές αυτών των μηχανισμών είναι η πρόβλεψη κατανάλωσης ενέργειας της συσκευής λειτουργίας και ένα δυναμικό έλεγχο ισχύος της συσκευής συλλογής ενέργειας, υποδομές συγκομιδής ενέργειας ραδιοσυχνοτήτων (RF: Radio Frequency) και σε λειτουργίες βασισμένες σε υποδομές (το κεντρικό BS ή AP (Access Point: Σημείο Πρόσβασης) μεταδίδει ενέργεια και πληροφορίες ραδιοσυχνοτήτων) καθώς και σε λειτουργίες χωρίς υποδομή (περιλαμβάνει τη χρήση ασύρματων πομπών ενέργειας που μπορούν να χρησιμοποιηθούν από τους κοντινούς χρήστες χωρίς διαμεσολάβηση BS ή AP), χρήση υβριδικών πηγών ενέργειας για να μπορούν να αντιμετωπιστούν οι διακυμάνσεις της συλλογής από τις πηγές ενέργειας (ηλεκτρικό δίκτυο, ενέργεια από το δίκτυο συγκομιδής ενέργειας, μπαταρίες και γεννήτριες ντίζελ) χρησιμοποιώντας πλήρως τη συλλεγόμενη ενέργεια και τέλος πρέπει να ληφθεί υπόψη προκαταλαμβανόμενη Συσχέτιση Χρηστών (User Association) που θα επιτύχει μια λειτουργία εξισορρόπησης του φορτίου για την αποτροπή της υπερφόρτωσης της βαθμίδας των μακροκυψελών για υπάρχει αποτελεσματική και ενεργειακά αποδοτική κατανάλωση ενέργειας [12, 34].

Ολοκληρώνοντας, οι έρευνες της επιστημονικής κοινότητας κατέληξαν σε κάποιες πηγές ενέργειας που

μπορούμε να αξιοποιήσουμε για να συλλέξουμε ενέργεια στο πλαίσιο της ανάγκης μας για πιο πράσινες μορφές ενέργειας και αν είναι εφικτό ενεργειακά αυτοσυντηρούμενα δίκτυα. Αυτές οι πηγές συλλογής ενέργειας μπορούν να ταξινομηθούν σε δύο κατηγορίες: • Συλλογή ενέργειας από τις πηγές του περιβάλλοντος: ηλιακή πηγή ενέργειας, μηχανικές πηγές ενέργειας, πηγές ενέργειας βασιζόμενες στην ροή(χρήση του ανέμου και της κίνησης του νερού), θερμοηλεκτρικές πηγές ενέργειας, ενέργεια από το ανθρώπινο σώμα. • Συλλογή ενέργειας από πηγές Ραδιοσυχνοτήτων (RF: Radio Frequency): συλλογή ενέργειας από ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία, που μπορεί να κατηγοριοποιηθεί σε τρεις αρχιτεκτονικές δικτύων, τα δίκτυα επικοινωνίας με οπισθοσκέδαση περιβάλλοντος (ABCN :Ambient Backscatter Communication Networks), δίκτυα ασύρματων τροφοδοτούμενων επικοινωνιών (WPCN : Wireless Powered Communication Networks), Ταυτόχρονη ασύρματη μεταφορά πληροφοριών και ισχύος (SWIPT : Simultaneous Wireless Information and Power Transfers) [9, 12, 20, 29, 32–34].

Τέλος υπάρχουν ανοιχτές ερευνητικές προκλήσεις που πρέπει να αντιμετωπίσουν τα ΕΗ δίκτυα όπως την συλλογή ενέργειας από πολλαπλές πηγές και την ανάπτυξη προηγμένων τεχνικών διαχείρισης της ενέργειας αυτής ώστε να μπορεί να υπάρχει ενεργειακή συνεργασία μεταξύ των BSs που έχουν μεγάλη συλλεγόμενη ανανεώσιμη ενέργεια ώστε να βοηθήσουν τους BSs που έχουν έλλειμμά μεταφέροντας τους την υπολειπόμενη ενέργεια. Επίσης να προσανατολιστούμε στην ανάπτυξη συστημάτων συλλογής ενέργειας σε μικρογραφία νανοκλίμακας έτσι ώστε τα είναι πιο εύκολη η εγκατάστασή τους και πιο οικονομική γιατί στην παρούσα φάση τα συστήματα αυτά είναι ογκώδης και με υψηλό κόστος εγκατάστασης, το οποίο θα έχει σαν συνέπεια και την ανάγκη προσαρμογής και των πρωτοκόλλων της δικτύωσης για την μεγιστοποίηση της διάρκειας της ζωής του δικτύου. Συνεπικουρικά θα πρέπει οι υπάρχουσες τεχνικές πρόβλεψης για την κατανάλωση ενέργειας του δικτύου λόγω της διαλείπουσας φύσης των ανανεώσιμων πηγών να επανεξεταστούν και για γίνουν πιο αποτελεσματικές με την ανάπτυξη αλγορίθμων πρόβλεψης που θα είναι αποτελεσματικότεροι και λιγότερο επιρρεπείς σε σφάλματα για την βελτίωση της διαχείρισης ενέργειας. Πρέπει επίσης να αναπτυχθούν αξιόπιστα συστήματα ενεργειακής απόδοσης με αξιόπιστους και αποδοτικότερους αισθητήρες και κόμβους (να υπάρχουν αντί-ρυπαντικές επικαλύψεις στις επιφάνειες και οι αισθητήρες να προσπαθούν να καταναλώνουν πολύ χαμηλή ισχύ, οι κόμβοι αισθητήρων θέτουν την πρόκληση της βαθμονόμησης και του καθαρισμού) ώστε να μειωθεί η ποσότητα της ενέργειας που απαιτείται όσο και το μέγεθος του συστήματος για να αυξηθεί η διάρκεια ζωής του συστήματος. Μια επίσης σημαντική παράμετρος είναι και η αποθήκευση της ενέργεια ιδιαίτερα στις εφαρμογές μεγάλης κλίμακας και διάρκειας που θα επηρεάσουν τις παραμέτρους των μπαταριών (αυτοεκφόρτωση, κύκλοι φόρτισης, περιβαλλοντικές συνθήκες) οπότε πρέπει να διερευνηθεί και αξιολογηθεί περαιτέρω η απόδοση και η αξιοπιστία των συμβατικών και επαναφορτιζόμενων τεχνολογιών στις μπαταρίες. Συμπερασματικά υπάρχει ανάγκη να αναπτυχθούν ενεργειακά βελτιστοποιημένα φορητά δίκτυα 5G έτσι ώστε να μπορούν να διαχειριστούν τις ενεργειακές τους ανάγκες, συνεργατικά δίκτυα επιπέδων για την καλύτερη ενεργειακή και φασματική απόδοση, καθώς και την εξέταση mobility scenarios που θα συμπληρώσει τις τεχνολογίες 5G με την διαχείριση του θορύβου του περιβάλλοντος και φυσικά την ασύρματη μεταφορά ισχύος. Οι αναδύμενες τεχνολογίες όπως οι επικοινωνίες Terahertz (THz) , οι έξυπνες επιφάνειες και η πλήρης ενεργοποίηση του IoT, μέσω της μαζικής συνδεσιμότητας έξυπνων συσκευών χαμηλής κατανάλωσης και καλύτερης αξιοποίησης των μπαταριών των συσκευών δείχνει το δρόμο για την επίτευξη του οράματος της ενεργειακής αυτάρκειας και αυτοβιωσιμότητας τόσο των δικτύων 5G όσων και των 6G [12, 20, 29, 33].

SONs (Self-Organizing Networks)

Στην διαδικασία της μετάβασης στα δίκτυα 5G παρατηρούμε την ανάγκη για την εξέλιξη των τηλεπικοινωνιακών υποδομών και την μετάβαση τους από τις παραδοσιακές - στατικές διαδικασίες σε αυτοματοποιημένες και δυναμικές ώστε να μπορούμε να παρέχουμε πιο ευέλικτες υπηρεσίες στους χρήστες. Έτσι προτάθηκαν τα δίκτυα SON που μπορούν να προσφέρουν αυτοματοποιημένες λειτουργίες self-configuration (αυτό-διαμόρφωσης), self-optimization (αυτό-βελτίωσης) and self-healing (αυτό-θεραπείας) οι οποίες μπορούν να υλοποιηθούν μέσω της Τεχνητής Νοημοσύνης (Artificial Intelligence (AI)), της Μηχανικής Μάθησης (Machine Learning), των Predictive Analytics και των pre-Optimized Software Algorithms [13, 14, 29].

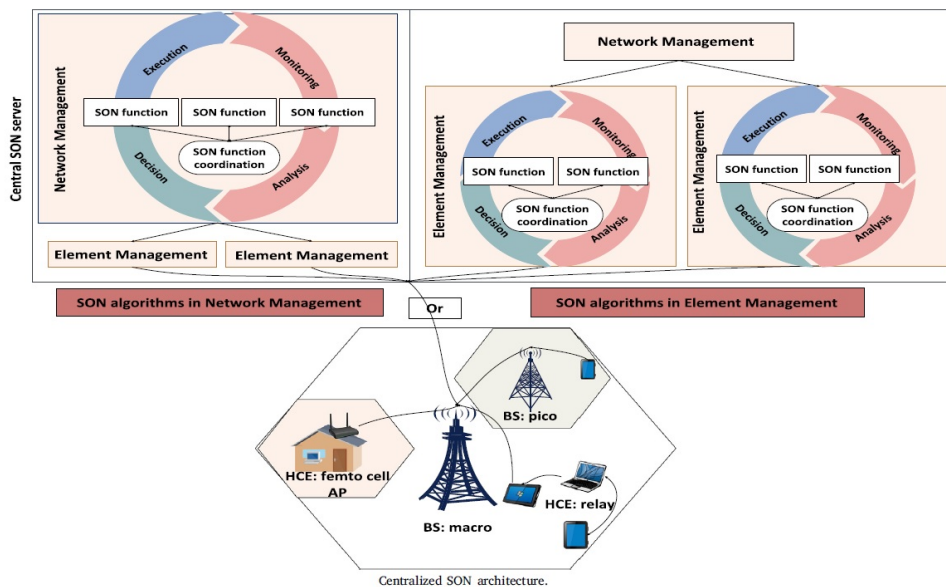
Ως self-configuration ορίζεται μια διαδικασία ενσωμάτωσης ενός νέου στοιχείου δικτύου (Network Element - NE) σε μια υπηρεσία που απαιτεί ελάχιστη ανθρώπινη παρέμβαση. Η διαμόρφωση ξεκινάει τοπικά σε κάθε κόμβο. Οι σταθμοί βάσης (BS) ή eNB (enhanced Node Base Station), οι σταθμοί αναμετάδοσης και τα femtocells διαμορφώνονται κατά την ανάπτυξη/επέκταση/αναβάθμιση τερματικών δικτύου ή κατά τη διάρκεια μιας τροποποίησης που συμβαίνει στο σύστημα. Στη συνέχεια, διαμορφώνονται αυτόνομα, ειδικά με την τεράστια αύξηση του αριθμού των κόμβων και της κλίμακας του συστήματος. Το self-configuration χρησιμοποιεί διάφορες λειτουργίες, όπως Automatic Neighbor Relations (ANR), αυτοματοποιημένη διαμόρφωση Physical Cell Identity (PCI) [13, 14].

Ως self-optimization ορίζεται μια διαδικασία η οποία βελτιστοποιεί αυτόνομα τις παραμέτρους του συστήματος μετά την αρχική self-configuration. Το δίκτυο παρέχει ορισμένες μετρήσεις που βοηθούν στη βελτιστοποίηση των παραμέτρων δικτύου κατά τη λειτουργία. Βελτιστοποιεί έξυπνα την κάλυψη και τη χωρητικότητα, το HandOver (HO) και τις παρεμβολές στα δίκτυα κινητής τηλεφωνίας. Για την επίτευξη αυτού του σκοπού χρησιμοποιούνται διάφορες λειτουργίες όπως Coverage and Capacity Optimization (CCO) (Βελτιστοποίηση Κάλυψης και Χωρητικότητας), Mobility Load Balancing (MLB) (Εξισορρόπηση Φορτίου Κινητικότητας), Mobility Robustness/ Handover Optimization (MRO), Inter-Cell Interference Coordination (ICIC) (Συντονισμός Παρεμβολών μεταξύ Κυψελών) and Random Access Channel (RACH) optimization, τα οποία ορίζονται με βάση το πρότυπο NGMN (Next Generation Mobile Networks) και τις εκδόσεις 3GPP (3rd Generation Partnership Project) [13, 14].

Ως self-healing ορίζεται η διαδικασία η οποία αυτόνομα, επιλύει ή μειώνει τα σφάλματα στο κυψελοειδές δίκτυο (όταν οι BS αποτυγχάνουν και χάνεται η συνδεσιμότητα) ενεργοποιώντας κατάλληλες ενέργειες ανάκτησης, ειδικά τη διαχείριση σφαλμάτων στο RAN (Radio Access Network). Τα self-healing προσαρμόζουν τις παραμέτρους των γειτονικών κυττάρων για να παρέχουν συνεχή υπηρεσία ή τουλάχιστον να ελαχιστοποιούν την υποβάθμιση της υπηρεσίας στους επηρεαζόμενους χρήστες [13, 14].

Σημαντικό ρόλο στο πλαίσιο του SONS που σχετίζεται με την λειτουργία του self-optimization είναι το ANR, το οποίο αντικαθιστά τη μη αυτόματη διαδικασία διαμόρφωσης γειτονικών κελιών και βελτιστοποίηση μεταβίβασης, δημιουργώντας αυτόματα και σε πραγματικό χρόνο τη βέλτιστη λίστα γειτονικών σχέσεων για μια κυψέλη που λειτουργεί σε οποιαδήποτε τεχνολογία (3G/4G/5G). Η λειτουργία εκτελείται τόσο σε λειτουργικές κυψέλες όσο και σε νέες που προστίθενται στο δίκτυο για την δημιουργία γειτονικών λιστών intra-frequency (ίδια τεχνολογία-ίδια συχνότητα) και inter-frequency (ίδια τεχνολογία-διαφορετική συχνότητα). Οι εφαρμογές ANR ενεργούν διαγράφοντας υπάρχουσες πλεονάζουσες σχέσεις γειτόνων που είτε δεν χρησιμοποιούνται είτε υπάρχουν κυψέλες εκτός της περιοχής κάλυψης και προσθέτουν σημαντικές σχέσεις γειτόνων ανάλογα με την κατάσταση του δικτύου σε μια δεδομένη στιγμή.

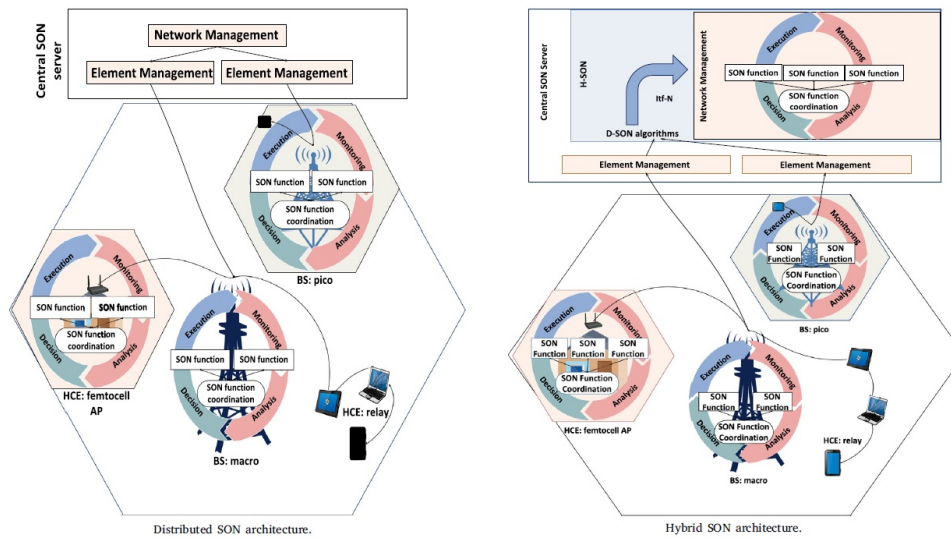
Αυτό σημαίνει ότι ακόμη και αν διαγραφεί μια σχέση γείτονα επειδή έχει χαμηλά ποσοστά χρησικότητας, η ίδια μπορεί να προστεθεί ξανά μετά από μια ορισμένη περίοδο, καθώς οι συνδρομητές που μετακινούνται στην περιοχή κάλυψης μιας κυψέλης μπορεί να χρειαστούν ξανά αυτήν τη σχέση, έτσι ώστε οι μεταβιβάσεις σε οποιαδήποτε τεχνολογία να είναι επιτυχής. Όλες οι κυψέλες έχουν έναν μέγιστο επιτρεπόμενο αριθμό σχέσεων γειτόνων που μπορούν να οριστούν και οι εφαρμογές ANR συντονίζονται αρχικά κατά τη διάρκεια της αρχικής διαδικασίας συντονισμού του συστήματος SON για να διατηρηθεί ο συγκεκριμένος κανόνας σύμφωνα με την πολιτική που απαιτεί κάθε χειριστής δικτύου. Η λειτουργία ANR επαναλαμβάνεται πολλές φορές έως ότου η λίστα γειτόνων είναι απόλυτα βέλτιστη σύμφωνα με μετρήσεις σε πραγματικό χρόνο και σύμφωνα με την κινητικότητα και τη διανομή του συνδρομητή [13, 14].



Σχήμα 1.13: Centralized SONs Architecture [13].

Όσον αφορά τις αρχιτεκτονικές των συστημάτων SONs, το 3GPP ορίζει τρεις τύπους που μπορούν να εφαρμοστούν: το Centralized SON (C-SON), το Distributed SON (D-SON) και τέλος το Hybrid SON (H-SON). Στις απαιτήσεις του 5G, η αρχιτεκτονική του SON πρέπει να βελτιωθεί προκειμένου να ανταποκριθεί στις απαιτήσεις, να ξεπεραστεί η υψηλή πυκνότητα των μικρών κυψελών και η ετερογένεια στα RATs (Radio Access Technologys) γι' αυτό εισάγεται η έννοια του Virtualization στην αρχιτεκτονική H-SON για να προσφέρει μια ανοιχτή και επεκτάσιμη αρχιτεκτονική δικτύου, να χειριστεί τον μεγάλο όγκο κυψελών, την ποικιλία των ραδιοεπικοινωνιών καθώς και την απαιτούμενη διαμόρφωση. Όποτε συζητάμε πλέον για την αρχιτεκτονική Virtual SON (V-SON) που ασχολείται με δύο βασικές τεχνολογίες 5G την Network Function Virtualization (NFV) και την Software Defined Networking (SDN) των οποίων οι αλγόριθμοι λειτουργούν σε εικονικές μηχανές που είναι κοντά ή στο eNB. Το V-SON βελτιστοποιεί την οργάνωση διεπαφών μεταξύ των πόρων ραδιοφώνου, παρέχει ένα γρήγορο και συντονισμένο SON που ενισχύει την αναδιαμόρφωση των επιπέδων RAT, των κυψελών και λαμβάνει υπόψη τις απαιτήσεις του δικτύου 5G [13, 14].

Συμπερασματικά τα βασικά σημεία που αφορούν την αλληλεπίδραση των λειτουργιών SON με το NFV, τα Big Data, τη διαχείριση backhaul, τις υποδομές IoT, τους σημαντικούς ενεργοποιητές τεχνολογίας 5G όπως το mmWave και το massive MIMO στο 5G και στα 6G δίκτυα θα χρειαστεί να διαμορφωθεί το κλασικό SON σε Self-Sustaining network (SSN) (Αυτοσυντηρούμενο δίκτυο). Οι αυστηρές απαιτή-



Σχήμα 1.14: Distributed-Hybrid SONs Architecture [13].

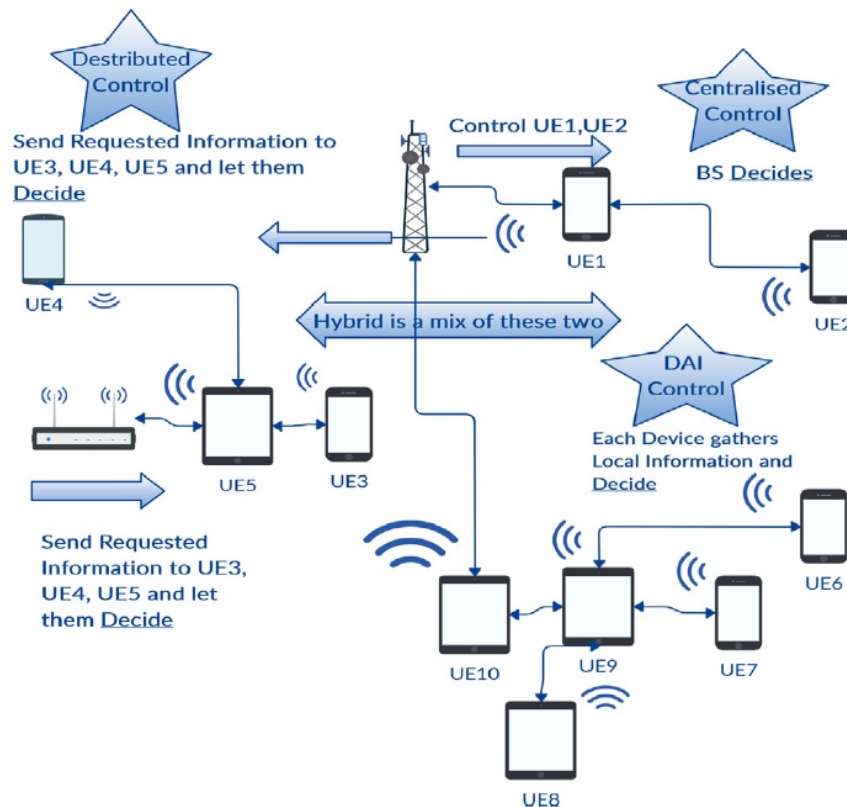
σεις για φασματική απόδοση, αξιοπιστία και μείωση του latency που σχετίζονται με το 6G δημιουργούν την ανάγκη για ένα όλο και πιο αυτόνομο δίκτυο. Η εξέλιξη και η συνεχόμενη ανάπτυξη του AI (Artificial Intelligence) είναι αρκετά χρήσιμο στη δημιουργία βιώσιμων δικτύων. Για να επιτευχθεί αυτός ο στόχος, η Τεχνητή Νοημοσύνη πρέπει να ενσωματωθεί με τη θεωρία παιγνίων για τη δημιουργία ενός κατανεμημένου μηχανισμού μάθησης όπου οι πράκτορες τεχνητής νοημοσύνης αλληλεπιδρούν για να διδάξουν και να μάθουν ο ένας από τον άλλο. Για την επίτευξη των 6G KPI (Key Performance Indicators (Βασικοί Δείκτες Απόδοσης)), τα SSN πρέπει να είναι σε θέση να διατηρήσουν τη χρήση και τη διαχείριση των πόρων τους μέσω της συλλογής ενέργειας, της αποτελεσματικής εκμετάλλευσης του φάσματος και της προσαρμογής των λειτουργιών τους με τη χρήση των λύσεων που μπορεί να προσφέρει το AI [13, 14].

D2D communications (Device to Device)

Μια ακόμη τεχνολογία που μπορεί να διαδραματίσει σημαντικό ρόλο στα 5G είναι η επικοινωνία D2D (Device to Device (Συσκευή με Συσκευή)) λόγω της σημαντικότητάς της στην υποστήριξη υπηρεσιών εγγύτητας που βασίζονται σε απευθείας μετάδοση μεταξύ συσκευών χωρίς την βοήθεια των BS ή του βασικού δικτύου. Το πλεονέκτημα της είναι ότι δεν περιορίζεται από της αδειοδοτημένες ζώνες συχνοτήτων και επίσης είναι διαφανής στα κυψελωτά δίκτυα, δηλ. επιτρέπει στο γειτονικό UE να παρακάμψει το BS και να δημιουργήσει άμεσες συνδέσεις μεταξύ τους. Με το γεγονός αυτό μπορεί να επιτευχθεί βελτιωμένη φασματική απόδοση, ενεργειακή απόδοση, data rates, throughput, delay, interference και fairness [29, 30].

Υπάρχουν τέσσερις τύποι ελέγχου που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την δημιουργία συνδέσεων στην επικοινωνία D2D οι οποίοι είναι οι εξής: ο Centralised (Κεντρικός) όπου το BS επιβλέπει πλήρως όλα τα UEs (regular και D2D) και λειτουργεί σαν βασικός ελεγκτής, υπεύθυνος για την διαχείριση παρεμβολών, συνδέσεων κτλ. στην κυψέλη, ο Distributed (Κατανεμημένος) στον οποίο η διαχείριση παρεμβολών, συνδέσεων κτλ. στην κυψέλη, εκτελούνται αυτόνομα από τα ίδια τα UEs έτσι μειώνεται η επιβάρυνση ελέγχου και το computational γεγονός που τον καθιστά κατάλληλο για μεγάλα δίκτυα D2D, ο Distributed AI (Κατανεμημένο AI) είναι ένας διαφορετικός τρόπος ελέγχου, όπου όλες οι διεργασίες ελέγχου εκτελούνται από τα UEs και μπορούν να ξεκινούν ασύγχρονα και να εκτελούνται παράλληλα

με κατανεμημένο τρόπο και τέλος ο Semi distributed (Hybrid) (Ήμι-Κατανεμημένο - Υβριδικό) για τις διαδικασίες διαχείρισης παρεμβολών, συνδέσεων κτλ. στην κυψέλη, εκτελούνται με την συνεργασία του BS και των UEs με στόχο να χρησιμοποιηθούν τα δυνατά σημεία κάθε προσέγγισης για την καλύτερη απόδοση του δικτύου [35].



Σχήμα 1.15: D2D [14].

Στον τρόπο μετάδοσης στην επικοινωνία D2D έχουμε διαφορετικές μεθόδους λειτουργίας με βάση το είδος της αλληλεπίδρασης των συσκευών D2D μεταξύ τους ή με τον BS οι οποίες είναι: η D2D Direct (D2DD), η D2D Backhauling που έχει δυο τύπους ανάλογα με τον είδος της αναμετάδοσης (Single-hop ή Multi-hop) την D2D Single hop Relay (D2DSHR) και την D2D Multi hop Relay (D2DMHR), την D2D Cluster και τέλος την D2D Client (D2DC) [35].

Επίσης στην επικοινωνία D2D στο κομμάτι της χρήσης του εύρους των συχνοτήτων, υπάρχει μια κατηγοριοποίηση των τύπων που μπορούν να χρησιμοποιηθούν στην δημιουργία των συνδέσεων οι οποίες είναι: η In-band Overlay, η In-band Underlay, η With In-band Cellular, η With Out-band Controlled και η Out-band Autonomous [35].

Όπως σε όλες τις τεχνολογίες έτσι και στην επικοινωνία D2D για να μπορέσουμε να την χρησιμοποιήσουμε στα δίκτυα 5G, πρέπει να επιλυθούν τεχνικά ζητήματα και προκλήσεις ώστε να μπορέσουμε να αξιοποιήσουμε πλήρως της δυνατότητες της. Κάποιες από αυτές τις προκλήσεις είναι: η διαδικασία εντοπισμού των συσκευών ώστε να μπορούν να αναγνωρίζουν ότι βρίσκονται κοντά ή εντός εμβέλειας η μια την άλλη, η επιλογή του βέλτιστου τρόπου λειτουργίας στην οποία οι υποψήφιες προς επικοινωνία συσκευές θα αποφασίσουν εάν η επικοινωνία θα γίνει απευθείας ή μέσω του δικτύου σαν συμβατικό κυψελοειδές δίκτυο ώστε ο χρήστης να έχει καλύτερο data rate και συνολικά το δίκτυο τον καλύτερο

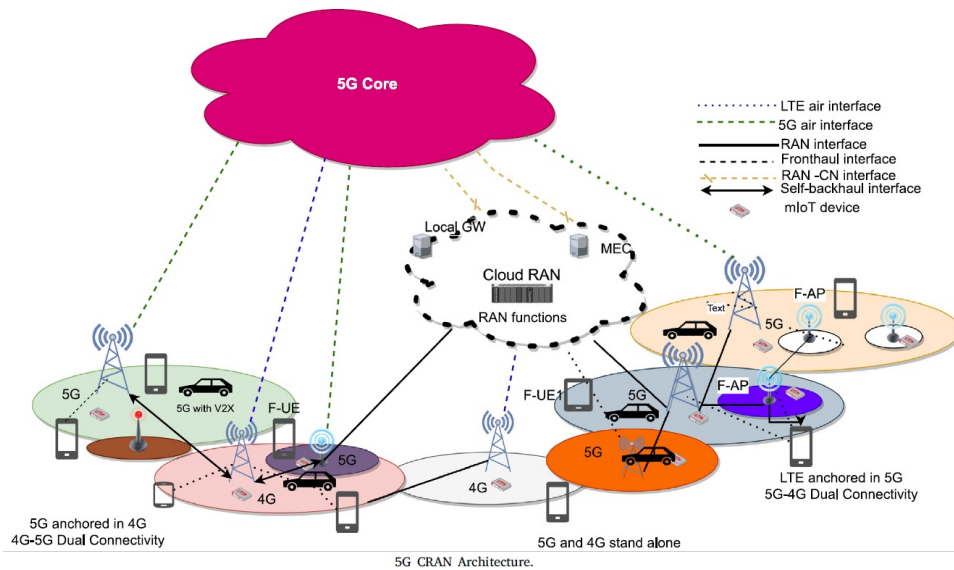
δυνατό sum rate. Σημαντικό κομμάτι είναι και η διαχείριση των παρεμβολών, ο έλεγχος ισχύος, η ασφάλεια των επικοινωνιών D2D, η κατανομή των ραδιοπόρων (πχ ζώνες συχνοτήτων), το densification και το offloading στην κυψέλη, την διασφάλιση της ικανοποίησης των απαιτήσεων QoS (Quality of Service)/QoE (Quality of Experience), την υλοποίηση της τεχνολογίας D2D σε mmWave δίκτυα λόγω του ότι τα mmWave απαιτούν Line-of-Sight μονοπάτια για την επικοινωνία δυο συσκευών και τέλος Handover από τις D2D συσκευές κατά την διάρκεια της επικοινωνίας [30, 35].

RAN (Radio Access Network)

Ένα Δίκτυο Ασύρματης Πρόσβασης (Radio Access Network - RAN) είναι ένα σημαντικό στοιχείο ενός ασύρματου συστήματος τηλεπικοινωνιών που συνδέει μεμονωμένες συσκευές με άλλα μέλη ενός δικτύου μέσω ενός radio link. Το RAN συνδέει τον εξοπλισμό ενός χρήστη μέσω μιας σύνδεσης οπτικών ινών ή ασύρματης σύνδεσης backhaul και αυτός ο σύνδεσμος πηγαίνει στο κεντρικό δίκτυο το οποίο διαχειρίζεται τις πληροφορίες των συνδρομητών, την τοποθεσία και άλλες πληροφορίες. Είναι το radio element του κυψελοειδούς δικτύου. Τα στοιχεία που συνθέτουν ένα RAN είναι οι BSs, οι κεραίες που καλύπτουν μια συγκεκριμένη περιοχή, ανάλογα την χωρητικότητά τους και οι BBU (BaseBand Unit) που παρέχουν ένα σύνολο λειτουργιών επεξεργασίας σήματος που καθιστούν δυνατή την ασύρματη επικοινωνία [15, 29, 36].

Οι τεχνολογικές εξελίξεις και ο σχεδιασμός για να καλυφθούν οι ολοένα αυξανόμενες ανάγκες χωρητικότητας καθώς και για να επιτευχθεί η μείωση των δικτύων Κεφαλαιουχικών Δαπανών (Capital Expenditure - CAPEX) και Λειτουργικών Δαπανών (Operational Expenditure - OPEX) καθιστά το παραδοσιακό RAN μη ανταποκρίσιμο στις αυξανόμενες ανάγκες των χρηστών, παρέχοντας χαμηλό latency και υψηλό bandwidth στους τελικούς χρήστες των νέων τεχνολογιών. Το RAN είναι ένα κρίσιμο στοιχείο του δικτύου κινητής τηλεφωνίας, αποτελείται από μια συλλογή διασυνδεδεμένων BSs που συνδέονται στο Core Network(CN) παρέχοντας κάλυψη σε μια συγκεκριμένη περιοχή που βασίζονται στο RATs (Radio Access Technologies). Τα παραδοσιακά δίκτυα κινητής τηλεφωνίας εξαρτώνται από μια κατανομημένη αρχιτεκτονική RAN έτσι ώστε ένα μεμονωμένο RRH (Remote Radio Heads) να συνδέεται με μια ενιαία και συγκεκριμένη BBU. Αυτός ο σχεδιασμός δεν είναι ούτε οικονομικός, ούτε ενεργειακά αποδοτικός και σε συνδυασμό με τα πρότυπα και οι απαιτήσεις στα δίκτυα 5G η ανάγκη για την εξέλιξη των παραδοσιακών RAN είναι επιτακτική. Η συζήτηση για νέες αρχιτεκτονικές RAN επικεντρώνεται στο Cloud-RAN(C-RAN), Heterogeneous CRAN(H-CRAN) και το Fog-RAN(F-RAN) [15, 29, 36].

Το C-RAN βασίζεται στην κεντρική επεξεργασία, το collaborative radio και την real-time υποδομή του cloud, χωρίζοντας την ομάδα των BBU και των RRH των BSs με σκοπό την δημιουργία κεντρικής ομάδας διαχείρισης. Το κεντρικό BBU βελτιώνεται μέσω virtualization και cloud computing. Βασικός στόχος είναι η μείωση των BSs και η κατανάλωση ενέργειας στο δίκτυο. Λόγω της χρήσης συνεργασίας και virtualization επιτρέπει την δυναμική κατανομή πόρων, βελτιωμένη φασματική απόδοση, χρήση υψηλού εύρους ζώνης, ευελιξία στη σχεδιαστική και λειτουργική αποτελεσματικότητα του δικτύου. Ουσιαστικά χωρίζει τα BSs σε BBU που είναι υπεύθυνα για εντατικές baseband δραστηριότητες επεξεργασίας σήματος και σε RRH που εκτελούν υπολογιστικές εργασίες όπως η διαμόρφωση και η ενίσχυση του σήματος. Πλεονεκτήματα αυτής της αρχιτεκτονικής είναι: ενισχυμένη ενεργειακή και φασματική απόδοση, μειωμένο CAPEX/OPEX και βελτιωμένη διαχείριση κινητικότητας λόγω δυναμικής κατανομής των πόρων του δικτύου. Ωστόσο αντιμετωπίζει και προκλήσεις σε επίπεδο ασφάλειας, την χωρητικότη-



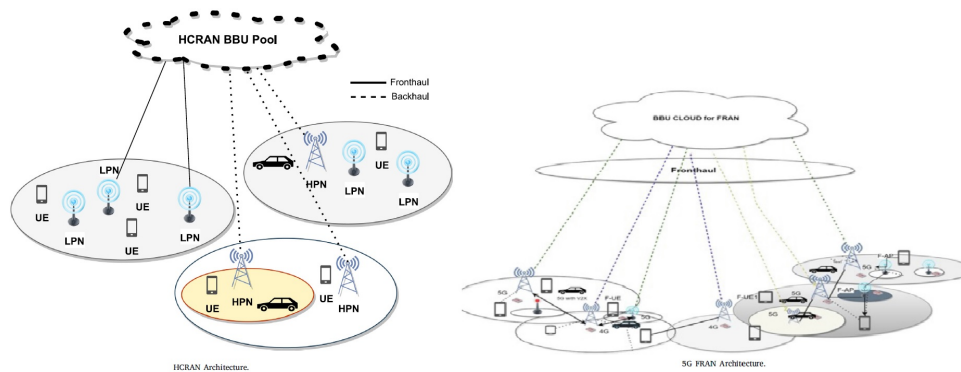
Σχήμα 1.16: CRAN Architecture [15].

τα του Fronthaul link λόγω της μεταφοράς των BBU πολλαπλών BSs στο cloud εάν το cloud αποτύχει, ολόκληρο το δίκτυο θα καταστεί ανενεργό (Οι σύνδεσμοι Fronthaul παρέχουν μια απρόσκοπτη σύνδεση μεταξύ των RRH και κεντρικής ομάδας BBU, ενώ οι σύνδεσμοι backhaul προσφέρουν μια σύνδεση μεταξύ των BBU και του βασικού δικτύου κινητής τηλεφωνίας) [15, 30].

Το H-CRAN χρησιμοποιεί τον συνδυασμό των HetNets και του Cloud computing και ο σχεδιασμός του ενσωματώνει διαφορετικές κυψέλες όπως macro BSs δηλαδή HPNs (High Power Nodes), micro BSs και RRH. Οι macro BSs παρέχουν έλεγχο του δικτύου, διαχείριση κινητικότητας και βελτίωση απόδοσης του συστήματος. Τα micro BSs και τα RRH βελτιώνουν την χωρητικότητα του συστήματος και μειώνουν την ισχύ της μετάδοσης. Τα RRH έχουν την δυνατότητα επεξεργασίας σήματος και τις λειτουργίες ραδιοσυχνότητας, ενώ η κεντρική ομάδα BBU ενσωματώνει άλλες λειτουργίες φυσικής επεξεργασίας της baseband που σχετίζονται με τα ανώτερα στρώματα. Όλες οι λειτουργίες σε physical και network επίπεδο είναι διαθέσιμες στα HPNs. Τα HPNs στέλνουν δεδομένα εκπομπής συστήματος και σήματα ελέγχου στα UEs βελτιώνοντας την χωρητικότητα σύνδεσης fronthaul και μειώνοντας την χρονική καθυστέρηση στο H-CRAN. Πλεονεκτήματα αυτής της αρχιτεκτονικής είναι η ενισχυμένη ενεργειακή και φασματική απόδοση, κοινή χρήση και κατανομή των πόρων (spectrum sharing, infrastructure sharing, network sharing), βελτιωμένη διαχείριση κινητικότητας χρηστών, βελτίωση απόδοσης του συστήματος λόγω της χρήσης cloud computing για τον κεντρικό έλεγχο των λειτουργιών όπου διασυνδέονται διάφορες οντότητες κόμβων. Οι προκλήσεις που αντιμετωπίζει είναι η κατανάλωση ενέργειας λόγω της πυκνής ανάπτυξης RRH και micro BS, δυσκολία στην εξισορρόπηση φορτίου στο Backhaul λόγω του ότι τα κυψελωτά δίκτυα εξελίσσονται σε πυκνά και dynamic HetNets με αποτέλεσμα ο αυξανόμενος όγκος των δεδομένων μετάδοσης στις συνδέσεις backhaul μεταξύ της κεντρικής ομάδας BBU και των RRHS να αποτελεί εμπόδιο για την υιοθέτηση του centralization του H-CRANs, μείωση του Latency και τέλος ο μετριασμός και έλεγχος των παρεμβολών που είναι δύσκολος λόγω της εκτεταμένης ετερογένειας των BSs, το μέγεθος του δικτύου και τους περιορισμούς των fronthaul/backhaul [15].

Στο Fog-RAN(F-RAN) έχουμε έναν συνδυασμό των CRAN και H-CRAN με την χρήση fog computing

προσπαθώντας να χειριστεί τους περιορισμούς/πλεονεκτήματα των δύο αυτών αρχιτεκτονικών βελτιώνοντας την υψηλή κινητικότητα, την κατανομή των ραδιοπόρων, την ποιότητα των υπηρεσιών (QoS) και μειώνοντας το latency. Η χρήση του cloud computing για την αποθήκευση όλων των δεδομένων στο cloud αντιμετωπίζει ζητήματα όπως καθυστερήσεις από άκρο σε άκρο στο δίκτυο, κυκλοφορική συμφόρηση, υπέρογκος όγκων δεδομένων για επεξεργασία και υψηλό κόστος συνδεσιμότητας κι έτσι έχει προταθεί μια προσέγγιση fog computing για να αντικατασταθούν οι λειτουργίες των απομακρυσμένων διακομιστών. Ουσιαστικά χρησιμοποιείται σαν μια επέκταση του cloud computing στο άκρο του δικτύου. Το F-RAN χωρίζεται σε κατανεμημένο και κεντρικό δίκτυο. Στο κατανεμημένο FRAN ορισμένες εργασίες του BBU, συμπεριλαμβανομένου του computing, της προσωρινής αποθήκευσης και της διαχείρισης πόρων, ανατίθενται στους RRH και τους UE, ενώ το κεντρικό FRAN γίνεται χρήση SDN (Software Defined Networking) και NFV (Network functions virtualization) για την υποστήριξη λογικών κεντρικών επιπέδων ελέγχου, την παροχή βελτιωμένης διαχείρισης πόρων και απλοποιημένη κοινή χρήση πόρων [15].



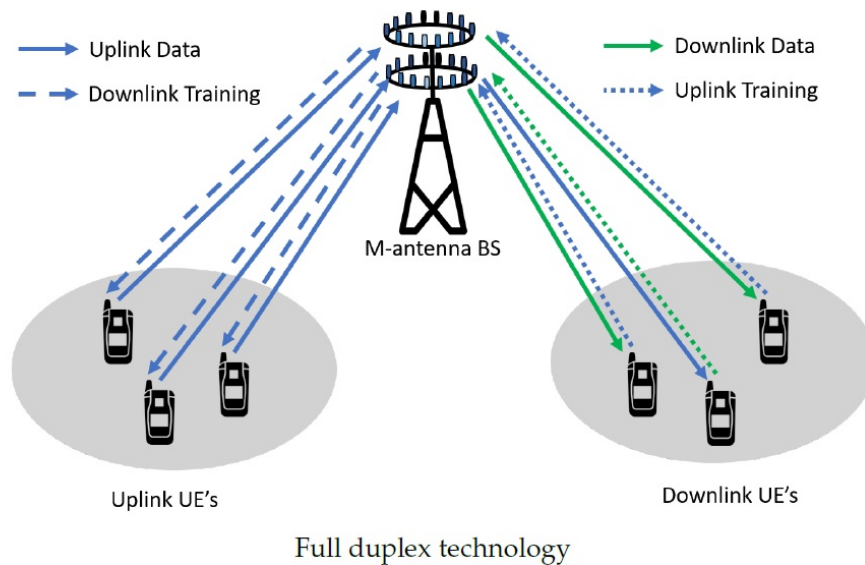
Σχήμα 1.17: HCRAN Architecture - FRAN Architecture [15].

Η αρχιτεκτονική του αποτελείται από τρία επίπεδα, το terminal layer, το access layer και το cloud computing layer. Το επίπεδο του fog computing υπάρχουν fog-UEs(F-UEs) και fog Access Points (F-APs) στο terminal και network επίπεδο αντίστοιχα. Τα F-UEs μπορούν να διασυνδέονται μεταξύ τους στο terminal layer με αναμεταδότες ή κάνοντας χρήση της λειτουργίας D2D(Device-to-Device), έχουν πρόσβαση στους HPNs. Τα HPNs και F-APs βρίσκονται στο access layer, τα F-APs επεξεργάζονται τα δεδομένα που λαμβάνουν από τα F-UEs και τα στέλνουν στο cloud computing layer μέσω συνδέσεων fronthaul ενώ τα HPNs συνδέονται με την κεντρική ομάδα BBU μέσω συνδέσεων backhaul. Η κατανομή ενός μεγάλου ποσοστού Collaboration Radio Signal Processing (CRSP) and Cooperative Radio Resource Management (CRRM) στα F-APs και F-UEs μειώνει τους περιορισμούς φορτίου στο fronthaul και στην κεντρική ομάδα BBU. Πλεονεκτήματα αυτής της αρχιτεκτονικής είναι η βελτίωση της αποδοτικότητας σε επίπεδο συστήματος και φασματική και ενεργειακή απόδοση λόγω καλύτερων μεθόδων ομαδοποίησης των χρηστών. Οι προκλήσεις που αντιμετωπίζει στις στρατηγικές αποθήκευσης στην κρυφή μνήμη των άκρων του δικτύου δηλ ποιο περιεχόμενο θα αποθηκευτεί στην κρυφή μνήμη, τότε θα παραδοθούν τα περιεχόμενα τους στις διαφορετικές συσκευές και ποιος αλγόριθμος προσωρινής αποθήκευσης θα χρησιμοποιηθεί (LRU, LFU, FIFO) έτσι ώστε να επιτευχθεί η επιτυχία της προσωρινής μνήμης, η χρήση NFV που βοηθάει στο virtualize του ελεγκτή SDN για την φιλοξενία του cloud server στο FRAN αλλά είναι αβέβαιη λόγω των χαρακτηριστικών των συσκευών διανομής στην άκρη του δικτύου καθώς επίσης η ασφάλεια, το απόρρητο, η υπολογιστική πολυπλοκότητα, η επεκτασιμότητα και η συμβατότητα λειτουργίας και συντήρησης με τον υπάρχον σχεδιασμό των RAN [15].

Full-Duplex communications

Ένας από τους κύριους περιορισμούς και προκλήσεις που αντιμετωπίζει η ανάπτυξη των δικτύων 5G είναι η πλήρης αξιοποίηση της χωρητικότητας του καναλιού μετάδοσης και ο διπλασιασμός της φασματικής απόδοσης. Στην ασύρματη επικοινωνία η μετάδοση και η λήψη δεδομένων δεν γίνονται στις ίδιες ζώνες συχνοτήτων για την αποφυγή παρεμβολών. Γι' αυτό τον λόγο έχει ερευνηθεί η χρήση του Full-Duplex (FD) συστήματος επικοινωνίας με οφέλη όσον αφορά τον διπλασιασμό της χωρητικότητας του δικτύου με την ταυτόχρονη μετάδοση και λήψη άνω και κάτω ζεύξης εντός της ίδιας ζώνης συχνοτήτων και την εκμετάλλευση του πρόσθετου χρησιμοποιούμενου φάσματος σε ζώνες υψηλότερων συχνοτήτων και καλύτερη χρήση του διαθέσιμου φάσματος. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα αύξηση στην πολυπλοκότητα του υλικού, στην κατανάλωση της ενέργειας του δικτύου, αυξημένες παρεμβολές μεταξύ των κυψελών και μια επιπλέον πρόκληση που σχετίζεται με τους δέκτες του FD, το Self Interference (SI) που είναι τόσο ισχυρό και κυμαίνεται από 90 έως 20 db και μπορεί να επιδεινώσει την ποιότητα λήψης των σημάτων [29, 37–39].

Έχουν εξεταστεί τεχνικές μετριασμού του SI που μπορούν να χωριστούν σε δύο κατηγορίες, ενεργητικές και παθητικές. Οι ενεργητικές τεχνικές μέθοδοι μπορούν να χωριστούν σε δύο κατηγορίες: ψηφιακή ακύρωση (digital cancellation) και αναλογική ακύρωση (analog cancellation). Οι παθητικές τεχνικές μπορούν να επιτευχθούν κυρίως με τις μεθόδους: διαχωρισμό κεραίας (antenna separation), ακύρωση κεραίας (antenna cancellation) και διαφοροποίηση κατεύθυνσης (directional diversity) [37, 38].



Σχήμα 1.18: Full Duplex Technology [10].

Εξαιτίας όλων αυτών μεθόδων που πρέπει να ενσωματωθούν και για να μπορέσει να υπάρξει πλήρης χρήση του δικτύου FD πρέπει να επανασχεδιαστεί το φυσικό επίπεδο και το επίπεδο MAC (Medium Access Control). Τα πλεονεκτήματα της τεχνολογίας FD συνοδεύονται από ζητήματα που πρέπει να αντιμετωπιστούν τα οποία είναι: i) ισχυρή loop-back παρεμβολή, ii) ατελής SI cancellation που μπορεί να προκληθεί από βλάβες υλικού όπως σφάλματα ADC και DAC, phase noise, I-Q imbalance κ.ά., iii) ανακριβείς γνώσεις καναλιού που μπορεί να έχουν σαν αποτέλεσμα ατελή εκτίμηση παρεμβολών, iv) total aggregate interference που προκύπτουν από τον αυξημένο αριθμό χρηστών, v) πρόσθετα στοιχεία στον δέκτη για την ακύρωση του SI και τις παρεμβολές μεταξύ των χρηστών που έχουν σαν αποτέλεσμα

την κατανάλωση επιπλέον πόρων (ισχύς και υλικό) και τέλος vi) ζητήματα συγχρονισμού σε συστήματα FD πολλαπλών χρηστών [38, 39].

Στα προηγούμενα μπορούμε να προσθέσουμε μια λύση που έχει προταθεί για την αντιμετώπιση της ανεπάρκειας του φάσματος κι αυτό είναι η ενίσχυση της χρήσης των διαθέσιμων ζωνών ραδιοσυχνοτήτων με τη χρήση μηχανισμών DSS (Dynamic Spectrum Sharing). Οι κύριες τεχνικές ενεργοποίησης των DSS ομαδοποιούνται σε δυο κατηγορίες, σε τεχνικές επίγνωσης του φάσματος και σε τεχνικές εκμετάλλευσης του φάσματος [38].

Επίσης έχει μελετηθεί η εφαρμογή της FD και σε ασύρματα δίκτυα όπως mmWave, massive MIMO, Small Cells, Energy Harvesting, cellular densification, Vehicular Communications, Military καθώς και σε πρακτικές εφαρμογές διότι ο χρόνος λειτουργίας του συστήματος και η κατανάλωση ενέργειας είναι σημαντικές παράμετροι που πρέπει να διερευνηθούν [37, 38].

Συμπερασματικά η τεχνολογία των επικοινωνιών FD θα διαδραματίσει σημαντικό ρόλο στα δίκτυα 5G λόγω των πλεονεκτημάτων που παρέχει και στο μέλλον θα χρησιμοποιηθεί σε διάφορα σενάρια και περιπτώσεις χρήσης όπως στην βελτίωση του throughput στην ζώνη των 6-GHz, στην υποστήριξη μικρής καθυστέρησης επικοινωνιών και στην μετάβαση προς τις μικρές και πυκνές κυψέλες όπου η αποφυγή συγκρούσεων είναι εξαιρετικά σημαντική.

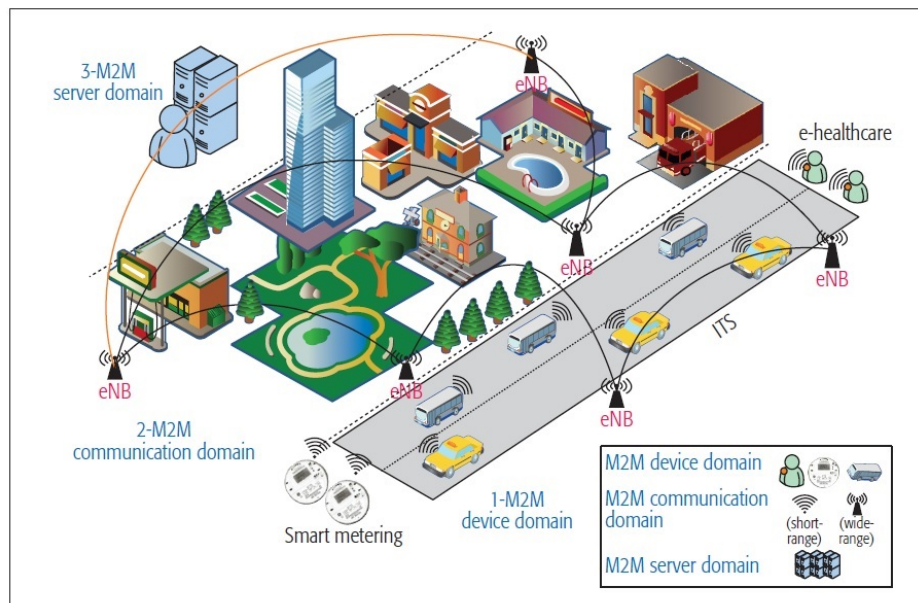
M2M (Machine to Machine)

Οι επικοινωνίες M2M προσφέρουν ubiquitous εφαρμογές οι οποίες είναι ένας από τους πιο σημαντικούς παράγοντες διευκόλυνσης του Internet of Things. Το M2M έχει σαν στόχο να προσφέρει έξυπνη σύνδεση μεταξύ μηχανών και ανθρώπων, την ανταλλαγή πληροφοριών και οδηγιών μεταξύ μηχανών και συστημάτων καθώς και την συνεχή ανταλλαγή πληροφοριών μεταξύ μηχανών και ανθρώπων. Το M2M δεν είναι μόνο μετάδοση δεδομένων αλλά απαιτεί από τις μηχανές να κάνουν κρίσεις μέσω ανταλλαγή πληροφοριών, να λαμβάνουν σωστές αποφάσεις ανεξάρτητα και να τις εκτελούν μόνες τους [16, 30, 40].

Ο μεγάλος αριθμός αισθητήρων και ενεργοποιητών που έχει συνδεθεί στο διαδίκτυο στέλνουν χαμηλό όγκο πληροφοριών σε σύντομες χρονικές περιόδους χρησιμοποιώντας χαμηλούς ρυθμούς δεδομένων και κανάλια μειωμένου εύρους ζώνης. Οι πομποδέκτες πρέπει να είναι απλοί ώστε να είναι χαμηλού κόστους και χαμηλής κατανάλωσης ενέργειας ώστε να μπορούν να λειτουργούν με την ίδια μπαταρία για αρκετά χρόνια [16, 30, 40].

Ορισμένα από τα πρότυπα M2M που χρησιμοποιούνται είναι ιδιόκτητα και χρησιμοποιούν την ζώνη χωρίς άδεια, ενώ άλλα είναι επεκτάσεις τεχνολογιών κινητής τηλεφωνίας που υποστηρίζουν αποτελεσματικά τις επικοινωνίες M2M στο αδειοδοτημένο φάσμα. Στο 3GPP ορίστηκαν τρία πρότυπα κινητής τηλεφωνίας M2M/IoT για χρήση στις αδειοδοτημένες ζώνες φάσματος: Machine Type Communication (MTC), Narrowband – IoT (NB-IoT), και Enhanced Coverage GSM-IoT (EC-GSM-IoT). Σε σύγκριση με τις ιδιόκτητες λύσεις, οι λύσεις 3GPP έχουν το πλεονέκτημα της υποστήριξης από ένα μεγάλο αριθμό εταιριών, διαλειτουργικότητα μεταξύ προμηθευτών και αξιόπιστη απόδοση [16, 30].

Η μείωση της κατανάλωσης ενέργειας είναι ένας σημαντικός παράγοντας στο 3GPP για όλες τις τεχνολογίες M2M γι' αυτό και περιλαμβάνουν μια λειτουργία εξοικονόμησης ενέργειας (Power Saving Mode (PSM)), που επιτρέπει στα τερματικά να εισέρχονται σε κατάσταση αναστολής λειτουργίας όταν δεν



M2M communications architecture proposed by ETSI.

Σχήμα 1.19: M2M communications Architecture [16] [29].

χρειάζονται να εκπέμπουν ή να λαμβάνουν. Κατά την διάρκεια του χρόνου αδράνειας, τα τερματικά παραμένουν εγγεγραμμένα στο δίκτυο έτσι ώστε όταν εκ νέου ενεργοποιηθούν να μην χρειαστεί να επανασυνδεθούν ή αποκαταστήσουν τη σύνδεση ενώ παράλληλα δεν είναι προσβάσιμα από το δίκτυο. Μια άλλη τεχνική για την μείωση της κατανάλωσης ενέργειας περιλαμβάνει τη χρήση ασυνεχούς λήψης με εκτεταμένο sleeping cycle σε κατάσταση αδράνειας κατά την οποία τα κυκλώματα απενεργοποιούνται για εξοικονόμηση ενέργειας, και στην διάρκεια της οποίας τα τερματικά δεν είναι προσβάσιμα στο δίκτυο και γίνονται περιοδικά προσβάσιμα κατά την διάρκεια του κύκλου ενεργοποίησης [16, 30].

Για να υλοποιηθεί η τεχνολογία M2M υπάρχουν κάποιες προκλήσεις που πρέπει να αντιμετωπιστούν οι οποίες συνοψίζονται στα εξής: i) κοινό πρωτόκολλο και πρακτικό πλαίσιο, μεταξύ των προμηθευτών εξοπλισμού για την καλύτερη επικοινωνία μεταξύ τους (πρωτόκολλα ασφάλειας επικοινωνίας μηχανών, πλαίσιο τεμαχισμού των ραδιοπόρων για αποτελεσματικότητα συνδέσεων μεταξύ ετερογενών δικτύων, πλαίσιο για την υποστήριξη QoS και επίλυση προβλημάτων συμφόρησης RAN), ii) χαμηλότερο latency και μεγαλύτερη ταχύτητα, η ανταλλαγή πληροφοριών πρέπει να είναι σε πραγματικό χρόνο και να επιτρέπει τη μετάδοση επαρκούς όγκου δεδομένων για τη διευκόλυνση της λήψης αποφάσεων για να γίνει αντιληπτή η πρακτική αξία του M2M στην χρήση, iii) διαθέσιμοι πόροι και πλήρης προγραμματισμός, μια σειρά από παράγοντες όπως το communication rate, η καθυστέρηση, η απόδοση και η κατανάλωση ενέργειας, πρέπει να ληφθούν υπόψιν κατά τον προγραμματισμό και την κατανομή των πόρων επικοινωνίας ώστε να υπάρξει εξισορρόπηση της απόδοσης και ο αυτόματος χρονοπρογραμματισμός, iv) υψηλά οφέλη και ευρύ φάσμα εφαρμογών, η M2M είναι μια τεχνολογία που μπορεί να εφαρμοστεί σε διάφορους τομείς ευρέως στην κοινωνία ώστε να διασφαλίσει την ασφάλεια, να μειώσει το κόστος και να βελτιώσει τα οικονομικά οφέλη, v) ευχρηστία και αξιοπιστία για τον χρήστη, vii) ασφάλεια και απόρρητο, λόγω της αύξησης των συσκευών IoT που συνδέονται στο διαδίκτυο δημιουργούνται περισσότερες απειλές για την ασφάλεια, την ακεραιότητα, την εμπιστευτικότητα και το απόρρητο των δεδομένων οι οποίες πρέπει να αντιμετωπιστούν και τέλος viii) συσκευές χαμηλού κόστους και χαμηλής κατανάλωσης, τα

οποία είναι οι πιο σημαντικοί παράγοντες σχεδιασμού για να καταστούν τα κυψελωτά δίκτυα εφικτά και εφαρμόσιμα σε σύγκριση με τις παραδοσιακές ασύρματες τεχνολογίες [16, 40].

Η τεχνολογία M2M μπορεί να βελτιστοποιήσει την απόδοση των 5G και την προώθηση δυναμικής διαχείρισης του φάσματος συνδυάζοντας WRV (Wireless Resource Virtualization) και M2M επικοινωνία η οποία μπορεί να επιτύχει υψηλότερη χωρητικότητα, καλύτερο QoS και χαμηλότερο κόστος εγκατάστασης και χρήσης για τα 5G δίκτυα [16, 40].

Small Cells (SC) / Ultra Dense Networks

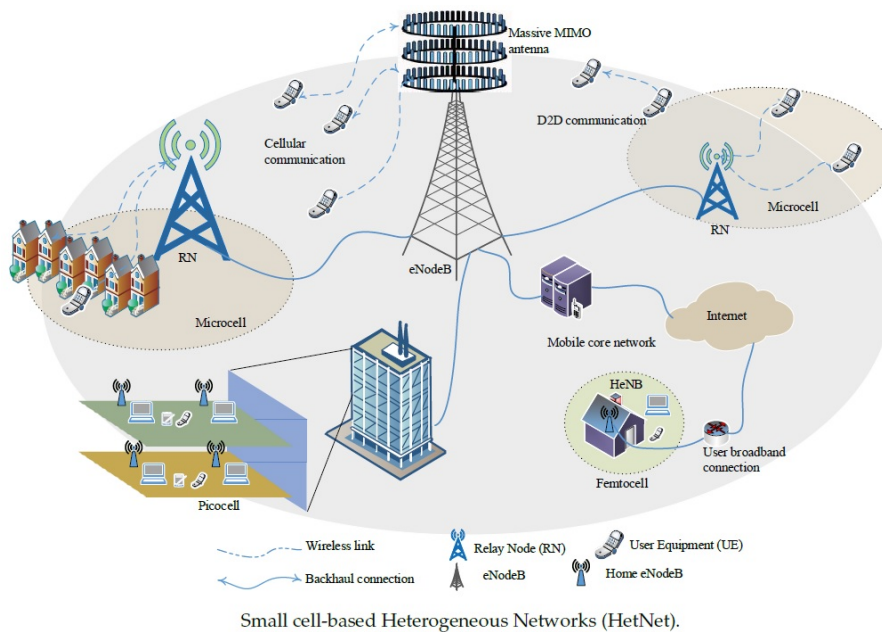
Η χρήση της τεχνολογίας των Small Cells (SC) δεν είναι κάτι καινούριο στις ασύρματες επικοινωνίες, όμως η αύξηση των ασύρματων συνδεδεμένων συσκευών (smartphones, tablets, laptops κτλ) και η ενρύτερη χρήση υπηρεσιών πολυμεσικών εφαρμογών έχουν σαν αποτέλεσμα την αύξηση της κίνησης στα τηλεπικοινωνιακά δίκτυα, την ανάγκη για αύξηση της ταχύτητας μετάδοσης/λήψης των δεδομένων, της φασματικής απόδοσης, της χωρητικότητας του δικτύου, της διαχείρισης των παρεμβολών μεταξύ των κυψελών του δικτύου που έχουν παρακινήσει τους παρόχους τηλεπικοινωνιακών δικτύων αλλά και την ακαδημαϊκή κοινότητα στην έρευνα, ανάπτυξη και βελτίωση των υπαρχόντων τεχνολογιών [8, 10, 17, 41].

Η πυκνή ανάπτυξη των SC είναι απαραίτητη για την ενίσχυση της χωρητικότητας στα δίκτυα 5G. Η πύκνωση των παραδοσιακών macro BS περιοριζόταν λόγω μη διαθεσιμότητας χώρων στις πόλεις, των υψηλών CAPEX των σχετικών υποδομών και της ισχύς εκπομπής τους. Η δημιουργία SC BS είναι εφικτή λόγω της χαμηλής ισχύς μετάδοσης, της ευελιξίας στην ανάπτυξη τους, του χαμηλού κόστους συντήρησης, την ενίσχυση της χωρητικότητας του δικτύου, την δυνατότητα της κάλυψης του δικτύου με την επαναχρησιμοποίηση συχνότητας σε μια δεδομένη γεωγραφική περιοχή και εκφόρτωση της κίνησης των δεδομένων σε άλλα SC καθώς και την ανάπτυξη τους όχι μόνο σε εξωτερικούς χώρους αλλά και εσωτερικούς [8, 17, 39, 41].

Ένας τρόπος για να μεγιστοποιήσεις την χωρητικότητα του δικτύου είναι πύκνωση του δικτύου με κυψέλες μειωμένου μεγέθους. Από την εποχή του 1G όπου το μέγεθος των κυψελοειδών συστημάτων άγγιζε την τάξη των εκατοντάδων τετραγωνικών χιλιομέτρων και μέχρι σήμερα την εποχή του 5G, το μέγεθος έχει μειωθεί στην τάξη του χιλιομέτρου στους εξωτερικούς χώρους και στην τάξη κάτω των εκατό(100) μέτρων σε εσωτερικούς χώρους[7][32], αυτό έχει πολλά πλεονεκτήματα συμπεριλαμβανομένου της επαναχρησιμοποίησης συχνότητας σε μια δεδομένη γεωγραφική περιοχή, εκφορτώνοντας τους χρήστες από επιβαρυνμένες κυψέλες λόγω υψηλής επισκεψιμότητας, σε κυψέλες χαμηλότερης κυκλοφορίας ώστε να μειωθεί η διαμάχη των πόρων μεταξύ των χρηστών σε κάθε BS [17, 41].

Τα BS SC χαμηλής ισχύος μετάδοσης εξυπηρετούν μικρότερες περιοχές κάλυψης από τα macroBS και ταξινομούνται σε microcells, picocells και femtocells τα οποία διαφέρουν ως προς την ανάπτυξη τους σε εξωτερικούς ή εσωτερικούς χώρους. Τα microcells έχουν ακτίνα κάλυψης δυο (2) χιλιομέτρων, μπορούν να υποστηρίξουν αρκετές εκατοντάδες χρήστες και χρησιμοποιούνται για την αύξηση της χωρητικότητας του εξωτερικού δικτύου σε σενάρια hot-spot όπως πχ σε εμπορικά κέντρα ή κόμβους μεταφοράς. Τα picocells έχουν εμβέλεια μέχρι και τριακόσια (300) μέτρα και μπορούν να υποστηρίξουν μερικές δεκάδες χρήστες. Μπορούν να αναπτυχθούν για την βελτίωση της χωρητικότητας σε εξωτερικούς χώρους σε σενάρια με έντονη κίνηση ή σε εσωτερικούς χώρους για την βελτίωση της ασύρματης κάλυψης. Και τέλος τα femtocells γνωστά κι ως οικιακά BS, είναι σημεία πρόσβασης χαμηλής ισχύος μετάδοσης με

χαμηλό CAPEX, έχουν εμβέλεια έως πενήντα (50) μέτρα σχεδιασμένα να υποστηρίζουν μόνο δώδεκα (12) ενεργούς χρήστες και μπορούν να χειρίζονται μόνο μερικές ταυτόχρονες κλήσεις. Εγκαθίστανται από τον χρήστη για να βελτιωθεί η κάλυψη σε ένα γραφείο στο σπίτι ή μια νεκρή ζώνη μέσα σε ένα κτήριο και εκφορτώνουν την κυκλοφορία δεδομένων χρησιμοποιώντας το broadband των καταναλωτών (DSL, καλώδιο ή οπτική ίνα) χωρίς να επιβαρύνεται ο χρήστης το κόστος του backhaul, το OPEX και το κόστος κατανάλωσης ενέργειας. Τα microcells και picocells λειτουργούν σε λειτουργία ανοιχτής πρόσβασης ενώ τα femtocells μπορούν να λειτουργήσουν και σε λειτουργία περιορισμένης πρόσβασης. Επίσης τα microcells και picocells σχεδιάζονται/αναπτύσσονται από παρόχους κινητής τηλεφωνίας ενώ τα femtocells από τους χρήστες. Πρέπει να αναφέρουμε και την χρήση relays (αναμεταδότες) που αναπτύσσονται από τον χειριστή όμως δεν ανήκουν στην ομάδα των SCs, τα οποία δρομολογούν δεδομένα από macro BSs στους τελικούς χρήστες και αντίστροφα, είναι ανεξάρτητα από την αρχιτεκτονική του δικτύου, λειτουργούν σαν επέκταση της κάλυψης του δίχως την δυνατότητα επαναχρησιμοποίησης του φάσματος χωρικά, προκαλώντας όμως παρεμβολές στα SCs κάτι το οποίο δε μπορεί να αγνοηθεί [10, 17, 32, 41].



Σχήμα 1.20: Small Cell based HetNet [17].

Όπως όλες οι τεχνολογίες έτσι και τα SC έχουν να αντιμετωπίσουν κάποιες προκλήσεις οι οποίες συνοψίζονται στις εξής κατηγορίες: 1) Διαχείριση παρεμβολών των SC είναι ένα σημαντικός παράγοντας για την ανάπτυξη τους, η αδειοδοτημένη ζώνη φάσματος που χρησιμοποιείται στα macroBS υποστηρίζεται και στα SC προκαλώντας πρόσθετες παρεμβολές στη μετάδοση άνω ζεύξης και κάτω ζεύξης συν τις παρεμβολές από τις συσκευές των άλλων επιπέδων του δικτύου και των relays που χρησιμοποιούνται. Χωρίζεται σε ακύρωση παρεμβολών που βελτιώνει το SINR (Signal to Interference plus Noise Ratio) αναδημιουργώντας τα σήματα παρεμβολής και σε συντονισμό παρεμβολών που βελτιώνει την απόδοση του SINR με έξυπνη κατανομή των ραδιοπόρων. Το FFR (Fractional Frequency Reuse) είναι ο πιο ευρέως διαδεδομένος μηχανισμός για το ICIC (Inter Cell Interference Coordination) της κάτω ζεύξης. Διαιρεί ολόκληρη την ζώνη του φάσματος σε πολλές υποζώνες για να αποφευχθεί η χρήση της ίδιας υποζώνης από τα UEs των ακμών σε γειτονικά macrocells. Έχει προταθεί η μαζική προσέγγιση κοινής χρήσης φάσματος (Spectrum Sharing - SS) για την κατασκευή των SC, με χρήση μη ορθογώνιας προσέγγισης SS χωρίς παρεμβολές για να σχηματιστούν 3D clusters και μικρότερη απόσταση μεταξύ του co-channel των

SC και παρατηρήθηκε σημαντική βελτίωση της μέσης φασματικής απόδοσης με την αύξηση του αριθμού των κτηρίων ενώ μειώθηκε η ενεργειακή απόδοση με την αύξηση των κτηρίων, οπότε αυτό το μη ορθογώνιο σχήμα που προτάθηκε είναι καλύτερο για τις μεθόδους LSA(Licensed Shared Access) και LAA (Licensed Assisted Access) για την κοινή χρήση του μη αδειοδοτημένου φάσματος των 60GHz. Μια άλλη προσέγγιση εισήγαγε μια νέα δομή δικτύου, δίνοντας μεγαλύτερη βαρύτητα στο σχεδιασμό δικτύων μικρού μεγέθους κυψέλης για τα συστήματα ασύρματης επικοινωνίας Wi-Fi και 4G προτείνοντας ένα σχήμα ABS (Almost Blank Subframe) κι ένα σχήμα αποφυγής παρεμβολών για την εξάλειψη της επίδρασης των τύπων των παρεμβολών που αντιμετωπίζουν οι δυο τεχνολογίες σε ένα δίκτυο και τα αποτελέσματα έδειξαν ότι συμβάλει αποτελεσματικά στην μείωση του κόστους και την αποφυγή παρεμβολών αλλά το εύρος μετάδοσης είναι περιορισμένο [17, 41].

2) Βελτίωση του throughput στα SC είναι επίσης σημαντική, έχει παρουσιαστεί ένα σενάριο με την ανάπτυξη ενός δικτύου SC με δυνατότητα προσωρινής αποθήκευσης για παροχή υψηλών QoS, το βέλτιστο μέγεθος μνήμης επιτυγχάνεται για ένα μικρής πυκνότητας BS και τα αποτελέσματα έδειξαν ότι ελαχιστοποιήθηκε η χωρητικότητα του backhaul και αυξήθηκε η απόδοση του throughput. Ένα άλλο σχήμα RRM (Radio Resource Managment) που έχει συζητηθεί είναι ένα cooperative game πρόγραμμα κοινής χρήσης ραδιοπόρων για την βελτίωση των αποτελεσμάτων όσον αφορά το throughput των χρηστών, το οποίο βελτιώνει την φασματική απόδοση, αλλά όσο μεγαλύτερα γίνονται τα δίκτυα SC απαιτούνται πρόσθετες καταναμημένες προσεγγίσεις μάθησης που μπορούν να εφαρμοστούν για αποτελεσματικό σχηματισμό συνασπισμών [17].

3) Σχεδιασμός κάλυψης SC. Η κάλυψη και η φασματική απόδοση σε δίκτυα SC mmWave είναι εξαιρετικά σημαντικές. Χρησιμοποιούνται τεχνικές επαναχρησιμοποίησης συχνότητας για την αξιολόγηση των πόρων του φάσματος και την εισαγωγή ενός σχήματος μετριάσμου παρεμβολών, εξετάζουν τον επηρεασμό της απόδοσης της λειτουργίας των MU-MIMO λόγω της ακτίνας επικάλυψης των SC και παρατήρησαν ότι η μέγιστη απόδοση επιτυγχάνεται όταν τρία επιπλέον κανάλια λειτουργούν σε ακτίνα έως και 50m. Έχει εξεταστεί και το θέμα των κενών της κάλυψης δηλαδή σημείων όπου ο χρήστης δεν λαμβάνει το βέλτιστο επίπεδο σήματος σε ένα δίκτυο δυο επιπέδων macrocell και SC προτείνοντας μια ενεργειακά αποδοτική προσέγγιση κάλυψης, μια τεχνική sleep scheduling με επίγνωση της πυκνότητας, την ενεργειακή απόδοση και την αποδοτικότητα του φάσματος που βασίζεται σε αλγόριθμους προσαρμογής πυκνότητας BS και cell-zooming, η οποία στοχεύει να αποτρέψει τα κενά στην κάλυψη του δικτύου, αυξάνοντας το throughput του δικτύου και μειώνοντας το SINR για τους χρήστες στις ακμές του SC βελτιώνοντας το throughput, την ενέργεια και τη φασματική απόδοση [17].

4) Ενίσχυση χωρητικότητας στα SC είναι ένα ακόμα παράγοντας που πρέπει να μελετηθεί. Τα αποτελέσματα από τον σχεδιασμό της κυψέλης δείχνουν υψηλή φασματική απόδοση και βελτίωση χωρητικότητας για απομονωμένους χρήστες μικρών κυψελών mmWave MU-MIMO, δίνοντας την δυνατότητα να εισαχθεί κι ένας relay κόμβος για να ενισχυθεί περαιτέρω η κάλυψη της περιοχής των SC. Εξετάστηκαν επίσης SC που εστιάζουν στην μεταφόρτωση των δεδομένων μεταξύ των χρηστών, προτείνοντας έναν καινοτόμο μηχανισμό cloud service των αρχείων για δίκτυα SC για τη μεταφόρτωση δεδομένων χρηστών κινητής τηλεφωνίας, επιτρέποντας στους χρήστες να μοιράζονται αρχεία και πληροφορίες, εξοικονομώντας τη χωρητικότητα του δικτύου για υψηλή κίνηση δεδομένων ωστόσο εάν το μέγεθος του αρχείου είναι μεγάλο θα υπάρξει μια καθυστέρηση. Εξετάστηκε επίσης το ζήτημα που αντιμετωπίζει η αυτό-οργάνωση των HetNet που βασίζονται σε SC στην ανάπτυξη του υποφέροντας από προκλήσεις

όπως είναι το backhauling, η παροχή χωρητικότητας και της δυναμικής του φόρτου κυκλοφορία, προτείνοντας ένα μαθηματικό μοντέλο ενός AIS (Artificial Immune System) που μπορεί να ενεργοποιεί και να απενεργοποιεί τα SCs με βάση τη ζήτηση κίνησης, ενισχύοντας το throughput και την ταχύτητα ενεργοποίησης BS. Οι υψηλές παρεμβολές μεταξύ κυψελών έχουν ως αποτέλεσμα πιο αργές ταχύτητες ενεργοποίησης και απενεργοποίησης [17].

5) Σχεδιασμός backhaul SC. Το SC backhaul διαφέρει από το backhaul macrocells. Οι κύριες τεχνικές προκλήσεις για τον σχεδιασμό των SC περιλαμβάνουν το κόστος, το οποίο περιλαμβάνει το CAPEX και το OPEX, τη διάσταση χωρητικότητας backhaul και την ανάπτυξη PoP (Point of Presence). Το κόστος αναλύεται χρησιμοποιώντας ένα μοντέλο τριών επιπέδων, το οποίο διαιρεί το συνολικό κόστος του backhaul σε κόστος υποδομής, χωρητικότητας και φυσικής σύνδεσης. Τα αποτελέσματα δείχνουν ότι υπάρχει ένα εύρος πυκνότητας κόμβων backhaul για την ελαχιστοποίηση του κόστους ανάπτυξης backhaul ενώ ικανοποιούνται οι απαιτήσεις throughput των UE. Ωστόσο, η διακύμανση του όγκου της κίνησης από άποψη χρόνου και χώρου δεν συζητείται όπως και το OPEX. Κατά συνέπεια, ο τρόπος μείωσης του συνολικού κόστους του backhaul όσον αφορά το CAPEX και το OPEX είναι ακόμα υπό διερεύνηση. Η διάσταση χωρητικότητας Backhaul μπορεί να βελτιώσει την απόδοση CAPEX προσαρμόζοντας τη χωρητικότητα για εξατομικευμένο όγκο κίνησης. Η συνάθροιση επισκεψιμότητας μπορεί να βελτιώσει την αποδοτικότητα του κόστους συγκεντρώνοντας την επισκεψιμότητα από πολλά SC και στέλνοντάς την μέσω ενός κοινού backhaul. Ωστόσο, μεμονωμένα σημεία αστοχίας μπορεί να θέτουν προκλήσεις, οδηγώντας στην υιοθέτηση πιο ακριβών τοπολογιών backhaul όπως η star και η mesh. Παρότι η συνάθροιση κυκλοφορίας μπορεί να μειώσει το CAPEX και να παρέχει λειτουργίες ελέγχου και επιπέδου χρήστη για μείωση του φορτίου σηματοδότησης στα στοιχεία CN. Ωστόσο, απαιτούνται μεγάλες προσπάθειες σχεδιασμού για την ανάπτυξη του PoP λόγω των πλεονεκτημάτων και των μειονεκτημάτων των ενσύρματων και ασύρματων λύσεων backhaul. Οι ενσύρματες λύσεις επικεντρώνονται στο κόστος εγκατάστασης και σύνδεσης υποδοχών, ενώ οι ασύρματες λύσεις επικεντρώνονται στην περιοχή κάλυψης του PoP. Οι υπάρχουσες υποδομές όπως τα macro BS και τα edge clouds προτιμώνται για την ανάπτυξη του PoP παρά το υψηλό κόστος. Οι ασύρματες λύσεις θα πρέπει να λαμβάνουν υπόψη την επιθυμητή απόσταση μετάδοσης σημάτων εξαιρετικά υψηλής συχνότητας. Η διαθεσιμότητα συνδέσεων LOS ή non-LOS (NLOS) επηρεάζει επίσης τη μέγιστη χωρητικότητα backhaul για τα UEs. Η επιλογή μεταξύ της μετάδοσης point-to-point (P2P) και point-to-multipoint (P2MP) θα πρέπει να γίνεται για διαφορετικά σενάρια εφαρμογής. Μια υβριδική λύση για την ανάπτυξη PoP μπορεί να είναι αποτελεσματική για σενάρια όπου οι ενσύρματες λύσεις γίνονται πολύ ακριβές, όπως οι δρόμοι [41].

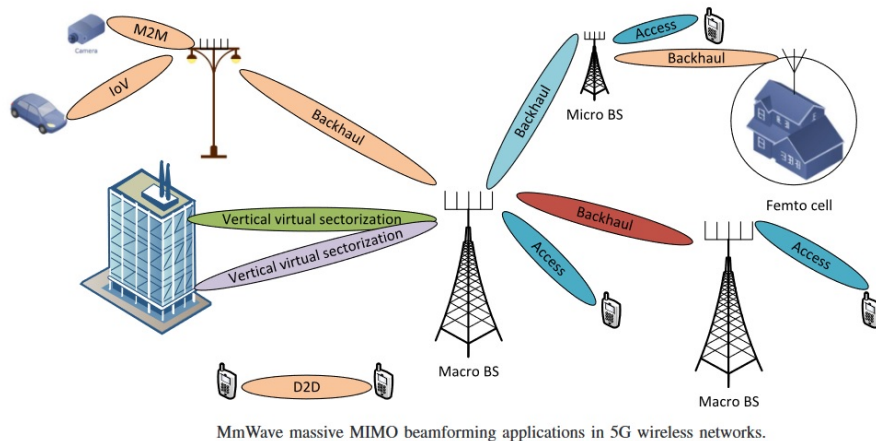
Εν κατακλείδι η χρήση SC στο δίκτυο 5G γίνεται όλο και πιο σημαντική λόγω της αυξανόμενης χρήσης ζωνών υψηλής συχνότητας. Ωστόσο, οι υπάρχοντες αλγόριθμοι κατανομής φάσματος είναι ανεπαρκείς όσον αφορά την βέλτιστη της απόδοσης, απαιτούνται αποτελεσματικές λύσεις για την κατανομή του φάσματος για δίκτυα περιορισμένης χωρητικότητας backhaul ώστε να βελτιωθεί η απόδοσή τους, η μείωση των καθυστερήσεων και η εξοικονόμηση ενέργειας. Η εναλλαγή μεταξύ SC και Wi-Fi είναι μια πρόκληση και απαιτούνται νέες προσεγγίσεις όπως η κατανομή ισχύος με επίγνωση του μπλοκ, η αποτελεσματική επιλογή relay και οι συνεργατικοί αλγόριθμοι προσωρινής αποθήκευσης. Οι προσεγγίσεις νευρωνικών δικτύων τροφοδοσίας μπορούν να εφαρμοστούν για κατανομή πόρων και ισχύος, ενώ οι αυτόνομες τεχνικές εκφόρτωσης κίνησης που βασίζονται στη μηχανική εκμάθηση μπορούν να μειώσουν την καθυστέρηση μετάδοσης. Οι προσεγγίσεις ομαδοποίησης που βασίζονται σε τεχνητή νοημοσύνη μπορούν να διαχειριστούν πλαίσια πόρων και να βελτιώσουν την αποδοτικότητα και την απόδοση των

μικρών κυμαλίων. Μελετάται η τοποθέτηση της νοημοσύνης και εφαρμογών στην άκρη του δικτύου μέσω NFV (Network Functions Virtualisation) και edge-cloud computing καθώς και SC Drone (SCD) μη επανδρωμένα εναέρια οχήματα (Unmanned Aerial Vehicles - UAVs) εξοπλισμένα με ασύρματα BS για την παροχή ασύρματων υπηρεσιών σε έκτακτα γεγονότα (πχ σεισμοί, πλημμύρες κτλ) [17].

Beamforming

Το Beamforming είναι μια κρίσιμη τεχνολογία στα δίκτυα 5G που ενισχύει την αποδοτικότητα του φάσματος, την κάλυψη δικτύου και μειώνει τις παρεμβολές. Περιλαμβάνει την κατεύθυνση μιας εστιασμένης δέσμης ενέργειας προς έναν συγκεκριμένο δέκτη, μειώνοντας τη μετάδοση ενέργειας προς όλες τις κατευθύνσεις. Η απόδοση της διαμόρφωσης δέσμης εξαρτάται από παράγοντες όπως ο αριθμός των κεραιών, η συχνότητα του σήματος, η απόσταση μεταξύ πομπού και δέκτη και το περιβάλλον. Βελτιώνει το Signal to Noise Ratio (SNR) εστιάζοντας στον δέκτη, μειώνοντας τη μετάδοση ενέργειας προς άλλες κατευθύνσεις, τις παρεμβολές μεταξύ πολλαπλών πομπών στην ίδια ζώνη συχνοτήτων κατευθύνοντας τη δέσμη προς τον επιθυμητό δέκτη. Μπορεί να εφαρμοστεί οπουδήποτε χρησιμοποιείται μετάδοση ραδιοκυμάτων ή ηχητικών κυμάτων, στα σόναρ, στα ραντάρ, στις ασύρματες επικοινωνίες, στη σεισμολογία, στη ραδιοαστρονομία και βιοϊατρική [10, 18, 25, 31, 39, 42, 43].

Το Beamforming με βάση τον συνδυασμό κεραιών μπορεί να ταξινομηθεί σε τρεις τύπους: το Static Beamforming που περιλαμβάνει πολλαπλές κατευθυντικές κεραιές για την παραγωγή σταθερής εξόδου ακτινοβολίας και χρησιμοποιείται σε εσωτερικές τομεακές συστοιχίες κεραιών, το Dynamic Beamforming που είναι παρόμοιο με το Static Beamforming αλλά επιτρέπει την προσαρμοστική ρύθμιση του σχεδίου ακτινοβολίας και τη ικανότητα κατευθυντικότητας (Directivity) οπότε μπορεί να διανεμηθεί σήμα βέλτιστης ποιότητας σε κάθε συσκευή σύνδεσης και τέλος το Transmit Beamforming είναι μια ευέλικτη τεχνική για τη μετάδοση του σήματος από τη συστοιχία μιας κεραιάς σε έναν ή περισσότερους χρήστες. Με αυτή την τεχνική, τα πολλαπλά phase-shifted σήματα μεταδίδονται σε in-phase προς το μέρος όπου πιστεύεται ότι βρίσκεται ο δέκτης [18].



Σχήμα 1.21: mmWave massive MIMO Beamforming application in 5G [18].

Η απόδοση του Beamforming επηρεάζεται από τον αλγόριθμο που χρησιμοποιείται. Οι αλγόριθμοι ταξινομούνται σε στις εξής κατηγορίες: στο Αναλογικό, στο Ψηφιακό και στο Υβριδικό Beamforming. Το Αναλογικό Beamforming χρησιμοποιεί μετατοπιστές φάσης για τη ρύθμιση της φάσης του σήματος σε κάθε στοιχείο κεραιάς, το Ψηφιακό Beamforming χρησιμοποιεί έναν αλγόριθμο επεξεργασίας ψηφιακού

σήματος για να προσαρμόσει το πλάτος και τη φάση του σήματος σε κάθε στοιχείο κεραίας έτσι πολλαπλές δέσμες από το ίδιο σύνολο (μια για κάθε χρήστη) στοιχείων κεραίας μπορούν να σχηματιστούν ταυτόχρονα και τέλος το Υβριδικό Beamforming του οποίου η εφαρμογή του κατανέμεται μεταξύ ψηφιακού και αναλογικού τομέα, έχοντας το πλεονέκτημα ότι μπορεί να χρησιμοποιηθεί μεγάλος αριθμός στοιχείων κεραίας – αποδίδοντας έτσι μεγάλο κέρδος συστοιχίας – χωρίς να θυσιάζεται η ευελιξία. Το χαμηλό κόστος υλικού και η χαμηλή κατανάλωση ενέργειας το καθιστούν μια οικονομικά αποδοτική λύση [18, 21, 42, 43].

Υπάρχουν πολλαπλά οφέλη από την χρήση του Beamforming μπορούν να συνοψισθούν ως εξής: Ενισχυμένη φασματική απόδοση (Spectrum Efficiency: SE) όπου οι κεραίες διαμόρφωσης δέσμης βελτιώνουν τη χωρητικότητα, την ποιότητα του σήματος και τον έλεγχο ισχύος σε τεράστια συστήματα MIMO το επιτυγχάνεται μέσω συνεκτικής προκωδικοποίησης και επεξεργασίας ανιχνευτή, Βελτιωμένη ενεργειακή απόδοση όπου η ισχύς που απαιτείται για τη μετάδοση ενός σήματος μέσω κεραίων διαμόρφωσης δέσμης είναι χαμηλή. Για τη μείωση της κατανάλωσης ενέργειας, προσδιορίζεται η ελάχιστη και ακριβής ποσότητα στοιχείων που οδηγεί σε ένα σύστημα με χαμηλό κόστος ενισχυτή και χαμηλή κατανάλωση ενέργειας. Εφαρμογή για ζώνες mmWave στις οποίες οι περισσότερες αδειοδοτημένες ζώνες συχνοτήτων για ασύρματη κυψελοειδές επικοινωνία μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την αύξηση των ρυθμών δεδομένων, αυτό περιλαμβάνει το εύρος συχνοτήτων από 60 GHz και άνω. Και τέλος βελτιωμένη ασφάλεια συστήματος καθώς το Beamforming καθοδηγεί τα σήματα μέχρι να φτάσουν στον προβλεπόμενο παραλήπτη, μειώνοντας τον κίνδυνο υποκλοπής [10, 18, 39].

Λόγω του ότι οι τεχνικές Beamforming μπορούν να βελτιώσουν την απόδοση χωρητικότητας και να μειώσουν τις παρεμβολές, έχουν προταθεί κοινοί αλγόριθμοι beamforming και κατανομής ισχύος για το ολοκληρωμένο δορυφορικό-επίγειο δίκτυο, αρχιτεκτονική διαμόρφωσης δέσμης με βάση το cloud για το ολοκληρωμένο δορυφορικό-επίγειο δίκτυο, ημι-προσαρμοστικός αλγόριθμος beamforming για δορυφορικό beamforming, αλγόριθμοι ομαδοποίησης και multicast beamforming για τη βελτιστοποίηση της απόδοσης του συστήματος, ένα ισχυρό σχήμα πολλαπλών ομάδων πολλαπλής εκπομπής beamforming για δορυφορικά-επίγεια δίκτυα IoT και διερευνήθηκε το πρόβλημα σχεδιασμού πολλαπλών ομάδων διαμόρφωσης δέσμης [21].

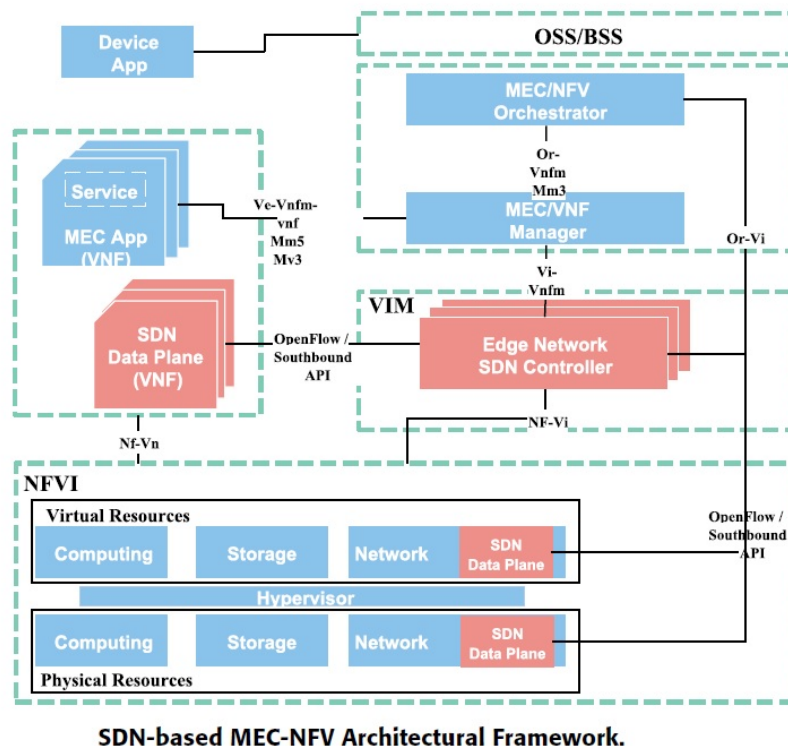
SDN (Software Defined Networks)

Η βασική ιδέα του SDN είναι ο διαχωρισμός των επιπέδων μεταξύ ελέγχου και δεδομένων χρήστη, δίνοντας την δυνατότητα συγκέντρωσης των λειτουργιών του επιπέδου ελέγχου σε ελεγκτές λογισμικού που μπορούν να οδηγηθούν από APIs (Application Programming Interfaces) για να επικοινωνήσουν με την υποδομή υλικού και να κατευθύνουν την κυκλοφορία δικτύου. Το SDN δημιουργεί και λειτουργεί μια σειρά από εικονικά δίκτυα επικάλυψης που λειτουργούν σε συνδυασμό με ένα φυσικό δίκτυο υποστρώματος [19–21, 30, 44].

Με την χρήση του SDN δίνεται η δυνατότητα βελτίωσης στην ανάπτυξη και διαχείριση του δικτύου εισάγοντας τα οφέλη του cloud χρησιμοποιώντας υπηρεσίες cloud computing και ενσωμάτωση APIs για μεγαλύτερη αποτελεσματικότητα. Τα βασικά στοιχεία που συνθέτουν ένα δίκτυο SDN είναι εφαρμογές για την μετάδοση των πληροφοριών του δικτύου ή για αιτήματα διαθεσιμότητας ή κατανομής συγκεκριμένων πόρων, ελεγκτές SDN, συσκευές δικτύωσης και τεχνολογίες Open-source (προγραμματιζόμενα πρωτόκολλα δικτύωσης όπως το OpenFlow). Υπάρχουν τέσσερις κύριοι τύποι SDN, το Open SDN, το

API SDN, το Overlay Model SDN και το υβριδικό μοντέλο SDN [44].

Η αρχιτεκτονική του SDN έχει πολλά πλεονεκτήματα λόγω του συγκεντρωτικού ελέγχου και διαχείρισης του δικτύου. Παρέχει ευκολία στο έλεγχο του δικτύου, agility στην διαχείριση της κυκλοφορίας στο δίκτυο, ευελιξία στις ρυθμίσεις διαμόρφωσης, την παροχή πόρων και την αύξηση της χωρητικότητας του δικτύου, μεγαλύτερο έλεγχο στην ασφάλεια του δικτύου, απλοποιημένη σχεδίαση και λειτουργία του δικτύου, εκσυγχρονισμό των τηλεπικοινωνιών. Στο πλαίσιο των ερευνών για την ενοποίηση δορυφορικών και επίγειων δικτύων αντιμετωπίζει πολλαπλές προκλήσεις, η αρχιτεκτονική του SDN λόγω του διαχωρισμού των επιπέδων ελέγχου και δεδομένων μπορεί να εφαρμοστεί αποτελεσματικά και έξυπνα [19,21,44].



Σχήμα 1.22: SDN-based MEC-NFV architectural framework [19].

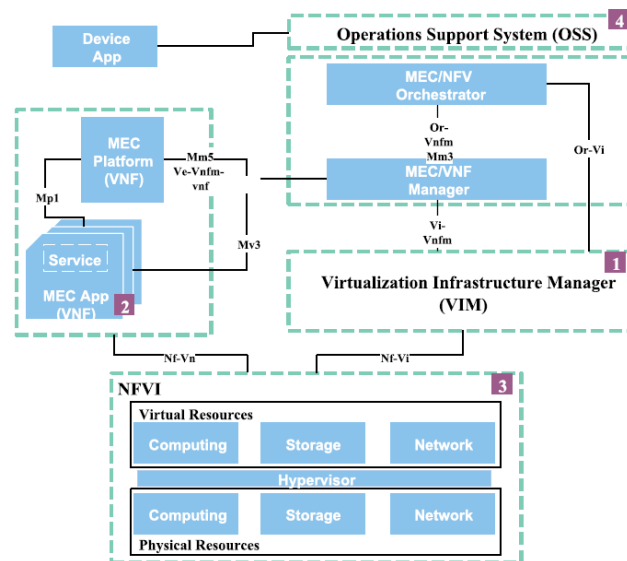
NFV (Network Function Virtualization)

Το NFV είναι ένα μοντέλο αρχιτεκτονικής δικτύου που χρησιμοποιεί τις τεχνολογίες εικονικοποίησης (Virtualization) για να εξομοιώσει λειτουργίες κόμβων δικτύων σε δομικά στοιχεία που μπορούν να συνδεθούν μαζί για να δημιουργήσουν υπηρεσίες τηλεπικοινωνιών. Οι υπηρεσίες αυτές (δρομολόγηση, εξισορρόπηση φορτίου, στοιχεία ελέγχου του firewall) εικονικοποιούνται ως VMs (Virtual Machines) ή containerized (διαδικασία ανάπτυξης λογισμικού που ομαδοποιεί τον κώδικα μιας εφαρμογής με όλα τα αρχεία και τις βιβλιοθήκες που χρειάζεται για να εκτελεστεί σε οποιαδήποτε υποδομή) διεργασίες σε commodity hardware (υπολογιστές ή εξαρτήματα που είναι άμεσα διαθέσιμα, φθηνά και εύκολα εναλλάξιμα με άλλο υλικό βασικών προϊόντων. Ο όρος χρησιμοποιείται περισσότερο για διακομιστές γενικής χρήσης [45]). Οι μεμονωμένες VNFs (Virtual Network Functions) αποτελούν βασικό συστατικό της αρχιτεκτονικής NFV καθώς μπορούν να προστεθούν πολλαπλά VNFs σε ένα τυπικό server και στην συνέχεια να παρακολουθούνται και να ελέγχονται από ένα VM hypervisor ή container host [19,20,30,46].

Τα πλεονεκτήματα που προσφέρει NFV λόγω της απλοποίησης και της επιτάχυνσης των διαδικασιών προσθήκης νέων λειτουργιών ή εφαρμογών στα δίκτυα είναι η γρήγορη ανάπτυξη, εύκολη κλιμάκωση, αναβαθμίσεις λογισμικού και χαμηλότερο κόστος ανάπτυξης και διαχείρισης του δικτύου καθώς επίσης μειωμένη κατανάλωση ενέργειας και μειωμένο φυσικό χώρο στο κέντρο δεδομένων διότι εξαλείφει τις περισσότερες παραδοσιακές συσκευές υλικού και συμβάλλει στην μείωση του OPEX και CAPEX [19, 46].

Η αρχιτεκτονική του NFV αποτελείται από τρία επίπεδα, το NFVI που προέρχεται από λογισμικό που μιμείται και εκχωρεί παραδοσιακές λειτουργίες υλικού, όπως υπολογιστές, αποθήκευση και δικτύωση, τα μεμονωμένα VNF που είναι οι πραγματικές λειτουργίες δικτύου που χρησιμοποιούν το NFVI για αυτούς τους πόρους και το επίπεδο NFV MANO (Management and Orchestration) που παρέχει διαχείριση και ενορχήστρωση των NFVI και VNF [46].

Στη βιβλιογραφία συχνά το NFV συνδυάζεται με το SDN. Το μεν NFV έχει σαν σκοπό την αποσύνδεση του υλικού από τις λειτουργίες του δικτύου και να μετακινηθούν αυτές οι υπηρεσίες σε VN περιβάλλοντα και να μειωθεί το κόστος υλοποίησης και λειτουργίας και παράλληλα να απλοποιηθεί η επεκτασιμότητα και η διαχείριση και το δε SDN εστιάζει στο διαχωρισμό της εκτέλεσης των λειτουργιών του δικτύου από τον έλεγχο και τη διαχείριση διαμόρφωσης, μοντέλο ιδανικό για περιβάλλοντα όπου είναι επιθυμητός ο αυτοματισμός δικτύου. Έτσι το NFV μπορεί να συνεργαστεί με το SDN ώστε να βελτιωθεί η διαχείριση μιας υποδομής NFV και να δημιουργηθεί ένα πιο δυναμικό περιβάλλον δικτύου [19, 20, 46].



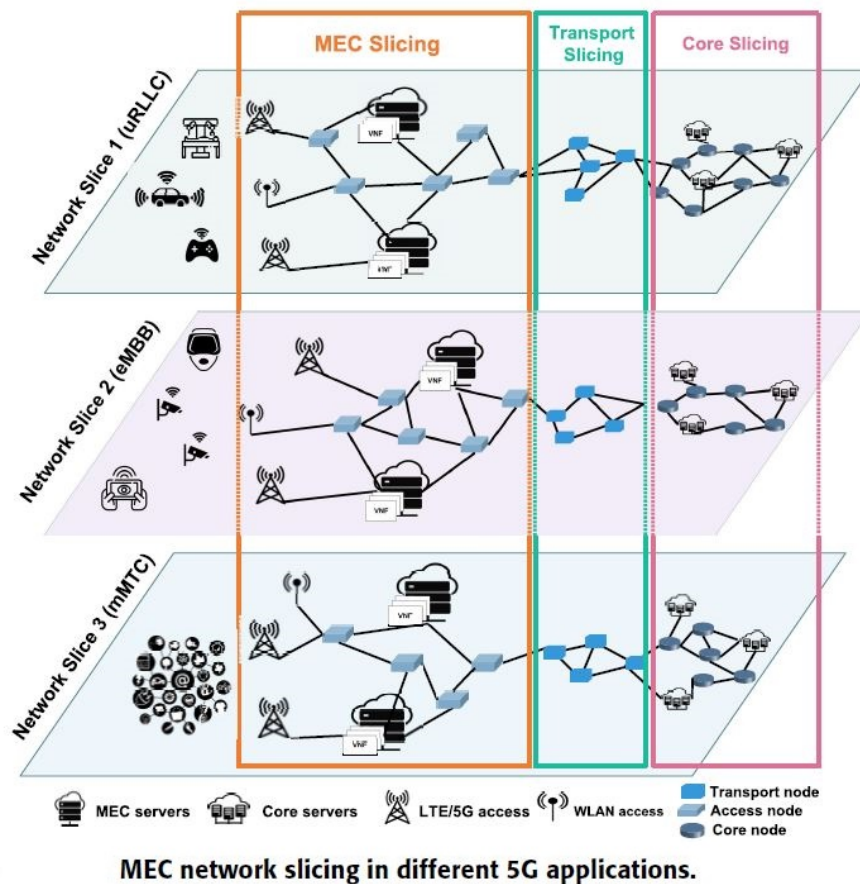
Simplified ETSI MEC reference architecture in an NFV environment.

Σχήμα 1.23: MEC reference architecture in an NFV environment [19].

MEC (Multi-Access Edge Computing)

Το MEC είναι αποτέλεσμα της σύγκλισης μεταξύ της IT (Information Technology) και των δικτύων τηλεπικοινωνιών. Είναι μια αρχιτεκτονική δικτύου που ορίζεται από το ETSI (European Telecommunications Standards Institute) που προσφέρει δυνατότητες cloud computing και υπηρεσίες IT κοντά στην άκρη του δικτύου σε προγραμματιστές λογισμικού και παρόχους περιεχομένου. Περιλαμβάνει τη μεταφορά πόρων από την κεντρική υποδομή cloud στην υποδομή αιχμής πιο κοντά στους τελικούς χρήστες και τις

συνδεδεμένες συσκευές. Το MEC παρέχει εξαιρετικά χαμηλή καθυστέρηση, υψηλό εύρος ζώνης και τη δυνατότητα για τις εφαρμογές να χρησιμοποιούν τις δυνατότητες του cloud όπως απαιτείται [19, 20, 30].



Σχήμα 1.24: MEC reference architecture in an NFV environment [19].

Η αρχιτεκτονική MEC εστιάζει στο να φέρει τους υπολογιστικούς πόρους πιο κοντά στους χρήστες για να βελτιώσει την απόδοση, να μειώσει τον λανθάνοντα χρόνο και να υποστηρίξει ένα ευρύ φάσμα εφαρμογών που απαιτούν επεξεργασία σε πραγματικό χρόνο και υψηλό εύρος ζώνης. Τα βασικά στοιχεία της περιλαμβάνουν, Edge Nodes που λειτουργούν ως μίνι κέντρα δεδομένων που αναλύουν, επεξεργάζονται και αποθηκεύουν δεδομένα, μειώνοντας την καθυστέρηση και παρέχοντας εφαρμογές υψηλού εύρους ζώνης με απόδοση σε πραγματικό χρόνο, Διαχείριση πόρων και ενορχήστρωση συμπεριλαμβανομένης της επεξεργασίας, της αποθήκευσης, της μνήμης, του εύρους ζώνης, της ενέργειας και της καθυστέρησης, Ενσωμάτωση με την αρχιτεκτονική 5G όπου το MEC μπορεί να αναπτυχθεί σε διαφορετικά επίπεδα της αρχιτεκτονικής 5G, όπως στο RAN, τα κέντρα δεδομένων άκρων και οι τοποθεσίες του βασικού δικτύου επιτρέποντας την ευέλικτη ανάπτυξη υπηρεσιών Edge Computing εντός του δικτύου 5G και τέλος πρωτοβουλίες τυποποίησης όπως το ETSI-MEC, η Edge Computing Consortium και άλλες, στοχεύουν στον καθορισμό προδιαγραφών για ένα ανοιχτό και τυποποιημένο περιβάλλον που διευκολύνει την ενοποίηση πλατφορμών και υπηρεσιών MEC από πολλούς προμηθευτές [19].

Το MEC προσφέρει πλεονεκτήματα που ενισχύουν τις δυνατότητες του δικτύου και βελτιώνουν την παροχή υπηρεσιών, κάποια από αυτά είναι Low Latency, High Bandwidth, Αποδοτικότητα πόρων, βελτιωμένο Quality of Experience (QoE), εξοικονόμηση κόστους, υποστήριξη στην επίτευξη των στόχων

του 5G και τέλος ευελιξία και επεκτασιμότητα [19].

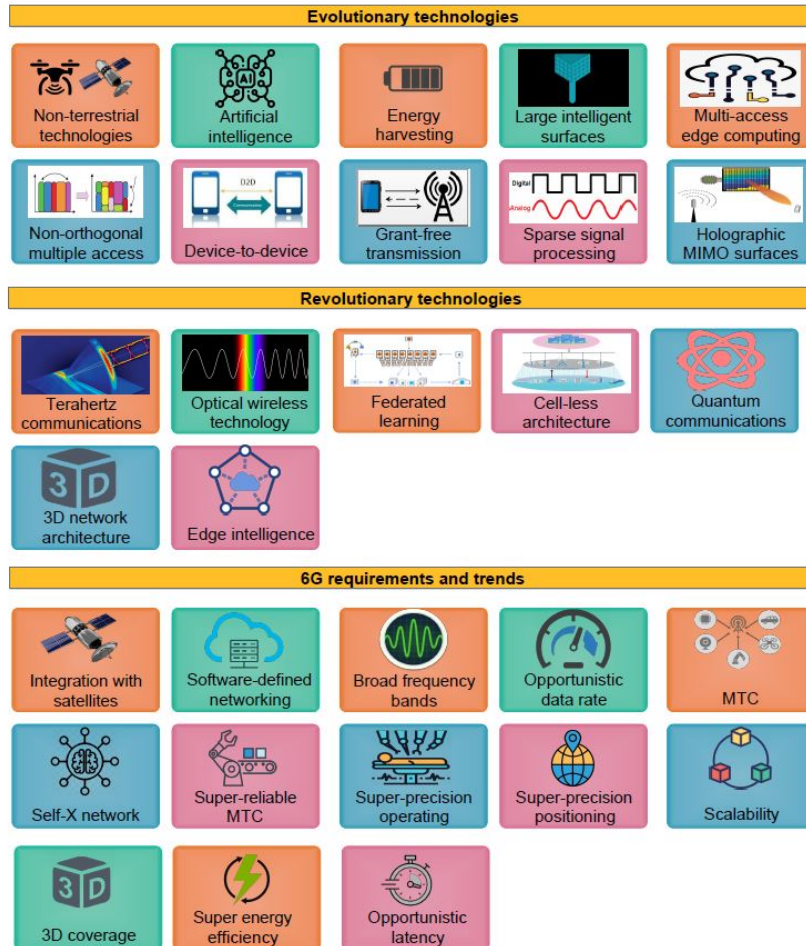
Το MEC διαδραματίζει κρίσιμο ρόλο στην ενσωμάτωση του Edge Computing στις τρέχουσες αρχιτεκτονικές δικτύων κινητής τηλεφωνίας και στη μετάβαση στα δίκτυα 5G και συσχετίζεται με τεχνολογίες όπως το SDN, το NFV, το SFC (Service Function Chaining) και το Network Slicing για να ενεργοποιηθούν οι λειτουργίες του. Η συσχέτιση των MEC, SDN και NFV είναι ζωτικής σημασίας για τη βελτιστοποίηση της απόδοσης του δικτύου, τη βελτίωση της παροχής υπηρεσιών και την υποστήριξη προηγμένων εφαρμογών. Το MEC αξιοποιεί το SDN για αποτελεσματική διαχείριση δικτύου και το NFV για ευέλικτη παροχή πόρων, ενώ το SDN και το NFV επωφελούνται από τις δυνατότητες υπολογιστικής αιχμής της MEC για μείωση της καθυστέρησης και βελτίωση της εμπειρίας χρήστη. Συνολικά, η ενσωμάτωση των MEC, SDN και NFV στις αρχιτεκτονικές δικτύων δημιουργεί ένα ισχυρό οικοσύστημα που επιτρέπει στους χειριστές να παρέχουν καινοτόμες υπηρεσίες, να βελτιώνουν την αποτελεσματικότητα του δικτύου και να ανταποκρίνονται στις εξελισσόμενες απαιτήσεις των σύγχρονων οικοσυστημάτων τηλεπικοινωνιών και πληροφορικής [19].

Συμπερασματικά αυτό που αντιλαμβανόμαστε είναι ότι η πληθώρα των τεχνικών, των δικτύων και των τεχνολογιών που διαδραματίζουν σημαντικό ρόλο στα δίκτυα της 5ης γενιάς, η ετερογένεια τους και η συσχέτιση μεταξύ τους, έχουν πολλές δυσκολίες αλλά και προκλήσεις που πρέπει να αντιμετωπίσουν για την εύρυθμη λειτουργία των δικτύων. Η έρευνα και η εξέλιξη αυτών των συστατικών που περιλαμβάνονται στην υλοποίηση ενός δικτύου 5G είναι επιτακτική καθώς ήδη συζητάμε για την ανάπτυξη και υλοποίηση τους στα πλαίσια της επόμενης γενιάς δικτύων τα 6G.

1.5 Δίκτυα έκτης γενιάς - 6G

Δεδομένης της εκθετικής αύξησης των εφαρμογών πολυμέσων υψηλής ευκρίνειας, της ταυτόχρονης επικοινωνίας μεταξύ διαφόρων συνδεδεμένων συσκευών με νέες δυνατότητες και της τεράστιας ζήτησης δεδομένων από τους χρήστες, η κυκλοφορία δεδομένων κινητής τηλεφωνίας πρέπει να ενισχυθεί ώστε να μπορέσει να ικανοποιήσει τις ολοένα αυξηνόμενες απαιτήσεις των χρηστών για γρήγορα, αξιόπιστα και ασφαλή ασύρματα δίκτυα. Καθώς ακόμα αναπτύσσονται και βελτιώνονται οι τεχνολογίες των δικτύων 5G έχει ήδη ξεκινήσει η έρευνα και ανάπτυξη για τα δίκτυα 6G. Αυτό το αναμενόμενο άλμα της υψηλής ζήτησης δεδομένων κινητής τηλεφωνίας και άλλων υπηρεσιών επικοινωνίας τύπου μηχανής καθιστά απαραίτητο να μελετήσουμε τις απαιτήσεις για μελλοντικά δίκτυα 6G. Η φασματική απόδοση, η ενεργειακή απόδοση, το υψηλό εύρος ζώνης και η χαμηλή κατανάλωση ενέργειας θεωρούνται ως κρίσιμη πρόκληση και θα πρέπει να ληφθούν υπόψη πριν από το σχεδιασμό δικτύων 6G. Για να τεκμηριωθούν οι μελλοντικές ανάγκες δεδομένων και να υποστηριχθεί ένα ποικίλο σύνολο συσκευών, τα New Radio (NR) 6G προβλέπεται να ανταποκριθούν σε αυτές τις απαιτήσεις με πόρους φάσματος με κατάλληλη διαχείριση. Σύμφωνα με τους ερευνητές, το NR είναι ένας συνδυασμός διαφόρων τεχνολογιών ραδιοπρόσβασης που βοηθούν στην παροχή δεδομένων με χαμηλή καθυστέρηση, υψηλή απόδοση φάσματος και χαμηλή κατανάλωση ενέργειας. Ταξινομείται ευρέως ως μικρές κυψέλες χαμηλής ισχύος που χρησιμοποιούν το φάσμα κυμάτων χιλιοστών (mmWave), λαμβάνοντας υπόψη την αποτελεσματική χρήση ενός μη αδειοδοτημένου φάσματος Wi-Fi σε ζώνη 5 GHz και την εφαρμογή Massive MIMO τεχνολογία αντί για το συμβατικό σύστημα MIMO. Η χρήση πρόσβασης υψηλού φάσματος, π.χ. ζώνη συχνοτήτων mmWave, Cognitive Radio (CR), M-MIMO, Συνεργατικά δίκτυα (CN) με χρήση κόμβων αναμετάδοσης (RNs), Συντονισμένη λειτουργία πολλαπλών σημείων (Coordinated Multipoint Operation, CoMP),

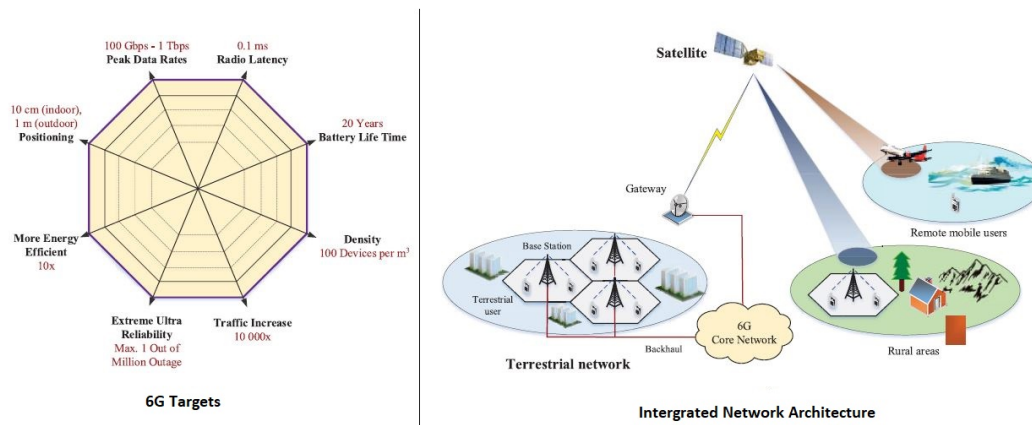
Ασύρματα δίκτυα αισθητήρων (Wireless Sensor Networks, WSN), Mobile Ad Hoc Δίκτυα (Mobile Ad Hoc Networks, MANETs), D2D, IoT, Ethernet Passive Optical Networks (EPON), τα HetNet και το cellular cloud computing, συμπεριλαμβανομένων των big data, είναι μερικές από τις τρέχουσες προσεγγίσεις που μπορούν να τροποποιηθούν για την παροχή των απαιτήσεων του 6G [10, 17, 20].



Σχήμα 1.25: enabling technologies, requirements and trends in 6G [20].

Κάποια από τα πλεονεκτήματα των δικτύων 6G θα είναι: Data rate: Το δίκτυο 6G αναμένεται να παρέχει ρυθμό δεδομένων έως και 10 Tbps, που είναι σχεδόν εκατό φορές καλύτερα από τα δίκτυα 5G. Latency: Το δίκτυο 6G θα παρείχει καθυστέρηση έως και 0,1 ms σε σύγκριση με το παρεχόμενο λανθάνον χρόνο 1 ms από δίκτυα 5G. Efficient signaling: Τα δίκτυα 6G παρέχουν αποτελεσματική σηματοδότηση για μαζική συνδεσιμότητα IoT και Επικοινωνία M2M. User experience: Το 6G ενισχύει την εκτεταμένη πραγματικότητα (enhances extended reality), την επαυξημένη πραγματικότητα, την εικονική πραγματικότητα και την τεχνητή νοημοσύνη. Φασματική απόδοση: Το 6G θα παρείχε δέκα φορές μεγαλύτερη φασματική απόδοση και απόδοση δικτύου σε σύγκριση σε δίκτυα 5G. Ενεργειακή απόδοση: Τα δίκτυα 6G παρέχουν 100 φορές πιο αποδοτική χρήση ενέργειας δικτύου σε σύγκριση σε δίκτυα 5G. Ubiquitous Connection: Το 6G θα παρέχει τεράστια δεδομένα μετάδοσης, τα οποία μπορούν να υποστηρίξουν περισσότερα από 1 εκατομμύριο συνδέσεις, που είναι σχεδόν εκατό φορές περισσότερες από τα δίκτυα 5G [10, 17, 20].

Με τις αυξανόμενες παγκόσμιες απαιτήσεις επικοινωνίας και την ανάπτυξη του IoT, η επέκταση της

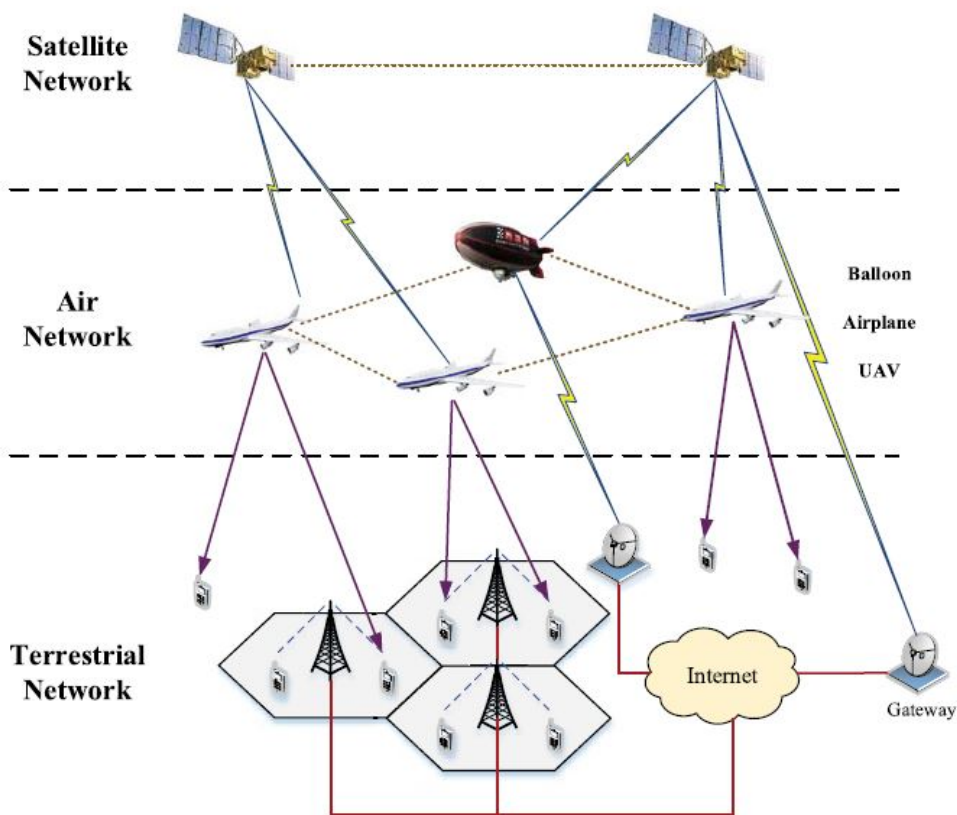


Σχήμα 1.26: targets-intergrates network architecture [21].

συνδεσιμότητας σε αγροτικές και απομακρυσμένες περιοχές έχει καταστεί επιτακτική για τα μελλοντικά δίκτυα. Τα δίκτυα έκτης γενιάς (6G) αναμένεται να παρέχει ετερογενείς υπηρεσίες και απρόσκοπτη κάλυψη δικτύου για όλους και για όλα. Συνδυάζοντας τα πλεονεκτήματα τόσο των δορυφορικών όσο και των επίγειων δικτύων, η ολοκληρωμένη αρχιτεκτονική επίγειων δορυφορικών δικτύων υπόσχεται να παρέχει παγκόσμια ευρυζωνική πρόσβαση για όλους τους τύπους χρηστών, κάτι που έχει τραβήξει μεγάλη προσοχή τόσο από την ακαδημαϊκή κοινότητα όσο και από τη βιομηχανία. Σε αυτό το άρθρο, παρουσιάζουμε μια ολοκληρωμένη έρευνα της τελευταίας τεχνολογίας των ολοκληρωμένων δορυφορικών-επίγειων δικτύων προς 6G. Αρχικά, παρουσιάζεται μια εκτελεστική ταξινόμηση και περίληψη της αρχιτεκτονικής ολοκλήρωσης από το σχεδιασμό του δικτύου έως τη βελτιστοποίηση απόδοσης. Στη συνέχεια, συζητούνται τυπικές εφαρμογές του ολοκληρωμένου δορυφορικού - επίγειου δικτύου με βάση την αρχιτεκτονική. Λαμβάνοντας υπόψη τα μοναδικά χαρακτηριστικά των δύο δικτύων, επισημαίνονται οι κύριες προκλήσεις κατά την εκτέλεση της ενοποίησης, όπως η μεγάλη καθυστέρηση διάδοσης, οι πολύπλοκες συνθήκες σύνδεσης και η υψηλή δυναμική της τοπολογίας του δικτύου. Τέλος, μερικές υποσχόμενες μελλοντικές τεχνικές διερευνώνται από την οπτική γωνία της ολοκληρωμένης αρχιτεκτονικής. Μια λεπτομερής έρευνα των πιθανών αρχιτεκτονικών ολοκλήρωσης έχει μεγάλη σημασία για να καταστεί δυνατή η πιο ευέλικτη σχεδίαση και κατασκευή δικτύου σε μελλοντικά δίκτυα 6G. Αυτό το άρθρο θα παρέχει μια πολύτιμη κατευθυντήρια γραμμή για τη μελλοντική έρευνα και ανάπτυξη ολοκληρωμένων δορυφορικών-επίγειων δικτύων [21].

Τα δίκτυα δορυφορικών επικοινωνιών παρέχουν μια άμεση λύση στο ζήτημα της κάλυψης με την ευρεία ικανότητα κάλυψης. Τις τελευταίες δεκαετίες, λόγω του υψηλού κόστους κατασκευής και της περιορισμένης ικανότητας επικοινωνίας σε σύγκριση με τα παραδοσιακά επίγεια δίκτυα, τα δίκτυα δορυφορικών επικοινωνιών μεγάλης κλίμακας δεν έχουν αναπτυχθεί με επιτυχία. Ωστόσο, με την αυξανόμενη ζήτηση επικοινωνίας και επίσης τις προόδους στις τεχνολογίες επικοινωνίας, η επίτευξη παγκόσμιας κάλυψης με δορυφορικούς αστερισμούς έχει γίνει πλέον hotspot τόσο για τον ακαδημαϊκό κόσμο όσο και για τη βιομηχανία. Έχουν δημιουργηθεί διάφορα έργα δορυφορικών αστερισμών για την κατασκευή δικτύων δορυφορικών επικοινωνιών για παγκόσμια κάλυψη, όπως το Starlink, το OneWeb και το Telesat. Από την άλλη πλευρά, τα συμβατικά επίγεια δίκτυα δεν μπορούν να αντικατασταθούν για την παροχή υπηρεσιών χαμηλού κόστους και υψηλής ταχύτητας όταν καλύπτονται πυκνοκατοικημένες περιοχές. Έτσι, συνδυάζοντας τα πλεονεκτήματα τόσο των δορυφορικών όσο και των επίγειων δικτύων, η ολοκληρωμένη αρχιτεκτονική δορυφορικού-εδάφους δικτύου υπόσχεται να παρέχει παγκόσμια ευρυζωνική πρόσβαση,

επιτρέποντας την πανταχού παρούσα υπηρεσία δικτύου. Στο έργο συνεργασίας 3ης γενιάς (3GPP) Rel-15, Rel-16 και Rel-17, το 3GPP μελέτησε την ενοποίηση επίγειων και μη επίγειων δικτύων. Με την ευρεία δυνατότητα κάλυψης, τα μη επίγεια δίκτυα αναμένεται να παρέχουν υπηρεσίες σε περιοχές που δεν μπορούν να καλυφθούν από επίγεια δίκτυα, να διασφαλίζουν τη συνέχεια της υπηρεσίας και επίσης να παρέχουν αποτελεσματική μετάδοση multicast/broadcast. Στο White Paper του ασύρματου δικτύου 6G, έχει προταθεί ότι το μελλοντικό ασύρματο δίκτυο πρέπει να μπορεί να διασυνδέεται απρόσκοπτα με επίγεια και δορυφορικά δίκτυα. Το ολοκληρωμένο δορυφορικό-επίγειο δίκτυο είναι η νέα αναπτυξιακή τάση για το δίκτυο επικοινωνίας επόμενης γενιάς. Στα σημερινά συστήματα επικοινωνιών, τα δορυφορικά δίκτυα και τα επίγεια δίκτυα αναπτύσσονται και λειτουργούν χωριστά. Αν και έχει δοθεί μεγάλη προσοχή στο ολοκληρωμένο δορυφορικό-επίγειο δίκτυο, ο τρόπος ενοποίησης των δύο δικτύων παραμένει ένα ανοιχτό ζήτημα. Μέχρι στιγμής, πολλές εργασίες έχουν επικεντρωθεί στην ολοκληρωμένη αρχιτεκτονική των δύο δικτύων από την απλή ενοποίηση έως τη βαθιά συνεργασία. Για παράδειγμα, μπορούν να ενσωματωθούν επίγεια ρελέ για να βοηθήσουν στην προώθηση δορυφορικών σημάτων όταν οι άμεσες συνδέσεις των δορυφόρων δεν είναι διαθέσιμες λόγω του φαινομένου κάλυψης. Σε περιοχές χωρίς σύνδεση οπτικών ινών, οι δορυφόροι θεωρείται ότι παρέχουν μετάδοση backhaul για επίγεια BS ή άλλα σημεία πρόσβασης. Επίσης, για τη βελτίωση της αποδοτικότητας του φάσματος, μπορεί να ενεργοποιηθεί η δυναμική αξιοποίηση των πόρων του φάσματος στα δύο δίκτυα χρησιμοποιώντας την τεχνική του Cognitive Ratio (CR) [21].



Σχήμα 1.27: targets-intergrates network architecture [21].

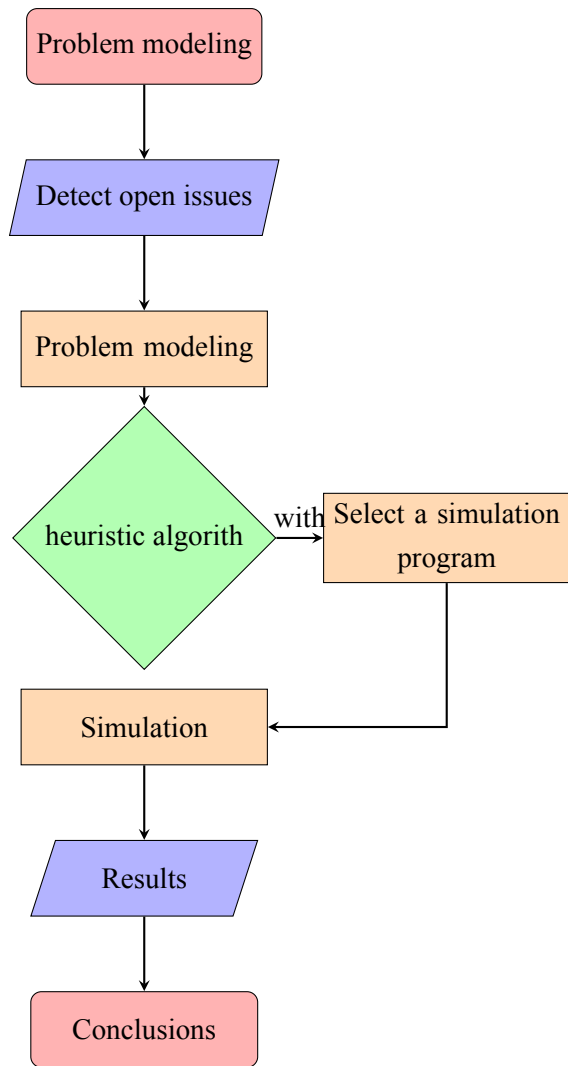
1.6 Θέμα και στόχοι παρούσας πτυχιακής εργασίας

Το θέμα της παρούσας πτυχιακής είναι ο σχεδιασμός και η σύγκριση των υπάρχοντων τεχνικών σύνδεσης χρήστη (User Association) που υπάρχουν, συζητούνται και υλοποιούνται στα δίκτυα της 5ης γενιάς και η εφαρμογή τους στα δίκτυα 6ης γενιάς (6G). Λόγω του ότι τα δίκτυα 6G θα αποτελούνται από ακόμα πιο πολλά διαφορετικά σημεία πρόσβασης και δυνατοτήτων (εύρος ζώνης, συχνότητα, κατανάλωση ενέργειας) με μεγάλη ετερογένεια και με την εισαγωγή εναέριων και δορυφορικών τύπων δικτύων πέρα του επίγειου, η επιλογή του σημείου πρόσβασης που θα εξυπηρετήσει τον χρήστη γίνεται ολοένα και πιο πολύπλοκη και απαιτεί ξεχωριστή μελέτη και σχεδιασμό. Στόχος της πτυχιακής είναι η μελέτη επίδοσης των κυριότερων τεχνικών σύνδεσης χρήστη (User Association) που έχουν προταθεί μέχρι σήμερα με εφαρμογή στα δίκτυα 6ης γενιάς (6G) ως προς διαφορετικά κριτήρια ποιότητας (η φασματική αποδοτικότητα, ο ρυθμός δεδομένων που επιτυγχάνεται, η ενεργειακή αποδοτικότητα κ.ά.). Θα μελετήσουμε δυο βασικά σενάρια υλοποίησης με παρεμβολή, στο ένα λαμβάνεται υπόψη ο χρήστης, ο σταθμός βάσης και το backhaul και στο δεύτερο που λαμβάνει υπόψη μόνο τον χρήστη και τον σταθμό βάσης. Για το σκοπό αυτό θα αναπτυχθεί κώδικας σε πρόγραμμα προσομοίωσης Matlab και θα προταθεί τεχνική, η οποία θα συγκριθεί με τις ήδη υπάρχουσες τεχνικές και θα εξαχθούν παράλληλα χρήσιμα συμπεράσματα.

1.7 Μεθοδολογία

Σε αυτό το υποκεφάλαιο θα περιγράψουμε την μεθοδολογία που θα ακολουθηθεί για την υλοποίηση της παρούσας πτυχιακής εργασίας η οποία περιλαμβάνει τα εξής βήματα:

- 1) Μελέτη βιβλιογραφίας : πρώτα θα μελετηθεί η δοθείσα βιβλιογραφία
- 2) Ανίχνευση ανοιχτών προβλημάτων : ανάλυση βιβλιογραφίας, ανίχνευση προβλήματος προς επίλυση
- 3) Μοντελοποίηση προβλήματος : με βάση το πρόβλημα προτείνουμε μια μέθοδο προς επίλυση, σύγκριση με τις υπάρχουσες τεχνικές σύνδεσης χρήστη και επιλογή εργαλείου που θα χρησιμοποιηθεί για την σύγκριση.
- 4) Πρόταση ενός ευρετικού (heuristic) αλγορίθμου προς επίλυση.
- 5) Επιλογή προγράμματος προσομοίωσης : έρευνα και επιλογή λογισμικού για την υλοποίηση του προτεινόμενου αλγορίθμου.
- 6) Προσομοίωση και αποτελέσματα : παρουσίαση προτεινόμενου αλγορίθμου και αναλυτικών αποτελεσμάτων.
- 7) Εξαγωγή συμπερασμάτων : εκτενής ανάλυση και σχολιασμός των αποτελεσμάτων και προτάσεις για μελλοντική εξέλιξη της εργασίας.



1.8 Επίλογος

Στο παρόν κεφάλαιο έγινε μια εισαγωγή στα κυβελωτά δίκτυα, αναλύθηκαν οι γενιές των ασυρμάτων δικτύων και έγινε μια εκτενής αναφορά στις βασικές τεχνολογίες των δικτύων 5G που χρησιμοποιούνται και θα διαδραματίσουν σημαντικό ρόλο και στα δίκτυα 6G. Παρουσιάστηκε το θέμα και οι στόχοι της παρούσας πτυχιακής εργασίας και τέλος αναλύθηκε η μεθοδολογία η οποία θα ακολουθηθεί για την εκπόνηση της.

Κεφάλαιο 2ο: Σύγχρονη Βιβλιογραφική Έρευνα & Προσεγγίσεις

2.1 Εισαγωγή

Στο παρόν κεφάλαιο θα εστιάσουμε στην βιβλιογραφική έρευνα που έχει πραγματοποιηθεί στις τεχνικές σύνδεσης χρηστών (User Association : UA) που χρησιμοποιούνται στα δίκτυα 5G. Τα συνεκτικά στοιχεία που απαρτίζουν τα δίκτυα 5G είναι τεχνολογίες και τύποι δικτύων που αλληλοεπιδρούν μεταξύ τους προσφέροντας στον χρήστη όσο το δυνατό καλύτερη εμπειρία περιήγησης. Τα πεδία εφαρμογή, οι μετρικές αξιολόγησης, η μοντελοποίηση της τοπολογίας που χρησιμοποιείται, ο τύπος του ελέγχου που χρησιμοποιείται στο δίκτυο καθώς και η χρήση βοηθητικών προγραμμάτων για την μοντελοποίηση του προβλήματος της συσχέτισης χρηστών

2.2 Related Work

Στο παρόν υποκεφάλαιο θα εστιάσουμε στην βιβλιογραφική έρευνα που έχει γίνει για το πρόβλημα των τεχνικών σύνδεσης χρήστη στα κύρια πεδία εφαρμογής τους. Μια τεχνική UA στα ασύρματα δίκτυα αναφέρεται στην στρατηγική ή τον αλγόριθμο με τον οποίο χρήστες κινητών συσκευών συνδέονται στα BS ή AP εντός του δικτύου. Ο στόχος των τεχνικών UA είναι να βελτιστοποιηθεί η απόδοση του δικτύου λαμβάνοντας υπόψη την ισχύ του σήματος, το φόρτο του δικτύου, την κινητικότητα των χρηστών και το QoS.

UA techniques	paper number
max-RSS	[29, 47, 48]
SNR	[9, 29, 49–52]
SINR	[9, 22, 29, 47–49, 49, 51–59]
MMAP	[60]
MRSP	[60]
RSRP	[32, 48, 49, 52–54, 59, 61, 62]
RSRQ	[32, 52, 53, 61]
RSRI	[52, 59]
MMKP	[61]
RE	[49, 54, 61]
MPL	[49, 54, 61]
CRE	[32, 48, 53, 58]
ABS	[32, 48, 53]

Πίνακας 2.1: summary of user association techniques in research projects

Στο άρθρο [29] παρουσιάζεται την έρευνα αλγορίθμων UA σε δίκτυα 5G. Επεξεργάζεται αλγόριθμους συσχέτισης χρηστών για τα δίκτυα Hetnets, massive MIMO, mmWave, EH networks αλλά και σε άλλες τεχνολογίες που έχουν αναπτυχθεί όπως το SON, το RAN, το D2D, το FD κ.ά., και συζητά τις προόδους και τις προκλήσεις σε αυτούς τους τομείς, αναφέρεται στις μετρικές που χρησιμοποιούνται για να αξιολογηθεί η απόδοση των τεχνικών UA η οποίες είναι το outage/coverage probability, η αποδοτικότητα του φάσματος, η ενεργειακή απόδοση στην μετάβαση μας στις πράσινες πηγές ενέργειας, το QoS που αφορά την καθυστέρηση μετάδοσης, το throughput του χρήστη, το SINR κ.ά. και στη δικαιοσύνη όσον

αφορά την κατανομή των ραδιοπόρων των ασύρματων δικτύων, γίνεται αναφορά στο μοντέλο τοπολογίας που χρησιμοποιείται στο δίκτυο που είναι είτε το κλασικό μοντέλο πλέγματος ή το τυχαίο χωρικό μοντέλο, στον τύπο του ελέγχου που χρησιμοποιείται στο δίκτυο αν είναι κεντρικός, κατανεμημένος ή ένα υβριδικό μοντέλο ελέγχου και τέλος στη χρήση βοηθητικών προγραμμάτων για την μοντελοποίηση του προβλήματος των τεχνικών UA χρησιμοποιώντας διαδεδομένα εργαλεία όπως η θεωρία παιγνίων, η συνδυαστική βελτιστοποίηση και η στοχαστική γεωμετρία. Κάποιες από τις τεχνικές UA που αναφέρονται στο άρθρο είναι η max-RSS UA (maximum Received Signal Strength), το SINR UA, το biased UA, BS sleeping και ότι στα δίκτυα EH το UA είναι περίπλοκο λόγω των μοναδικών χαρακτηριστικών των ΑΠΕ(Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας) κι οι αλγόριθμοι πρέπει να σχεδιάζονται για να βελτιστοποιούν τη χρήση της συλλεγόμενης ενέργειας, να διασφαλίζουν δικαιοσύνη μεταξύ των χρηστών και να διατηρούν το QoS κι όλα αυτά ενώ αντιμετωπίζουν τη μεταβλητότητα της διαθεσιμότητας ενέργειας.

Στο άρθρο [60] εξετάζονται δύο βασικές τεχνικές UA για χρήστες sleeping cell σε δίκτυα ασύρματων επικοινωνιών. Η μια τεχνική είναι το MMAP (Maximum Mean channel Access Probability όπου ένας αυθαίρετος χρήστης σε ένα sleeping cell επιλέγει έναν BS που προσφέρει τη μέγιστη πιθανότητα απόκτησης του καναλιού, με βάση τη μέγιστη μέση πιθανότητα πρόσβασης στο κανάλι. Οι πιθανότητες πρόσβασης καναλιού είναι στατιστικές μετρήσεις που ορίζονται για οποιονδήποτε αυθαίρετο χρήστη σε ένα sleeping cell και στην MRSP (Maximum Received Signal Power) όπου περιλαμβάνει την επιλογή ενός BS με τη μέγιστη στιγμιαία λαμβανόμενη ισχύ σήματος για οποιονδήποτε αυθαίρετο χρήστη σε ένα sleeping cell από ένα ενεργό BS. Τα αριθμητικά αποτελέσματα δείχνουν βελτιώσεις στη φασματική απόδοση για χρήστες sleeping cell με UA που βασίζεται σε MMAP σε σενάρια μη ομοιόμορφου φόρτου κυκλοφορίας, αντίθετα η UA που βασίζεται σε MRSP τείνει να αποδίδει καλά σε σενάρια ομοιόμορφου φόρτου κυκλοφορίας.

Στο άρθρο [61] προτείνεται ένας ευρετικός αλγόριθμος για τη βελτιστοποίηση του UA σε κυψελωτά δίκτυα και τη βελτίωση της ενεργειακής απόδοσης. Ο αλγόριθμος αξιοποιεί context-aware πληροφορίες, όπως μετρήσεις χρηστών, γνώση αρχιτεκτονικής δικτύου και διαθέσιμους πόρους φάσματος, για να εκχωρήσει τους χρήστες σε σταθμούς βάσης με ενεργειακά αποδοτικό τρόπο. Ελαχιστοποιώντας την κατανάλωση ενέργειας και λαμβάνοντας υπόψη τη χρήση ενέργειας πρόσβασης και backhaul, ο αλγόριθμος στοχεύει στην επίτευξη υψηλής ενεργειακής απόδοσης δικτύου διατηρώντας παράλληλα τη φασματική απόδοση. Η σύγκριση του προτεινόμενου αλγορίθμου έναντι αλγορίθμων RSRP (Reference Signal Received Power), RE (Range Expansion) και MPL (Minimum Path Loss), δείχνει καλύτερη απόδοση όσον αφορά την ενεργειακή απόδοση, την εξισορρόπηση φορτίου και τη φασματική απόδοση.

Στο άρθρο [32] τονίζεται η ανάγκη για δίκτυα πολλαπλών επιπέδων, για τη βελτίωση των ρυθμών δεδομένων, της κάλυψης και της απόδοσης, μειώνοντας παράλληλα την καθυστέρηση και την κατανάλωση ενέργειας. Αναφέρει τις προκλήσεις στη διαχείριση παρεμβολών και προτείνει τροποποιήσεις στους υπάρχοντες σχεδιασμούς για τα συστήματα 5G. Τα βασικά σημεία περιλαμβάνουν την υιοθέτηση μιας αρχιτεκτονικής πολλαπλών επιπέδων, τη σημασία της διαχείρισης παρεμβολών και την αναγκαιότητα νέων προσεγγίσεων λόγω της πολυπλοκότητας των δικτύων 5G. Επίσης παρέχει μια ποιοτική σύγκριση των υφιστάμενων σχημάτων CAPC, καταδεικνύοντας τους περιορισμούς τους στο πλαίσιο των δικτύων 5G, την ασυμμετρία μεταξύ των πολιτικών συσχέτισης χρηστών άνω και κάτω ζεύξης και την ανάγκη για κοινά πλαίσια βελτιστοποίησης για την παροχή σχεδόν βέλτιστων λύσεων και για τα δύο, μια ποσοτική σύγκριση διαφορετικών σχημάτων συσχέτισης κυψελών, που λαμβάνει υπόψη τη μετάδοση κάτω ζεύξης

σε ένα δίκτυο πολλαπλών επιπέδων και τον αντίκτυπο των διαφορετικών εντάσεων χρήστη και σεναρίων φόρτου κυκλοφορίας στη μέση φασματική απόδοση. Τέλος αναφέρει διάφορες στρατηγικές για τη διαχείριση των πολύπλοκων συνθηκών παρεμβολών και φόρτου κυκλοφορίας σε κυψελωτά δίκτυα πολλαπλών επιπέδων, συμπεριλαμβανομένων των RSRP, CRE (Cell Range Expansion), ABS (Almost Blank Subframe), TPC (Target Power Control), TPC-GR (TPC with Gradual Removal), OPC (Opportunistic Power Control) και DTTPC (Dynamic-SIR Tracking Power Control) δίνοντας για κάθε ένα από αυτές τους στόχους, τη δυνατότητα εφαρμογής και την επίγνωση των διαφορετικών συνθηκών δικτύου και μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε διαφορετικούς συνδυασμούς για τη βελτιστοποίηση της απόδοσης του δικτύου.

Στο άρθρο [47] εξετάζεται η FFR (Fractional Frequency Reuse) ως μέθοδο διαχείρισης παρεμβολών σε δίκτυα κινητής τηλεφωνίας, ειδικά στα HetNets και πώς το FFR μπορεί να μειώσει τις παρεμβολές μεταξύ διαφορετικών τύπων σταθμών βάσης και να βελτιώσει την απόδοση του δικτύου, συγκρίνονται διαφορετικά σχήματα FFR, όπως το strict FFR, το soft FFR και το FFR-3, επισημαίνοντας τον αντίκτυπό τους στη διεκπεραίωση του δικτύου και στη διαχείριση παρεμβολών. Προτείνει ένα νέο σχήμα FFR που ονομάζεται OSFFR (Optimal Static FFR), το οποίο φαίνεται να έχει καλύτερη απόδοση από τα υπάρχοντα σχήματα και αναφέρει τις στρατηγικές κατανομής καναλιών και τη σημασία του μετριασμού των παρεμβολών στα HetNets για καλύτερη εμπειρία χρήστη και αποτελεσματικότητα δικτύου. Τα αποτελέσματα δείχνουν ότι το προτεινόμενο σχήμα OSFFR ξεπερνά τα άλλα σχήματα FFR όσον αφορά τη φασματική απόδοση, το άθροισμα του ρυθμού δικτύου και την πιθανότητα διακοπής λειτουργίας, επιδεικνύοντας τις δυνατότητές του για βελτίωση της διαχείρισης παρεμβολών και της συνολικής απόδοσης δικτύου στα LTE-Advanced HetNets.

Στο άρθρο [53] εξετάζεται η εξέλιξη προς τα κυψελωτά ασύρματα δίκτυα πολλαπλών επιπέδων 5G από την άποψη της διαχείρισης παρεμβολών, τις προκλήσεις στα υπάρχοντα δίκτυα και προτείνει λύσεις όπως biased BSs και αλγόριθμους ελέγχου ισχύος, τονίζεται η ανάγκη για προσαρμοστική πόλωση, UA με επίγνωση των πόρων και προτεραιότητα στον έλεγχο ισχύος για τη βελτιστοποίηση της χρησιμότητας του συστήματος, το όραμα για τα δίκτυα 5G, συμπεριλαμβανομένων των ρυθμών δεδομένων, της καθυστέρησης και των βελτιώσεων της αρχιτεκτονικής δικτύου και τέλος εξετάζει τα τρέχοντα συστήματα UA και ελέγχου ισχύος, επισημαίνοντας περιορισμούς και προτείνοντας τροποποιήσεις για μελλοντικά συστήματα 5G. Αναφέρονται οι τεχνολογίες MTC, D2D, mmWave, multi-RAT, η πυκνώση των BS, ο ρόλος του data rate και του latency στα δίκτυα 5G, προτεραιότητα πρόσβασης στο φάσμα, το EH για ενεργειακά αποδοτικά δίκτυα, οι τεχνικές UA ABS, RSRP, RSRQ, CRE, τα σχέδια ελέγχου ισχύος Distributed Power Control Schemes και HPC (Hybrid Power Control) που είναι ένας συνδυασμός TPC και OPC, σχεδιασμένος να ελαχιστοποιεί την ισχύ μετάδοσης ανερχόμενης ζεύξης, επιτυγχάνοντας παράλληλα τον επιθυμητό SIR (Signal-to-Interference Ratio).

Στο άρθρο [9] συζητιέται ότι με την ανάπτυξη πρόσθετων LPNs (Low Power Nodes) εντός της περιοχής κάλυψης των παραδοσιακών HPNs (High Power Nodes) και φέρνοντάς τους πιο κοντά στους χρήστες, τα HetNets μπορούν να ενισχύσουν σημαντικά τη συνολική φασματική απόδοση (Spectral Efficiency: SE) και την ενεργειακή απόδοση (Energy Efficiency : EE) μέσω μιας πλήρους επαναχρησιμοποίησης χωρικών πόρων. Λαμβάνοντας υπόψη ότι η σοβαρή intra-tier παρεμβολή μεταξύ των πυκνών LPN και η inter-tier παρεμβολή μεταξύ LPN και HPN αμφισβητούν την επιτυχημένη κυκλοφορία και τις εμπορικές λειτουργίες των υποκείμενων HetNets, δίνεται μεγάλη έμφαση σε προηγμένες τεχνικές που λαμβάνουν

τον έλεγχο παρεμβολών, την κατανομή ραδιοπόρων και self-organization για να ενισχυθεί τόσο η SE όσο και η EE. Οι τεχνικές έλεγχου παρεμβολών που παρουσιάζονται σε αυτό το άρθρο ταξινομούνται ως ο συντονισμός της χωρικής παρεμβολής στον πομπό και η ακύρωση παρεμβολών στον δέκτη. Για την κατανομή πόρων ραδιοφώνου, η πολυδιάστατη βελτιστοποίηση, η βελτιστοποίηση πολλαπλών επιπέδων και η συνεργατική διαχείριση ραδιοπόρων συνοψίζονται αναλυτικά. Ερευνώνται οι τεχνικές self-configuration, self-optimization και self-healing για τα self-organized underlay HetNets. Επιπλέον, περιγράφει τα πιθανά ανοιχτά ζητήματα για τα υποκείμενα HetNets για τη βελτίωση της SE και της EE όταν συνδυάζονται με τη συλλογή ενέργειας και το cloud computing. Ορίζει τα HetNets ως δίκτυα που ενσωματώνουν διάφορους τύπους κυψελών και τεχνολογιών για να βελτιώσουν οικονομικά την κάλυψη και τη χωρητικότητα του συστήματος. Χαρακτηρίζονται από την ανάπτυξη HPN, όπως macroBS (MBS), για εκτεταμένη κάλυψη και υποστήριξη υψηλής κινητικότητας, παράλληλα με LPNs συμπεριλαμβανομένων femto AP (FAP), SC AP (SCAP), picoBS (PBS) και Relay Stations (RSs) για την ενίσχυση της χωρητικότητας και της κάλυψης σε πυκνοκατοικημένες περιοχές. Προτείνει τις ταξινομήσεις inter-HetNet που επικεντρώνεται στην ενοποίηση μεταξύ διαφορετικών τύπων δικτύων, όπως κυψελωτά δίκτυα και WBAN (Wireless Broadband Access Networks) για να εξασφαλίσουν απρόσκοπτη κάλυψη και QoS για UEs. Επίσης συζητά τις προκλήσεις των μηχανισμών διασύνδεσης για ετερογενή RAN (Radio Access Networks) και την ανάγκη για αποτελεσματική συνεδρία handoff και στρατηγικές επιλογής δικτύου για τη βελτίωση της συνολικής απόδοσης και intra-HetNet η οποία ασχολείται με τη συνύπαρξη και τον συντονισμό εντός ενός μεμονωμένου τύπου δικτύου, όπως το δίκτυο LTE, αλλά περιλαμβάνουν διαφορετικά επίπεδα κυψελών (π.χ. macrocells, SC). Εστιάζει στη διαχείριση της πρόσβασης ραδιοφώνου και στη διασφάλιση αποτελεσματικής επικοινωνίας μεταξύ κόμβων υψηλής ισχύος και κόμβων χαμηλής ισχύος χωρίς κεντρικό RNC (Radio Network Controller) που οδηγεί σε μια επίπεδη αρχιτεκτονική δικτύου που βασίζεται σε IP.

Στο άρθρο [48] περιγράφονται οι αναμενόμενες βελτιώσεις στα δίκτυα 5G, όπως βελτιωμένη αρχιτεκτονική με διάφορα επίπεδα δικτύου, πυκνότερους σταθμούς βάσης και χρήση μικρών κυψελών για ευρύτερη κάλυψη. Αναφέρει επίσης τη χρήση ζωνών υψηλότερων συχνοτήτων για την επικοινωνία και την ανάγκη νέων τεχνολογιών για αύξηση της αποτελεσματικότητας, προσδιορίζει βασικούς τομείς στους οποίους απαιτούνται σημαντικές τεχνολογικές εξελίξεις, συμπεριλαμβανομένης της καλύτερης διαχείρισης πολλαπλών σημείων πρόσβασης και παρεμβολών, μικροσκοπικών τεχνολογιών κεραιών και πιο εξελιγμένων συστημάτων ζώνης βάσης και ραδιοσυχνοτήτων, τεχνολογίες που θα επιτρέψουν τα δίκτυα 5G, όπως τα Cognitive Radio Networks που μπορούν να προσαρμοστούν στο περιβάλλον τους και την αρχιτεκτονική C-RAN η οποία επιτρέπει πιο κεντρική επεξεργασία και διαχείριση των πόρων του δικτύου, τις δυσκολίες στη διαχείριση παρεμβολών σε πολύπλοκα δίκτυα πολλαπλών επιπέδων, κάτι που είναι ζωτικής σημασίας για τη διατήρηση υψηλής ποιότητας υπηρεσιών, τη σημασία της αποτελεσματικής κατανομής πόρων όπως το φάσμα και η ισχύς σε ένα δίκτυο 5G για τη διασφάλιση της βέλτιστης απόδοσης και χρήση της ενέργειας, αναφέρει τις τεχνολογίες massive MIMO, mmWave, D2D, C-RAN. Αναφέρει τις τεχνικές UA, SIR, CRE, RSRP, RSRQ, ABS, Joint Minimum Effective-Interference-Based και OPC (Opportunistic Power Control) το οποίο δεν είναι ικανό να μεγιστοποιήσει την απόδοση στην άνω ζεύξη, αλλά μπορεί να είναι χρήσιμο όταν συνδυάζεται με UA που βασίζεται σε RSRP ή RSRQ.

Στο άρθρο [54] εξετάζεται η πρόκληση της μεγιστοποίησης της συνολικής ενεργειακής απόδοσης του δικτύου σε cognitive SCs HetNets διασφαλίζοντας παράλληλα το QoS για τα UEs. Το πρόβλημα διατυπώνεται ως πρόβλημα βελτιστοποίησης που είναι NP-hard, που σημαίνει ότι δεν μπορεί να λυθεί σε

πολυωνυμικό χρόνο. Ο στόχος είναι να βελτιστοποιηθεί το άθροισμα της ενεργειακής απόδοσης δικτύου άνω ζεύξης (uplink: UL) και κάτω ζεύξης (downlink: DL), η οποία ορίζεται ως ο συνολικός αριθμός των bit που μεταδόθηκαν επιτυχώς από όλους τους UE τόσο σε UL όσο και σε DL διαιρούμενο με τη συνολική κατανάλωση ενέργειας (δίκτυο πρόσβασης και συνδέσεις backhaul (BH)) τόσο στο UL όσο και στο DL. Το πρόβλημα βελτιστοποίησης υπόκειται σε περιορισμούς, όπως κάθε UE να συσχετίζεται με έναν μόνο BS κάθε φορά για UL ή DL, αν και η συσχέτιση UL μπορεί να διαφέρει από τη DL. Επιπλέον, ο συνολικός αριθμός των ζευγών PRB (Physical Resource Block) που χρησιμοποιούνται από ένα BS δεν μπορεί να υπερβαίνει τον μέγιστο αριθμό που του έχει εκχωρηθεί. Ο προτεινόμενος ευρετικός αλγόριθμος, που αναφέρεται ως Joint EE (joint UL-DL energy-efficient), αξιολογείται μέσω προσομοιώσεων και συγκρίνεται με άλλους αλγόριθμους τελευταίας τεχνολογίας (RSRP, RE, MPL). Τα αποτελέσματα δείχνουν ότι το Joint EE υπερέρχει σημαντικά των αλγορίθμων αναφοράς, ιδιαίτερα σε συνθήκες χαμηλού φορτίου. Συγκεκριμένα, επιτυγχάνει έως και 45τις εκατο υψηλότερη συνολική ενεργειακή απόδοση δικτύου UL-DL σε σύγκριση με τον αλγόριθμο RSRP. Αυτή η βελτίωση αποδίδεται στην ικανότητα του αλγορίθμου να λαμβάνει υπόψη τόσο την πρόσβαση όσο και την κατανάλωση ενέργειας BH σε UL και DL, καθώς και στη χρήση πληροφοριών με επίγνωση του πλαισίου για τη δημιουργία ενεργειακά αποδοτικών συσχετίσεων UE. Η απόδοση του αλγορίθμου είναι συνεπής στη διατήρηση της υψηλής φασματικής απόδοσης και της χαμηλής κατανάλωσης ενέργειας UE, που είναι κρίσιμοι παράγοντες για την QoS. Τα αποτελέσματα καταδεικνύουν την αποτελεσματικότητα του Joint EE αλγορίθμου στη βελτιστοποίηση της ενεργειακής απόδοσης στα HetNets χωρίς να διακυβεύεται η εμπειρία του χρήστη.

Στο άρθρο [49] μελετάται το πρόβλημα συσχέτισης χρηστών σε cognitive HetNets. Αξιολογεί τις υπάρχουσες προσεγγίσεις όσον αφορά την ενεργειακή απόδοση και δείχνει τη δυνατότητα εκμετάλλευσης των διαθέσιμων πληροφοριών με context-aware (δηλαδή, μετρήσεις και απαιτήσεις των χρηστών, γνώση της αρχιτεκτονικής του δικτύου και των διαθέσιμων πόρων φάσματος κάθε σταθμού βάσης) για τη συσχέτιση των χρηστών με ενεργειακά αποδοτικό τρόπο, διατηρώντας παράλληλα υψηλή απόδοση φάσματος. Ο προτεινόμενος αλγόριθμος ονομάζεται Context-Aware (CA) συγκρίνεται με τους RSRP, RE και MPL, λαμβάνει υπόψη τόσο το δίκτυο πρόσβασης όσο και την κατανάλωση ενέργειας backhaul, ενώ η απόδοση των αλγορίθμων συσχέτισης αξιολογείται σε δύο διαφορετικά σενάρια μελέτης περίπτωσης. Το πρώτο σενάριο περιλαμβάνει χρήστες που είναι ομοιόμορφα κατανομημένοι σε μια περιοχή τομέα, ενώ το δεύτερο σενάριο εστιάζει στην κίνηση hotspot, όπου οι χρήστες συγκεντρώνονται γύρω από συγκεκριμένα μικρά κελιά. Οι κύριες μετρικές για αξιολόγηση είναι η απόδοση του φάσματος και η ενεργειακή απόδοση. Η απόδοση φάσματος μετρά πόσο αποτελεσματικά το δίκτυο χρησιμοποιεί το φάσμα συχνοτήτων του, ενώ η ενεργειακή απόδοση αξιολογεί την ποσότητα των δεδομένων που μεταδίδονται επιτυχώς ανά μονάδα ενέργειας που καταναλώνεται. Χρησιμοποιούνται δύο διαφορετικά σενάρια αρχιτεκτονικής BH, το πρώτο σενάριο έχει μια συγκεκριμένη διαμόρφωση των SCs και των συνδέσεων τους στο δίκτυο ενώ το δεύτερο σενάριο έχει διαφορετική διαμόρφωση των SC λόγω πιθανών βλαβών ανάπτυξης όπως κτίρια. Ο αλγόριθμος CA φαίνεται να αποδίδει ελαφρώς καλύτερα από τον RSRP όσον αφορά την ενεργειακή απόδοση, ειδικά όταν ο αριθμός των χρηστών είναι υψηλός, μπορεί να προσαρμοστεί σε διαφορετικές διανομές χρηστών και απαιτήσεις επισκεψιμότητας, έχει επίγνωση του backhaul, που σημαίνει ότι μπορεί να χειριστεί αστοχίες σύνδεσης backhaul δρομολογώντας την κυκλοφορία μέσω εναλλακτικών διαδρομών και έχει σχεδιαστεί για να ελαχιστοποιεί την κατανάλωση ενέργειας, διασφαλίζοντας παράλληλα ότι ικανοποιούνται οι απαιτήσεις των χρηστών.

Στο άρθρο [21] γίνεται μια ανάλυση για το δίκτυο έκτης γενιάς (6G) που αναμένεται να παρέχει ετερο-

γενείς υπηρεσίες και απρόσκοπτη κάλυψη δικτύου για όλους και για όλα. Συνδυάζοντας τα πλεονεκτήματα τόσο των δορυφορικών όσο και των επίγειων δικτύων, η ολοκληρωμένη αρχιτεκτονική επίγειων δορυφορικών δικτύων υπόσχεται να παρέχει παγκόσμια ευρυζωνική πρόσβαση για όλους τους τύπους χρηστών, κάτι που έχει τραβήξει μεγάλη προσοχή τόσο από την ακαδημαϊκή κοινότητα όσο και από τη βιομηχανία. Παρουσιάζεται μια περιεκτική έρευνα της τελευταίας τεχνολογίας των ολοκληρωμένων δορυφορικών-επίγειων δικτύων προς 6G, αναφέρεται το υπάρχον δίκτυο και την τάση ανάπτυξης του που περιλαμβάνει τα Επίγεια Δίκτυα, τα Δορυφορικά Δίκτυα, το Υφιστάμενο/Μελλοντικό Δορυφορικό Σύστημα (Starlink, OneWeb, Telesat LEO) και το 6G-Integrated Networks, συζητούνται τυπικές εφαρμογές του ολοκληρωμένου δορυφορικού - επίγειου δικτύου με βάση την αρχιτεκτονική που περιλαμβάνει τα : Hybrid Satellite-Terrestrial Relay Networks, Satellite-Terrestrial Backhaul Networks, Cognitive Satellite-Terrestrial Networks, Cooperative Satellite-Terrestrial Networks και τα Satellite-Air-Terrestrial Networks, αναλύει τις τυπικές περιπτώσεις εφαρμογής για το ολοκληρωμένο επίγειο δορυφορικό δίκτυο που περιλαμβάνουν την Αγροτική Κάλυψη, την Επικοινωνία Θαλάσσιας Περιοχής, την Αερομεταφερόμενη Επικοινωνία (Airborne Communication) και Επικοινωνία Έκτακτης Ανάγκης Multicast/Broadcast. Λαμβάνοντας υπόψη τα μοναδικά χαρακτηριστικά των δύο δικτύων, επισημαίνονται οι κύριες προκλήσεις κατά την εκτέλεση της ενοποίησης, όπως η μεγάλη καθυστέρηση διάδοσης, οι πολύπλοκες συνθήκες σύνδεσης και η υψηλή δυναμική της τοπολογίας του δικτύου και τέλος, μερικές υποσχόμενες μελλοντικές τεχνικές διερευνώνται από την οπτική γωνία της ολοκληρωμένης αρχιτεκτονικής που περιλαμβάνουν τα: Spectrum Sharing, Beamforming, Diversity Technique, Cooperative Secure Transmission, SDN, Artificial Intelligence.

Στο άρθρο [62] προτείνεται έναν αλγόριθμο εξισορρόπησης φορτίου για ένα δίκτυο multi-RAT (Radio Access Technology) που περιλαμβάνει ένα μη επίγειο δίκτυο (Non-Terrestrial Network: NTN) και ένα επίγειο δίκτυο (Terrestrial Network: TN). Τα δίκτυα πέμπτης γενιάς (5G) και beyond-5G θεωρούν ότι τα NTN παρέχουν συνδεσιμότητα και παράδοση δεδομένων σε μεγάλο αριθμό UEs. Ωστόσο, οι προηγούμενοι αλγόριθμοι εξισορρόπησης φορτίου δεν λαμβάνουν υπόψη τη συνύπαρξη NTN και TN και αγνοούν τις διαφορετικές μονάδες κατανομής πόρων σε ένα δίκτυο πολλαπλών RAT. Ως εκ τούτου, ορίζουμε μια RRUR (Radio Resource Utilization Ratio) ως μια κοινή μέτρηση φορτίου για τη μέτρηση του φορτίου κυψέλης κάθε RAT και χρησιμοποιούμε ένα προσαρμοστικό όριο για τον προσδιορισμό των υπερφορτωμένων κυψελών. Ο προτεινόμενος αλγόριθμος αποτελείται από δύο βήματα για να ξεπεραστεί η άνιση κατανομή φορτίου μεταξύ των κυψελών 5G: εξισορρόπηση φορτίου εντός RAT και εξισορρόπηση φορτίου μεταξύ RAT. Με βάση το RRUR μιας κυψέλης, ο αλγόριθμος εκτελεί πρώτα εξισορρόπηση φορτίου εντός RAT με εκφόρτωση των κατάλληλων UE ακμών ενός υπερφορτωμένου κελιού σε υποχρησιμοποιημένα γειτονικά κελιά. Εάν το RRUR της κυψέλης εξακολουθεί να είναι υψηλότερο από ένα προκαθορισμένο όριο, τότε η εξισορρόπηση φορτίου μεταξύ RAT εκτελείται με εκφόρτωση των ανεκτικών σε καθυστέρηση ροών δεδομένων των UE σε μια δορυφορική σύνδεση. Επιπλέον, ο αλγόριθμος εκτιμά τον αντίκτυπο των μετακινούμενων φορτίων στο φορτίο κυψέλης στόχου για να αποφευχθούν περιττές ενέργειες εξισορρόπησης φορτίου. Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης δείχνουν ότι ο προτεινόμενος αλγόριθμος όχι μόνο κατανέμει το φορτίο στις επίγειες κυψέλες πιο ομοιόμορφα, αλλά αυξάνει επίσης τη διεκπεραίωση του δικτύου και τον αριθμό των ικανοποιημένων UEs ποιότητας υπηρεσιών περισσότερο από προηγούμενους αλγόριθμους εξισορρόπησης φορτίου.

Στο άρθρο [63] αναλύει το μέλλον των δικτύων 5G βρίσκεται σε ένα υβριδικό μοντέλο που συνδυάζει επίγεια και μη δίκτυα για να παρέχει πανταχού παρούσα κάλυψη. Αυτό θα επεκτείνει την εμβέλεια

της εξαιρετικά γρήγορης κινητής ευρυζωνικής σύνδεσης σε κοινότητες που δεν εξυπηρετούνται και δεν εξυπηρετούνται. Το έγγραφο βεβαιώνει ότι τα NTN αποτελούν αναπόφευκτο μέρος αυτού του μέλλοντος, προσφέροντας σαφή οικονομικά πλεονεκτήματα για τους παρόχους δικτύου και αξία για τους καταναλωτές. Οι απαραίτητες τάσεις και τεχνολογίες ενεργοποίησης, όπως οι έξυπνες κεραιές, το χαμηλό κόστος εκτόξευσης για LEO και οι πτήσεις μεγάλης διάρκειας για τα HAP (High-Altitude Platforms, in combination with larger scalable antennas – are a more recent development, and such platforms come in various forms, including balloons and aerostats), συγκλίνουν τώρα, θέτοντας τις βάσεις για αυτήν την υβριδική αρχιτεκτονική 5G.

Στο άρθρο [50] εξετάζεται το πρόβλημα συσχέτισης χρήστη σε πυκνά δίκτυα mmWave, διερευνά τις προκλήσεις και τις διαφορές στη συμπεριφορά μεταξύ κυμάτων κάτω των 6 GHz και mmWaves και πώς αυτές οι διαφορές επηρεάζουν τη βέλτιστη ανάπτυξη των BSs, τα μεγέθη και τα σχήματα κυψελών, το UA και το handover. Το έγγραφο εισάγει την έννοια των restless bandits και προτείνει μια πολιτική συσχέτισης χρηστών βάσει ευρετηρίου Whittle για την ελαχιστοποίηση του σταθμισμένου μέσου χρόνου που αφιερώνουν οι χρήστες στο σύστημα. Εξετάζει ένα ασύρματο δίκτυο με K BSs mmWave (mBSs) που εξυπηρετούν μια μικρή περιοχή, όπως μια αίθουσα σεμιναρίων ή μια στάση λεωφορείου, ο χρόνος χωρίζεται σε slots ίσης διάρκειας, το πρόβλημα συσχέτισης χρήστη που διατυπώνεται είναι ένα restless multi-armed bandit, όπου κάθε BS θεωρείται ως ένα arm of the bandit, στόχος είναι να προσδιοριστεί με ποιον BS θα πρέπει να συσχετιστεί ένας χρήστης που φτάνει για να βελτιστοποιήσει την απόδοση του δικτύου. - Το έγγραφο υποθέτει ότι οι αναχωρήσεις από έναν BS mmWave ακολουθούν μια διαδικασία Bernoulli. Η προτεινόμενη πολιτική συσχέτισης βάσει ευρετηρίου Whittle συγκρίνεται με τις πολιτικές συσχέτισης που βασίζονται σε SNR, βάσει Throughput, βασισμένες σε φορτίο (Load Based), μικτές και τυχαίες συσχετίσεις μέσω προσομοιώσεων και καταδεικνύει ότι η πολιτική που βασίζεται σε ευρετήριο Whittle έχει καλύτερη απόδοση από τις άλλες.

Στο άρθρο [55] αναφέρει ότι τα εξαιρετικά πυκνά HetNets (Ultra Dense Heterogeneous Networks, UDHNs) έχουν θεωρηθεί ευρέως ως μια μακροπρόθεσμη και αξιόπιστη λύση για τη βελτίωση της απόδοσης του συστήματος και τη μείωση της αποδοτικότητας του κόστους. Για να διασφαλιστούν αυτά τα κέρδη στα UDHNs, ορισμένα προβλήματα πρέπει να αντιμετωπιστούν σωστά, τα οποία περιλαμβάνουν αύξηση των OPEX/CAPEX, πιο περίπλοκες, σοβαρές και μέσες παρεμβολές και μεγαλύτερη κατανάλωση ενέργειας που προκαλείται από την πυκνότητα του δικτύου. Εισάγεται η λειτουργία ενεργοποίησης/απενεργοποίησης BS και εισάγεται στο σχεδιασμό μηχανισμών συσχέτισης χρηστών στα UDHNs με ένα γενικό μοντέλο καναλιού πολλαπλών κλίσεων. Συγκεκριμένα, εκτελούμε από κοινού τη λειτουργία BS (on/off) και η συσχέτιση χρηστών μεγιστοποιεί το άθροισμα των σταθμισμένων μακροπρόθεσμων χρεώσεων downlink. Τέτοιοι ρυθμοί σχετίζονται στενά με την ισχύ του σήματος των χρηστών και τα επίπεδα φορτίου των σχετικών BS. Ο προτεινόμενος αλγόριθμος UABO (user association and BS operation) περιλαμβάνει έναν επαναληπτικό αλγόριθμο τριών επιπέδων για να βρούμε τη λύση σε ένα μετασχηματισμένο πρόβλημα, όπου το πρώτο επίπεδο προσπαθεί να βρει τους εισαγόμενους πολλαπλασιαστές και παραμέτρους Lagrangian χρησιμοποιώντας μια μέθοδο Newton, το δεύτερο επίπεδο βελτιστοποιεί τη συσχέτιση χρηστών και τους δείκτες on/off εναλλάξ και το τρίτο επίπεδο βελτιστοποιεί αυτούς τους δείκτες ξεχωριστά, αναφέρει τη χρήση του swarm intelligence για την επίλυση του διατυπωμένου προβλήματος και συγκεκριμένα έναν αλγόριθμο IHAS (Improved Hierarchical Adaptive Search) και τον συγκρίνει με τον UABO. Αναφέρει επίσης άλλους αλγόριθμους συσχέτισης χρηστών για σύγκριση στην προσομοίωση, όπως AMAR (Association with Maximizing Achievable Rate), AMSUER (Association with

Maximizing the Sum of Utilities of Effective Rates) και ANSWER (Association with Maximizing the Sum of Weighted Effective Rates). Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης δείχνουν ότι ο σχεδιασμένος αλγόριθμος μπορεί να επιτύχει καλύτερη απόδοση συσχέτισης χρηστών από άλλους υπάρχοντες.

Στο άρθρο [64] αντιμετωπίζεται η ανάγκη για παροχή προσαρμοσμένου QoS σε ασύρματα δίκτυα λόγω διαφορετικών απαιτήσεων εφαρμογών. Η εργασία προτείνει έναν αλγόριθμο για τη βελτιστοποίηση της συσχέτισης των χρηστών και της κατανομής πόρων, λαμβάνοντας υπόψη διαφορετικές ζώνες συχνοτήτων και ετερογενείς απαιτήσεις QoS. Επίσης, εισάγει έναν ευρετικό αλγόριθμο τον IOA (Interactive Optimization Algorithm) για την επαναληπτική επίλυση του προβλήματος. Ο IOA στοχεύει να λύσει το πρόβλημα της κοινής συσχέτισης χρηστών και της κατανομής πόρων επαναληπτικά μέχρι να επιτευχθεί σύγκλιση, έχει σχεδιαστεί για να παρέχει προσαρμοσμένη παροχή QoS σε 6G HetNets. Συγκρίνεται με τρεις άλλους αλγόριθμους συσχέτισης χρηστών τους: Random UA Algorithm ο οποίος συσχετίζει τυχαία τον UE με τον BSs χωρίς να λαμβάνει υπόψη την ποιότητα του σήματος ή άλλες μετρήσεις, τον Max-RSRP(Max-Reference Signal Received Power) που συσχετίζει τους UE με το BS από τον οποίο λαμβάνουν το ισχυρότερο σήμα, όπως μετράται από το RSRP και τέλος με τον Max-Biased RSRP UA Algorithm που είναι παρόμοιος με τον αλγόριθμο max-RSRP, αλλά με μια προκατάληψη που προστίθεται για να ευνοήσει ορισμένα BSs, ενδεχομένως για τη διαχείριση του φορτίου ή της κάλυψης. Τα αποτελέσματα επιβεβαιώνουν ότι ο αλγόριθμος IOA ξεπερνά αρκετούς βασικούς αλγόριθμους όσον αφορά τόσο τη μέση χρησιμότητα όσο και την αναλογία ικανοποίησης UE. Η εργασία επικεντρώνεται στην αντιστάθμιση μεταξύ κατανάλωσης ενέργειας και μετρήσεων απόδοσης, όπως οι ρυθμοί δεδομένων χρήστη και το φόρτο δικτύου, αντί να συγκρίνεται άμεσα με τις προαναφερθείσες μετρήσεις ή τεχνικές ποιότητας σήματος κι ο μηχανισμός συσχέτισης χρηστών που σχεδιάστηκε στοχεύει να εξισορροπήσει τα φορτία του δικτύου και να μεγιστοποιήσει το άθροισμα των σταθμισμένων μακροπρόθεσμων ρυθμών, που εγγενώς θα λαμβάνει υπόψη την ποιότητα του σήματος σε κάποιο βαθμό, καθώς η καλύτερη ποιότητα σήματος γενικά οδηγεί σε υψηλότερους ρυθμούς δεδομένων.

Στο άρθρο [56] μελετάται ένα πρόβλημα κατανομής πόρων όπου ένα σύνολο χρηστών σε μια συγκεκριμένη περιοχή εξυπηρετείται από δομή δικτύου C-RAN που αποτελείται από ένα σύνολο BBUs (BaseBand Units) συνδεδεμένες με ένα σύνολο RRH (Radio Remote Heads) εξοπλισμένα με μεγάλο αριθμό κεραιών μέσω ζεύξεων fronthaul περιορισμένης χωρητικότητας. Η συσχέτιση χρηστών με κάθε σύνδεση RRH, BBU και fronthaul είναι απαραίτητη για την επίτευξη υψηλών ποσοστών για χρήστες κινητής τηλεφωνίας υπό περιορισμούς δικτύου. Εισάγουμε δύο τύπους μεταβλητών βελτιστοποίησης για να διαμορφώσουμε αυτό το πρόβλημα κατανομής πόρων, έναν C-RAN UAF (UA Factor) συμπεριλαμβανομένων των RRH, BBU και fronthaul για κάθε χρήστη και υποθέτει ένα σενάριο υψηλού SINR χρησιμοποιώντας μια επαναληπτική προσέγγιση για την επίλυση του υποπροβλήματος και ένα διάλυμα κατανομής ισχύος (Power Allocation Algorithm) στο οποίο υποθέτει επίσης ένα σενάριο υψηλού SINR μεταφράζοντας το πρόβλημα σε πρόβλημα γεωμετρικού προγραμματισμού (GP) που μπορεί να λυθεί επαναληπτικά. Το διατυπωμένο πρόβλημα βελτιστοποίησης είναι non-convex με υψηλή υπολογιστική πολυπλοκότητα. Προτείνεται μια αποτελεσματική επαναληπτική προσέγγιση δύο επιπέδων. Το υψηλότερο επίπεδο αποτελείται από δύο βήματα όπου, σε κάθε βήμα, η μία από αυτές τις δύο μεταβλητές βελτιστοποίησης είναι σταθερή για να προκύψει η άλλη. Στο κατώτερο επίπεδο, εφαρμόζοντας διαφορετικούς μετασχηματισμούς και τεχνικές κυρτοποίησης, το πρόβλημα βελτιστοποίησης σε κάθε βήμα αναλύεται σε μια ακολουθία προβλημάτων GP που πρέπει να λυθούν από το SCA(Successive Convex Approximation). Οι προτεινόμενοι αλγόριθμοι έχουν σχεδιαστεί για να μειώνουν την υπολογιστική πολυπλοκότητα βελτιώνοντας παράλλη-

λα τη συνολική απόδοση του συστήματος, ειδικά για μη ομοιόμορφα κατανομημένων χρήστες cell-edge, με αποτελεσματική διαχείριση των παρεμβολών και λαμβάνοντας υπόψη περιορισμούς χωρητικότητας fronthaul και υπερέχουν της παραδοσιακής προσέγγισης max-SINR παρέχοντας σημαντικές βελτιώσεις στην κάλυψη δικτύου στο cell-edge (βελτίωση έως και 70 τοις εκατό) και στη συνολική απόδοση δικτύου.

Στο άρθρο [57] συζητά αλγόριθμους συσχέτισης χρηστών για μελλοντικά ασύρματα δίκτυα, εστιάζοντας συγκεκριμένα σε ασύρματα δίκτυα πολλαπλών ζωνών (multi-band wireless networks), αντιμετωπίζει τις προκλήσεις της εξισορρόπησης του φορτίου χρήστη και της ποιότητας σήματος σε διαφορετικές ζώνες συχνοτήτων, όπως RF, mmWave και THz και προτείνει έναν αλγόριθμο που λαμβάνει υπόψη παράγοντες όπως η ποιότητα του σήματος, η πιθανότητα blockage και τις προτεραιότητες χρήστη για την ομοιόμορφη κατανομή των χρηστών μεταξύ των BSs. Συζητά επίσης τη χρήση ζωνών υψηλής συχνότητας όπως mmWave και THz για δίκτυα 6G, τονίζοντας τις δυνατότητές τους για υψηλούς ρυθμούς δεδομένων και χαμηλή καθυστέρηση και τονίζει την ανάγκη για δίκαιη κατανομή φορτίου και αποτελεσματική χρήση πόρων σε ασύρματα δίκτυα πολλαπλών ζωνών. Ο προτεινόμενος UA αλγόριθμος είναι ο Multi-band user association algorithm και συγκρίνεται με τους Max-SINR, CRE (Cell Range Expansion) και με μεθόδους Optimization-Based User Association που στοχεύουν στη βελτιστοποίηση της συσχέτισης των χρηστών λαμβάνοντας υπόψη διάφορους παράγοντες όπως το SINR, το φορτίο και τις προτιμήσεις των χρηστών και υπερέχει της προσέγγισης max-SINR επιτυγχάνοντας πιο ισορροπημένη κατανομή φορτίου και bell-shaped κατανομή SINR, που υποδηλώνει μια πιο ομοιόμορφη εμπειρία χρήστη. Διατηρεί επίσης χαμηλότερες τυπικές αποκλίσεις στις συσχετίσεις χρηστών μεταξύ των BSs, γεγονός που είναι ενδεικτικό μιας πιο δίκαιης κατανομής των πόρων του δικτύου. Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης αποκαλύπτουν την αποτελεσματικότητα της προτεινόμενης προσέγγισης για την αύξηση της συνολικής απόδοσης του δικτύου, ειδικά για χρήστες cell-edge. Ξεπερνά την παραδοσιακή προσέγγιση συσχέτισης χρηστών, στην οποία κάθε χρήστης εκχωρείται πρώτα στο RRH με τη μεγαλύτερη μέση τιμή ισχύος σήματος και, στη συνέχεια, με βάση αυτή τη σταθερή συσχέτιση χρηστών, βελτιστοποιείται η συσχέτιση ζεύξης μπροστινής απόστασης και η κατανομή ισχύος.

Στο άρθρο [65] συζητείται ότι τα σύγχρονα ασύρματα συστήματα κινητής επικοινωνίας χρησιμοποιούν ηλεκτρομαγνητικά κύματα για τη μετάδοση πληροφοριών στον αέρα, επιτρέποντας έτσι την απρόσκοπτη συνδεσιμότητα για ένα ευρύ φάσμα συσκευών, όμως μία από τις βασικές προκλήσεις που αντιμετωπίζουν στις διαδρομές της ασύρματης επικοινωνίας είναι η απώλεια της ισχύος των διαδιδόμενων σημάτων. Η απώλεια διαδρομής (PathLoss) αναφέρεται στη μείωση της ισχύος του σήματος καθώς διαδίδεται μέσω του ασύρματου καναλιού. Τα μοντέλα απώλειας διαδρομής είναι μαθηματικές αναπαραστάσεις που καταγράφουν την εξασθένηση της ισχύος του σήματος λόγω διαφόρων παραγόντων όπως η απόσταση, η συχνότητα, τα εμπόδια και οι περιβαλλοντικές συνθήκες. Η κατανόηση και η μοντελοποίηση της απώλειας διαδρομής είναι ζωτικής σημασίας για το σχεδιασμό και τη βελτιστοποίηση των συστημάτων ασύρματης επικοινωνίας, καθώς επηρεάζει άμεσα την περιοχή κάλυψης, την ποιότητα σύνδεσης και τη συνολική απόδοση του δικτύου. Με την ακριβή μοντελοποίηση της απώλειας διαδρομής, οι μηχανικοί μπορούν επίσης να βελτιστοποιήσουν διάφορες πτυχές ενός συστήματος ασύρματης επικοινωνίας, όπως η τοποθέτηση κεραίας, έλεγχος ισχύος μετάδοσης και μετριασμός παρεμβολών, βελτιώνοντας τελικά τη συνολική απόδοση και αξιοπιστία του δικτύου.

Με την πρόοδο της τεχνολογίας, η ασύρματη επικοινωνία έχει γίνει πιο γρήγορη, πιο αξιόπιστη και διαδεδομένη, επιτρέποντας απρόσκοπτες συνδέσεις μεταξύ συσκευών και ατόμων. Ένα βασικό χαρα-

κτηριστικό των σύγχρονων συστημάτων ασύρματης επικοινωνίας είναι η ικανότητά τους να μεταδίδουν μεγάλες ποσότητες δεδομένων σε υψηλές ταχύτητες. Επιπλέον, η αυξημένη χωρητικότητα των σύγχρονων ασύρματων δικτύων διασφαλίζει ότι πολλές συσκευές μπορούν να συνδεθούν ταυτόχρονα, υποστηρίζοντας τον αυξανόμενο αριθμό συσκευών που χρησιμοποιούν οι άνθρωποι στην καθημερινότητά τους. Με την ενσωμάτωση τεχνολογιών όπως beamforming και MIMO, τα ασύρματα σήματα μπορούν να κατευθύνονται και να εστιάζονται σε συγκεκριμένες συσκευές, ελαχιστοποιώντας τις παρεμβολές και βελτιστοποιώντας την ποιότητα του σήματος. Αυτό διασφαλίζει ότι οι ασύρματες συνδέσεις παραμένουν σταθερές και στιβαρές, ακόμη και σε πολυσύχναστες περιοχές ή περιβάλλοντα με υψηλές παρεμβολές. Επιπλέον, η ανάπτυξη προηγμένων πρωτοκόλλων κρυπτογράφησης και μέτρων ασφαλείας έχει ενισχύσει την ασφάλεια της ασύρματης επικοινωνίας, παρέχοντας στους χρήστες ασφαλείς και ιδιωτικές συνδέσεις. Αυτές οι εξελίξεις έχουν καταστήσει πολλά σύγχρονα ασύρματα συστήματα κινητής επικοινωνίας βασικό συστατικό διαφόρων τομέων, συμπεριλαμβανομένης της υγειονομικής περίθαλψης, των μεταφορών και της ψυχαγωγίας, διασφαλίζοντας την απρόσκοπτη μετάδοση κρίσιμων πληροφοριών και βελτιώνοντας τη συνολική εμπειρία χρήστη. Το Signal propagation, το fading, και το Pathloss είναι θεμελιώδεις έννοιες στα συστήματα ασύρματων επικοινωνιών και η κατανόηση αυτών των φαινομένων είναι εξαιρετικά σημαντική για τον σχεδιασμό αξιόπιστων και αποτελεσματικών ασύρματων δικτύων. Η διάδοση του σήματος αναφέρεται στη συμπεριφορά των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων καθώς ταξιδεύουν μέσω ενός μέσου, όπως ο αέρας ή το νερό. Το Fading είναι ένα φαινόμενο που εμφανίζεται συνήθως σε συστήματα ασύρματης επικοινωνίας και αναφέρεται στη διακύμανση της ισχύος ή της ποιότητας του σήματος. Το Pathloss βοηθά στον προσδιορισμό της περιοχής κάλυψης ενός πομπού και βοηθά στην επιλογή των κατάλληλων επιπέδων ισχύος σήματος και ύψους κεραίας. Το fading χωρίζεται σε δυο τύπους: στο Small-Scale Fading που περιλαμβάνει το Multipath delay Spread και το Doppler Spread και στο Large Scale Fading που περιλαμβάνει το Pathloss και το Shadowing. Και τέλος αναφέρονται τα μοντέλα Pathloss που είναι μαθηματικές εξισώσεις που χρησιμοποιούνται για να περιγράψουν την εξασθένηση ή την εξασθένιση ενός σήματος καθώς διασχίζει ένα μέσο ή μια διαδρομή τα οποία είναι: Frequency Dependent Path Loss Models, Free Space Path Loss (FSPL) Model, Okumura-Hata Model, Cost 231 Hata Model.

Στο [58] συζητούνται οι προκλήσεις της επίτευξης συσχέτισης χρηστών στα HetNets 6G, και προτείνεται η λύση ενός DTMN (Digital Twin Mobile Network) που είναι βασισμένο σε τοπολογία εικονικού δικτύου. Προτείνει έναν αλγόριθμο έχει σχεδιαστεί για να αντιμετωπίζει τις προκλήσεις της συσχέτισης χρηστών με ισορροπημένο φορτίο (load-balanced) χρησιμοποιώντας μια εξελιγμένη χωρική και χρονική κατανόηση που υποστηρίζεται από την εικονική τοπολογία για την επίτευξη μέγιστης τέλει αντιστοιχίας βάρους μεταξύ κατανεμημένων χρηστών και σταθμών βάσης, με αποτέλεσμα τη μεγιστοποίηση της ικανοποίησης του QoS ενώ ελαχιστοποιεί τις ανισορροπίες χωρικού και χρονικού φορτίου. Οι προκλήσεις περιλαμβάνουν την ακανόνιστη χωρική κατανομή των χρηστών και των σταθμών βάσης, την εξαιρετικά δυναμική κίνηση δικτύου, τα μη ισορροπημένα φορτία για τους κατανεμημένους σταθμούς βάσης και τη λιγότερο προβλέψιμη κινητικότητα των χρηστών. Συγκρίνονται οι τεχνικές συσχέτισης Max-DL-SINR, CRE και την προτεινόμενη DTMN.

Στο [59] συζητείται ότι στα HetNets 5G, οι σταθμοί βάσης SC(SBS) αναπτύσσονται στην κάλυψη των macroBS (MBS) για τη βελτίωση της απόδοσης του συστήματος, όμως ορισμένοι macroUE (MUE) έχουν ισχυρές παρεμβολές από γειτονικά SBS και έτσι η απόδοση των MBS μειώνεται, και προτείνουν έναν νέο έξυπνο DPC (dynamic power control) με CRE (cell range expansion) για τη βελτίωση της απόδοσης

κάτω ζεύξης (DL) τόσο των SUEs όσο και των CRE UE (CUE). Στο προτεινόμενο σχήμα DPC, κάθε MUE συλλέγει πρώτα τα RSSI (Received Signal Strength Indicator) από γειτονικά SBS και τις στέλνει στο MBS που εξυπηρετεί. Στη συνέχεια, το MBS βρίσκει MUE με ισχυρή παρεμβολή από γειτονικά SBS με βάση ένα δεδομένο όριο στόχου του CRE και εκφορτώνει ένα κλάσμα MUE από MBS σε SBS. Το RSRP των MUEs μειώνεται σταδιακά καθώς αυξάνεται η απόσταση μεταξύ MBS και MUE, οπότε είναι απαραίτητο να εκφορτώνονται τα MUE με χαμηλό RSRP από MBS σε SBS χρησιμοποιώντας CRE για να επιλύσει το φορτίο (load) και να αυξήσει την απόδοση των υπόλοιπων MUE. Ουσιαστικά τα SBS χωρίζουν τα SUE και τα CUE τους σε δύο ομάδες (εσωτερικές και εξωτερικές ομάδες) για να εκχωρήσουν διαφορετικά υποκανάλια και να εκχωρήσουν δυναμικά την κατάλληλη ισχύ μετάδοσης για να αυξήσουν την απόδοση τόσο των SUE όσο και των CUE. Μέσω των αποτελεσμάτων προσομοίωσης, αποδεικνύεται ότι το προτεινόμενο σχήμα DPC υπερτερεί των άλλων όσον αφορά τη χωρητικότητα και την πιθανότητα διακοπής λειτουργίας των SUE και των CUE.

Το [22] είναι μια ολοκληρωμένη έρευνα της διαχείρισης πόρων (Resource Management RM) σε προηγμένα HetNets για τα μελλοντικά συστήματα επικοινωνίας 6G και καλύπτει διάφορες πτυχές του RM όπως την κατανομή ισχύος, την συσχέτιση χρηστών, την διαχείριση της κινητικότητας, την ελαχιστοποίηση του latency, των περιορισμών υλικού, την διαχείριση παρεμβολών, την ενεργειακή και φασματική απόδοση, το throughput και την ασφάλεια επικοινωνίας κι ότι οι ικανότητες των UEs θα είναι ένας από τους πιο σημαντικούς παράγοντες καθώς στο 6G θα καθοδηγούνται από AI και απαιτούν σημαντική υπολογιστική ισχύ για τη λειτουργία αλγορίθμων AI, οπότε θα πρέπει να σχεδιάζονται χρησιμοποιώντας νέες στρατηγικές και υλικά που υποστηρίζουν τα αναδυόμενα δίκτυα. Αναφέρει ότι στα 6G η συνεχής συνδεσιμότητα είναι το κλειδί για την αυτοματοποίηση και το intelligence του δικτύου κι ότι η UA διαδραματίζει εξέχοντα ρόλο διασφαλίζοντας ότι το φορτίο κατανέμεται ομοιόμορφα μεταξύ SBSs και MBSs. Η πρόκληση συσχέτισης χρήστη και BS θα απαιτήσει πρόσθετη μελέτη και προσοχή στο μέλλον. Η επαλήθευση UA για κάθε BS είναι η λειτουργία του πράκτορα και το όφελος είναι το υπόλοιπο φορτίου δικτύου το οποίο λόγω της αστικής κυκλοφορίας, η διάσταση του χωροχρόνου περιλαμβάνει διάφορα μοτίβα κι αυτά τα μοτίβα που αποκτήθηκαν κατά τη φάση εκπαίδευσης της ενισχυτικής μάθησης (Reinforcement Learning RL) επιτρέπουν την ταυτόχρονη εξισορρόπηση φορτίου των BS, λαμβάνοντας υπόψη τόσο τις δυναμικές αλλαγές στο περιβάλλον όσο και τις χωροχρονικές κανονικότητες. Η ενισχυτική μάθηση δημιουργεί έναν πίνακα UA για κάθε BS με βάση τις ομοιότητες μεταξύ της τρέχουσας κατάστασης και των ιστορικών προτύπων κι έτσι χρήστες εκχωρούνται σε συγκεκριμένες κυψέλες σύμφωνα με τις ιδιαίτερες ανάγκες τους και οι πληροφορίες όπως η ποιότητα του καναλιού, το SINR και η χωρητικότητα backhaul είναι βασικά χαρακτηριστικά ενός UA, το QoE του χρήστη είναι ίσης ή υψηλότερης προτεραιότητας. Και τέλος τονίζει την ανάγκη για αποτελεσματική RM στα HetNets για την επίτευξη απρόσκοπτης συνδεσιμότητας, υψηλής απόδοσης συστήματος, μειωμένης καθυστέρησης και μαζικής συνδεσιμότητας στα 6G.

Στο [51] προτείνεται ένας κατανομημένος αλγόριθμος κατανομής πόρων δύο επιπέδων για την αντιμετώπιση των απαιτήσεων συσχέτισης χρηστών σε HetNets 5G LTE-Based δίκτυα, που στοχεύει στη βελτιστοποίηση της ενεργειακής απόδοσης (την αναλογία του μακροπρόθεσμου ρυθμού συγκεντρωτικών δεδομένων προς τη μακροπρόθεσμη συνολική κατανάλωση ενέργειας), της απόδοσης φάσματος (τον μακροπρόθεσμο μέσο ρυθμό δεδομένων σε όλες τις μεταδόσεις) και του μήκους της ουράς (queue length, στο πλαίσιο της σταθερότητας και της καθυστέρησης του συστήματος, εισάγει μια συνάρτηση Lyapunov για την αναπαράσταση μιας κλιμακωτής μέτρησης της συμφόρησης ουράς, η οποία χρησιμο-

ποιείται για τη διασφάλιση της σταθερότητας της ουράς), ξεπερνώντας τους υπάρχοντες αλγόριθμους (SINR, SNR). Η εργασία περιγράφει έναν λεπτομερή αλγόριθμο βελτιστοποίησης για την επίλυση του προβλήματος στοχαστικής βελτιστοποίησης πολλαπλών στόχων, αντιμετωπίζοντας την κοινή κατανομή πόρων, τη συσχέτιση χρηστών και τις προκλήσεις ελέγχου ισχύος σε 5G LTE-Based δίκτυα.

Στο [52] επικεντρώνεται στην ανάλυση των μετρήσεων του δικτύου LTE και των επιπτώσεών τους στην απόδοση του δικτύου. Εξετάζει τις τέσσερις βασικές μετρήσεις RRM στο σύστημα LTE που είναι οι CQI (Channel Quality Indicator), RSRP, RSSI, RSRQ και SINR παρέχοντας λεπτομερείς πληροφορίες για τους ορισμούς και τις σχέσεις τους. Το έγγραφο εμβαθύνει επίσης στις επιπτώσεις του SNR στην απόδοση, τονίζοντας τη σχέση μεταξύ SNR και Throughput. Επιπλέον, διερευνά την εμφάνιση και τις επιπτώσεις του Handover εντός του δικτύου LTE, ρίχνοντας φως στους παράγοντες που επηρεάζουν τις αποφάσεις μεταβίβασης και τον αντίκτυπό τους στη διατήρηση συνεχών κλήσεων ή περιόδων δεδομένων. Συνολικά, το έγγραφο προσφέρει πολύτιμες γνώσεις σχετικά με την απόδοση και τη διαχείριση των δικτύων LTE, καθιστώντας το μια σημαντική πηγή για την κατανόηση των περιπλοκών των συστημάτων ασύρματης επικοινωνίας.

2.3 Ορισμοί

Φασματική απόδοση (Spectrum efficiency SE)

Η φασματική απόδοση αναφέρεται στην ποσότητα των δεδομένων που μπορούν να μεταδοθούν σε ένα συγκεκριμένο εύρος ζώνης και μετρείται σε bps/Hz. Μπορείτε να το χρησιμοποιήσετε για να συγκρίνετε πόσο αποτελεσματικά δύο διαφορετικά συστήματα χρησιμοποιούν την ίδια συχνότητα [29].

Ενεργειακή απόδοση (Energy efficiency)

Καθοδηγούμενη από περιβαλλοντικές ανησυχίες, οι πράσινες επικοινωνίες έχουν τραβήξει τεράστια προσοχή τόσο από τη βιομηχανία όσο και από τον ακαδημαϊκό κόσμο. Υπάρχουν δύο κύριοι τύποι μετρήσεων ενεργειακής απόδοσης: 1) Η αναλογία μεταξύ του συνολικού ρυθμού δεδομένων όλων των χρηστών και της συνολικής κατανάλωσης ενέργειας (bits/Joule). 2) Η άμεση παρουσίαση της εξοικονόμησης ενέργειας/ενέργειας που επιτυγχάνεται μέσω συγκεκριμένου αλγορίθμου (π.χ. η διαφορά στην κατανάλωση ισχύος/ενέργειας πριν και μετά την υιοθέτηση ενός συγκεκριμένου αλγορίθμου, το ποσοστό εξοικονόμησης ενέργειας κ.λπ.) [29].

Signal to Interference plus Noise Ratio (SINR)

Το SINR μετρείται με βάση το UE σε RB (Block Resource), το UE υπολογίζει το SINR σε κάθε RB, το μετατρέπει σε CQI (Channel quality information, Δείκτης Ποιότητας Καναλιού) και το αναφέρει στο gNodeB όπου χρησιμοποιείται για την επιλογή του καταλληλότερου MCS (Modulation Coding Scheme) για μετάδοση δεδομένων χρήστη, ιδίως RB. Η τιμή SINR καθορίζει το MCS που θα χρησιμοποιηθεί για ένα RB, δηλαδή τον αριθμό των bit ανά σύμβολο διαμόρφωσης που θα σταλεί, δηλαδή την απόδοση που πρέπει να επιτευχθεί για το συγκεκριμένο RB καθώς και τον αριθμό των RB που θα εκχωρηθούν από το gNodeB στον χρήστη. Το SINR μπορεί να οριστεί ως ο λόγος της ισχύος του σήματος προς το άθροισμα της μέσης ισχύος παρεμβολής από τις άλλες κυψέλες και του θορύβου περιβάλλοντος [52].

Reference Signal Received Power (RSRP)

ο RSRP είναι μια μέτρηση που σχετίζεται με την ισχύ σήματος συγκεκριμένης κυψέλης που χρησιμοποιείται ως είσοδος για αποφάσεις εκτομής και παράδοσης κυψέλης. Για μια συγκεκριμένη κυψέλη, το RSRP ορίζεται ως η μέση ισχύς (σε Watts) των στοιχείων πόρων (REs) που φέρουν RS (σήματα αναφοράς) ειδικά για την κυψέλη εντός του εξεταζόμενου εύρους ζώνης. Η μέτρηση RSRP, που συνήθως εκφράζεται σε dBm, χρησιμοποιείται κυρίως για την κατάταξη μεταξύ διαφορετικών υποψήφιων κυψελών σύμφωνα με την ισχύ του σήματος τους. Γενικά, τα σήματα αναφοράς στην πρώτη θύρα κεραιάς χρησιμοποιούνται για τον προσδιορισμό του RSRP, ωστόσο, τα σήματα αναφοράς που αποστέλλονται στη δεύτερη θύρα μπορούν επίσης να χρησιμοποιηθούν επιπλέον των RS στην πρώτη θύρα, εάν η UE μπορεί να ανιχνεύσει ότι μεταδίδονται [52].

Minimum Path loss (MPL)

Path loss είναι η εξασθένηση διαδρομής είναι η μείωση της πυκνότητας ισχύος (εξασθένηση) ενός ηλεκτρομαγνητικού κύματος καθώς διαδίδεται στο διάστημα. Το Path loss μπορεί να οφείλεται σε πολλά αποτελέσματα, όπως απώλεια ελεύθερου χώρου, διάθλαση, περίθλαση, ανάκλαση, απώλεια σύζευξης ανοίγματος-μέσου και απορρόφηση. Το Path loss επηρεάζεται επίσης από τα περιγράμματα του εδάφους, το περιβάλλον (αστικό ή αγροτικό, βλάστηση και φύλλωμα), το μέσο διάδοσης (ξηρός ή υγρός αέρας), η απόσταση μεταξύ του πομπού και του δέκτη και το ύψος και η θέση των κεραιών. Το MPL λαμβάνει υπόψη την πιο κοντινή διαδρομή για να συνδεθεί ώστε να ελαχιστοποιήσει την απώλεια της ισχύος του λαμβανόμενου σήματος. Στο MPL ο αλγόριθμος θα συνδέσει το UE με το πλησιέστερο BS. Σε σενάρια διανομής επισκεψιμότητας hotspot, το MPL επιτυγχάνει τη μέγιστη εκφόρτωση κίνησης σε SC, καθώς οι περισσότεροι UE θα συσχετίζονται με SC που βρίσκονται κοντά τους. Επιπλέον, επιτυγχάνει πολύ χαμηλότερη απόδοση φάσματος από τη μέγιστη, καθώς το SINR δεν λαμβάνεται υπόψη στην απόφαση συσχέτισης χρήστη. Παρόλο που το MPL ελαχιστοποιεί την κατανάλωση ενέργειας UE στην ανερχόμενη ζεύξη, αποτυγχάνει να εγγυηθεί υψηλή ενεργειακή απόδοση δικτύου λόγω της υψηλής κατανάλωσης ενέργειας BH [49].

RANGE EXPANSION (RE)

Η ισχύς που λαμβάνει το σήμα αναφοράς παρουσιάζει σχετικά κακή συνολική απόδοση απόδοσης, καθώς οι περισσότεροι UE συνδέονται στο gNB, ενώ πολλά SC έχουν λίγες ενεργές UE. Για το σκοπό αυτό, προτάθηκε η επέκταση εύρους (RE), η οποία προσθέτει μια μεροληψία (σε dB) στο RSRP στην περίπτωση κατά την οποία το σήμα μεταδίδεται από ένα SC, ωθώντας έτσι ενεργά τους UE στα SC. Παρά το δυνητικά σημαντικό χτύπημα SINR για αυτήν την EE, αυτό έχει τη δυνατότητα για μια κατάσταση win-win, επειδή η UE αποκτά πρόσβαση σε πολύ μεγαλύτερο μέρος των πόρων, ενώ η eNB διεκδικεί εκ νέου αυτούς που θα της είχαν διατεθεί. Η επέκταση εύρους παρουσιάζει χαμηλότερη απόδοση φάσματος από το RSRP, ειδικά σε περιπτώσεις που χρησιμοποιείται επιθετική μεροληψία, καθώς ένα UE συνδέεται με ένα BS που δεν παρέχει το υψηλότερο SINR. Τέλος, ισοδύναμο με το RSRP, η ενεργειακή του απόδοση δεν είναι εγγυημένη [49].

2.4 Επίλογος

Στο παρόν κεφάλαιο παρουσιάσαμε μια εκτενή βιβλιογραφική αναφορά που αφορά το πρόβλημα της συσχέτισης χρηστών που εξετάζουμε στην παρούσα πτυχιακή εργασία, σε διαφορετικά σενάρια που περιλαμβάνουν τα δίκτυα HetNet, massive MIMO, C-RAN, τις πράσινες επικοινωνίες, τις συχνότητες RF, mmWave, THz, τις παραμέτρους που επηρεάζουν το σήμα, το φάσμα και γενικά όλες τις τεχνολογίες, τεχνικές και παραμέτρους που αναπτύσσονται στα δίκτυα 5G αλλά και την συζήτηση και έρευνα που έχει ξεκινήσει για την υλοποίηση αυτών των τεχνικών συσχέτισης στα δίκτυα 6G.

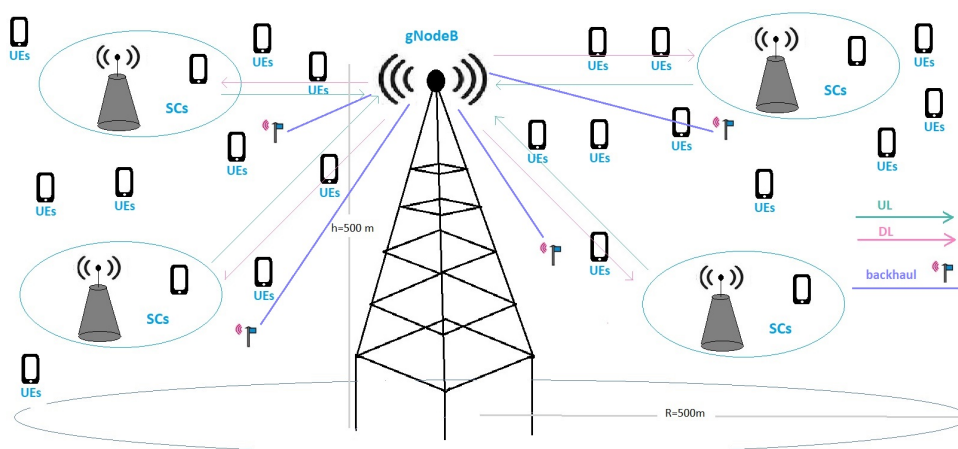
Κεφάλαιο 3ο: Μοντέλο Συστήματος και Πρόβλημα προς Επίλυση

3.1 Εισαγωγή

Στο παρόν κεφάλαιο θα συζητήσουμε και θα αναλύσουμε το πρόβλημα το οποίο εντοπίστηκε από την βιβλιογραφική έρευνα όσον αφορά τις τεχνικές συσχέτισης χρηστών που χρησιμοποιούνται στα δίκτυα 5G και πως μπορούν αυτές να εφαρμοστούν και να βελτιωθούν για τα δίκτυα 6G και στην συνέχεια θα προτείνουμε έναν ευρετικό (heuristic) αλγόριθμο ο οποίος θα συγκριθεί με τις υπάρχουσες τεχνικές που υλοποιούνται ακόμα και σήμερα.

3.2 Μοντέλο Συστήματος (System Model)

Έχουμε δύο σενάρια που θα μελετήσουμε στην παρούσα πτυχιακή. Το πρώτο περιλαμβάνει μόνο την σύνδεση (link) του χρήστη με τον σταθμό βάσης (gNB) που ονομάζεται Access Network (AN) και στην δεύτερη περίπτωση περιλαμβάνει και την σύνδεση backhaul. Και στις δυο περιπτώσεις έχουμε έναν αριθμό χρηστών N , χρήστες με συγκεκριμένες απαιτήσεις που θα τους συμβολίσουμε με GBR (Guarded Bits Rate), συνταταγμένες X, Y για κάθε χρήστη, δυο clusters που περιλαμβάνουν τέσσερα SC το κάθε ένα, ένα pathloss model (επιλέχθηκε και θα χρησιμοποιήσουμε το pathloss-Okumura) για κάθε χρήστη για να υπολογίσουμε τις παραμέτρους για να δούμε που θα συνδεθεί ο χρήστης, θα υπολογίσουμε τον λόγο του σήματος ως προς τον θόρυβο SNR (Signal-to-Noise Ratio), έπειτα λαμβάνοντας υπόψιν και την παρεμβολή στο δίκτυο θα υπολογίσουμε και τον λόγο του σήματος ως προς τον θόρυβο συν την παρεμβολή SINR (Signal-to-Interference-plus-Noise Ratio) που παρέχει ένα μέτρο της ποιότητας του λαμβανόμενου σήματος και της ικανότητας της συσκευής να αποκωδικοποιεί σωστά τα δεδομένα, θα υπολογίσουμε επίσης το RSRP (Reference Signal Received Power) που παρέχει ένδειξη της ποιότητας ραδιοζεύξης μεταξύ της συσκευής και της κυνέλης εξυπηρέτησης, θα χρησιμοποιήσουμε δυο τεχνικές σύνδεσης χρήστη που είναι State-of-the-Art το Minimum-Pathloss(MPL) και Range-Expansion(RE) για τις συγκρίσεις μας.



Σχήμα 3.1: System Model.

3.3 Πρόβλημα προς Επίλυση

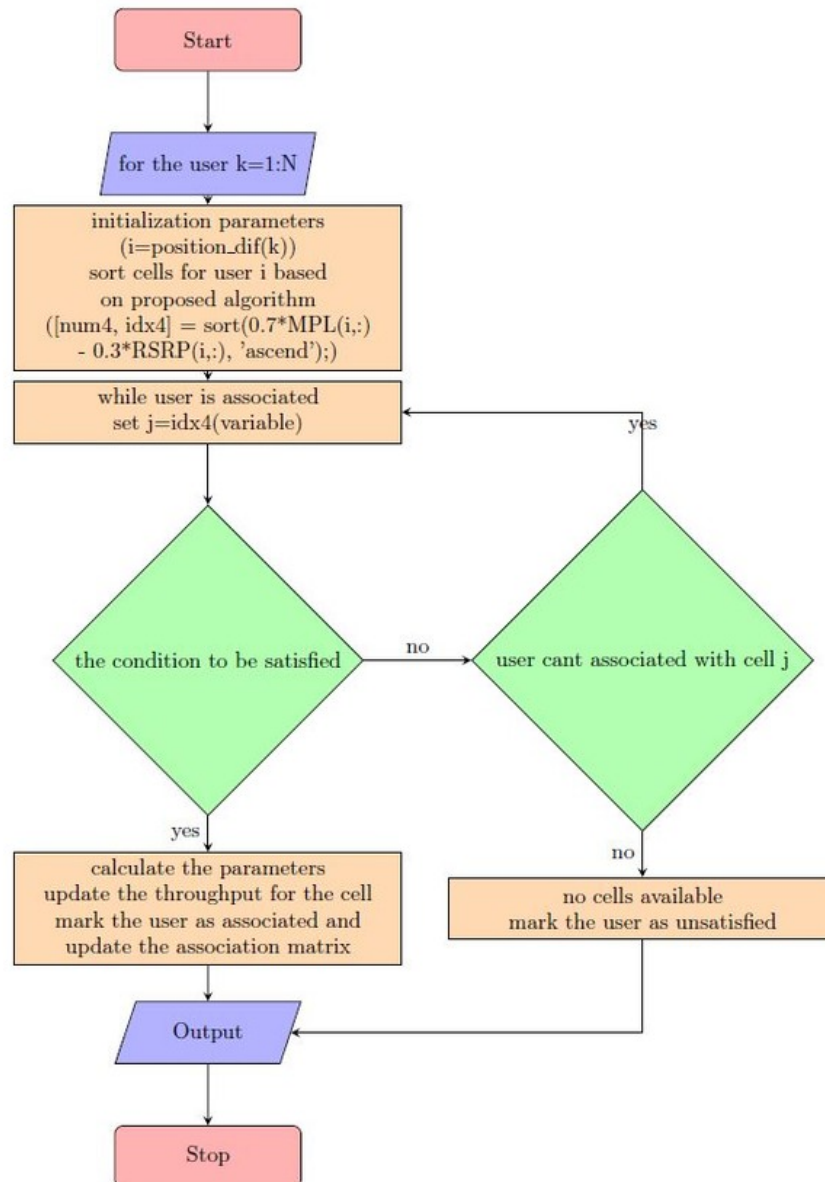
Μελετώντας την βιβλιογραφία όσον αφορά την συσχέτιση των χρηστών στα κυψελωτά δίκτυα, παρατηρήσαμε ότι από την 4η γενιά μέχρι και σήμερα που έχουν υπερ-πολλαπλασιαστεί οι χρήστες των κινητών συσκευών και κατ'επέκταση η κίνηση των δεδομένων, οι παρεμβολές, οι συσκευές στα ασύρματα δίκτυα και το κύριο πρόβλημα παραμένει στις κεραιές του δικτύου, είτε στην περίπτωση που ο χρήστης λαμβάνει σήμα από την κεραιά (Downlink:DL) είτε στέλνει σήμα προς την κεραιά (Uplink:UL). Ακόμα μέχρι και σήμερα είναι πολύ σημαντικός ο δείκτης RSRP για το δίκτυο, τον οποίο τον χρησιμοποιούμε σαν μέτρο σύγκρισης για τις τεχνικές συσχετίσεων χρηστών που μελετάμε.

Θέλοντας να συμβάλλουμε στην έρευνα για την εξεύρεσης μια τεχνικής συσχέτισης χρηστών που θα βελτίωνε τις συσχετίσεις, σκεφτήκαμε ότι να συνδυάσουμε κάποιες από τις υπάρχουσες τεχνικές έτσι ώστε να δούμε εάν θα μπορέσουμε να επιτύχουμε ένα καλύτερο αποτέλεσμα. Στην προσομοίωση θα εξετάσουμε την κατανάλωση ενέργειας, την φασματική απόδοση και την ενεργειακή απόδοση μόνο στην περίπτωση που εξετάζουμε την σύνδεση του χρήστη με τον σταθμό βάσης και θα συγκρίνουμε πως συμπεριφέρονται οι ήδη υπάρχουσες τεχνικές (RSRP, RE, MPL) με αυτές που προτείνουμε εμείς και θα αναλύσουμε τα αποτελέσματα.

3.4 Προτεινόμενος Αλγόριθμος

Οι αλγόριθμοι που θα προταθούν είναι δύο ένας για την περίπτωση που λαμβάνεται υπόψη μόνο η σύνδεση (link) του χρήστη με τον σταθμό βάσης (gNB) και ο άλλος για την περίπτωση περιλαμβάνει και την σύνδεση backhaul.

Τα βήματα για την υλοποίηση του αλγορίθμου PAOAN που είναι για την περίπτωση που λαμβάνουμε υπόψη μόνο το AN είναι τα εξής :



Σχήμα 3.2: Flowcharts PAOAN Algorithm.

Ο αλγόριθμος PAOAN επιχειρεί συστηματικά να συσχετίσει κάθε χρήστη με το καταλληλότερο κελί με βάση την ποιότητα του σήματος, τη διαθεσιμότητα πόρων και τις απαιτήσεις του χρήστη, ενώ λαμβάνει επίσης υπόψη τους χρήστες που δεν μπορούν να συσχετιστούν ικανοποιητικά με κανένα κελί.

Παρακάτω παραθέτουμε τις παραμέτρους που χρησιμοποιήθηκαν για την υλοποίηση του αλγορίθμου

PAOAN είναι οι εξής:

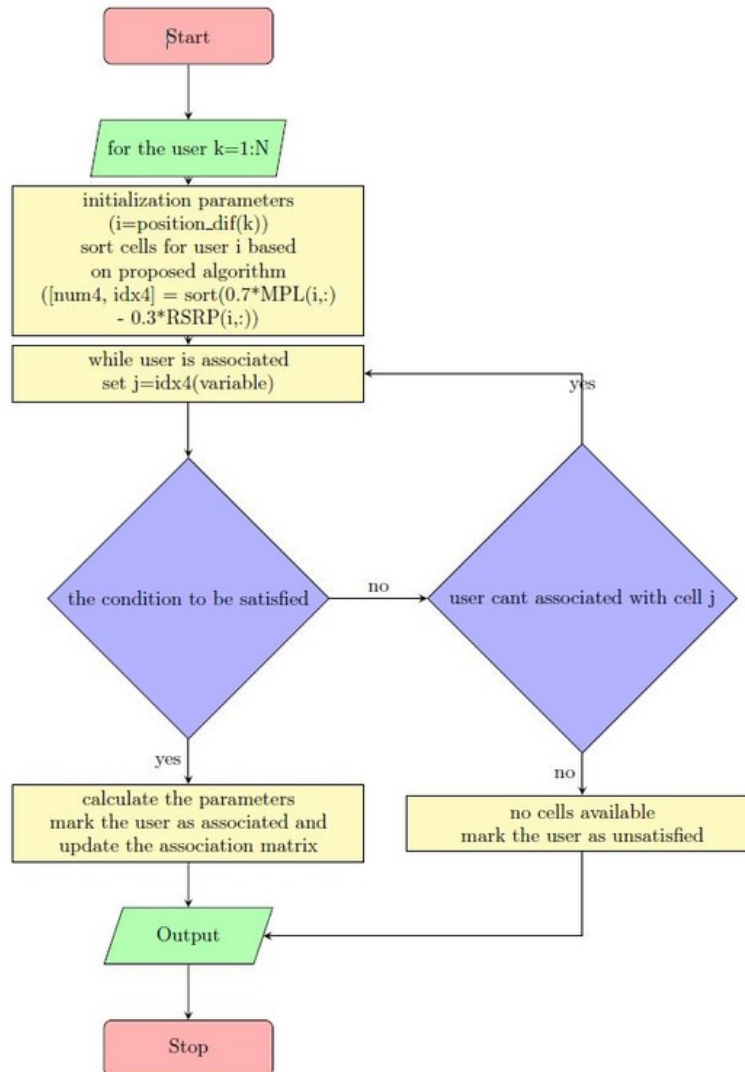
Inputs: PAOAN
1. N : The total number of users to be processed.
2. position_dif(k) : The position difference for user 'k', used to identify or calculate metrics for the user.
3. MPL(i,:) : The Minimum Path Loss (MPL) values for user 'i' across all cells.
4. RE_constant : A constant value representing Range Expansion (RE).
5. RSRP(i,:) : The Received Signal Received Power (RSRP) values for user 'i' across all cells.
6. BW_cell_need_PAOAN_DL(j) and BW_cell_need_PAOAN_UL(j) : The current bandwidth need for downlink (DL) and uplink (UL) in cell 'j'.
7. available_resources(j) : The available resources in cell 'j'.
8. SINR_RSRP(i,j) : The Signal-to-Interference-plus-Noise Ratio (SINR) for user 'i' in cell 'j'.
9. SINR_target : The target SINR threshold that must be met or exceeded for a user to be associated with a cell.
10. BW_need(i,j) and BW_need_UL(i,j) : The bandwidth need for user 'i' in cell 'j' for downlink and uplink, respectively.
11. P_RB_pair_UL_watt(i,j) : The power requirement for user 'i' in cell 'j' for uplink.
12. Ptu : Power threshold for user.
13. data_rate_user_DL(i) and data_rate_user_UL(i) : The data rate for user 'i' for downlink and uplink, respectively.
14. throughput_cell_RE_DL(j) and throughput_cell_RE_UL(j) : The current throughput for cell 'j' for downlink and uplink, respectively, before applying the PAOAN algorithm.

Σχήμα 3.3: Inputs of PAOAN Algorithm.

Outputs: PAOAN
1. totally_unsatisfied_user_PAOAN : The total number of users who could not be associated with any cell and are marked as unsatisfied.
2. BW_cell_need_PAOAN_DL(j) and BW_cell_need_PAOAN_UL(j) : Updated bandwidth needs for downlink and uplink in cell 'j' after attempting to associate all users.
3. throughput_cell_PAOAN_DL(j) and throughput_cell_PAOAN_UL(j) : The updated throughput for cell 'j' for downlink and uplink, respectively, after applying the PAOAN algorithm.
4. association_PAOAN(i,j) : A matrix indicating whether user 'i' has been successfully associated with cell 'j' (1 for associated, 0 otherwise).
5. N_users_PAOAN(j) : The number of users successfully associated with cell 'j' after the algorithm has been applied.

Σχήμα 3.4: Outputs of PAOAN Algorithm.

Τα βήματα για την υλοποίηση του αλγορίθμου NPA που είναι για την περίπτωση που λαμβάνουμε υπόψη το AN και το blackhaul του δικτύου είναι τα εξής :



Σχήμα 3.5: Flowcharts NPA Algorithm.

Ο αλγόριθμος NPA επικεντρώνεται στην κατανομή πόρων με βάση συγκεκριμένα κριτήρια για την ικανοποίηση των απαιτήσεων των χρηστών, επιχειρεί συστηματικά να συσχετίσει κάθε χρήστη με ένα κελί με βάση τη διαθεσιμότητα πόρων, την ποιότητα του σήματος και τους περιορισμούς ισχύος, βελτιστοποιώντας τόσο τις ανάγκες της άνω (UL) και της κάτω (DL) ζεύξης και εάν οι απαιτήσεις δεν μπορούν να εκπληρωθούν, αυξάνεται ο αριθμός των μη ικανοποιημένων χρηστών.

Παρακάτω παραθέτουμε τις παραμέτρους που χρησιμοποιήθηκαν για την υλοποίηση του αλγορίθμου ΡΑΟΑΝ είναι οι εξής:

Inputs NPA:
1. data_rate_user_DL(i) : The downlink data rate for user i. This input is used to calculate the total throughput for a cell in the downlink direction.
2. data_rate_user_UL(i) : The uplink data rate for user i. Similar to the downlink data rate, this is used for calculating the total throughput in the uplink direction.
3. N : The total number of users or a specific set of users to be processed.
4. position_dif(k) : Likely represents the difference in position or a specific attribute of user k that needs to be processed.
5. MPL(i,:) : Possibly the path loss metric for user i.
6. RSRP(i,:) : Reference Signal Received Power for user i.
7. available_resources(j) : The available resources for cell j.
8. SINR_RSRP(i,j) : The Signal-to-Interference-plus-Noise Ratio based on RSRP for user i in cell j.
9. SINR_target : The target SINR threshold.
10. BW_need(i,j) : The bandwidth need for user i in cell j in the downlink direction.
11. BW_need_UL(i,j) : The bandwidth need for user i in cell j in the uplink direction.
12. P_RB_pair_UL_watt(i,j) : Power requirement for a Resource Block pair in the uplink for user i in cell j.
13. Ptu : Power threshold for user.

Σχήμα 3.6: Inputs of NPA Algorithm.

Outputs: NPA
1. throughput_cell_NPA(j) : The total throughput for cell j after adding the downlink data rate for associated users.
2. throughput_cell_NPA_UL(j) : The total throughput for cell j in the uplink direction after adding the uplink data rate for associated users.
3. association_NPA(i,j) : A binary indicator showing whether user i is associated with cell j (1 for associated, 0 otherwise).
4. N_users_NPA(j) : The total number of users associated with cell j.
5. totally_unsatisfied_user_NPA : The total number of users that could not be satisfied or associated with any cell based on the given criteria.
6. BW_cell_need_NPA(j) : The total bandwidth need for cell j in the downlink direction after accommodating the needs of associated users.
7. BW_cell_need_NPA_UL(j) : The total bandwidth need for cell j in the uplink direction after accommodating the needs of associated users.

Σχήμα 3.7: Outputs of NPA Algorithm.

3.5 Επίλογος

Σε αυτό το κεφάλαιο αναλύσαμε το πρόβλημα που εντοπίστηκε από την βιβλιογραφική έρευνα, παρουσιάσαμε το μοντέλο του συστήματος που χρησιμοποιήσαμε για την υλοποίηση του αλγορίθμου, παρουσιάσαμε το πρόβλημα και προτείναμε τους ευρετικούς αλγορίθμους που θα υλοποιήσουμε στο λογισμικό που επιλέξαμε στο επόμενο κεφάλαιο.

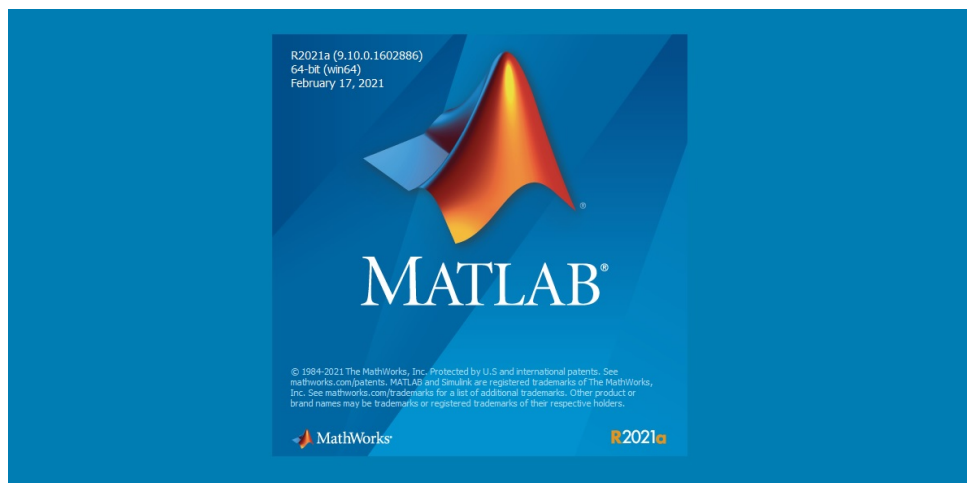
Κεφάλαιο 4ο: Αριθμητικά Αποτελέσματα & Ανάλυση

4.1 Εισαγωγή

Στο παρόν κεφάλαιο θα παρουσιάσουμε το περιβάλλον προσομοίωσης το οποίο περιλαμβάνει το λογισμικό που επιλέχθηκε για την εκτέλεση του προτεινόμενου αλγόριθμου που αναφέρθηκε στο Κεφάλαιο 3 , τον κώδικα που έχει γραφτεί για την υλοποίηση του αλγόριθμου καθώς επίσης και τα αποτελέσματα που προέκυψαν από την εκτέλεση της προσομοίωσης.

4.2 Περιβάλλον Προσομοίωσης

Το λογισμικό που έχει επιλεγεί για τις ανάγκες της επίλυσης του προβλήματος που εντοπίστηκε από την έρευνα της βιβλιογραφίας στο Κεφάλαιο 2 είναι το Matlab. Το Matlab είναι ένα περιβάλλον αριθμητικής υπολογιστικής και μια γλώσσα προγραμματισμού βασισμένη σε πολλά προγραμματιστικά παραδείγματα. Αποθηκεύει και κάνει πράξεις με βάση την άλγεβρα των πινάκων. Χρησιμοποιείται κατά κύριο λόγο για την επίλυση μαθηματικών προβλημάτων, ωστόσο είναι ένα πολύ ισχυρό εργαλείο και για γενικό προγραμματισμό καθώς περιέχει εντολές από την C++. Στον τομέα των γραφικών όσον αφορά τον μαθηματικό κλάδο μπορεί να υλοποιήσει συναρτήσεις πραγματικών αριθμών, μιγαδικών, συναρτήσει δυο μεταβλητών κα. Όσον αφορά τον κλάδο της στατιστικής μπορεί να υλοποιήσει ιστογράμματα, τομεογράμματα, ραβδογράμματα, εμβοδογράμματα κά [66]. [55]

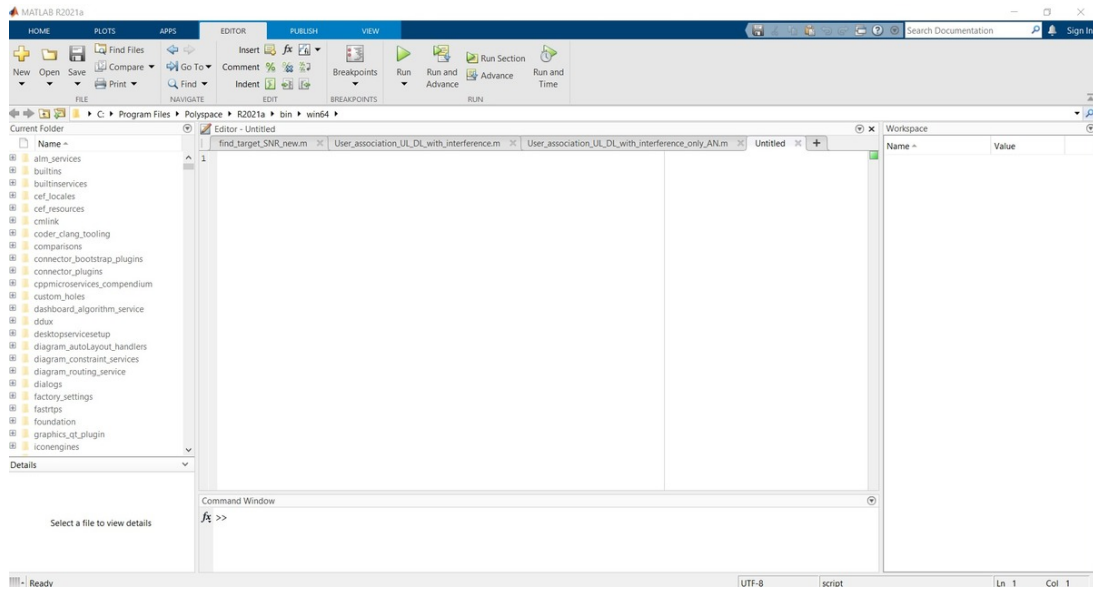


Σχήμα 4.1: Matlab Logo.

Έχει μεγάλο πλήθος δυνατοτήτων κάποιες εκ των οποίων είναι: Data Analysis(Explore, model, and analyze data), Graphics(Visualize and explore data), Programming(Create scripts, functions, and classes), App Building(Create desktop and web apps), External Language Interfaces(Use MATLAB with Python, C/C++, Fortran, Java, and other languages), Hardware(Connect MATLAB to hardware), Parallel Computing (Perform large scale computations and parallelize simulations using multicore desktops, GPUs, clusters, and clouds), Web and Desktop Deployment(Share your MATLAB programs), MATLAB in the Cloud(Run in cloud environments from MathWorks Cloud to public clouds including AWS and Azure). Έχει εφαρμογή σε πολλούς τομείς όπως: Artificial Intelligence (AI), Automated Driving Systems, Computational Biology, Control Systems, Data Science, Deep Learning, Electrification, Embedded Systems, Enterprise

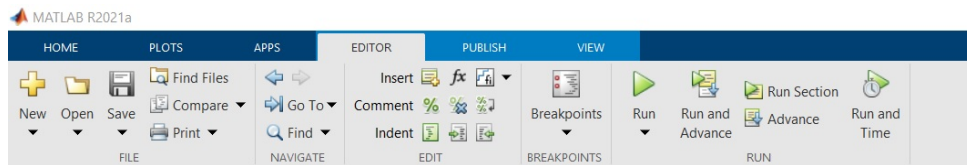
and IT Systems, Internet of Things, Machine Learning, Radar Systems, Robotics, Signal Processing, Wireless Communications [67].

Στη παρούσα πτυχιακή θα χρησιμοποιήσουμε την έκδοση MATLAB-R2021a(9.10.0.1602886) στην 64-bit έκδοση για υπολογιστή που τρέχει λογισμικό WINDOWS 10. Το περιβάλλον εργασίας με την έναρξη του προγράμματος είναι το εξής:



Σχήμα 4.2: Παραθυρικό Περιβάλλον.

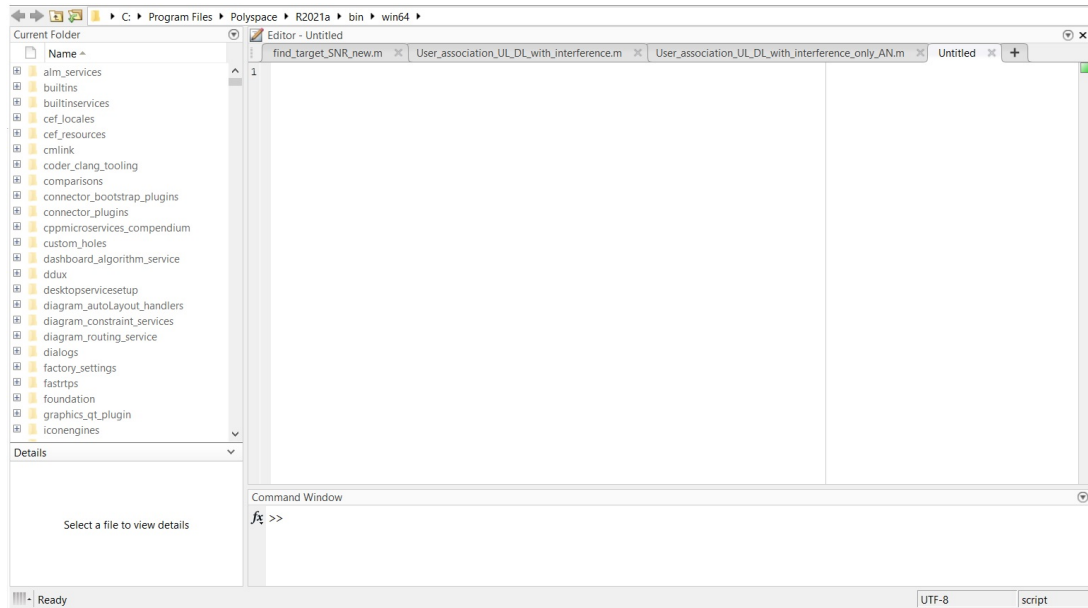
Στην αρχική θόνη του προγράμματος που είναι παράλληλα και το παράθυρο εργασίας μας διακρίνεται το βασικό μενού της γραμμής εντολών και ένα μενού επιλογών σε μορφή εικονιδίων:



Σχήμα 4.3: Γραμμή εργασιών.

Κεφάλαιο 4

Και το κύριο παράθυρο εργασίας είναι το εξής που γράφουμε τον κώδικα και τρέχουμε την προσομοίωση είναι το εξής:



Σχήμα 4.4: Κύριο Παράθυρο εργασίας.

Στην παρούσα εργασία δουλέψαμε δυο αρχεία στο περιβάλλον του Matlab το `User_association_UL_DL_with_interference_only_AN.m` που αφορά την περίπτωση που εξετάζουμε μόνο την σύνδεση του χρήστη με τον σταθμό βάσης (gNB) και το δεύτερο είναι το `User_association_UL_DL_with_interference.m` που συμπεριλαμβάνει και το backhaul του δικτύου. Επίσης θα χρειαστούμε και το αρχείο `find_target_SNR_new.m` (ο πλήρης κώδικας των αρχείων θα υπάρχει στο παράρτημα).

Ο αλγόριθμος για την προτεινόμενη συσχέτιση χρήστη PAOAN στο περιβάλλον του Matlab είναι ο εξής:

```
totally_unsatisfied_user_PAOAN=0;

for k = 1:N
    i = position_dif(k);

    variable = 1;
    user_associated = 0;
    [num4, idx4] = sort(0.7*MPL(i,:) - 0.3*RSRP(i,:), 'ascend');

    while user_associated==0
        j=idx4(variable);
        if (BW_cell_need_PAOAN_DL(j)+BW_need(i,j))<=available_resources(j)
            %% SINR_RSRP(i,j)>=SINR_target
            %% (BW_cell_need_PAOAN_UL(j)+BW_need_UL(i,j))<=available_resources(j)
            %% ((BW_need_UL(i,j)+P_RB_pair_UL_watt(i,j))<=Ptu)
            BW_cell_need_PAOAN_DL(j)=BW_cell_need_PAOAN_DL(j)+BW_need(i,j);
            BW_cell_need_PAOAN_UL(j)=BW_cell_need_PAOAN_UL(j)+BW_need_UL(i,j);
            throughput_cell_PAOAN_DL(j)=throughput_cell_PAOAN_DL(j)+data_rate_user_DL(i);
            throughput_cell_PAOAN_UL(j)=throughput_cell_PAOAN_UL(j)+data_rate_user_UL(i);
            association_PAOAN(i,j)=1;
            user_associated=1;
            N_users_PAOAN(j)=N_users_PAOAN(j)+1;

            % Update throughput for the cell
            throughput_cell_DL(j) = throughput_cell_DL(j) + data_rate_user_DL(i);
            throughput_cell_UL(j) = throughput_cell_UL(j) + data_rate_user_UL(i);
        else
            if variable < cells % If the user cannot be associated with cell j, try the next cell
                variable = variable + 1;
            else
                % If no cells are available, mark the user as unsatisfied
                totally_unsatisfied_user_PAOAN = totally_unsatisfied_user_PAOAN + 1;
                user_associated = 1;
            end
        end
    end
end
end
```

Σχήμα 4.5: Ο αλγόριθμος PAOAN στο περιβάλλον του Matlab.

Ο αλγόριθμος για την προτεινόμενη συσχέτιση χρήστη NPA στο περιβάλλον του Matlab είναι ο εξής:

```

totally_unsatisfied_user_NPA=0;
for k=1:N
    i=position_dif(k);

    variable=1;
    user_associated=0;
    %sort cells for user i based on the proposed algorithm
    [num4, idx4] = sort(0.7*MPL(i,:) - 0.3*RSRP(i,:)); % proposed algorithm

    while user_associated==0
        j=idx4(variable);
        if (BW_cell_need_NPA(j)+BW_need(i,j))<=available_resources(j)
            && SINR_RSRP(i,j)>=SINR_target
            && (BW_cell_need_NPA_UL(j)+BW_need_UL(i,j))<=available_resources(j)
            && ((BW_need_UL(i,j)*P_RB_pair_UL_watt(i,j))<=Ptu)
            BW_cell_need_NPA(j)=BW_cell_need_NPA(j)+BW_need(i,j);
            BW_cell_need_NPA_UL(j)=BW_cell_need_NPA_UL(j)+BW_need_UL(i,j);

            throughput_cell_NPA(j)=throughput_cell_NPA(j)+data_rate_user_DL(i);
            throughput_cell_NPA_UL(j)=throughput_cell_NPA_UL(j)+data_rate_user_UL(i);

            %mark the user as associated and update the association matrix
            association_NPA(i,j)=1;
            user_associated=1;
            N_users_NPA(j)=N_users_NPA(j)+1;
        else
            %if the user cant be associated with cell j, try the next cell
            if variable<cells
                variable=variable+1;
            else
                %if no cells available, mark the user as unsatisfied
                totally_unsatisfied_user_NPA=totally_unsatisfied_user_NPA+1;
                user_associated=1;
            end
        end
    end
end
end
end

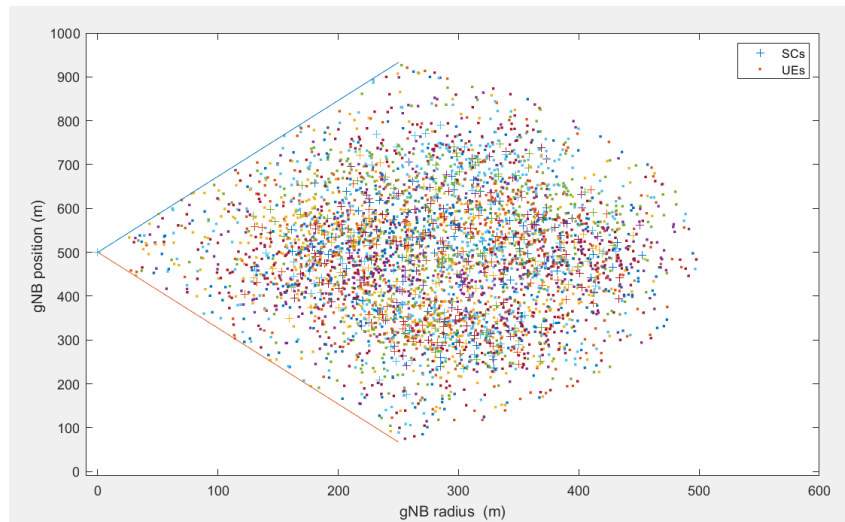
```

Σχήμα 4.6: Ο αλγόριθμος NPA στο περιβάλλον του Matlab.

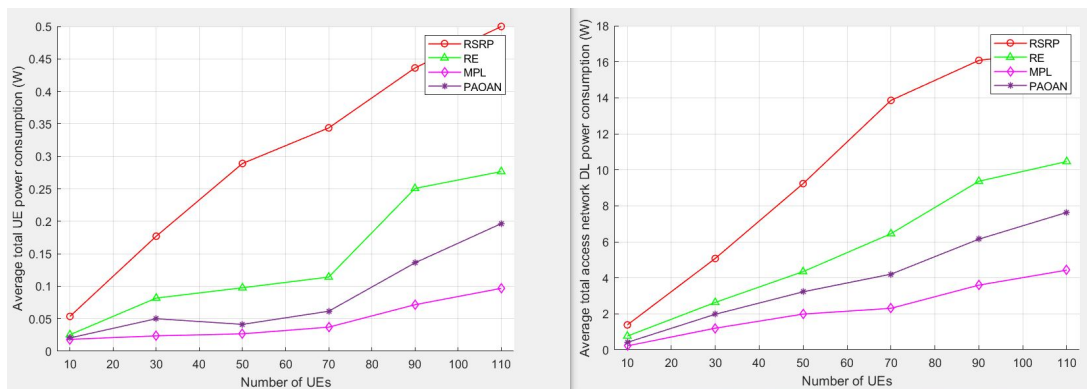
4.3 Αποτελέσματα

Σε αυτό το υποκεφάλαιο θα παρουσιάσουμε και θα σχολιάσουμε τα αποτελέσματα που βρήκαμε απο την υλοποίηση των προτεινόμενων αλγορίθμων στις δύο περιπτώσεις που εξετάσαμε. Θα εξετάσουμε την απόδοση των τεχνικών σύνδεσης όσων αφορά την κατανάλωση ενέργειας, την φασματική απόδοση και στην περίπτωση που μελετάμε μόνο την σύνδεση του σταθμού βάσης με τους χρήστες (AN) θα εξετάσουμε και την ενεργειακή απόδοση. Παρακάτω θα παραθέσουμε τις εικόνες των αποτελεσμάτων και απο κάτω θα υπάρχει ο σχολιασμός.

Στην πρώτη περίπτωση που μελετάμε μόνο το AN και μας ενδιαφέρει το DL στο δίκτυο έχουμε τα παρακάτω αποτελέσματα: Στο σχήμα 4.7 βλέπουμε πως έχουν κατανεμηθεί στο δίκτυο τα SC και τα UEs μετά την ολοκλήρωση της προσομοίωσης.



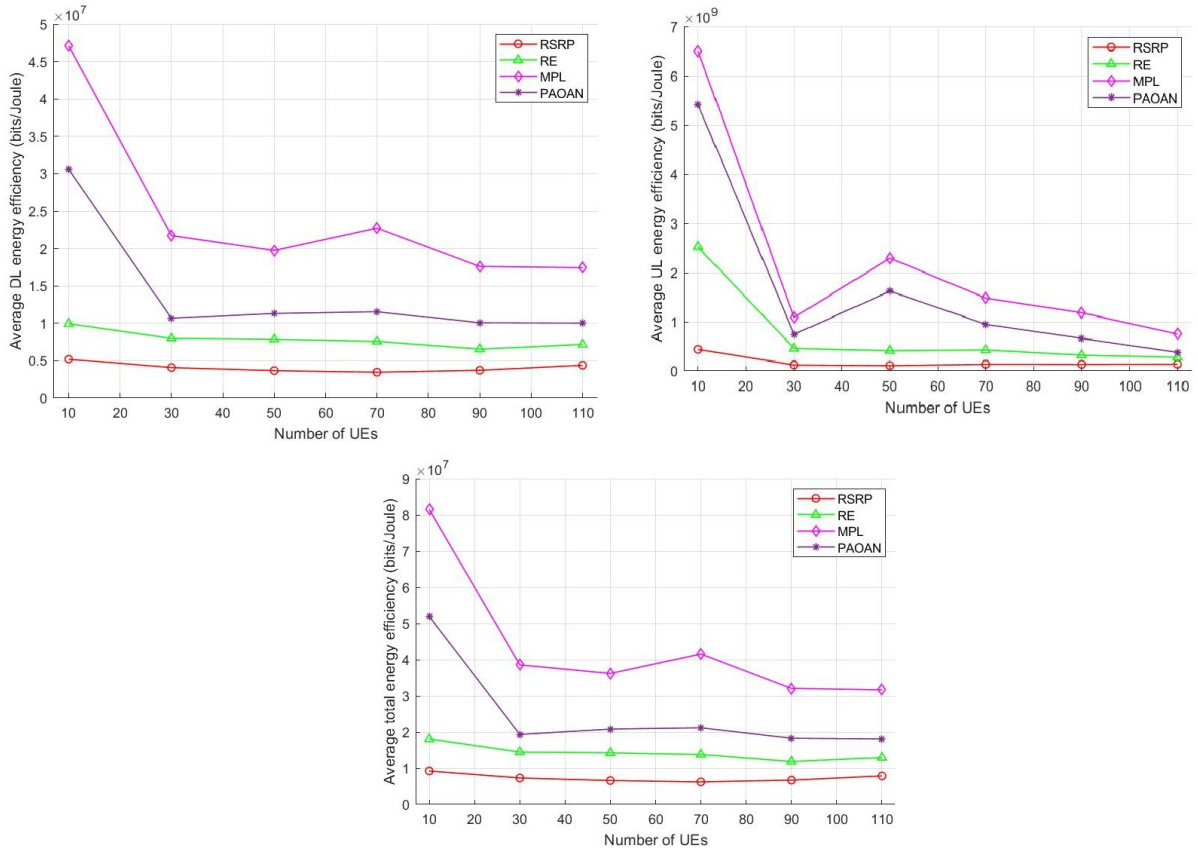
Σχήμα 4.7: Η τοποθέτηση των SC και των UEs στο δίκτυο.



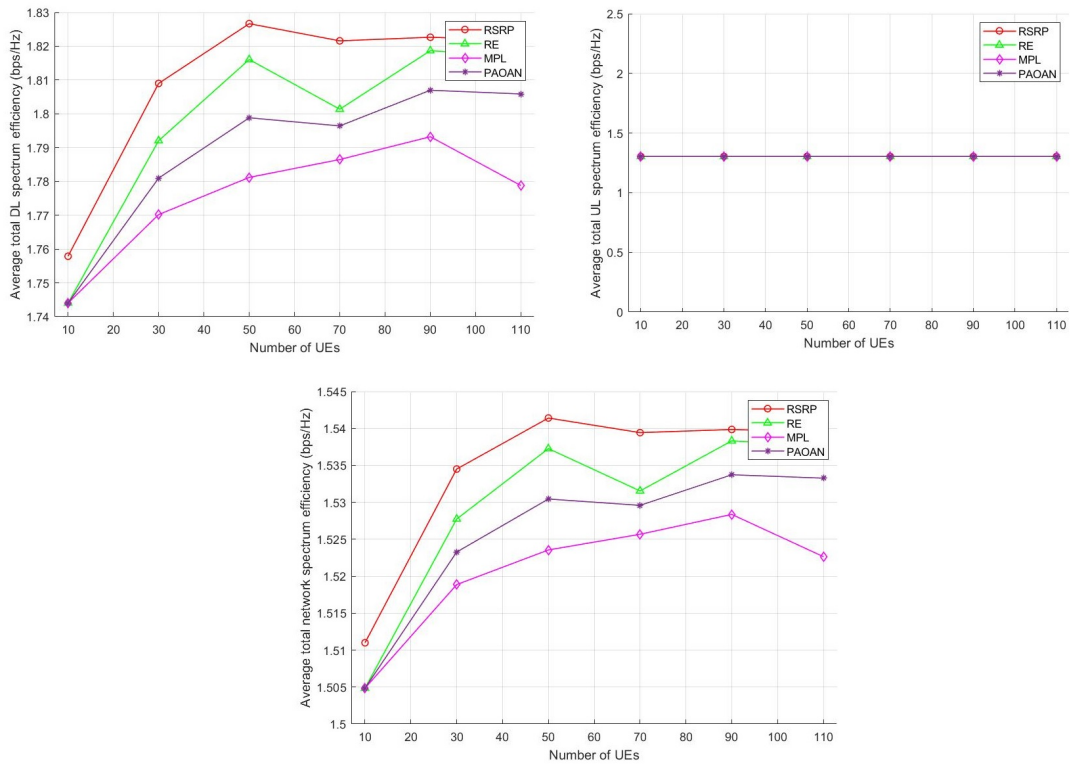
Σχήμα 4.8: Μέση συνολική κατανάλωση ενέργειας.

Στο σχήμα 4.8 βλέπουμε την μέση κατανάλωση ενέργειας των UEs του δικτύου και στο DL για όλες τις τεχνικές σύγκρισης που έχουμε χρησιμοποιήσει στην παρούσα προσομοίωση (RSRP, RE, MPL, PAOAN) η οποία μετριέται σε Watts. Αυτό που παρατηρούμε στην περίπτωση των UEs είναι ότι στην προτεινόμενη μέθοδο PAOAN η κατανάλωση ενέργειας όσο τοποθετούνται χρήστες (UEs) στο δίκτυο έχει σχετικά καλά αποτελέσματα έχοντας την δεύτερη καλύτερη κατανάλωση ενέργειας και πολύ κοντά με την μέθοδο MPL. Το ίδιο παρατηρούμε και στην κατανάλωση ενέργειας στο DL, έχοντας πάλι σχετικά χαμηλή κατανάλωση την δεύτερη καλύτερη από όλες τις μεθόδους.

Στο σχήμα 4.9 βλέπουμε την συνολική ενεργειακή απόδοση (Energy Efficiency) του δικτύου στο UL και στο DL καθώς εισέρχονται οι χρήστες μέσα στο δίκτυο και πως μεταβάλλεται για όλες τις τεχνικές σύγκρισης που έχουμε χρησιμοποιήσει στην παρούσα προσομοίωση (RSRP, RE, MPL, PAOAN) η οποία μετριέται σε bits/Joule. Και στις τρεις περιπτώσεις η τεχνική PAOAN έχει την δεύτερη καλύτερη EE. Στην περίπτωση του DL ενώ ξεκινάει σε μια σχετικά καλή τιμή, στην είσοδο και το 30ο χρήστη κάνει μια απότομη μεταβολή και πέφτει κάτω από το μέσο όρο κάτι το οποίο παρατηρούμε και στην MPL και στην συνέχεια κρατάει μια χαμηλή με σταθερή δε EE.

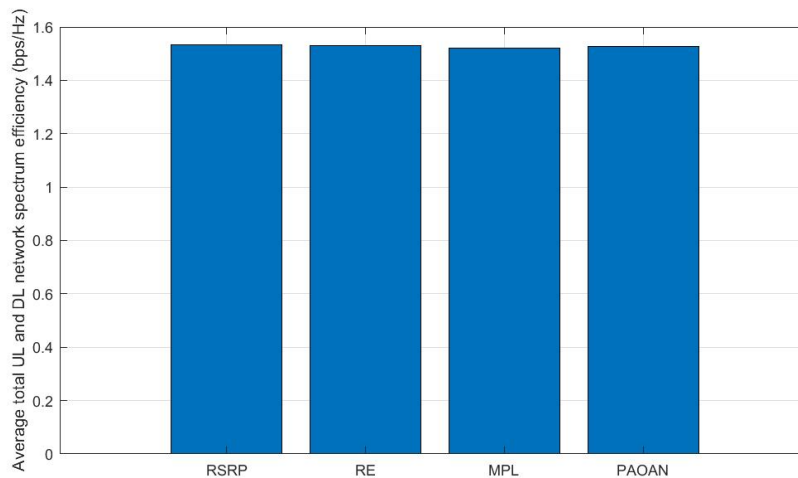


Σχήμα 4.9: Μέση συνολική ενεργειακή απόδοση.



Σχήμα 4.10: Μέση συνολική φασματική απόδοση.

Στο σχήμα 4.10 βλέπουμε την μέση συνολική φασματική απόδοση (spectrum efficiency) του δικτύου και στο DL και το UL, καθώς εισέρχονται οι χρήστες μέσα στο δίκτυο και πως μεταβάλλεται για όλες τις τεχνικές σύγκρισης που έχουμε χρησιμοποιήσει στην παρούσα προσομοίωση (RSRP, RE, MPL, PAOAN) η οποία μετριέται σε bps/Hz. Τα αποτελέσματα παρουσιάζουν ένα ενδιαφέρον ιδιαίτερα στην περίπτωση του UL όπου όλες η τεχνικές έχουν την ίδια SE κάτι που δεν ήταν αναμενόμενο. Στην περίπτωση του DL η τεχνική μας δεν φαίνεται να αποδίδει τόσο καλά, για την ακρίβεια έχει την τρίτη καλύτερη επίδοση. Ξεκινάει σε χαμηλή τιμή και κάνει μια απότομη αύξηση στον 30ο και στον 50ο χρήστη, στον 70ο έχουμε μια μικρή πτώση της απόδοσης και μεχρι και την είσοδο του 110ου χρήστη κρατάει μια λίγο αύξουσα αλλά σταθερή πορεία. Στη συνολική SE του δικτύου παρατηρούμε οτι όλες ξεκινάνε με χαμηλή τιμή, κάνουν στον 50ο χρήστη μια απότομη αύξηση και μια ακόμα στο 70ο και απο τον 90ο και μετά πέφτει η απόδοση των τεχνικών.

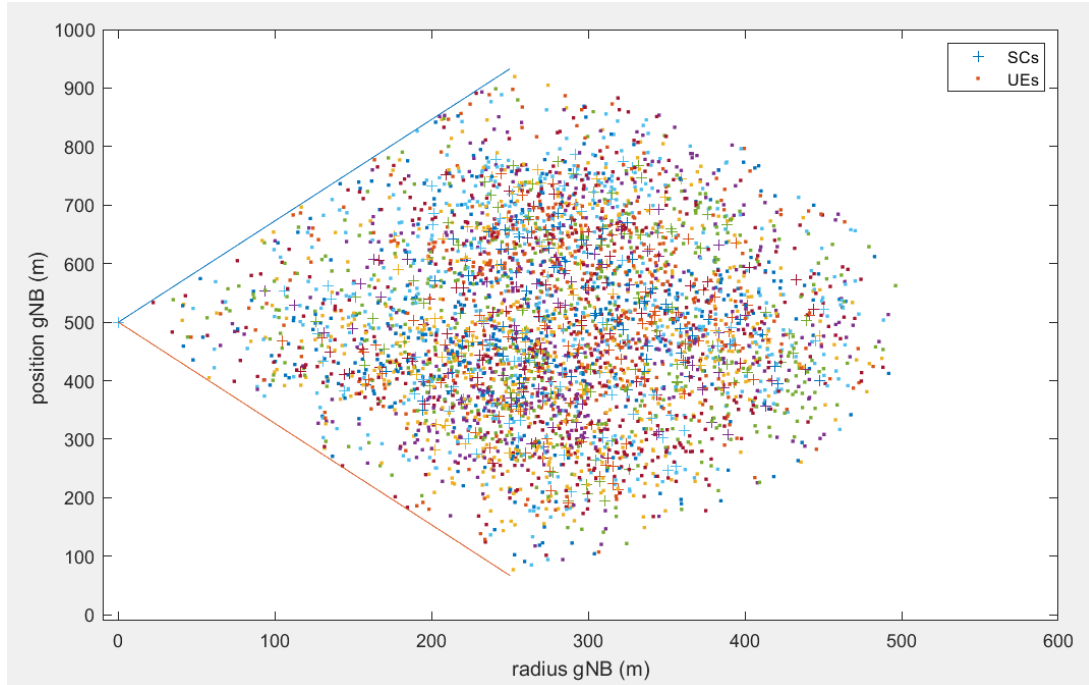


Σχήμα 4.11: Μέση συνολική φασματική απόδοση.

Στο σχήμα 4.11 βλέπουμε συγκεντρωτικά σε μορφή διαγραμμάτων την φασματική απόδοση των τεχνικών συσχέτισης χρηστών στο δίκτυο συνολικά καθώς και στο UL και DL, όπου παρατηρούμε οτι όλες οι τεχνικές είναι σχετικά την ίδια SE και την MPL να έχει την χειρότερη συνολικά.

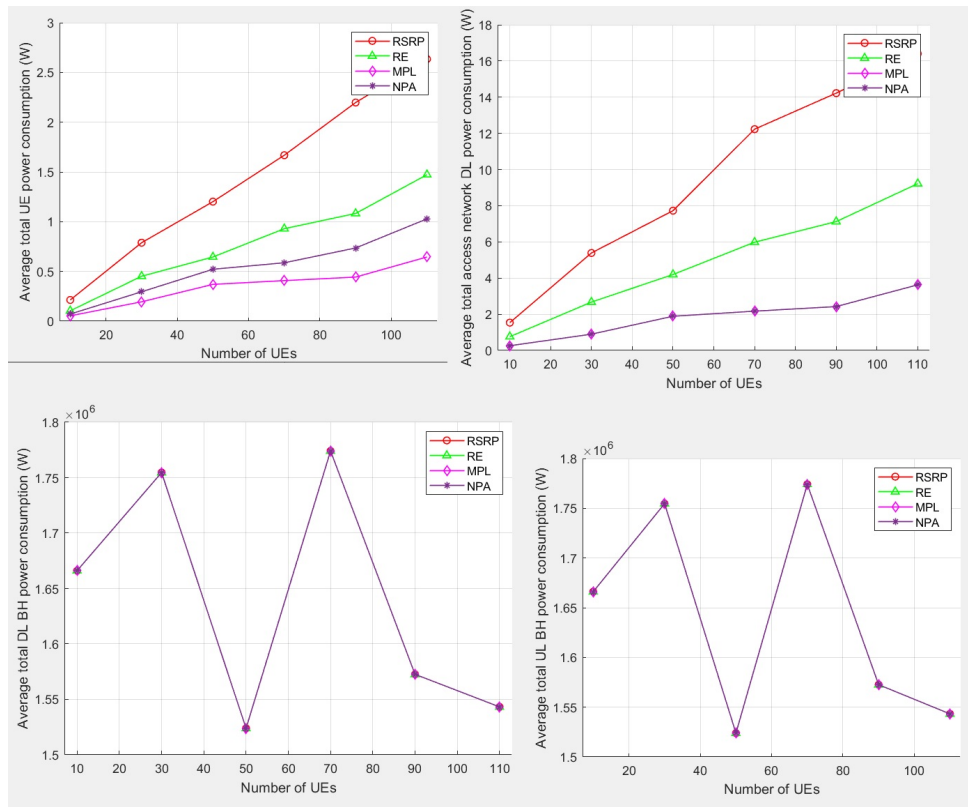
Στο δεύτερο σενάριο μελετάμε το AN και το backhaul (BH) του δικτύου, μας ενδιαφέρει το DL στο δίκτυο έχουμε τα παρακάτω αποτελέσματα.

Στο σχήμα 4.12 βλέπουμε πως έχουν καταναμηθεί στο δίκτυο τα SC και τα UEs μετά την ολοκλήρωση της προσομοίωσης.

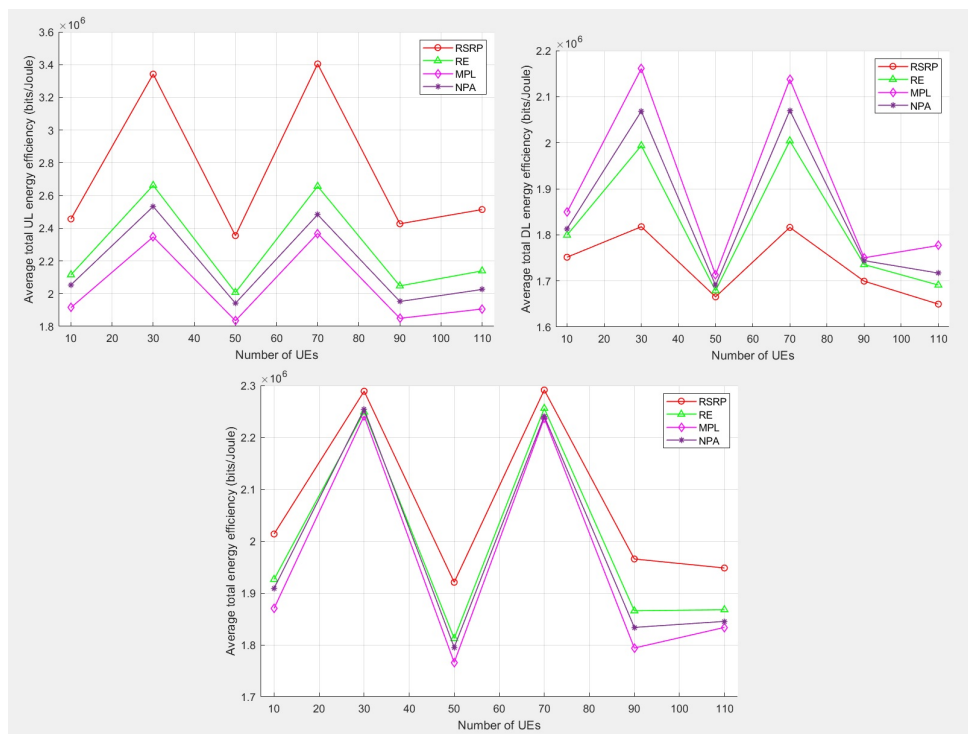


Σχήμα 4.12: Η τοποθέτηση των SC και των UEs στο δίκτυο.

Στο σχήμα 4.13 βλέπουμε την μέση κατανάλωση ενέργειας των UEs του δικτύου και του DL του δικτύου για όλες τις τεχνικές σύγκρισης που έχουμε χρησιμοποιήσει στην παρούσα προσομοίωση (RSRP, RE, MPL, NPA) η οποία μετριέται σε Watts. Στην περίπτωση των χρηστών η τεχνική μας έχει την δεύτερη καλύτερη κατανάλωση ενέργειας, με καλύτερη την τεχνική MPL και την RSRP να έχει την υψηλότερη απ'όλες και με σημαντική διαφορά. Στην περίπτωση του δικτύου συνολικά η τεχνική μας έχει ακριβώς την ίδια κατανάλωση ενέργειας με την MPL, μια σταθερή χαμηλή κατανάλωση ενέργεια χωρίς απότομες μεταβολές όπως η RSRP. Στο DL όλες οι τεχνικές ακολουθούν την ίδια πορεία, ξεκινώντας από μια μέση τιμή κατανάλωσης, κάνοντας μια απότομη αύξηση στο 30ο χρήστη, έπειτα μια απότομη μεταβολή στον 50ο, μια απότομη αύξηση στον 70ο και από εκεί και μετά μια φθίνουσα κατανάλωση ενέργειας μέχρι να μπουν όλοι οι χρήστες στο δίκτυο. Παρόμοια πορεία ακολουθείται και στην περίπτωση του UL με τις ίδιες μεταπτώσεις στους ίδιους χρήστες.



Σχήμα 4.13: Μέση συνολική κατανάλωση ενέργειας.

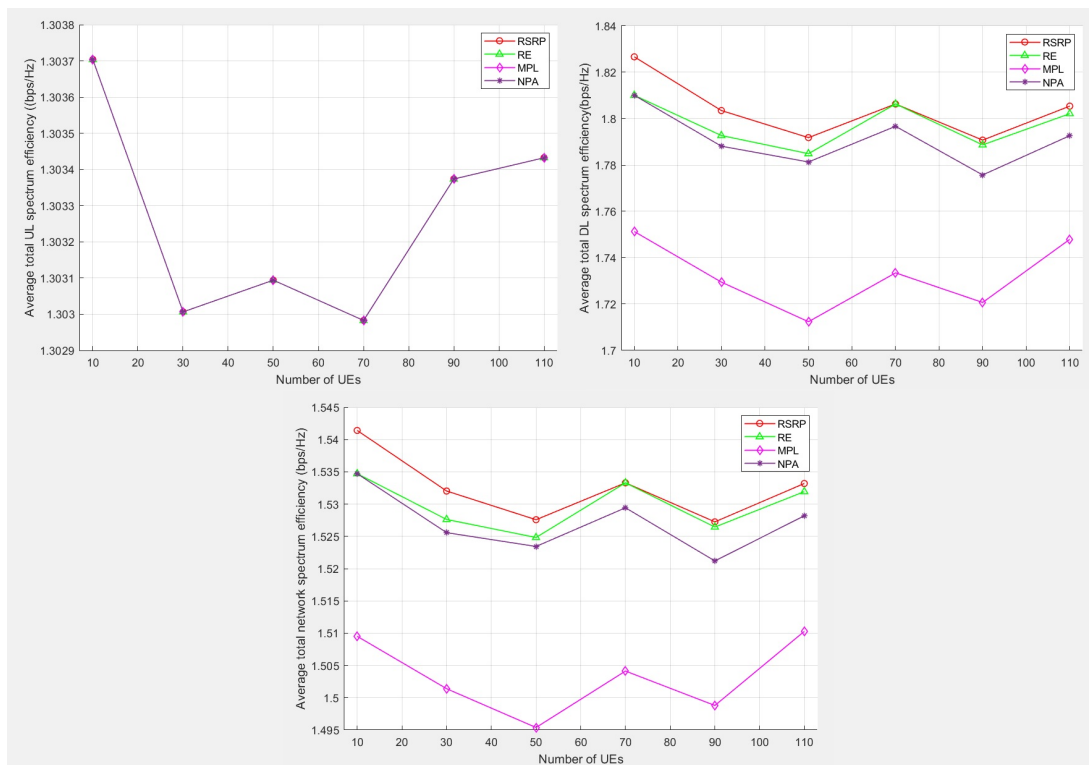


Σχήμα 4.14: Μέση συνολική ενεργειακή απόδοση.

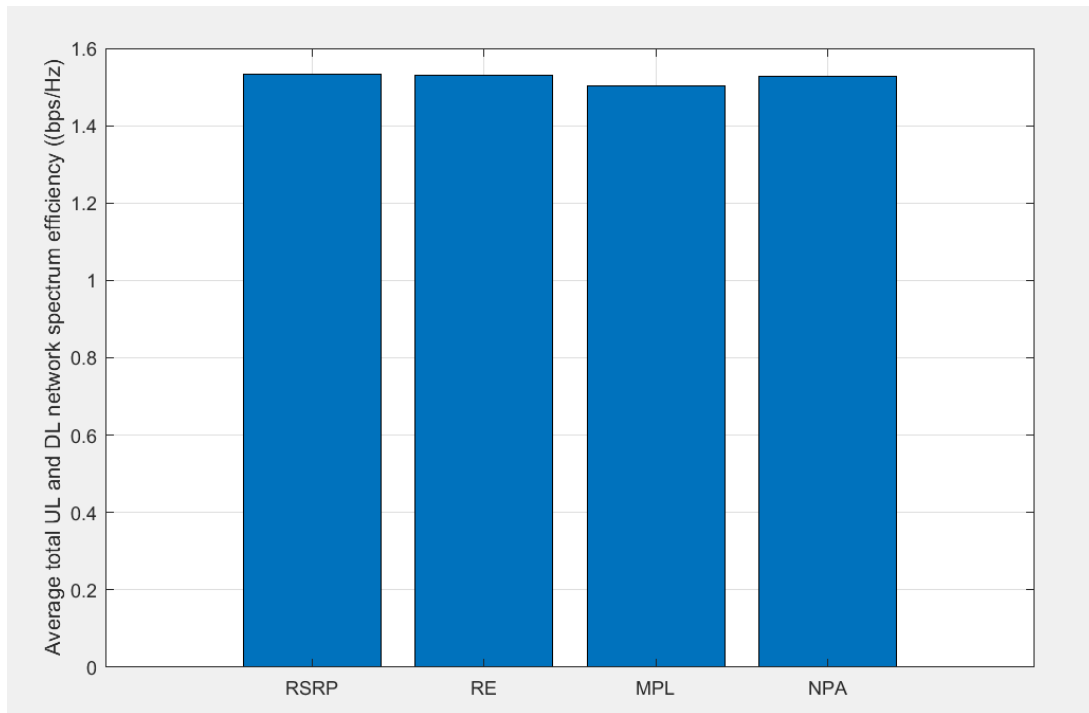
Στο σχήμα 4.14 βλέπουμε την μέση συνολική ενεργειακή απόδοση στο BH για το UL και το DL για όλες τις τεχνικές σύγκρισης που έχουμε χρησιμοποιήσει στην παρούσα προσομοίωση (RSRP, RE, MPL, NPA) η οποία μετριέται σε Watts. Στο UL αρχικά παρατηρούμε ότι όλες οι τεχνικές κάνουν τις ίδιες απότομες

μεταβολές στους χρήστες 30, 50, 70, 90 με μια μικρη ομαλοποίηση στην είσοδο και του τελευταίου χρήστη. Η τεχνική μας έχει συνολικά την 3η καλύτερη απόδοση. Στο DL απο την άλλη πάλι παρατηρούμε απότομες αλλαγές στους ίδιους χρήστες 30, 50, 70, 90 με μια μικρη ομαλοποίηση στην είσοδο και του τελευταίου χρήστη και την τεχνική μας να έχει την δεύτερη καλύτερη EE μετά την MPL. Στην συνολική επαναλαμβάνεται το ίδιο μοτίβο αυξο-μείωσης στους ίδιους χρήστες με την τεχνική μας να έχει την 3η καλύτερη απόδοση.

Στο σχήμα 4.15 βλέπουμε την συνολική φασματική απόδοση (Spectrum Efficiency) του δικτύου και για το UL και το DL, καθώς εισέρχονται οι χρήστες μεσα στο δίκτυο και πως μεταβάλλεται για όλες τις τεχνικές σύγκρισης που έχουμε χρησιμοποιήσει στην παρούσα προσομοίωση (RSRP, RE, MPL, NPA) η οποία μετριέται σε bps/Hz. Στην περίπτωση του UL παρατηρούμε οτι όλες οι τεχνικές ακολουθούν την ίδια πορεία όσον αφορά την φασματική απόδοση. Ξεκινάνε απο μια υψηλη τιμη απόδοσης στον 30ο κάνουν μια απότομη μείωση, στον 50ο μια μικρή αύξηση, στον 70ο μια ακόμη μείωση και στον 90ο μια απότομη αύξηση της απόδοσης η οποία όμως δεν φτάνει την αρχική απόδοση που είχαν οι τεχνικές μας. Στο DL απο την άλλη η τεχνική μας έχει την 3η καλύτερη επίδοση σχετικά υψηλή χωρίς ιδιαίτερες μεταβολές καθώς εισέρχονται οι χρήστες στο σύστημα. Τέλος συνολικά όσον αφορά την φασματική απόδοση του δικτύου η τεχνική μας κατατάσσεται στην 3η θέση, με μικρή διαφορά απο τις RSRP, RE που έχουν καλύτερη απόδοση και μικρή διαφορά σε σχέση με την MPL.



Σχήμα 4.15: Μέση συνολική φασματική απόδοση.



Σχήμα 4.16: Μέση συνολική φασματική απόδοση του δικτύου και στο UL και DL.

Στο σχήμα 4.16 βλέπουμε συγκεντρωτικά σε μορφή διαγραμάτων την φασματική απόδοση των τεχνικών συσχέτισης χρηστών στο δίκτυο συνολικά στο UL και DL. Τα αποτελέσματα για την προτεινόμενη τεχνική NPA όπως περιγράψαμε και παραπάνω την κατατάσσουν 3η σε απόδοση κάτι που δεν ήταν στις προσδοκίες μας.

4.4 Επίλογος

Σε αυτό το κεφάλαιο παραθέσαμε μια αναλυτική αναφορά των αποτελεσμάτων της προσομοίωσης για τις προτεινόμενες τεχνικές σύνδεσης που παρουσιάσαμε στην παρούσα πτυχιακή εργασία, σε συγκριση με τις ήδη υπάρχουσες τεχνικές σύνδεσης που επιλέξαμε από την βιβλιογραφία. Συλλέξαμε στοιχεία για την παράθεση των συμπερασμάτων στο επόμενο κεφάλαιο και στο τί μπορεί να γίνει περαιτέρω σε αυτό το δύσκολο κομμάτι της σύνδεσης των χρηστών στα νέας τεχνολογίας ασύρματα δίκτυα, που λόγω των πολλών διαφορετικών στοιχείων που τα συνδέτουν έχει εξέχουσα θέση στην ερευνητική κοινότητα για την απόδοση στους χρήστες του καλύτερου QoS με την καλύτερη δικαιοσύνη και διαμοίρασμα στους πόρους του δικτύου.

Κεφάλαιο 5ο: Συμπεράσματα ή/και προτάσεις βελτίωσης

5.1 Εισαγωγή

Σε αυτό το κεφάλαιο θα παρθέσουμε και θα σχολιάσουμε τα συμπεράσματα που εξήγαμε απο τις τεχνικές σύνδεσης που προτείναμε και υλοποιήσαμε στην παρούσα πτυχιακή εργασία, καθώς και για την μελλοντική εξέλιξη που μπορεί να έχει η εργασία στα δίκτυα 6G.

5.2 Συμπεράσματα

Στην παρούσα πτυχιακή εργασία παρουσιάσαμε δύο τεχνικές σύνδεσης χρήστη σε ένα δίκτυο με δυο διαφορετικές παραμέτρους.

Στην πρώτη περίπτωση που εξετάζαμε μόνο την σύνδεση του gNB με τους χρήστες, προτείναμε την τεχνική PAOAN που είναι ουσιαστικά ένα ευρετικός αλγόριθμος, ο οποίος συνδυάζει τις δύο υπάρχουσες τεχνικές που χρησιμοποιούνται μέχρι και σήμερα στην βιβλιογραφία, συν μια biased μεταβλητή (RE_constant) ώστε να ωθήσουμε τα UEs να συνδεθούν στα SCs του δικτύου που στήσαμε κι όχι στον gNB. Η εντολή που χρησιμοποιήσαμε είναι η: $\text{sort}(0.7 * \text{MPL}(i,:) - 0.3 * \text{RSRP}(i,:))$.

Τα αποτελέσματα της προτεινόμενης τεχνικής PAOAN ήταν μέτρια κι όχι τα επιθυμητά. Η τεχνική που προτείναμε επειδή συμμετέχει σε μεγαλύτερο ποσοστό με την τεχνική MPL που σχετίζεται με την μικρότερη απώλεια σήματος στη διαδρομή μετάδοσης που σημαίνει οτι απαιτείται λιγότερη ισχύς για μια επιτυχημένη μετάδοση και άρα μεγαλύτερη ενεργειακή απόδοση, να έχει καλη ενεργειακή απόδοση αλλά στο μέτρο της φασματικής απόδοσης δεν είχε ιδιαίτερα καλά αποτελέσματα.

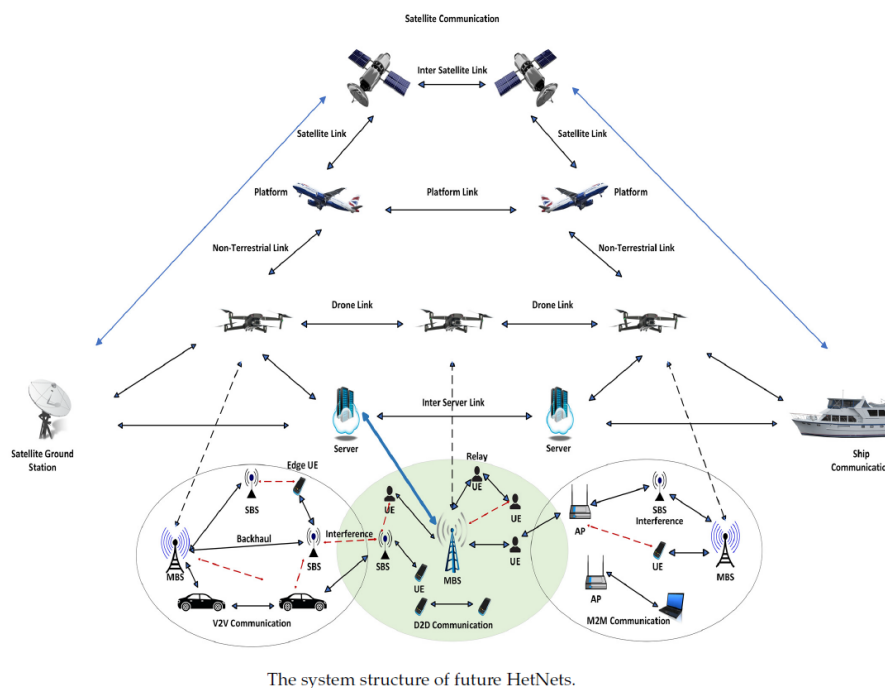
Στην δεύτερη περίπτωση που εξετάσαμε την σύνδεση του gNB με τους χρήστες αλλά και το BH του δικτύου, προτείναμε την τεχνική NPA που είναι ουσιαστικά ένα ευρετικός αλγόριθμος, ο οποίος συνδυάζει τις δύο υπάρχουσες τεχνικές που χρησιμοποιούνται μέχρι και σήμερα στην βιβλιογραφία. Η εντολή που χρησιμοποιήσαμε είναι η: $\text{sort}(0.7 * \text{MPL}(i,:) - 0.3 * \text{RSRP}(i,:))$

Τα αποτελέσματα της προτεινόμενης τεχνικής NPA ήταν σχεδόν αναμενόμενα οτι θα συμβαδίζανε ή θα ήταν καλύτερα απο της τεχνικής MPL. Είδαμε οτι στη περίπτωση της φασματικής απόδοσης η τεχνική μας είχε πολυ καλύτερη απόδοση στο DL και στη συνολική (DL+UL) του δικτύου σε σχέση με την τεχνική MPL. Αυτό που δεν περίμεναμε σαν αποτέλεσμα ήταν στο UL του δικτύου όπου όλες οι τεχνικές είχαν την ίδια συμπεριφορά καθώς εισέρχονταν οι χρήστες το δίκτυο. Περιμέναμε μια μείωση στο UL καθώς εισέρχονταν όλο και περισσότεροι χρήστες αλλά όχι αυτην την απότομη σχεδόν ραγδαία μείωση της φασματικής απόδοσης.

5.3 Κατευθύνσεις για Περαιτέρω Έρευνα

Αυτό που παρατηρήσαμε απο την έρευνα της βιβλιογραφίας και απο τα αποτελέσματα αυτής της εργασίας είναι οτι απο τα δίκτυα 4ης γενιάς μέχρι και σήμερα που βαδίζουμε στα δίκτυα 6ης γενιάς, η ραγδαία αύξηση των συσκευών στα κυψελοειδή δίκτυα έχει δημιουργήσει την ανάγκη για αύξηση των ταχυτήτων των ασύρματων δικτύων, πυκνότερων δικτύων, παροχή υψηλού QoS και QoE, καλύτερη διαχείριση

των πόρων των δικτύων, μείωση του latency, αύξηση του throughput, ανάπτυξη πράσινων δικτύων με χρήση των ΑΠΕ και μία πλειάδα ανοιχτών θεμάτων στην ανάπτυξη νέων αλλά και την βελτίωση των υπάρχουσών τεχνικών που πρέπει να ερευνηθούν περαιτέρω. Τα δίκτυα 6G πλήρη ασύρματα δίκτυα χωρίς περιορισμούς, βρίσκονται στο στάδιο ανάπτυξης και θα παρέχουν απίστευτη ταχύτητα μετάδοσης στο επίπεδο του terabit, θα απαιτεί έξυπνες κεραιές, μεγάλη μνήμη στα κινητά τηλέφωνα και τεράστια οπτικά δίκτυα. Τα 6G θα είναι χωρίς κυψέλες και θα επιτρέψουν την τεχνητή νοημοσύνη να εισαχθεί και να βοηθήσει στην ανάπτυξη τους. Δεν είναι σαφές ποια ζώνη συχνοτήτων θα χρησιμοποιούν, αλλά είναι προφανές ότι θα χρειαστεί πολύ υψηλότερη ζώνη συχνοτήτων για να αυξηθεί ο ρυθμός δεδομένων που απαιτείται. Ενώ το 5G χρησιμοποιεί συχνότητα μεγαλύτερη από 30 GHz και έως 300 GHz (mmWave), το 6G σχετίζεται με πολύ υψηλότερη συχνότητα σε ζώνες THz (300 GHz έως 3 THz) κι η χρήση του φάσματος THz εκτιμάται ότι θα γίνει εμπορική τα επόμενα 5-7 χρόνια. Μερικές από τις εφαρμογές για δίκτυα 6G είναι συνδεδεμένη ρομποτική και αυτόνομα συστήματα, ασύρματες διεπαφές εγκεφάλου-υπολογιστή, τεχνολογία blockchain, εκτεταμένη πραγματικότητα πολλαπλών αισθητήρων, διαστημικά ταξίδια, απτικό διαδίκτυο και βιομηχανικό διαδίκτυο. Τα δίκτυα 6G αναμένεται να εισαχθούν το έτος 2030. [10, 20–22, 63, 64]



Σχήμα 5.1: The system structure for future HetNets. [22]

Μερικά από τα πλεονεκτήματα των δικτύων 6G είναι:

- Data rate: αναμένεται να παρέχει ρυθμό δεδομένων έως και 10 Tbps, που είναι σχεδόν εκατό φορές καλύτερος από τα δίκτυα 5G.
- Latency: θα παρέχει Latency έως και 0,1 ms σε σύγκριση με τον 1 ms που παρέχεται από τα δίκτυα 5G.
- Efficient signaling: θα παρέχουν αποτελεσματική σηματοδότηση για μαζική συνδεσιμότητα IoT και επικοινωνία M2M.

- Εμπειρία χρήστη: Το 6G θα ενισχύσει την εκτεταμένη πραγματικότητα, την επαυξημένη πραγματικότητα, την εικονική πραγματικότητα και την τεχνητή νοημοσύνη.
- Φασματική απόδοση: θα παρείχε δέκα φορές μεγαλύτερη φασματική απόδοση και απόδοση δικτύου σε σύγκριση με τα δίκτυα 5G.
- Ενεργειακή απόδοση: θα παρέχουν 100 φορές πιο αποδοτική χρήση ενέργειας δικτύου σε σύγκριση με τα δίκτυα 5G.
- Ubiquitous Connection: θα παρέχει τεράστια δεδομένα μετάδοσης, τα οποία μπορούν να υποστηρίξουν περισσότερες από 1 εκατομμύριο συνδέσεις, που είναι σχεδόν εκατό φορές περισσότερα από τα δίκτυα 5G. [10]

Το μέλλον των δικτύων 6G είναι στην ετερογένεια και το οικοσύστημα τους δεν θα περιορίζεται στα επίγεια δίκτυα αλλά συμπεριλαμβάνει τα δορυφορικά δίκτυα, καθώς ότι γίνεται στο επίπεδο της ατμόσφαιρας, τα λεγόμενα Δίκτυα Εναέριας Πρόσβασης (Aerial Access Networks) και θα περιλαμβάνει και έξτρα συσκευές όπως UAV, θα γίνεται χρήση εξελιγμένων τεχνικών και αλγορίθμων κι όλα αυτά ενώ θα συμβάλλουν στην ανάπτυξη και την βελτίωση των δικτύων παράλληλα καθιστούν το πρόβλημα της συσχέτισης χρηστών ακόμα πιο δύσκολο και πολύπλοκο. Η έρευνα για τις τεχνικές συσχέτισης χρηστών θα πρέπει να επεκταθεί και σε αυτά δίκτυα κι είναι κάτι που προτείνουμε σαν επέκταση της παρούσας πτυχιακής εργασίας

5.4 Επίλογος

Η συζήτηση για την βελτίωση και την ανάπτυξη των δικτύων 6G είναι ανοιχτή, καθώς η ετερογένεια των στοιχείων και τεχνικών που θα περιλαμβάνει, η εισαγωγή επιπλέον χρηστών στα δίκτυα και η ποιότητα των υψηλών υπηρεσιών που προβλέπεται να παρέχει δεν είναι εφικτή με την υπάρχουσα ανάπτυξη των δικτύων 5G. Οι προκλήσεις που έχει να αντιμετωπίσει η ανάπτυξη των δικτύων 6G είναι πολλές και ιδιαίτερα απαιτητικές και σίγουρα το μέλλον των ασύρματων δικτύων θα είναι εξαιρετικά ενδιαφέρον όσον αφορά αυτά που έρχονται και αυτά που θα ζήσουμε τα επόμενα χρόνια.

BIBΛIOΓPAΦIA

- [1] https://en.wikipedia.org/wiki/Cellular_network/.
- [2] https://en.wikipedia.org/wiki/Wireless_network/.
- [3] <https://www.qualcomm.com/news/onq/2019/09/5g-launches-globally-what-comes-next>.
- [4] <https://www.sketchbubble.com/en/presentation-cellular-communication.html>.
- [5] <https://umutcanbolat.com/2g-gsm-cellular-network-basics/>.
- [6] S. Nashwan and A. Hamarsheh, “An extended approach for enhancing packet-loss of inter-rgsn in 3g mobile networks,” *International Journal of Computer Network and Information Security*, vol. 9, pp. 43–51, 11 2017.
- [7] M. Mahmud, “Cellular mobile technologies (1g to 5g) and massive mimo.,” *International Journal of Science and Research (IJSR)*, vol. 8, pp. 929–937, 07 2019.
- [8] N. Al-Falahy and O. Y. Alani, “Technologies for 5g networks: Challenges and opportunities,” *IT Professional*, vol. 19, no. 1, pp. 12–20, 2017.
- [9] M. Peng, C. Wang, J. Li, H. Xiang, and V. Lau, “Recent advances in underlay heterogeneous networks: Interference control, resource allocation, and self-organization,” *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, vol. 17, no. 2, pp. 700–729, 2015.
- [10] R. Chataut and R. Akl, “Massive mimo systems for 5g and beyond networks—overview, recent trends, challenges, and future research direction,” *Sensors*, vol. 20, no. 10, 2020.
- [11] <https://www.5g-networks.net/tag/mmwave/>.
- [12] M. Imran, L. U. Khan, I. Yaqoob, E. Ahmed, M. A. Qureshi, and A. Ahmed, “Energy harvesting in 5g networks: Taxonomy, requirements, challenges, and future directions,” 2019.
- [13] H. Fourati, R. Maaloul, L. Chaari, and M. Jmaiel, “Comprehensive survey on self-organizing cellular network approaches applied to 5g networks,” *Computer Networks*, vol. 199, p. 108435, 2021.
- [14] A. G. Papidas and G. C. Polyzos, “Self-organizing networks for 5g and beyond: A view from the top,” *Future Internet*, vol. 14, no. 3, 2022.
- [15] V. S. Pana, O. P. Babalola, and V. Balyan, “5g radio access networks: A survey,” *Array*, vol. 14, p. 100170, 2022.
- [16] Y. Mehmood, N. Haider, M. Imran, A. Timm-Giel, and M. Guizani, “M2m communications in 5g: State-of-the-art architecture, recent advances, and research challenges,” *IEEE Communications Magazine*, vol. 55, no. 9, pp. 194–201, 2017.
- [17] F. Qamar, M. U. A. Siddiqui, M. N. Hindia, R. Hassan, and Q. N. Nguyen, “Issues, challenges, and research trends in spectrum management: A comprehensive overview and new vision for designing 6g networks,” *Electronics*, vol. 9, no. 9, 2020.

- [18] A. Bindle, T. Gulati, and N. Kumar, “A detailed introduction of different beamforming techniques used in 5g,” *International Journal of Communication Systems*, vol. 34, no. 5, p. e4718, 2021. e4718 IJCS-20-1106.R1.
- [19] A. Filali, A. Abouaomar, S. Cherkaoui, A. Kobbane, and M. Guizani, “Multi-access edge computing: A survey,” *IEEE Access*, vol. 8, pp. 197017–197046, 2020.
- [20] A. Shahraki, M. Abbasi, M. J. Piran, and A. Taherkordi, “A comprehensive survey on 6g networks: applications, core services, enabling technologies, and future challenges,” 2021.
- [21] X. Zhu and C. Jiang, “Integrated satellite-terrestrial networks toward 6g: Architectures, applications, and challenges,” *IEEE Internet of Things Journal*, vol. 9, no. 1, pp. 437–461, 2022.
- [22] H. F. Alhashimi, M. N. Hindia, K. Dimiyati, E. B. Hanafi, N. Safie, F. Qamar, K. Azrin, and Q. N. Nguyen, “A survey on resource management for 6g heterogeneous networks: Current research, future trends, and challenges,” *Electronics*, vol. 12, no. 3, 2023.
- [23] R. Tidke, P. Uttarwar, D. Dandwate, and U. Tupe, “A literature review on: Wireless technologies from 0g to 7g,” vol. 4, pp. 59–64, 12 2021.
- [24] B. Kalra and D. Chauhan, “A comparative study of mobile wireless communication network: 1g to 5g,” *International Journal of Computer Science and Information Technology Research*, vol. 2, pp. 430–433, 09 2014.
- [25] Κουκουλομμάτης Θωμάς, “Στρατηγικές αδρανοποίησης σταθμών βάσης (*sleep mode*) σε πυκνά κινητά δίκτυα πέμπτης γενιάς”. PhD thesis, School of Engineering, University of Patras, 2020.
- [26] <https://en.wikipedia.org/wiki/3G/>.
- [27] J. A. del Peral-Rosado, R. Raulefs, J. A. López-Salcedo, and G. Seco-Granados, “Survey of cellular mobile radio localization methods: From 1g to 5g,” *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, vol. 20, no. 2, pp. 1124–1148, 2018.
- [28] B. Fayssal, A. Marwen, and D. Fedoua, “Network selection schemes in heterogeneous wireless networks,” 2022.
- [29] D. Liu, L. Wang, Y. Chen, M. ElKashlan, K.-K. Wong, R. Schober, and L. Hanzo, “User association in 5g networks: A survey and an outlook,” *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, vol. 18, no. 2, pp. 1018–1044, 2016.
- [30] A. Morgado, K. M. S. Huq, S. Mumtaz, and J. Rodriguez, “A survey of 5g technologies: regulatory, standardization and industrial perspectives,” *Digital Communications and Networks*, vol. 4, no. 2, pp. 87–97, 2018.
- [31] E. Udayakumar and V. Krishnaveni, “Analysis of various interference in millimeter-wave communication systems: A survey,” in *2019 10th International Conference on Computing, Communication and Networking Technologies (ICCCNT)*, pp. 1–5, 2019.

- [32] E. Hossain, M. Rasti, H. Tabassum, and A. Abdelnasser, "Evolution toward 5g multi-tier cellular wireless networks: An interference management perspective," *IEEE Wireless Communications*, vol. 21, no. 3, pp. 118–127, 2014.
- [33] F. K. Shaikh and S. Zeadally, "Energy harvesting in wireless sensor networks: A comprehensive review," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 55, pp. 1041–1054, 2016.
- [34] P. Tedeschi, S. Sciancalepore, and R. Di Pietro, "Security in energy harvesting networks: A survey of current solutions and research challenges," *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, vol. 22, no. 4, pp. 2658–2693, 2020.
- [35] I. Ioannou, C. Christophorou, V. Vassiliou, and A. Pitsillides, "A novel distributed ai framework with ml for d2d communication in 5g/6g networks," *Computer Networks*, vol. 211, p. 108987, 2022.
- [36] <https://www.techtarget.com/searchnetworking/definition/radio-access-network-RAN/>.
- [37] A. H. Gazestani, S. A. Ghorashi, B. Mousavinasab, and M. Shikh-Bahaei, "A survey on implementation and applications of full duplex wireless communications," *Physical Communication*, vol. 34, pp. 121–134, 2019.
- [38] S. K. Sharma, T. E. Bogale, L. B. Le, S. Chatzinotas, X. Wang, and B. Ottersten, "Dynamic spectrum sharing in 5g wireless networks with full-duplex technology: Recent advances and research challenges," *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, vol. 20, no. 1, pp. 674–707, 2018.
- [39] A. Sufyan, K. B. Khan, O. A. Khashan, T. Mir, and U. Mir, "From 5g to beyond 5g: A comprehensive survey of wireless network evolution, challenges, and promising technologies," *Electronics*, vol. 12, no. 10, 2023.
- [40] J. Cheng, Y. Yang, X. Zou, *et al.*, "5G in manufacturing: a literature review and future research," *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 131, 2024.
- [41] M. Hunukumbure, J. P. Coon, B. Allen, and T. Vernon, *Small Cells – an Evolution or a Revolution?*, pp. 317–344. 2022.
- [42] W. T. Chishiri and K. Kumar, "Analysis of beamforming performance in 5g communication," in *2023 3rd International Conference on Intelligent Technologies (CONIT)*, pp. 1–4, 2023.
- [43] *The Changing Face of Mobile Communications*, ch. 12, pp. 377–405. John Wiley & Sons, Ltd, 2021.
- [44] <https://www.ibm.com/topics/sdn/>.
- [45] <https://www.techtarget.com/whatis/definition/commodity-hardware/>.
- [46] <https://www.techtarget.com/searchnetworking/definition/network-functions-virtualization-NFV/>.
- [47] N. Saquib, E. Hossain, and D. I. Kim, "Fractional frequency reuse for interference management in lte-advanced hetnets," *IEEE Wireless Communications*, vol. 20, pp. 113–122, 2013.

- [48] E. Hossain, “Evolution towards 5g cellular networks: Radio resource and interference management issues and approaches,” half-day tutorial, presented in *ieee globecom 2014, austin, tx, usa*,” 2014.
- [49] A. Mesodiakaki, F. Adelantado, L. Alonso, and C. Verikoukis, “Energy-efficient user association in cognitive heterogeneous networks,” *IEEE Communications Magazine*, vol. 52, no. 7, pp. 22–29, 2014.
- [50] S. K. Singh, V. S. Borkar, and G. S. Kasbekar, “User association in dense mmwave networks as restless bandits,” *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 71, no. 7, pp. 7919–7929, 2022.
- [51] J.-S. Liu, C.-H. R. Lin, and Y.-C. Hu, “Joint resource allocation, user association, and power control for 5g lte-based heterogeneous networks,” *IEEE Access*, vol. 8, pp. 122654–122672, 2020.
- [52] F. Afroz, R. Subramanian, R. Heidary, K. Sandrasegaran, and S. Ahmed, “Sinr, rsrp, rssi and rsrq measurements in long term evolution networks,” *International Journal of Wireless & Mobile Networks*, 2015.
- [53] E. Hossain, M. Rasti, H. Tabassum, and A. Abdelnasser, “Evolution toward 5g multi-tier cellular wireless networks: An interference management perspective,” *IEEE Wireless Communications*, vol. 21, no. 3, pp. 118–127, 2014.
- [54] A. Mesodiakaki, F. Adelantado, L. Alonso, and C. Verikoukis, “Joint uplink and downlink cell selection in cognitive small cell heterogeneous networks,” in *2014 IEEE Global Communications Conference*, pp. 2643–2648, 2014.
- [55] T. Zhou, Y. Fu, D. Qin, X. Li, and C. Li, “Joint user association and bs operation for green communications in ultra-dense heterogeneous networks,” *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 73, no. 2, pp. 2305–2319, 2024.
- [56] S. Parsaeefard, V. Jumba, A. D. Shoaie, M. Derakhshani, and T. Le-Ngoc, “User association in cloud rans with massive mimo,” *IEEE Transactions on Cloud Computing*, vol. 9, no. 2, pp. 821–833, 2021.
- [57] N. Hassan, X. Fernando, I. Woungang, and A. Anpalagan, “User association performance trade-offs in integrated rf/mmwave/thz communications,” *Future Internet*, vol. 15, no. 12, 2023.
- [58] P. Jia and X. Wang, “A new virtual network topology-based digital twin for spatial-temporal load-balanced user association in 6g hetnets,” *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol. 41, no. 10, pp. 3080–3094, 2023.
- [59] I. Ban and S.-J. Kim, “Intelligent dynamic power control with cell range expansion for small-cells in 5g hetnets,” *Applied Sciences*, vol. 14, no. 9, 2024.
- [60] H. Tabassum, U. Siddique, E. Hossain, and M. J. Hossain, “Downlink performance of cellular systems with base station sleeping, user association, and scheduling,” *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol. 13, no. 10, pp. 5752–5767, 2014.
- [61] A. Mesodiakaki, F. Adelantado, L. Alonso, and C. Verikoukis, “Energy-efficient context-aware user association for outdoor small cell heterogeneous networks,” in *2014 IEEE International Conference on Communications (ICC)*, pp. 1614–1619, 2014.

- [62] S. M. Shahid, Y. T. Seyoum, S. H. Won, and S. Kwon, "Load balancing for 5g integrated satellite-terrestrial networks," *IEEE Access*, vol. 8, pp. 132144–132156, 2020.
- [63] "5g's future is hybrid – the non-terrestrial opportunity," *Mobile World Live, Cambridge Consultants*, 2021.
- [64] Y. Fu and X. Wang, "Joint user association and resource allocation for tailored qos provisioning in 6g hetnets," 2024.
- [65] J. Isabona, E. Oghu, and O. Omasheye, "Path loss and models: A survey and future perspective for wireless communication networks," *International Journal of Advanced Networking and Applications*, vol. 15, p. 5892–5907, 09 2023.
- [66] <https://en.wikipedia.org/wiki/MATLAB>.
- [67] <https://www.mathworks.com/products/matlab.html>.

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α: Κώδικός αρχείου UL_DL_with_interference_only_AN

```
%%%%%%%%% UL_DL_with_interference_only_AN %%%%%%%%%%%%%%

clc;
clear all;
close all;

%%%%%%%%% Input Parameters %%%%%%%%%%%%%%

number_points=6;

Total_energy_eff_RSRP_avg=zeros(1,number_points);

[Total_energy_eff_RE_avg,Total_energy_eff_PAOAN_avg,
 Total_energy_eff_MPL_avg]=deal (Total_energy_eff_RSRP_avg);

[Total_cell_throughput_MPL_DL_avg, Total_cell_throughput_RE_DL_avg,
 Total_cell_throughput_PAOAN_DL_avg,
 Total_cell_throughput_RSRP_DL_avg ]=deal (
 Total_energy_eff_RSRP_avg);

[Total_cell_throughput_MPL_UL_avg,Total_cell_throughput_PAOAN_UL_avg,
 Total_cell_throughput_RE_UL_avg,
 Total_cell_throughput_RSRP_UL_avg ]=deal (
 Total_energy_eff_RSRP_avg);

[UL_energy_eff_RSRP_avg,UL_energy_eff_PAOAN_avg, UL_energy_eff_RE_avg,
 , UL_energy_eff_MPL_avg ]=deal (Total_energy_eff_RSRP_avg);

[DL_energy_eff_RSRP_avg, DL_energy_eff_RE_avg,DL_energy_eff_PAOAN_avg,
 , DL_energy_eff_MPL_avg ]=deal (Total_energy_eff_RSRP_avg);

[Total_spectral_eff_RE_avg,Total_spectral_eff_PAOAN_avg,
 Total_spectral_eff_RSRP_avg,Total_spectral_eff_MPL_avg,
 P_AN_total_Watt_RSRP_UL_avg,P_AN_total_Watt_PAOAN_UL_avg,
 P_AN_total_Watt_RE_UL_avg, P_AN_total_Watt_MPL_UL_avg]=deal (
 Total_energy_eff_RSRP_avg);

[Spectral_eff_RE_UL_avg,Spectral_eff_PAOAN_UL_avg,
```

```

Spectral_eff_RSRP_UL_avg, Spectral_eff_MPL_UL_avg,
Spectral_eff_PAOAN_DL_avg, Spectral_eff_RE_DL_avg,
Spectral_eff_RSRP_DL_avg, Spectral_eff_MPL_DL_avg,
P_AN_total_Watt_PAOAN_DL_avg, P_AN_total_Watt_RSRP_DL_avg,
P_AN_total_Watt_RE_DL_avg, P_AN_total_Watt_MPL_DL_avg]=deal (
Total_energy_eff_RSRP_avg);

re=0;  %%index of each point of interest

initial=10;
step=20;
end_value=110;

for N=initial:step:end_value

    re=re+1;

    iteration=10;

    Total_energy_eff_RE_DL=zeros(1,iteration);

    [Total_energy_eff_RSRP_DL, Total_energy_eff_RE_DL,
     Total_energy_eff_PAOAN_UL, Total_energy_eff_MPL_DL]=deal(
     Total_energy_eff_RE_DL);

    [Total_DL_ener_saving_MPL, Total_DL_ener_saving_PAOAN,
     Total_DL_ener_saving_RSRP, Total_DL_ener_saving_RE ]=deal(
     Total_energy_eff_RE_DL);

    [Total_UL_ener_saving_MPL, Total_UL_ener_saving_PAOAN,
     Total_UL_ener_saving_RSRP, Total_UL_ener_saving_RE ]=deal(
     Total_energy_eff_RE_DL);

    [Total_energy_eff_RE_UL, Total_energy_eff_PAOAN_U,
     Total_energy_eff_RSRP_UL, Total_energy_eff_MPL_UL ]=deal(
     Total_energy_eff_RE_DL);

    [Total_UL_DL_ener_eff_MPL, Total_UL_DL_ener_eff_PAOAN,
     Total_UL_DL_ener_eff_RE, Total_UL_DL_ener_eff_RSRP ]=deal(
     Total_energy_eff_RE_DL);

```

```

[Total_cell_throughput_MPL_DL,Total_cell_throughput_PAOAN_DL,
  Total_cell_throughput_RE_DL, Total_cell_throughput_RSRP_DL]=
  deal(Total_energy_eff_RE_DL);

[Total_cell_throughput_MPL_UL,Total_cell_throughput_PAOAN_UL,
  Total_cell_throughput_RE_UL, Total_cell_throughput_RSRP_UL ]=
  deal(Total_energy_eff_RE_DL);

[ Sum_RBs_used_RE_DL, Sum_RBs_used_RSRP_DL,Sum_RBs_used_PAOAN_DL,
  Sum_RBs_used_MPL_DL, Sum_RBs_used_RE_UL,
  Total_energy_eff_PAOAN_DL,Sum_RBs_used_PAOAN_UL,
  Sum_RBs_used_RSRP_UL, Sum_RBs_used_MPL_UL ]=deal(
  Total_energy_eff_RE_DL);

[ P_AN_total_Watt_RE_UL,P_AN_total_Watt_PAOAN_UL,
  P_AN_total_Watt_MPL_UL, P_AN_total_Watt_RSRP_UL ]=deal(
  Total_energy_eff_RE_DL);

[P_AN_total_Watt_RE_tot, P_AN_total_Watt_RSRP_tot,
  P_AN_total_Watt_PAOAN_tot, P_AN_total_Watt_MPL_tot ]=deal(
  Total_energy_eff_RE_DL);

[ P_AN_total_Watt_RE_DL, P_AN_total_Watt_MPL_DL,
  P_AN_total_Watt_PAOAN_DL, P_AN_total_Watt_RSRP_DL ]=deal(
  Total_energy_eff_RE_DL);

[ Spectral_eff_RE_DL, Spectral_eff_RSRP_DL,Spectral_eff_PAOAN_DL,
  Spectral_eff_MPL_DL, Spectral_eff_RE_UL,
  Spectral_eff_RSRP_UL,Spectral_eff_PAOAN_UL,
  Spectral_eff_MPL_UL ]=deal(Total_energy_eff_RE_DL);

[Total_UL_DL_spec_eff_MPL,Total_UL_DL_spec_eff_PAOAN,
  Total_UL_DL_spec_eff_RE, Total_UL_DL_spec_eff_RSRP ]=deal(
  Total_energy_eff_RE_DL);

time=0;
for iter=1:iteration
  tic
  clc
  step2=1;
  stop=iteration;
  sprintf('Time left %2.2f m in iteration %d of point %d',((

```

```

        stop+step2-iter)*time/step2)/60,iter,re)

clearvars column_vector

Ptmacro_dBm=46; %dBm;
Ptmacro=(10^(Ptmacro_dBm/10))/1000; %Maximum transmission
    power of a macrocell/gNodeB (gNB) in Watts (~40W);

Ptsc_dBm=30; %dBm;
Ptsc=(10^(Ptsc_dBm/10))/1000; %Maximum transmission power of
    an outdoor small cell/Home gNB in Watts (~1W);

Ptu_dBm=23; %dBm;
Ptu=(10^(Ptu_dBm/10))/1000; %Maximum transmission power of a
    UE in Watts;

NF=9; %dB Noise Figure
k_T_B=-132.24; %% dBm noise for a subcarrier (15kHz)
N_watt=(10^((k_T_B+NF)/10))/1000;

NF_UL=7; %dB
k_T_B_UL=-121.45; %dBm noise for a PRB

N_antennas=2; %the number of antennas in every base station

BW_per_RB_pair=2*180*10^3; %Hz
number_of_SC_RBs=50; % RBs for each SC (50 physical resource
    blocks (PRBs)- 10 MHz channel)
number_of_gNB_RBs=50; % RBs for the gNB sector (10 MHz
    channel)

N_clusters=2;
cluster_center_x=zeros(1,N_clusters);
cluster_center_y=zeros(1,N_clusters);
number_of_SCs_cluster=4; %every cluster has 4 SCs
cells=number_of_SCs_cluster*N_clusters+1;

available_resources(1)=number_of_gNB_RBs;
available_resources(2:cells)=number_of_SC_RBs;

SINR_target=-10;%dB
SINR_target_UL=7;%dB

```

```

fading=zeros(N,cells);

X=zeros(1,cells); %%The index 1 is for the gNB and the rest
for the SCs
Y=zeros(1,cells);

P=zeros(1,cells);
[P_subcarrier, P_subcarrier_dBm, P_RB_pair, P_RB_pair_UL,
P_RB_pair_UL_watt]=deal(P);

GBR=1*N ;% percentage of users with GBR of data_rate_user
GBR_1=0.600*N ;% percentage of users with GBR of
data_rate_user
GBR_2=0.200*N ;% percentage of users with GBR of
data_rate_user
GBR_3=0.200*N ;% percentage of users with GBR of
data_rate_user

set1=1:N;

id_GBR_1 = datasample(set1,GBR_1,'Replace',false);
set2 = setdiff(set1,id_GBR_1);
id_GBR_2 = datasample(set2,GBR_2,'Replace',false);
set3 = setdiff(set2,id_GBR_2);
id_GBR_3 = datasample(set3,GBR_3,'Replace',false);

data_rate_user_UL=zeros(1,N);
data_rate_user_DL=zeros(1,N);

for i=1:GBR
    if any( id_GBR_1(:)==i )
        data_rate_user_DL(i)=0.512*10^6; data_rate_user_UL(i)
        =0.512*10^6; %1 Mbps , fixed rate for GBR
    else if any( id_GBR_2(:)==i )
        data_rate_user_DL(i)=0.728*10^6;
        data_rate_user_UL(i)=1.024*10^6;%1 Mbps ,
fixed rate for GBR %1 Mbps , fixed rate for
GBR
    else if any( id_GBR_3(:)==i )
        data_rate_user_DL(i)=1.024*10^6;
        data_rate_user_UL(i)=0.256*10^6;%1 Mbps ,

```

```

                                fixed rate for GBR
                                end
                                end
                                end

end

UES_per_cluster=zeros(1,N_clusters);
UES_per_cluster(:)=ceil(((2*N)/3)/N_clusters);

% Macrocell Position
X(1)=0;           %X of Macro
Y(1)=500;        %Y of Macro

%%Macrocell radius equal to R (m)
R=500; %gNB radius

% Small Cells' Positions

r_SC_min=20; %minimum distance between two SCs
r2=70; %hotspot radius for UE dropping in a cluster

r_cluster=50; % radius for SC dropping in a cluster
r_border=max(r_cluster,r2); %%maximum radius in order for
    the UEs not to be outsideof the macrocell sector
                                %%area when dropping them in
                                hotspots

UX=zeros(1,N);
UY=zeros(1,N);

for y=1:(N_clusters) %Uniformly distributed cluster centers
    not_done = true;
    while not_done

        cluster_center_x(y)= (R) *rand(1);
        cluster_center_y(y)= (Y(1)-R)+2*R *rand(1);

        not_done = ((cluster_center_y(y))+sqrt(3)*
            cluster_center_x(y)-Y(1))<0 || ((cluster_center_y(
            y))-sqrt(3)*cluster_center_x(y)-Y(1))>0 || (

```

```

cluster_center_x(y)^2+(cluster_center_y(y)-Y(1))
^2>R^2 || (cluster_center_x(y))^2+(
cluster_center_y(y)-Y(1))^2<105^2 ...
||((cluster_center_y(y)+r_border)+sqrt(3)*
cluster_center_x(y)+r_border)-Y(1))<0 || ((
cluster_center_y(y)+r_border)-sqrt(3)*
cluster_center_x(y)+r_border)-Y(1))>0 || (
cluster_center_x(y)+r_border)^2+(
cluster_center_y(y)+r_border-Y(1))^2>R^2 ...
||((cluster_center_y(y)-r_border)+sqrt(3)*
cluster_center_x(y)-r_border)-Y(1))<0 || ((
cluster_center_y(y)-r_border)-sqrt(3)*
cluster_center_x(y)-r_border)-Y(1))>0 || (
cluster_center_x(y)-r_border)^2+(
cluster_center_y(y)-r_border-Y(1))^2>R^2 ...
||((cluster_center_y(y)-r_border)+sqrt(3)*
cluster_center_x(y)+r_border)-Y(1))<0 || ((
cluster_center_y(y)-r_border)-sqrt(3)*
cluster_center_x(y)+r_border)-Y(1))>0 || (
cluster_center_x(y)+r_border)^2+(
cluster_center_y(y)-r_border-Y(1))^2>R^2 ...
||((cluster_center_y(y)+r_border)+sqrt(3)*
cluster_center_x(y)-r_border)-Y(1))<0 || ((
cluster_center_y(y)+r_border)-sqrt(3)*
cluster_center_x(y)-r_border)-Y(1))>0 || (
cluster_center_x(y)-r_border)^2+(
cluster_center_y(y)+r_border-Y(1))^2>R^2 ;

if not_done== false
    for k=1:(y-1)
        not_done=not_done || (cluster_center_x(y)-
            cluster_center_x(k))^2+(cluster_center_y(y)
            -cluster_center_y(k))^2<(2*r_cluster)^2;
        %%% 2*r_cluster=2*50 minimum distance between
            two cluster centers
    end
end
end

end

m=2;
for y=1:(N_clusters) %Uniformly distributed SCs in a cluster

```

```

while m<=(y*number_of_SCs_cluster+1)
    not_done = true;
    while not_done

        X(m)= 2*r_cluster *rand(1)+ (cluster_center_x(y)-
            r_cluster);
        Y(m)= 2*r_cluster *rand(1)+ (cluster_center_y(y)-
            r_cluster);
        not_done = (X(m)-cluster_center_x(y))^2+(Y(m)-
            cluster_center_y(y))^2>r_cluster^2;

        if not_done== false
            for i=2:(m-1)
                not_done= not_done || (X(m)-X(i))^2+(Y(m)-Y
                    (i))^2<r_SC_min^2;
                %%The SCs should not be closer to each
                    other than 20m
            end
        end
    end
    m=m+1;

end

end

[association_RSRP, association_MPL, association_PAOAN,
    association_RE ]=deal(fading);
[I_dB, I_tot, I, I_Asc, I_Asc_dB, I_Bsc_dB, I_Bsc, I_Csc,
    I_Csc_dB, RSRP, RSRP_UL, MPL, SNR, RE, nodeDistance,
    pathloss, pathloss_Okumura, differences_RSRP,
    differences_MPL, differences_RE, differences_SNR, SNR_RSRP
    , SINR_UL_watt, SINR_watt, SINR_RSRP, PL_dB, PL]=deal(
    fading);

% Power Consumption in a subframe
P(1)=Pmacro;
P_subcarrier(1)=(P(1)/N_antennas)/(number_of_gNB_RB*12); %
    Power per subcarrier
P_subcarrier_dBm(1)=10*log10(P_subcarrier(1)*1000)+17; %Power

```

```

        per subcarrier dBm , antenna gain and cable loss
P_RB_pair(1)=((P(1)/N_antennas))/(number_of_gNB_RB_s); %Power
per RB pair
for i=2:cells
    P(i)=Ptsc;
    P_subcarrier(i)=(P(i)/N_antennas)/(number_of_SC_RB_s*12);
        %Power per subcarrier
    P_subcarrier_dBm(i)=10*log10(P_subcarrier(i)*1000)+5; %
        Power per subcarrier dBm ,5dB antenna gain and 0 dB
        cable loss
    P_RB_pair(i)=((P(i)/N_antennas)/(number_of_SC_RB_s)); %dBm
end

% %Users' Positions

m=1;
for y=1:(N_clusters) %Hotspot users with radius r2
    for k=1:UEs_per_cluster(y) %UEs per cluster define how
many UEs will be included in a cluster
        not_done = true;
        while not_done

            UX(m)= 2*r2 *rand(1)+ (cluster_center_x(y)-r2);
            UY(m)= 2*r2 *rand(1)+ (cluster_center_y(y)-r2);
            not_done = (UX(m)-cluster_center_x(y))^2+(UY(m)-
                cluster_center_y(y))^2>r2^2;

            if not_done== false
                for i=2:cells
                    not_done= not_done ||(UX(m)-X(i))^2+(UY(m)
                        )-Y(i))^2<5^2;
                    %%minimum distance between UE and SC is 5
                    m
                end
            end
        end
        m=m+1;
    end
end
end
end

```

```

UEs_in_clusters= sum(UEs_per_cluster(:));

%% Uniformly distributed
for y=(UEs_in_clusters+1):N % UEs that are uniformly
    distributed
        not_done = true;

        while not_done

            UX(y)= (R) *rand(1);
            UY(y)= (Y(1)-R)+2*R *rand(1);

            not_done = ((UY(y))+sqrt(3)*UX(y)-Y(1))<0 || ((UY(y))
                -sqrt(3)*UX(y)-Y(1))>0 || (UX(y))^2+(UY(y)-Y(1))
                ^2>R^2 || (UX(y))^2+(UY(y)-Y(1))^2<35^2;
            %%minimum distance between gNB and UE is 35m

            if not_done== false
                for i=2:cells
                    not_done= not_done ||(UX(y)-X(i))^2+(UY(y)-Y(
                        i))^2<5^2;
                end
            end
        end
    end

end

plot(X,Y,'+');
hold all;
plot(UX,UY,'. ');
axis([-10 600 -10 1000]);
hold all;
x1=[0, R/2];

y1=[Y(1), Y(1)+(R*sqrt(3))/2];

plot (x1, y1, '-');
hold all;
y2=[Y(1), Y(1)-(R*sqrt(3))/2];
plot (x1, y2, '-');

```

```

legend({'SCs','UEs'},'Location','NorthEast')
xlabel('gNB radius (m)')
ylabel('gNB position (m) ')

f=2*10^3; %%measured in MHz, 2 GHz

h_SC=2.5; %% 2.5m
h_gNB=25; %% m
h_M=1.5; %%m

C_H= 0.8+ (1.1*log10(f)- 0.7)*h_M -1.56*log10(f);

RE_constant=13;%%dB %% RE bias, TS 36.842 page 9

%%%%%%First association rule: Maximum RSRP (downlink)

%ELECTROMAGNETIC HANDLING
%matrix G(i) is the channel gain of user(i)per time slot (
    real number

%----- CASE I, FIXED PRE-DEFINED CHANNELS
-----

%Nodes' Distance from the cells center (in (m))
% nodeDistance is NxN matrix [Users x Cells], node: ID=1 is
    Macro
for i=1:N
    for j=1:cells
        nodeDistance(i,j)=(sqrt(((UX(i)-X(j))^2)+(UY(i)-Y(j))^2)); %%in m
        if j==1
            pathloss_Okumura(i,j)= 69.55+26.16*log10(f)
                -13.82*log10(h_gNB)-C_H+(44.9-6.55*log10(h_gNB)
                    ))*log10(nodeDistance(i,j)/1000);

            m = 1; %% for mean =0dB
            v = 10^(8/10); %%% for variance= 4 dB
            mu = log((m^2)/sqrt(v+m^2));
            sigma = sqrt(log(v/(m^2)+1));
            fading(i,j)=lognrnd(mu,sigma);

        else

```

```

        pathloss_Okumura(i,j)= 69.55+26.16*log10(f)
            -13.82*log10(h_SC)+(44.9-6.55*log10(h_SC))*
            log10(nodeDistance(i,j)/1000);

        m = 1; %% for mean =0dB
        v = 10^(10/10); %%% for variance= 4 dB
        mu = log((m^2)/sqrt(v+m^2));
        sigma = sqrt(log(v/(m^2)+1));
        fading(i,j)=lognrnd(mu,sigma);

    end
end
end

%%%% Calculation of reference signal received power (RSRP)
for i=1:N
    for j=1:cells
        RSRP(i,j)= P_subcarrier_dBm(j)-pathloss_Okumura(i,j)
            -10*log10(fading(i,j)); % %%%%dBm
    end
end

%%%Interference to be based on the frequency allocation
scheme
%%%that is used (it has to include the sum of the power )
%%Three cases

for i=1:N
    for j=1:cells
        I(i,j)=(10^(RSRP(i,j)/10))/1000; %%RSRP in Watt
    end
end

%%% A) Both gNB and SCs use the same resources

for i=1:N
    for j=1:cells
        B = I(i,:);
        B(:,j) = [];
        I_Asc(i,j)=sum(B)/(N_watt);
        I_Asc_dB(i,j)=10*log10(I_Asc(i,j)+1); %%%%%
    end
end

```

```

        end
    end

    %%% B) All SCs use the same resources- but not the gNB

    for i=1:N
        for j=2:cells
            B = I(i,2:cells);
            B(:,j-1) = [];
            I_Bsc(i,j)=sum(B)/(N_watt);
            I_Bsc_dB(i,j)=10*log10(I_Bsc(i,j)+1); %%%%%%
        end
    end

    %%% C) Only one SC of each cluster uses the same resources
    with
    %%%% exactly one SC of the other clusters

    r_interf=zeros(number_of_SCs_cluster,number_of_SCs_cluster);

    for j=2:number_of_SCs_cluster+1
        for m=number_of_SCs_cluster+2:2*number_of_SCs_cluster+1
            r_interf(j-1,m-(number_of_SCs_cluster+1))=(sqrt(((X(j)
                )-X(m))^2)+(Y(j)-Y(m))^2));
        end
    end

    [sort_r_inter, pos]=sortrows(r_interf,[-1, -2, -3, -4]);

    for i=1:N
        for j=2:cells
            %fixed frequency reuse (soft frequency reuse schemes
            should be also taken into account)
            if j<=(number_of_SCs_cluster+1)

                I_Csc(i,j)=I(i,(number_of_SCs_cluster+1)+pos(j-1)
                    )/(N_watt);

            else

                I_Csc(i,j)=I(i,pos(j-(number_of_SCs_cluster+1))
                    +1)/(N_watt);
            end
        end
    end

```

```

        end
        I_Csc_dB(i,j)=10*log10(I_Csc(i,j)+1);
    end
end

%%%%%%%%%
alpha=1;
for i=1:N
    for j=1:cells
        SNR_RSRP(i,j)=RSRP(i,j)-k_T_B-NF;
        SINR_RSRP(i,j)=SNR_RSRP(i,j)-I_Csc_dB(i,j);

        if j~=1
            RE(i,j)=RSRP(i,j)+RE_constant;
        else
            RE(i,j)=RSRP(i,j);
        end

        PL_dB(i,j)=alpha*(pathloss_Okumura(i,j)+10*log10(
            fading(i,j)));
        P_RB_pair_UL(i,j)= max((SINR_target_UL+k_T_B_UL+NF_UL
            +PL_dB(i,j)), -40); % %%%dBm antenna gain 5
            dBi
        P_RB_pair_UL_watt(i,j)=(10^(P_RB_pair_UL(i,j)/10))
            /1000;
        MPL(i,j)=pathloss_Okumura(i,j)+10*log10(fading(i,j));
    end
end

N_users_MPL=zeros(1,cells);
[N_users_RSRP, N_users_RE, N_users_PA0AN]=deal(N_users_MPL);

spectral_efficiency=zeros(N,cells);
spectral_efficiency_UL=zeros(N,cells);

for i=1:N
    for j=1:cells
        SINR_watt(i,j)=(10^(SINR_RSRP(i,j)/10));
        spectral_efficiency(i,j)=log2(1+SINR_watt(i,j));
    end
end

```

```

        end
    end

    SINR_RSRP_UL=zeros(N,cells);
    SINR_RSRP_UL(:,:)=SINR_target_UL(:,:);

    for i=1:N
        for j=1:cells
            SINR_UL_watt(i,j)=(10^(SINR_RSRP_UL(i,j)/10));
            spectral_efficiency_UL(i,j)=log2(1+SINR_UL_watt(i,j))
                ;
        end
    end

    throughput_cell_MPL_DL=zeros(1,cells);
    [throughput_cell_RSRP_DL,throughput_cell_DL,
        throughput_cell_UL, throughput_cell_PAOAN_UL,
        throughput_cell_RE_DL,throughput_cell_PAOAN_DL,
        throughput_cell_MPL_UL, throughput_cell_RSRP_UL,
        throughput_cell_RE_UL ]=deal(throughput_cell_MPL_DL);

    [BW_cell_need_MPL_DL, BW_cell_need_RSRP_DL,
        BW_cell_need_PAOAN_DL, BW_cell_need_RE_DL,
        BW_cell_need_PAOAN_UL, BW_cell_need_RE_UL,
        BW_cell_need_MPL_UL, BW_cell_need_RSRP_UL ]=deal(
        throughput_cell_MPL_DL);

    BW_need=zeros(N,cells);
    [BW_need_actual, BW_need_UL, BW_need_actual_UL]=deal(BW_need)
        ;

    for i=1:N
        for j=1:cells
            BW_need(i,j)=ceil(((data_rate_user_DL(i))/(
                spectral_efficiency(i,j))/BW_per_RB_pair));
            BW_need_actual(i,j)=(((data_rate_user_DL(i))/(
                spectral_efficiency(i,j))/BW_per_RB_pair));
            BW_need_UL(i,j)=ceil(((data_rate_user_UL(i))/(
                spectral_efficiency_UL(i,j))/BW_per_RB_pair));
            BW_need_actual_UL(i,j)=(((data_rate_user_UL(i))/(

```

```

        spectral_efficiency_UL(i,j))/BW_per_RB_pair));
    end
end

%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

[classification_RB, classification_id]=sort(BW_need_actual
    (:,:),2); %%This is important

differences=zeros(N,cells-1);
actual_differences=zeros(N,cells-1);

for i=1:N
    for j=1:cells-1
        %%Difference between the number of RBs needed
        differences(i,j)=ceil(classification_RB(i,j+1))-ceil(
            classification_RB(i,j));
        actual_differences(i,j)=classification_RB(i,j+1)-
            classification_RB(i,j);

    end
end

for i=1:cells-1
    column_vector(i)=(-i);
end

[~, position_dif]=sortrows(actual_differences, column_vector);

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%% RSRP
%%
totally_unsatisfied_user_RSRP=0;
for k=1:N
    i=position_dif(k);
    %% I start the association from the UEs having the
    fewest candidate cells
    variable=1;
    user_associated=0;
    [num1, idx1] = sort(RSRP(i,:), 'descend');

```

```

while user_associated==0
    j=idx1(variable);
    if (BW_cell_need_RSRP_DL(j)+BW_need(i,j))<=
        available_resources(j)  && (BW_cell_need_RSRP_UL(j)
        )+BW_need_UL(i,j))<=available_resources(j)&& ((
        BW_need_UL(i,j)*P_RB_pair_UL_watt(i,j))<=Ptu)

        BW_cell_need_RSRP_DL(j)=BW_cell_need_RSRP_DL(j)+
            BW_need(i,j);
        throughput_cell_RSRP_DL(j)=
            throughput_cell_RSRP_DL(j)+data_rate_user_DL(i
            );
        BW_cell_need_RSRP_UL(j)=BW_cell_need_RSRP_UL(j)+
            BW_need_UL(i,j);
        throughput_cell_RSRP_UL(j)=
            throughput_cell_RSRP_UL(j)+data_rate_user_UL(i
            );
        association_RSRP(i,j)=1;
        user_associated=1;
        N_users_RSRP(j)=N_users_RSRP(j)+1;

    else
        if variable<cells
            variable=variable+1;
        else
            totally_unsatisfied_user_RSRP=
                totally_unsatisfied_user_RSRP+1;
            user_associated=1;

        end
    end
end
end
end

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%% MPL
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

totally_unsatisfied_user_MPL=0;

for k=1:N
    i=position_dif(k);

```

```

variable=1;
user_associated=0;
[num2, idx2] = sort(MPL(i,:));
while user_associated==0
    j=idx2(variable);
    if (BW_cell_need_MPL_DL(j)+BW_need(i,j))<=
        available_resources(j) && SINR_RSRP(i,j)>=
        SINR_target &&(BW_cell_need_MPL_UL(j)+BW_need_UL(i
        ,j))<=available_resources(j)&& ((BW_need_UL(i,j)*
        P_RB_pair_UL_watt(i,j))<=Ptu)
        BW_cell_need_MPL_DL(j)=BW_cell_need_MPL_DL(j)+
            BW_need(i,j);
        BW_cell_need_MPL_UL(j)=BW_cell_need_MPL_UL(j)+
            BW_need_UL(i,j);
        throughput_cell_MPL_DL(j)=throughput_cell_MPL_DL(
            j)+data_rate_user_DL(i);
        throughput_cell_MPL_UL(j)=throughput_cell_MPL_UL(
            j)+data_rate_user_UL(i);
        association_MPL(i,j)=1;
        N_users_MPL(j)=N_users_MPL(j)+1;
        user_associated=1;
    else if variable<cells
        variable=variable+1;
    else
        totally_unsatisfied_user_MPL=
            totally_unsatisfied_user_MPL+1;
        user_associated=1;
    end
end

end

end

end

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%% RE
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
totally_unsatisfied_user_RE=0;
for k=1:N
    i=position_dif(k);

    variable=1;
    user_associated=0;

```

```

[num3, idx3] = sort(RE(i,:), 'descend');
while user_associated==0
    j=idx3(variable);
    if (BW_cell_need_RE_DL(j)+BW_need(i,j))<=
        available_resources(j) && SINR_RSRP(i,j)>=
        SINR_target &&(BW_cell_need_RE_UL(j)+BW_need_UL(i,
        j))<=available_resources(j) && ((BW_need_UL(i,j)*
        P_RB_pair_UL_watt(i,j))<=Ptu)
        BW_cell_need_RE_DL(j)=BW_cell_need_RE_DL(j)+
            BW_need(i,j);
        BW_cell_need_RE_UL(j)=BW_cell_need_RE_UL(j)+
            BW_need_UL(i,j);
        throughput_cell_RE_DL(j)=throughput_cell_RE_DL(j)
            +data_rate_user_DL(i);
        throughput_cell_RE_UL(j)=throughput_cell_RE_UL(j)
            +data_rate_user_UL(i);
        association_RE(i,j)=1;
        user_associated=1;
        N_users_RE(j)=N_users_RE(j)+1;
    else
        if variable<cells
            variable=variable+1;
        else
            totally_unsatisfied_user_RE=
                totally_unsatisfied_user_RE+1;
            user_associated=1;
        end
    end

end

end

end

```

```

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%% proposed algorithm PAOAN
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

```

```

totally_unsatisfied_user_PAOAN=0;

```

```

for k = 1:N
    i = position_dif(k);

    variable = 1;

```

```

user_associated = 0;
[num4, idx4] = sort(0.7*MPL(i,:) - 0.3*RSRP(i,:), 'ascend
    ');

while user_associated==0
    j=idx4(variable);
    if (BW_cell_need_PAOAN_DL(j)+BW_need(i,j))<=
        available_resources(j) && SINR_RSRP(i,j)>=
        SINR_target &&(BW_cell_need_PAOAN_UL(j)+
        BW_need_UL(i,j))<=available_resources(j) && ((
        BW_need_UL(i,j)*P_RB_pair_UL_watt(i,j))<=Ptu)
        BW_cell_need_PAOAN_DL(j)=
            BW_cell_need_PAOAN_DL(j)+BW_need(i,j);
        BW_cell_need_PAOAN_UL(j)=
            BW_cell_need_PAOAN_UL(j)+BW_need_UL(i,j)
        ;
        throughput_cell_PAOAN_DL(j)=
            throughput_cell_PAOAN_DL(j)+
            data_rate_user_DL(i);
        throughput_cell_PAOAN_UL(j)=
            throughput_cell_PAOAN_UL(j)+
            data_rate_user_UL(i);
        association_PAOAN(i,j)=1;
        user_associated=1;
        N_users_PAOAN(j)=N_users_PAOAN(j)+1;

        % Update throughput for the cell
        throughput_cell_DL(j) = throughput_cell_DL(j) +
            data_rate_user_DL(i);
        throughput_cell_UL(j) = throughput_cell_UL(j) +
            data_rate_user_UL(i);

    else
        if variable < cells % If the user cannot be
            associated with cell j, try the next cell
            variable = variable + 1;
        else
            % If no cells are available, mark the
            user as unsatisfied
            totally_unsatisfied_user_PAOAN =
                totally_unsatisfied_user_PAOAN + 1;
            user_associated = 1;
        end
    end
end

```

```

end
end
end
end

```

```

%%%%%%%%%%Calculation of link throughput for UL and DL for all
algorithms

```

```

%%Number of associated UEs
N_users_associated_MPL=sum(N_users_MPL(:));%-
    true_unsatisfied_users_MPL(:));
N_users_associated_RE=sum(N_users_RE(:));%-
    true_unsatisfied_users_RE(:));
N_users_associated_RSRP=sum(N_users_RSRP(:));%-
    true_unsatisfied_users_RSRP(:));
N_users_associated_PAOAN=sum(N_users_PAOAN(:));%-
    true_unsatisfied_users_PAOAN(:));
%totally_unsatisfied_user_PAOAN

```

```

%%% Calculation of total cell throughput for UL and DL for
all algorithms

```

```

Total_cell_throughput_MPL_DL(iter)=sum(throughput_cell_MPL_DL
(:));
Total_cell_throughput_RSRP_DL(iter)=sum(
    throughput_cell_RSRP_DL(:));
Total_cell_throughput_RE_DL(iter)=sum(throughput_cell_RE_DL
(:));
Total_cell_throughput_PAOAN_DL(iter)=sum(
    throughput_cell_PAOAN_DL(:));

Total_cell_throughput_MPL_UL(iter)=sum(throughput_cell_MPL_UL
(:));
Total_cell_throughput_RSRP_UL(iter)=sum(
    throughput_cell_RSRP_UL(:));
Total_cell_throughput_RE_UL(iter)=sum(throughput_cell_RE_UL
(:));
Total_cell_throughput_PAOAN_UL(iter)=sum(
    throughput_cell_PAOAN_UL(:));

```

```

%%%%%%%%% Calculation of total AN consumption in DL

```

```

P_AN_Watt_RE=(BW_cell_need_RE_DL(:)).*P_RB_pair(:);
P_AN_total_Watt_RE_DL(iter)=sum(P_AN_Watt_RE);

P_AN_Watt_RSRP=(BW_cell_need_RSRP_DL(:)).*P_RB_pair(:);
P_AN_total_Watt_RSRP_DL(iter)=sum(P_AN_Watt_RSRP);

P_AN_Watt_MPL=(BW_cell_need_MPL_DL(:)).*P_RB_pair(:);
P_AN_total_Watt_MPL_DL(iter)=sum(P_AN_Watt_MPL);

P_AN_Watt_PAOAN=(BW_cell_need_PAOAN_DL(:)).*P_RB_pair(:);
P_AN_total_Watt_PAOAN_DL(iter)=sum(P_AN_Watt_PAOAN);

```

%%%%%%%%%% Calculation of total AN consumption in UL

```

for i=1:N
    for j=1:cells
        if association_RE(i,j)==1
            P_AN_total_Watt_RE_UL(iter)=P_AN_total_Watt_RE_UL
                (iter)+P_RB_pair_UL_watt(i,j) .*BW_need_UL(i,j)
                );
        end
    end
end

for i=1:N
    for j=1:cells
        if association_RSRP(i,j)==1
            P_AN_total_Watt_RSRP_UL(iter)=
                P_AN_total_Watt_RSRP_UL(iter)+
                P_RB_pair_UL_watt(i,j) .*BW_need_UL(i,j);
        end
    end
end

for i=1:N
    for j=1:cells
        if association_MPL(i,j)==1
            P_AN_total_Watt_MPL_UL(iter)=
                P_AN_total_Watt_MPL_UL(iter)+P_RB_pair_UL_watt
                (i,j) .*BW_need_UL(i,j);
        end
    end
end

```

```

        end
    end
end

for i=1:N
    for j=1:cells
        if association_PAOAN(i,j)==1
            P_AN_total_Watt_PAOAN_UL(iter)=
                P_AN_total_Watt_PAOAN_UL(iter)+
                P_RB_pair_UL_watt(i,j) .*BW_need_UL(i,j);
        end
    end
end
end

```

%%%%%%%%%% Calculation of total AN consumption as a sum of UL and DL

```

P_AN_total_Watt_RE_tot(iter)=P_AN_total_Watt_RE_DL(iter)+
    P_AN_total_Watt_RE_UL(iter);

P_AN_total_Watt_RSRP_tot(iter)=P_AN_total_Watt_RSRP_DL(iter)+
    P_AN_total_Watt_RSRP_UL(iter);

P_AN_total_Watt_MPL_tot(iter)=P_AN_total_Watt_MPL_DL(iter)+
    P_AN_total_Watt_MPL_UL(iter);

P_AN_total_Watt_PAOAN_tot(iter)=P_AN_total_Watt_PAOAN_DL(iter)
    +P_AN_total_Watt_PAOAN_UL(iter);

```

%

%%%

```

%%%Total number of PRBs pairs used in DL
Sum_RBs_used_MPL_DL(iter)= sum(BW_cell_need_MPL_DL);
Sum_RBs_used_RE_DL(iter)= sum(BW_cell_need_RE_DL);
Sum_RBs_used_RSRP_DL(iter)= sum(BW_cell_need_RSRP_DL);
Sum_RBs_used_PAOAN_DL(iter)= sum(BW_cell_need_PAOAN_DL);

%%%Total number of PRBs pairs used in UL
Sum_RBs_used_MPL_UL(iter)= sum(BW_cell_need_MPL_UL);
Sum_RBs_used_RE_UL(iter)= sum(BW_cell_need_RE_UL);

```

```

Sum_RB_s_used_RSRP_UL(iter)= sum(BW_cell_need_RSRP_UL);
Sum_RB_s_used_PAOAN_UL(iter)= sum(BW_cell_need_PAOAN_UL);

%%%%%%%% Calculation of total DL energy efficiency (bits/
Joule)
Total_energy_eff_MPL_DL(iter)=(sum(throughput_cell_MPL_DL(:))
/(P_AN_total_Watt_MPL_DL(iter)));
Total_energy_eff_RSRP_DL(iter)=(sum(throughput_cell_RSRP_DL
(:))/(P_AN_total_Watt_RSRP_DL(iter)));
Total_energy_eff_RE_DL(iter)=(sum(throughput_cell_RE_DL(:))/(
P_AN_total_Watt_RE_DL(iter)));
Total_energy_eff_PAOAN_DL(iter)=(sum(throughput_cell_PAOAN_DL
(:))/(P_AN_total_Watt_PAOAN_DL(iter)));

%% Calculation of total DL power saving (Joules/bit)
Total_DL_ener_saving_MPL(iter)=(P_AN_total_Watt_MPL_DL(iter))
/(sum(throughput_cell_MPL_DL(:)));
Total_DL_ener_saving_RSRP(iter)=(P_AN_total_Watt_RSRP_DL(iter)
)/(sum(throughput_cell_RSRP_DL(:)));
Total_DL_ener_saving_RE(iter)=(P_AN_total_Watt_RE_DL(iter))/(
sum(throughput_cell_RE_DL(:)));
Total_DL_ener_saving_PAOAN(iter)=(P_AN_total_Watt_PAOAN_DL(
iter))/(sum(throughput_cell_PAOAN_DL(:)));

%% Calculation of total UL energy efficiency (bits/Joule)
Total_energy_eff_MPL_UL(iter)=(sum(throughput_cell_MPL_UL(:))
/(P_AN_total_Watt_MPL_UL(iter)));
Total_energy_eff_RSRP_UL(iter)=(sum(throughput_cell_RSRP_UL
(:))/(P_AN_total_Watt_RSRP_UL(iter)));
Total_energy_eff_RE_UL(iter)=(sum(throughput_cell_RE_UL(:))/(
P_AN_total_Watt_RE_UL(iter)));
Total_energy_eff_PAOAN_UL(iter)=(sum(throughput_cell_PAOAN_UL
(:))/(P_AN_total_Watt_PAOAN_UL(iter)));

%% Calculation of total UL power saving (Joules/bit)
Total_UL_ener_saving_MPL(iter)=(P_AN_total_Watt_MPL_UL(iter))
/(sum(throughput_cell_MPL_UL(:)));
Total_UL_ener_saving_RSRP(iter)=(P_AN_total_Watt_RSRP_UL(iter)
)/(sum(throughput_cell_RSRP_UL(:)));
Total_UL_ener_saving_RE(iter)=(P_AN_total_Watt_RE_UL(iter))/(
sum(throughput_cell_RE_UL(:)));
Total_UL_ener_saving_PAOAN(iter)=(P_AN_total_Watt_PAOAN_UL(
iter))/(sum(throughput_cell_PAOAN_UL(:)));

```

```

%%% Calculation of total UL and DL energy efficiency (bits/
    Joule)
Total_UL_DL_ener_eff_MPL(iter)=(sum(throughput_cell_MPL_UL(:)
    )+sum(throughput_cell_MPL_DL(:)))/(P_AN_total_Watt_MPL_UL(
    iter)+P_AN_total_Watt_MPL_DL(iter));
Total_UL_DL_ener_eff_RE(iter)=(sum(throughput_cell_RE_UL(:))+
    sum(throughput_cell_RE_DL(:)))/(P_AN_total_Watt_RE_UL(iter)
    )+P_AN_total_Watt_RE_DL(iter));
Total_UL_DL_ener_eff_RSRP(iter)=(sum(throughput_cell_RSRP_UL
    (:))+sum(throughput_cell_RSRP_DL(:)))/(
    P_AN_total_Watt_RSRP_UL(iter)+P_AN_total_Watt_RSRP_DL(iter)
    ));
Total_UL_DL_ener_eff_PAOAN(iter)=(sum(
    throughput_cell_PAOAN_UL(:))+sum(throughput_cell_PAOAN_DL
    (:)))/(P_AN_total_Watt_PAOAN_UL(iter)+
    P_AN_total_Watt_PAOAN_DL(iter));

%%% Calculation of DL spectral efficiency (bits/s/Hz)
Spectral_eff_RE_DL(iter)=Total_cell_throughput_RE_DL(iter)./(
    Sum_RBs_used_RE_DL(iter).*BW_per_RB_pair);
Spectral_eff_RSRP_DL(iter)=Total_cell_throughput_RSRP_DL(iter)
    )./(Sum_RBs_used_RSRP_DL(iter).*BW_per_RB_pair);
Spectral_eff_MPL_DL(iter)=Total_cell_throughput_MPL_DL(iter)
    )./(Sum_RBs_used_MPL_DL(iter).*BW_per_RB_pair);
Spectral_eff_PAOAN_DL(iter)=Total_cell_throughput_PAOAN_DL(
    iter)./(Sum_RBs_used_PAOAN_DL(iter).*BW_per_RB_pair);

%%% Calculation of UL spectral efficiency (bits/s/Hz)
Spectral_eff_RE_UL(iter)=Total_cell_throughput_RE_UL(iter)./(
    Sum_RBs_used_RE_UL(iter).*BW_per_RB_pair);
Spectral_eff_RSRP_UL(iter)=Total_cell_throughput_RSRP_UL(iter)
    )./(Sum_RBs_used_RSRP_UL(iter).*BW_per_RB_pair);
Spectral_eff_MPL_UL(iter)=Total_cell_throughput_MPL_UL(iter)
    )./(Sum_RBs_used_MPL_UL(iter).*BW_per_RB_pair);
Spectral_eff_PAOAN_UL(iter)=Total_cell_throughput_PAOAN_UL(
    iter)./(Sum_RBs_used_PAOAN_UL(iter).*BW_per_RB_pair);

%%% Calculation of total UL and DL spectral efficiency (bits
    /s/Hz)
Total_UL_DL_spec_eff_MPL(iter)=(Total_cell_throughput_MPL_UL(
    iter)+Total_cell_throughput_MPL_DL(iter))./(
    Sum_RBs_used_MPL_UL(iter).*BW_per_RB_pair+

```

```

        Sum_RB_s_used_MPL_DL(iter).*BW_per_RB_pair);
Total_UL_DL_spec_eff_RE(iter)=(Total_cell_throughput_RE_UL(
    iter)+Total_cell_throughput_RE_DL(iter))./(
    Sum_RB_s_used_RE_UL(iter).*BW_per_RB_pair+
    Sum_RB_s_used_RE_DL(iter).*BW_per_RB_pair);
Total_UL_DL_spec_eff_RSRP(iter)=(
    Total_cell_throughput_RSRP_UL(iter)+
    Total_cell_throughput_RSRP_DL(iter))./(
    Sum_RB_s_used_RSRP_UL(iter).*BW_per_RB_pair+
    Sum_RB_s_used_RSRP_DL(iter).*BW_per_RB_pair);
Total_UL_DL_spec_eff_PAOAN(iter)=(
    Total_cell_throughput_PAOAN_UL(iter)+
    Total_cell_throughput_PAOAN_DL(iter))./(
    Sum_RB_s_used_PAOAN_UL(iter).*BW_per_RB_pair+
    Sum_RB_s_used_PAOAN_DL(iter).*BW_per_RB_pair);

```

```

time=toc;

```

```

end

```

```

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%% CALCULATION OF AVERAGES

```

```

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

```

```

%% Average total AN power consumption in UL

```

```

P_AN_total_Watt_RSRP_UL_avg(re)=sum(P_AN_total_Watt_RSRP_UL(:))/
    iteration;

```

```

P_AN_total_Watt_RE_UL_avg(re)=sum(P_AN_total_Watt_RE_UL(:))/
    iteration;

```

```

P_AN_total_Watt_MPL_UL_avg(re)=sum(P_AN_total_Watt_MPL_UL(:))/
    iteration;

```

```

P_AN_total_Watt_PAOAN_UL_avg(re)=sum(P_AN_total_Watt_PAOAN_UL(:))
    /iteration;

```

```

%% Average total AN power consumption in DL

```

```

P_AN_total_Watt_RSRP_DL_avg(re)=sum(P_AN_total_Watt_RSRP_DL(:))/
    iteration;

```

```

P_AN_total_Watt_RE_DL_avg(re)=sum(P_AN_total_Watt_RE_DL(:))/
    iteration;

```

```

P_AN_total_Watt_MPL_DL_avg(re)=sum(P_AN_total_Watt_MPL_DL(:))/
    iteration;

```

```

P_AN_total_Watt_PAOAN_DL_avg(re)=sum(P_AN_total_Watt_PAOAN_DL(:))

```

```

/iteration;

%% Average total energy efficiency
Total_energy_eff_RSRP_avg(re)=sum(Total_UL_DL_ener_eff_RSRP(:))/
iteration;
Total_energy_eff_RE_avg(re)=sum(Total_UL_DL_ener_eff_RE(:))/
iteration;
Total_energy_eff_MPL_avg(re)=sum(Total_UL_DL_ener_eff_MPL(:))/
iteration;
Total_energy_eff_PAOAN_avg(re)=sum(Total_UL_DL_ener_eff_PAOAN(:))
/iteration;

%%% Average total UL energy efficiency
UL_energy_eff_RSRP_avg(re)=sum(Total_energy_eff_RSRP_UL(:))/
iteration;
UL_energy_eff_RE_avg(re)=sum(Total_energy_eff_RE_UL(:))/iteration
;
UL_energy_eff_MPL_avg(re)=sum(Total_energy_eff_MPL_UL(:))/
iteration;
UL_energy_eff_PAOAN_avg(re)=sum(Total_energy_eff_PAOAN_UL(:))/
iteration;

%%% Average total DL energy efficiency
DL_energy_eff_RSRP_avg(re)=sum(Total_energy_eff_RSRP_DL(:))/
iteration;
DL_energy_eff_RE_avg(re)=sum(Total_energy_eff_RE_DL(:))/iteration
;
DL_energy_eff_MPL_avg(re)=sum(Total_energy_eff_MPL_DL(:))/
iteration;
DL_energy_eff_PAOAN_avg(re)=sum(Total_energy_eff_PAOAN_DL(:))/
iteration;

%%% Average total DL throughput
Total_cell_throughput_MPL_DL_avg(re)=sum(
Total_cell_throughput_MPL_DL(:))/iteration;
Total_cell_throughput_RE_DL_avg(re)=sum(
Total_cell_throughput_RE_DL(:))/iteration;
Total_cell_throughput_RSRP_DL_avg(re)=sum(
Total_cell_throughput_RSRP_DL(:))/iteration;
Total_cell_throughput_PAOAN_DL_avg(re)=sum(
Total_cell_throughput_PAOAN_DL(:))/iteration;

%%% Average total UL throughput

```

```

Total_cell_throughput_MPL_UL_avg(re)=sum(
    Total_cell_throughput_MPL_UL(:))/iteration;
Total_cell_throughput_RE_UL_avg(re)=sum(
    Total_cell_throughput_RE_UL(:))/iteration;
Total_cell_throughput_RSRP_UL_avg(re)=sum(
    Total_cell_throughput_RSRP_UL(:))/iteration;
Total_cell_throughput_PAOAN_UL_avg(re)=sum(
    Total_cell_throughput_PAOAN_UL(:))/iteration;

%%% Average total spectral efficiency
Total_spectral_eff_RE_avg(re)=sum(Total_UL_DL_spec_eff_RE(:))/
    iteration;
Total_spectral_eff_RSRP_avg(re)=sum(Total_UL_DL_spec_eff_RSRP(:))
    /iteration;
Total_spectral_eff_MPL_avg(re)=sum(Total_UL_DL_spec_eff_MPL(:))/
    iteration;
Total_spectral_eff_PAOAN_avg(re)=sum(Total_UL_DL_spec_eff_PAOAN
    (:))/iteration;

%%% Average DL spectral efficiency
Spectral_eff_RE_DL_avg(re)=mean(Spectral_eff_RE_DL(:));
Spectral_eff_RSRP_DL_avg(re)=mean(Spectral_eff_RSRP_DL(:));
Spectral_eff_MPL_DL_avg(re)=mean(Spectral_eff_MPL_DL(:));
Spectral_eff_PAOAN_DL_avg(re)=mean(Spectral_eff_PAOAN_DL(:));

%%% Average UL spectral efficiency
Spectral_eff_RE_UL_avg(re)=mean(Spectral_eff_RE_UL(:));
Spectral_eff_RSRP_UL_avg(re)=mean(Spectral_eff_RSRP_UL(:));
Spectral_eff_MPL_UL_avg(re)=mean(Spectral_eff_MPL_UL(:));
Spectral_eff_PAOAN_UL_avg(re)=mean(Spectral_eff_PAOAN_UL(:));

end

set(0,'DefaultAxesFontSize',11)

N=initial:step:end_value;

perith=3;

figure;

```

```

xlabel('Number of UEs');
ylabel('Average total UE power consumption (W)');

grid on;
xlim([initial-perith end_value+perith])

hold all;
plot (N,P_AN_total_Watt_RSRP_UL_avg,'-ro', 'LineWidth',1);

hold all;
plot (N,P_AN_total_Watt_RE_UL_avg,'-g^', 'LineWidth',1);

hold all;
plot (N,P_AN_total_Watt_MPL_UL_avg,'-md', 'LineWidth',1);

hold all;
plot (N,P_AN_total_Watt_PAOAN_UL_avg,'-*', 'LineWidth',1)

legend5=legend('RSRP','RE','MPL','PAOAN','Location', 'NorthEast');
set(legend5,'FontSize',10);

figure;

xlabel('Number of UEs');
ylabel('Average total access network DL power consumption (W)');
grid on;

xlim([initial-perith end_value+perith])

hold all;
plot (N,P_AN_total_Watt_RSRP_DL_avg,'-ro', 'LineWidth',1);

hold all;
plot (N,P_AN_total_Watt_RE_DL_avg,'-g^', 'LineWidth',1);

hold all;
plot (N,P_AN_total_Watt_MPL_DL_avg,'-md', 'LineWidth',1);

hold all;

```

```

plot (N,P_AN_total_Watt_PAOAN_DL_avg,'-*', 'LineWidth',1);

legend7=legend('RSRP','RE','MPL', 'PAOAN', 'Location', 'NorthEast');
set(legend7,'FontSize',10);

figure;

xlabel('Number of UEs');
ylabel('Average total energy efficiency (bits/Joule)');
grid on;

xlim([initial-perith end_value+perith])

hold all;
plot (N,Total_energy_eff_RSRP_avg,'-ro', 'LineWidth',1);

hold all;
plot (N,Total_energy_eff_RE_avg,'-g^', 'LineWidth',1);

hold all;
plot (N,Total_energy_eff_MPL_avg,'-md', 'LineWidth',1);

hold all;
plot (N,Total_energy_eff_PAOAN_avg,'-*', 'LineWidth',1);

legend7=legend('RSRP','RE','MPL','PAOAN','Location', 'NorthEast');
set(legend7,'FontSize',10);

figure;

xlabel('Number of UEs');
ylabel('Average UL energy efficiency (bits/Joule)');
grid on;

xlim([initial-perith end_value+perith])

hold all;
plot (N,UL_energy_eff_RSRP_avg,'-ro', 'LineWidth',1);

hold all;
plot (N,UL_energy_eff_RE_avg,'-g^', 'LineWidth',1);

hold all;

```

```

plot (N,UL_energy_eff_MPL_avg,'-md', 'LineWidth',1);

hold all;
plot (N,UL_energy_eff_PAOAN_avg,'-*', 'LineWidth',1);

legend7=legend('RSRP','RE','MPL','PAOAN','Location', 'NorthEast');
set(legend7,'FontSize',10);

figure;

xlabel('Number of UEs');
ylabel('Average DL energy efficiency (bits/Joule)');
grid on;

xlim([initial-perith end_value+perith])

hold all;
plot (N,DL_energy_eff_RSRP_avg,'-ro', 'LineWidth',1);

hold all;
plot (N,DL_energy_eff_RE_avg,'-g^', 'LineWidth',1);

hold all;
plot (N,DL_energy_eff_MPL_avg,'-md', 'LineWidth',1);

hold all;
plot (N,DL_energy_eff_PAOAN_avg,'-*', 'LineWidth',1);

legend7=legend('RSRP','RE','MPL','PAOAN','Location', 'NorthEast');
set(legend7,'FontSize',10);

figure;

xlabel('Number of UEs');
ylabel('Average total DL network throughput (bps)');
grid on;

xlim([initial-perith end_value+perith])

hold all;
plot (N,Total_cell_throughput_RSRP_DL_avg,'-ro', 'LineWidth',1);

```

```

hold all;
plot (N,Total_cell_throughput_RE_DL_avg,'-g^','LineWidth',1);

hold all;
plot (N,Total_cell_throughput_MPL_DL_avg,'-md','LineWidth',1);

hold all;
plot (N,Total_cell_throughput_PAOAN_DL_avg,'-*','LineWidth',1);

legend9=legend('RSRP','RE','MPL','PAOAN','Location','NorthEast');
set(legend9,'FontSize',10);

figure;

xlabel('Number of UEs');
ylabel('Average total UL network throughput (bps)');
grid on;

xlim([initial-perith end_value+perith])

hold all;
plot (N,Total_cell_throughput_RSRP_UL_avg,'-ro','LineWidth',1);

hold all;
plot (N,Total_cell_throughput_RE_UL_avg,'-g^','LineWidth',1);

hold all;
plot (N,Total_cell_throughput_MPL_UL_avg,'-md','LineWidth',1);

hold all;
plot (N,Total_cell_throughput_PAOAN_UL_avg,'-*','LineWidth',1);

legend10=legend('RSRP','RE','MPL','PAOAN','Location','NorthEast');
set(legend10,'FontSize',10);

figure;

xlabel('Number of UEs');
ylabel('Average total network spectrum efficiency (bps/Hz)');
grid on;

```

```

xlim([initial-perith end_value+perith])

hold all;
plot (N,Total_spectral_eff_RSRP_avg,'-ro', 'LineWidth',1);

hold all;
plot (N,Total_spectral_eff_RE_avg,'-g^','LineWidth',1);

hold all;
plot (N,Total_spectral_eff_MPL_avg,'-md','LineWidth',1);

hold all;
plot (N,Total_spectral_eff_PAOAN_avg,'-*','LineWidth',1);

legend11=legend('RSRP','RE','MPL','PAOAN','Location', 'NorthEast');
set(legend11,'FontSize',10);

figure;

xlabel('Number of UEs');
ylabel('Average total DL spectrum efficiency (bps/Hz)');
grid on;

xlim([initial-perith end_value+perith])

hold all;
plot (N,Spectral_eff_RSRP_DL_avg,'-ro', 'LineWidth',1);

hold all;
plot (N,Spectral_eff_RE_DL_avg,'-g^','LineWidth',1);

hold all;
plot (N,Spectral_eff_MPL_DL_avg,'-md','LineWidth',1);

hold all;
plot (N,Spectral_eff_PAOAN_DL_avg,'-*','LineWidth',1);

legend11=legend('RSRP','RE','MPL','PAOAN','Location', 'NorthEast');
set(legend11,'FontSize',10);

figure;

```

```

xlabel('Number of UEs');
ylabel('Average total UL spectrum efficiency (bps/Hz)');
grid on;

xlim([initial-perith end_value+perith])

hold all;
plot (N,Spectral_eff_RSRP_UL_avg,'-ro', 'LineWidth',1);

hold all;
plot (N,Spectral_eff_RE_UL_avg,'-g^','LineWidth',1);

hold all;
plot (N,Spectral_eff_MPL_UL_avg,'-md','LineWidth',1);

hold all;
plot (N,Spectral_eff_PAOAN_UL_avg,'-*','LineWidth',1);

legend11=legend('RSRP','RE','MPL','PAOAN','Location','NorthEast');
set(legend11,'FontSize',10);

figure;

Y=[sum(Total_spectral_eff_RSRP_avg)/number_points,sum(
    Total_spectral_eff_RE_avg)/number_points, sum(
    Total_spectral_eff_MPL_avg)/number_points, sum(
    Total_spectral_eff_PAOAN_avg)/number_points];
x=[1,2,3,4];
bar(x,Y);
colormap(summer(4));
grid on
l = cell(1);
l{1}='RSRP'; l{2}='RE'; l{3}='MPL'; l{4}='PAOAN';
set(gca,'xticklabel', l) ;
ylabel('Average total UL and DL network spectrum efficiency (bps/Hz)')
);

```

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β: Κώδικας αρχείου UL_DL_with_interference.m

```
%%%%%%%% UL_DL_with_interference %%%%%%%%%%%%%%
clc;
clear all;
close all;

% Input Parameters
number_points=6;

Total_energy_eff_RSRP_avg=zeros(1,number_points);

[Total_energy_eff_RE_avg,Total_energy_eff_MPL_avg,
 Total_energy_eff_NPA_avg,Total_cell_throughput_MPL_avg,
 Total_cell_throughput_NPA_avg, Total_cell_throughput_RE_avg,
 Total_cell_throughput_RSRP_avg ]=deal (Total_energy_eff_RSRP_avg);

[Total_cell_throughput_MPL_UL_avg, Total_cell_throughput_RE_UL_avg,
 Total_cell_throughput_NPA_UL_avg,
 Total_cell_throughput_RSRP_UL_avg ]=deal (
 Total_energy_eff_RSRP_avg);

[Spectral_eff_RE_avg, Spectral_eff_RSRP_avg,Spectral_eff_NPA_avg,
 Spectral_eff_MPL_avg, UL_energy_eff_RSRP_avg,UL_energy_eff_NPA_avg
 , UL_energy_eff_RE_avg, UL_energy_eff_MPL_avg ]=deal (
 Total_energy_eff_RSRP_avg);

[DL_energy_eff_RSRP_avg, DL_energy_eff_RE_avg,DL_energy_eff_NPA_avg,
 DL_energy_eff_MPL_avg ]=deal (Total_energy_eff_RSRP_avg);

[P_AN_total_Watt_RSRP_UL_avg, P_AN_total_Watt_RE_UL_avg,
 P_AN_total_Watt_NPA_UL_avg, P_AN_total_Watt_MPL_UL_avg]=deal (
 Total_energy_eff_RSRP_avg);

[Spectral_eff_RE_UL_avg,Spectral_eff_NPA_UL_avg,
 Spectral_eff_RSRP_UL_avg,Spectral_eff_MPL_UL_avg,
 Spectral_eff_RE_DL_avg,Spectral_eff_RSRP_DL_avg,
 Spectral_eff_NPA_DL_avg,Spectral_eff_MPL_DL_avg,
 P_AN_total_Watt_RSRP_DL_avg,P_AN_total_Watt_NPA_DL_avg,
 P_AN_total_Watt_RE_DL_avg, P_AN_total_Watt_MPL_DL_avg]=deal (
 Total_energy_eff_RSRP_avg);
```

```

re=0;  %%index of each point of interest

initial=10;
step=20;
end_value=110;

for N=initial:step:end_value

    re=re+1;

    iteration=10;

    Total_energy_eff_RE=zeros(1,iteration);

    P_user_MPL_UL_avg=zeros(1,N);

    [P_user_RSRP_UL_avg, P_user_RE_UL_avg]=deal(P_user_MPL_UL_avg);

    P_user_MPL_UL=zeros(N,iteration);

    [P_user_RSRP_UL, P_user_RE_UL]=deal(P_user_MPL_UL);

    [Total_energy_eff_RSRP, Total_energy_eff_NPA, Total_energy_eff_MPL
     ]=deal(Total_energy_eff_RE);

    [Total_DL_ener_saving_MPL, Total_DL_ener_saving_RSRP,
     Total_DL_ener_saving_NPA, Total_DL_ener_saving_RE ]=deal(
     Total_energy_eff_RE);

    [Total_UL_ener_saving_MPL, Total_UL_ener_saving_RSRP,
     Total_UL_ener_saving_NPA, Total_UL_ener_saving_RE ]=deal(
     Total_energy_eff_RE);

    [Total_energy_eff_RE_UL, Total_energy_eff_RSRP_UL,
     Total_energy_eff_MPL_UL, Total_energy_eff_NPA_UL ]=deal(
     Total_energy_eff_RE);

    [Total_UL_DL_ener_eff_MPL, Total_UL_DL_ener_eff_RE,
     Total_UL_DL_ener_eff_NPA, Total_UL_DL_ener_eff_RSRP ]=deal(
     Total_energy_eff_RE);

```

```

[Total_cell_throughput_MPL,Total_cell_throughput_NPA,
  Total_cell_throughput_RE, Total_cell_throughput_RSRP]=deal(
  Total_energy_eff_RE);

[Total_cell_throughput_MPL_UL,Total_cell_throughput_NPA_UL,
  Total_cell_throughput_RE_UL, Total_cell_throughput_RSRP_UL ]=
  deal(Total_energy_eff_RE);

[ Sum_RBs_used_RE, Sum_RBs_used_RSRP, Sum_RBs_used_MPL,
  Sum_RBs_used_NPA,Sum_RBs_used_NPA_UL, Sum_RBs_used_RE_UL,
  Sum_RBs_used_RSRP_UL, Sum_RBs_used_MPL_UL ]=deal(
  Total_energy_eff_RE);

[ P_all_total_Watt_RE,P_all_total_Watt_NPA, P_all_total_Watt_RSRP
  , P_all_total_Watt_MPL,P_all_total_Watt_NPA_UL,
  P_all_total_Watt_RE_UL, P_all_total_Watt_RSRP_UL,
  P_all_total_Watt_MPL_UL ]=deal(Total_energy_eff_RE);

[ P_AN_total_Watt_RE_UL, P_AN_total_Watt_MPL_UL,
  P_AN_total_Watt_NPA_UL, P_AN_total_Watt_RSRP_UL ]=deal(
  Total_energy_eff_RE);

[P_AN_total_Watt_RE_tot, P_AN_total_Watt_RSRP_tot,
  P_AN_total_Watt_NPA_tot, P_AN_total_Watt_MPL_tot ]=deal(
  Total_energy_eff_RE);

[ P_AN_total_Watt_RE, P_AN_total_Watt_MPL,P_AN_total_Watt_NPA,
  P_AN_total_Watt_RSRP ]=deal(Total_energy_eff_RE);

[ Spectral_eff_RE, Spectral_eff_RSRP, Spectral_eff_MPL,
  Spectral_eff_NPA, Spectral_eff_NPA_UL, Spectral_eff_RE_UL,
  Spectral_eff_RSRP_UL, Spectral_eff_MPL_UL ]=deal(
  Total_energy_eff_RE);

[Total_UL_DL_spec_eff_MPL, Total_UL_DL_spec_eff_RE,
  Total_UL_DL_spec_eff_NPA, Total_UL_DL_spec_eff_RSRP ]=deal(
  Total_energy_eff_RE);

[P_BH_total_Watt_MPL, P_BH_total_Watt_RSRP, P_BH_total_Watt_RE,
  P_BH_total_Watt_NPA ] =deal(Total_energy_eff_RE);

[P_BH_total_Watt_MPL_UL, P_BH_total_Watt_RSRP_UL,
  P_BH_total_Watt_RE_UL, P_BH_total_Watt_NPA_UL ]=deal(

```

```
Total_energy_eff_RE);
```

```
time=0;
for iter=1:iteration
    tic
    clc
    step2=1;
    stop=iteration;
    sprintf('Time left %2.2f m in iteration %d of point %d',((
        stop+step2-iter)*time/step2)/60,iter,re)

    clearvars column_vector

    Ptmacro_dBm=46; %dBm;
    Ptmacro=(10^(Ptmacro_dBm/10))/1000; %Maximum transmission
        power of a macrocell/gNodeB (gNB) in Watts (~40W);

    Ptsc_dBm=30; %dBm;
    Ptsc=(10^(Ptsc_dBm/10))/1000; %Maximum transmission power of
        an outdoor small cell/Home gNB in Watts (~1W);

    Pt_u_dBm=23; %dBm;
    Pt_u=(10^(Pt_u_dBm/10))/1000; %Maximum transmission power of a
        UE in Watts;

    NF=9; %dB Noise Figure
    k_T_B=-132.24; %% dBm noise for a subcarrier (15kHz)
    N_watt=(10^((k_T_B+NF)/10))/1000;

    NF_UL=7; %dB
    k_T_B_UL=-121.45; %dBm noise for a PRB

    N_antennas=2;

    BW_per_RB_pair=2*180*10^3; %Hz
    number_of_SC_RBs=50; % RBs for each SC (50 physical resource
        blocks (PRBs)- 10 MHz channel)
    number_of_gNB_RBs=50; % RBs for the gNB sector (10 MHz
        channel)
```

```

N_clusters=2;
cluster_center_x=zeros(1,N_clusters);
cluster_center_y=zeros(1,N_clusters);
number_of_SCs_cluster=4;
cells=number_of_SCs_cluster*N_clusters+1;

available_resources(1)=number_of_gNB_RB;
available_resources(2:cells)=number_of_SC_RB;

SINR_target=-10;%dB
SINR_target_UL=7;%dB

fading=zeros(N,cells);

X=zeros(1,cells); %%The index 1 is for the gNB and the rest
                  for the SCs
Y=zeros(1,cells);

P=zeros(1,cells);
[P_subcarrier, P_subcarrier_dBm, P_RB_pair, P_RB_pair_UL,
 P_RB_pair_UL_watt]=deal(P);

GBR=1*N ;% percentage of users with GBR of data_rate_user
GBR_1=0.600*N ;% percentage of users with GBR of
                  data_rate_user
GBR_2=0.200*N ;% percentage of users with GBR of
                  data_rate_user
GBR_3=0.200*N ;% percentage of users with GBR of
                  data_rate_user

set1=1:N;

id_GBR_1 = datasample(set1,GBR_1,'Replace',false);
set2 = setdiff(set1,id_GBR_1);
id_GBR_2 = datasample(set2,GBR_2,'Replace',false);
set3 = setdiff(set2,id_GBR_2);
id_GBR_3 = datasample(set3,GBR_3,'Replace',false);

data_rate_user_UL=zeros(1,N);
data_rate_user_DL=zeros(1,N);

```

```

for i=1:GBR
    if any( id_GBR_1(:)==i )
        data_rate_user_DL(i)=0.512*10^6; data_rate_user_UL(i)
            =0.512*10^6; %1 Mbps , fixed rate for GBR
    else if any( id_GBR_2(:)==i )
        data_rate_user_DL(i)=0.728*10^6;
        data_rate_user_UL(i)=1.024*10^6;%1 Mbps ,
            fixed rate for GBR %1 Mbps , fixed rate for
            GBR
    else if any( id_GBR_3(:)==i )
        data_rate_user_DL(i)=1.024*10^6;
        data_rate_user_UL(i)=0.256*10^6;%1 Mbps ,
            fixed rate for GBR
    end
end
end
end

end

UES_per_cluster=zeros(1,N_clusters);
UES_per_cluster(:)=ceil(((2*N)/3)/N_clusters);

% Macrocell Position
X(1)=0; %X of Macro
Y(1)=500; %Y of Macro

%%Macrocell radius equal to R (m)
R=500; %gNB radius

% Small Cells' Positions

r_SC_min=20; %minimum distance between two SCs
r2=70; %hotspot radius for UE dropping in a cluster

r_cluster=50; % radius for SC dropping in a cluster
r_border=max(r_cluster,r2); %%maximum radius in order for
    the UEs not to be outside
                                %of the macrocell sector area
                                when dropping them in hotspots

UX=zeros(1,N);
UY=zeros(1,N);

```

```

for y=1:(N_clusters) %Uniformly distributed cluster centers
    not_done = true;
    while not_done

        cluster_center_x(y)= (R) *rand(1);
        cluster_center_y(y)= (Y(1)-R)+2*R *rand(1);

        not_done = ((cluster_center_y(y))+sqrt(3)*
            cluster_center_x(y)-Y(1))<0 || ((cluster_center_y(
            y))-sqrt(3)*cluster_center_x(y)-Y(1))>0 || (
            cluster_center_x(y))^2+(cluster_center_y(y)-Y(1))
            ^2>R^2 || (cluster_center_x(y))^2+(
            cluster_center_y(y)-Y(1))^2<105^2 ...
            ||((cluster_center_y(y)+r_border)+sqrt(3)*
            cluster_center_x(y)+r_border)-Y(1))<0 || ((
            cluster_center_y(y)+r_border)-sqrt(3)*
            cluster_center_x(y)+r_border)-Y(1))>0 || (
            cluster_center_x(y)+r_border)^2+(
            cluster_center_y(y)+r_border-Y(1))^2>R^2 ...
            ||((cluster_center_y(y)-r_border)+sqrt(3)*
            cluster_center_x(y)-r_border)-Y(1))<0 || ((
            cluster_center_y(y)-r_border)-sqrt(3)*
            cluster_center_x(y)-r_border)-Y(1))>0 || (
            cluster_center_x(y)-r_border)^2+(
            cluster_center_y(y)-r_border-Y(1))^2>R^2 ...
            ||((cluster_center_y(y)-r_border)+sqrt(3)*
            cluster_center_x(y)+r_border)-Y(1))<0 || ((
            cluster_center_y(y)-r_border)-sqrt(3)*
            cluster_center_x(y)+r_border)-Y(1))>0 || (
            cluster_center_x(y)+r_border)^2+(
            cluster_center_y(y)-r_border-Y(1))^2>R^2 ...
            ||((cluster_center_y(y)+r_border)+sqrt(3)*
            cluster_center_x(y)-r_border)-Y(1))<0 || ((
            cluster_center_y(y)+r_border)-sqrt(3)*
            cluster_center_x(y)-r_border)-Y(1))>0 || (
            cluster_center_x(y)-r_border)^2+(
            cluster_center_y(y)+r_border-Y(1))^2>R^2 ;

    if not_done== false
        for k=1:(y-1)
            not_done=(cluster_center_x(y)-
                cluster_center_x(k))^2+(cluster_center_y(y)
                )-cluster_center_y(k))^2<(2*r_cluster)^2;
        end
    end
end

```

```

                %%2*r_cluster+50 minimum distance between
                two cluster centers
            end
        end
    end

end

m=2;
for y=1:(N_clusters) %Uniformly distributed SCs in a cluster
    while m<=(y*number_of_SCs_cluster+1)
        not_done = true;
        while not_done

            X(m)= 2*r_cluster *rand(1)+ (cluster_center_x(y)-
                r_cluster);
            Y(m)= 2*r_cluster *rand(1)+ (cluster_center_y(y)-
                r_cluster);
            not_done = (X(m)-cluster_center_x(y))^2+(Y(m)-
                cluster_center_y(y))^2>r_cluster^2;

            if not_done== false
                for i=2:(m-1)
                    not_done= not_done || (X(m)-X(i))^2+(Y(m)-Y
                        (i))^2<r_SC_min^2;
                    %%The SCs should not be closer to each
                    other than 50m
                end
            end
        end
        m=m+1;
    end
end

[association_RSRP, association_MPL, association_RE,
    association_NPA ]=deal(fading);
[I_dB, I, RSRP, RSRP_UL, MPL, SNR, RE, nodeDistance, pathloss
    , pathloss_Okumura, differences_RSRP, differences_MPL,
    differences_RE, differences_SNR, SNR_RSRP, SINR_UL_watt,

```

```

SINR_watt, SINR_RSRP, PL_dB, PL]=deal(fading);

% Power Consumption in a subframe
P(1)=Ptmacro;
P_subcarrier(1)=(P(1)/N_antennas)/(number_of_gNB_RB*12); %
    Power per subcarrier
P_subcarrier_dBm(1)=10*log10(P_subcarrier(1)*1000)+17; %Power
    per subcarrier dBm , antenna gain and cable loss
P_RB_pair(1)=((P(1)/N_antennas))/(number_of_gNB_RB); %Power
    per RB pair
for i=2:cells
    P(i)=Ptsc;
    P_subcarrier(i)=(P(i)/N_antennas)/(number_of_SC_RB*12);
        %Power per subcarrier
    P_subcarrier_dBm(i)=10*log10(P_subcarrier(i)*1000)+5; %
        Power per subcarrier dBm ,5dB antenna gain and 0 dB
        cable loss
    P_RB_pair(i)=((P(i)/N_antennas)/(number_of_SC_RB)); %dBm
end

% %Users' Positions

m=1;
for y=1:(N_clusters) %Hotspot users with radius r2
    for k=1:UEs_per_cluster(y) %UEs per cluster define how
        many UEs will be included in a cluster
        not_done = true;
        while not_done

            UX(m)= 2*r2 *rand(1)+ (cluster_center_x(y)-r2);
            UY(m)= 2*r2 *rand(1)+ (cluster_center_y(y)-r2);
            not_done = (UX(m)-cluster_center_x(y))^2+(UY(m)-
                cluster_center_y(y))^2>r2^2;

            if not_done== false
                for i=2:cells
                    not_done= (UX(m)-X(i))^2+(UY(m)-Y(i))
                        ^2<5^2; %% minimum distance between UE
                            and SC is 5 m
                end
            end
        end
    end
end

```

```

        end
    end
    m=m+1;
end
end

UES_in_clusters= sum(UES_per_cluster(:));

%%% Uniformly distributed
for y=(UES_in_clusters+1):N % UEs that are uniformly
    distributed
        not_done = true;

        while not_done

            UX(y)= (R) *rand(1);
            UY(y)= (Y(1)-R)+2*R *rand(1);

            not_done = ((UY(y))+sqrt(3)*UX(y)-Y(1))<0 || ((UY(y))
                -sqrt(3)*UX(y)-Y(1))>0 || (UX(y))^2+(UY(y)-Y(1))
                ^2>R^2|| (UX(y))^2+(UY(y)-Y(1))^2<35^2;
            %minimum distance between gNB and UE is 35m

            if not_done== false

                for i=2:cells
                    not_done= (UX(y)-X(i))^2+(UY(y)-Y(i))^2<5^2;
                end

            end

        end
    end

end

plot(X,Y,'+');
hold all;
plot(UX,UY,'.');
axis([-10 600 -10 1000]);
hold all;
x1=[0, R/2];

```

```

y1=[Y(1), Y(1)+(R*sqrt(3))/2];

plot (x1, y1, '-');
hold all;
y2=[Y(1), Y(1)-(R*sqrt(3))/2];
plot (x1, y2, '-');

legend({'SCs','UEs'},'Location','NorthEast')
xlabel('radius gNB (m)')
ylabel('position gNB (m) ')

f=2*10^3; %%measured in MHz, 2 GHz

h_SC=2.5; %% 2.5m
h_gNB=25; %% m
h_M=1.5; %m

C_H= 0.8+ (1.1*log10(f)- 0.7)*h_M -1.56*log10(f);

RE_constant=13;%%dB %% RE bias, TS 36.842 page 9

%%%%%%First association rule: Maximum RSRP (downlink)

%ELECTROMAGNETIC HANDLING
%matrix G(i) is the channel gain of user(i)per time slot (
    real number

%----- CASE I, FIXED PRE-DEFINED CHANNELS
-----

%Nodes' Distance from the cells center (in (m))
% nodeDistance is NxN matrix [Users x Cells], node: ID=1 is
    Macro
for i=1:N
    for j=1:cells
        nodeDistance(i,j)=(sqrt(((UX(i)-X(j))^2)+(UY(i)-Y(j))^2)); %%in m
        if j==1
            pathloss_Okumura(i,j)= 69.55+26.16*log10(f)

```

```

-13.82*log10(h_gNB)-C_H+(44.9-6.55*log(h_gNB))
*log10(nodeDistance(i,j)/1000);

fading(i,j)=exp(randn(1) .* sqrt(8/(10/log(10))
^2)); %lognormal variables with 0 mean and 8dB
deviation

else
pathloss_Okumura(i,j)= 69.55+26.16*log10(f)
-13.82*log10(h_SC)+(44.9-6.55*log(h_SC))*log10
(nodeDistance(i,j)/1000);

fading(i,j)=exp(randn(1) .* sqrt(10/(10/log(10))
^2)); %lognormal variables with 0 mean and 10
dB deviation

end

end

end

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%BACKHAUL
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%BH PARAMETERS
IL=7; %dB %% Implementation loss
Gtx=15;
Grx=15; %
Plo=57.5;%dB
f_BH=60*10^9; %60 GHz
lamda=(3*10^8)/f_BH;
number_links=cells-1;
Pl=zeros(1,number_links);
distance_from_gNB=zeros(1,cells-1);
kT=-174;
BW_BH=200 *10^6; %Hz

for i=2:(cells) %% distance of all the SCs from the gNB, X
(1) and Y(1) are reserved for the gNB
distance_from_gNB(i-1)=(sqrt(((X(i)-X(1))^2)+(Y(i)-Y(1))
^2));
end

[distance, id_SC]=sort(distance_from_gNB);

```

```

r_link=zeros(1,cells-1); %% Number of links
number_of_hops=zeros(1,cells);

number_of_hops(1)=0;

k=0;
for i=1:N_clusters %%Deciding that the SC that is the
    closest to the gNB will be the aggregator (one aggregator
    per cluster)

    r_link(i)=min(distance_from_gNB(k+1:k+
        number_of_SCs_cluster));

    k=k+number_of_SCs_cluster;
    number_of_hops(id_SC(distance==r_link(i))+1)=1;
end

Number_of_2_hop_cluster=2;
distance_from_SC_1=zeros(N_clusters,number_of_SCs_cluster);

w=0;

for i=1:N_clusters
    for k=1:number_of_SCs_cluster
        distance_from_SC_1(i,k)= (sqrt(((X(w+k+1)-X(id_SC(
            distance==r_link(i))+1))^2)+(Y(w+k+1)-Y(id_SC(
            distance==r_link(i))+1))^2));

    end
    w=w+number_of_SCs_cluster;
end

[distance_from_SC_1_sorted(:,,:), position(:,,:)] = sort(
    distance_from_SC_1,2);

for i=1:N_clusters
    k=1;
    while k<=Number_of_2_hop_cluster

        r_link(N_clusters+(i-1)*Number_of_2_hop_cluster+k)=
            distance_from_SC_1_sorted(i, k+1);
    end
end

```

```

        number_of_hops((i-1)*number_of_SCs_cluster+position(i
            ,k+1)+1)=2;
        k=k+1;
    end
end

Number_of_3_hop_cluster=1;
id_1=zeros(1,N_clusters);
id_2=zeros(1,Number_of_2_hop_cluster*N_clusters);
id_3=zeros(1,Number_of_3_hop_cluster*N_clusters+1); %%% the
    position 1 is taken by the gNB

%%% Here we define the BH architecture, by defining how many
    of the SCs
%%% will be one hop away, two hop away etc. in a cluster.
id_1(:)=find(number_of_hops==1);
id_2(:)=find(number_of_hops==2);
id_3(:)=find(number_of_hops==0);

distance_from_SC_2=zeros(Number_of_3_hop_cluster*N_clusters ,
    Number_of_2_hop_cluster);
%%Calculation of the distance of all 3-hop SCs from the 2-hop
    ones of the same cluster

for i=1:Number_of_3_hop_cluster*N_clusters
    y=1;
    while y<=Number_of_2_hop_cluster
        distance_from_SC_2(i,y)= (sqrt(((X(id_3(i+1))-X(id_2(
            Number_of_2_hop_cluster*(ceil(i/
            Number_of_3_hop_cluster)-1)+y)))^2)+(Y(id_3(i+1))-
            Y(id_2(Number_of_2_hop_cluster*(ceil(i/
            Number_of_3_hop_cluster)-1)+y)))^2));

        y=y+1;
    end
end

k=1;
for i=1:N_clusters

```

```

while k<=i*Number_of_3_hop_cluster

    [r_link(N_clusters+N_clusters*Number_of_2_hop_cluster
        +k), BH_position(k)]=min(distance_from_SC_2(i,:));

    k=k+1;
end

end

for i=2:cells
    if number_of_hops(i)==0
        number_of_hops(i)=3;
    end
end

BH_link=zeros(number_links,number_of_SCs_cluster); %%three
    hops is the maximum

k=1;
for i=1:length(id_1)

    BH_link(i,1)= id_1(k);
    k=k+1;
end

k=1;
for i=1:length(id_2)
    BH_link(i+length(id_1),2)= id_2(k);
    k=k+1;
end

k=1;
for i=1:length(id_3)-1
    BH_link(i+length(id_1)+length(id_2),3)= id_3(k+1);
    k=k+1;
end

Number_of_1_hop_cluster=1;

for i=1:length(id_1)
    k=1;

```

```

    while k<=Number_of_2_hop_cluster
        BH_link(i,k+Number_of_1_hop_cluster)= id_2((i-1)*
            Number_of_2_hop_cluster+k);
        k=k+1;
    end
end

l=2;
for i=1:N_clusters
    change=0;

    for j=1:Number_of_2_hop_cluster
        if l<=length(id_3) && change==0 %%%problhma otan
            BH_position einai 1 kai 2
            if BH_position(l-1)==j
                BH_link(j+(i-1)*Number_of_2_hop_cluster+
                    length(id_1),Number_of_1_hop_cluster+2)=
                    id_3(l);
                l=l+1; change=1;
            end
        end
    end
end

for i=1:length(id_3)-1
    k=1;
    while k<=Number_of_3_hop_cluster
        BH_link(i,k+Number_of_1_hop_cluster+
            Number_of_2_hop_cluster)= id_3((i-1)*
                Number_of_3_hop_cluster+k+1);
        k=k+1;
    end
end

BH_path=zeros(cells-1,3);

for i=2:cells
    k=1;
    [row, ~]=find(BH_link==i);
    while k<=length(row)
        BH_path(i-1,k)=row(k);
        k=k+1;
    end
end

```

```

        end

    end

    for i=1:number_links
        Pl(i)=20*log10(4*pi*(r_link(i)/lamda));
    end

    r_interf=zeros(number_of_SCs_cluster,number_of_SCs_cluster);

    for j=2:number_of_SCs_cluster+1
        for m=number_of_SCs_cluster+2:2*number_of_SCs_cluster+1
            r_interf(j-1,m-(number_of_SCs_cluster+1))=(sqrt(((X(j)
                )-X(m))^2)+(Y(j)-Y(m))^2));
        end
    end

    [sort_r_inter, pos]=sortrows(r_interf,[-1, -2, -3, -4]);

%%%%%%%%% Calculation of reference signal received power (RSRP)
%%%%%%%%%

    for i=1:N
        for j=1:cells
            RSRP(i,j)= P_subcarrier_dBm(j)-pathloss_Okumura(i,j)
                -10*log10(fading(i,j)); % %%%%%%%%%dBm
        end
    end

    for i=1:N
        for j=2:cells
            if j<=(number_of_SCs_cluster+1)
                %fixed frequency reuse (soft frequency reuse
                    schemes should be also taken into account)
                I(i,j)=((10^((RSRP(i,(number_of_SCs_cluster+1)+
                    pos(j-1))))/10))/1000)/(N_watt);

            else
                I(i,j)=((10^((RSRP(i,pos(j-(number_of_SCs_cluster
                    +1))+1))/10))/1000)/(N_watt);
            end
        end
    end

```

```

        I_dB(i,j)=10*log10(I(i,j)+1);
    end
end
alpha=1;
for i=1:N
    for j=1:cells
        RSRP(i,j)= P_subcarrier_dBm(j)-pathloss_Okumura(i,j)
            -10*log10(fading(i,j)); % %%%dBm
        SNR_RSRP(i,j)=RSRP(i,j)-k_T_B-NF;
        SINR_RSRP(i,j)=SNR_RSRP(i,j)-I_dB(i,j);

        if j~=1
            RE(i,j)=RSRP(i,j)+RE_constant;
        else
            RE(i,j)=RSRP(i,j);
        end

        PL(i,j)=alpha*(10^(((pathloss_Okumura(i,j)+10*log10(
            fading(i,j))))/10));
        PL_dB(i,j)=10*log10(PL(i,j));
        P_RB_pair_UL(i,j)= max((SINR_target_UL+k_T_B_UL+NF_UL
            +PL_dB(i,j)), -40); % %%%dBm antenna gain 5
            dBi
        P_RB_pair_UL_watt(i,j)=(10^(P_RB_pair_UL(i,j)/10))
            /1000;
        MPL(i,j)=pathloss_Okumura(i,j)+10*log10(fading(i,j));
    end
end

N_users_MPL=zeros(1,cells);
[N_users_RSRP, N_users_RE, N_users_NPA]=deal(N_users_MPL);

spectral_efficiency=zeros(N,cells);
spectral_efficiency_UL=zeros(N,cells);

for i=1:N
    for j=1:cells
        SINR_watt(i,j)=(10^(SINR_RSRP(i,j)/10));
        spectral_efficiency(i,j)=log2(1+SINR_watt(i,j));
    end
end

```

```

end

SINR_RSRP_UL=zeros(N,cells);
SINR_RSRP_UL(:,:)=SINR_target_UL(:,:);

for i=1:N
    for j=1:cells
        SINR_UL_watt(i,j)=(10^(SINR_RSRP_UL(i,j)/10));
        spectral_efficiency_UL(i,j)=log2(1+SINR_UL_watt(i,j))
        ;
    end
end

throughput_cell_MPL=zeros(1,cells);
[throughput_cell_RSRP, throughput_cell_RE,throughput_cell_NPA
,throughput_cell_NPA_UL, throughput_cell_MPL_UL,
throughput_cell_RSRP_UL, throughput_cell_RE_UL ]=deal(
throughput_cell_MPL);

[BW_cell_need_MPL, BW_cell_need_RSRP, BW_cell_need_RE,
BW_cell_need_NPA, BW_cell_need_RE_UL, BW_cell_need_MPL_UL
, BW_cell_need_RSRP_UL, BW_cell_need_NPA_UL ]=deal(
throughput_cell_MPL);

P_BH_link_RSRP=zeros(1,cells-1);
[P_BH_link_RE, P_BH_link_MPL,P_BH_link_NPA, P_BH_link_RSRP_UL
, P_BH_link_RE_UL,P_BH_link_NPA_UL, P_BH_link_MPL_UL ]=
deal(P_BH_link_RSRP);
[ SNR_BH_link_MPL_target, SNR_BH_link_RSRP_target,
SNR_BH_link_NPA_target, SNR_BH_link_RE_target]=deal(
P_BH_link_RSRP);

[P_BH_link_Watt_MPL,P_BH_link_Watt_NPA, P_BH_link_Watt_RSRP,
P_BH_link_Watt_RE ]=deal(P_BH_link_RSRP);

[SNR_BH_link_MPL_target_UL, SNR_BH_link_RSRP_target_UL,
SNR_BH_link_RE_target_UL ]=deal(P_BH_link_RSRP);

[P_BH_link_Watt_MPL_UL,P_BH_link_Watt_NPA_UL,
P_BH_link_Watt_RSRP_UL, P_BH_link_Watt_RE_UL ]=deal(

```

```

P_BH_link_RSRP);
[P_BH_total_Watt_MPL, P_BH_total_Watt_RSRP,
 P_BH_total_Watt_RE, P_BH_total_Watt_NPA ] =deal(
 Total_energy_eff_RE);
[P_BH_total_Watt_MPL_UL, P_BH_total_Watt_RSRP_UL,
 P_BH_total_Watt_RE_UL, P_BH_total_Watt_NPA_UL ]=deal(
 Total_energy_eff_RE);

BW_need=zeros(N,cells);
[BW_need_actual, BW_need_UL, BW_need_actual_UL]=deal(BW_need)
;

for i=1:N
    for j=1:cells
        BW_need(i,j)=ceil(((data_rate_user_DL(i))/(
            spectral_efficiency(i,j))/BW_per_RB_pair));
        BW_need_actual(i,j)=(((data_rate_user_DL(i))/(
            spectral_efficiency(i,j))/BW_per_RB_pair));
        BW_need_UL(i,j)=ceil(((data_rate_user_UL(i))/(
            spectral_efficiency_UL(i,j))/BW_per_RB_pair));
        BW_need_actual_UL(i,j)=(((data_rate_user_UL(i))/(
            spectral_efficiency_UL(i,j))/BW_per_RB_pair));
    end
end
end

```

%

%%%

```

[classification_RB, classification_id]=sort(BW_need_actual
(:,:),2); %%%This is important
[classification_P_UL, classification_id_UL]=sort(
P_RB_pair_UL_watt(:,:),2);

```

```

differences=zeros(N,cells-1);
actual_differences=zeros(N,cells-1);

```

```

for i=1:N
    for j=1:cells-1
        %%%Difference between the number of RBs needed
        differences(i,j)=ceil(classification_RB(i,j+1))-ceil(

```

```

        classification_RB(i,j));
    actual_differences(i,j)=classification_RB(i,j+1)-
        classification_RB(i,j);

    end
end

for i=1:cells-1
    column_vector(i)=(-i);
end

[~, position_dif]=sortrows(actual_differences ,column_vector);

totally_unsatisfied_user_RSRP=0;
for k=1:N
    i=position_dif(k);
    %%% I start the association from the UEs having the
        fewest candidate cells
    variable=1;
    user_associated=0;
    [num1, idx1] = sort(RSRP(i,:), 'descend');

    while user_associated==0
        j=idx1(variable);
        if (BW_cell_need_RSRP(j)+BW_need(i,j))<=
            available_resources(j)  && (BW_cell_need_RSRP_UL(j)
            )+BW_need_UL(i,j))<=available_resources(j)&& ((
            BW_need_UL(i,j)*P_RB_pair_UL_watt(i,j))<=Pt_u)

            BW_cell_need_RSRP(j)=BW_cell_need_RSRP(j)+BW_need
                (i,j);
            throughput_cell_RSRP(j)=throughput_cell_RSRP(j)+
                data_rate_user_DL(i);
            BW_cell_need_RSRP_UL(j)=BW_cell_need_RSRP_UL(j)+
                BW_need_UL(i,j);
            throughput_cell_RSRP_UL(j)=
                throughput_cell_RSRP_UL(j)+data_rate_user_UL(i
                );
            association_RSRP(i,j)=1;
            user_associated=1;
            N_users_RSRP(j)=N_users_RSRP(j)+1;
        end
    end
end

```

```

else if variable<cells
    variable=variable+1;
else
    totally_unsatisfied_user_RSRP=
        totally_unsatisfied_user_RSRP+1;
    user_associated=1;

end

end

end

end

```

```

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%% MPL %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
totally_unsatisfied_user_MPL=0;

```

```

for k=1:N
    i=position_dif(k);

    variable=1;
    user_associated=0;
    [num2, idx2] = sort(MPL(i,:));
    while user_associated==0
        j=idx2(variable);
        if (BW_cell_need_MPL(j)+BW_need(i,j))<=
            available_resources(j) && SINR_RSRP(i,j)>=
            SINR_target &&(BW_cell_need_MPL_UL(j)+BW_need_UL(i
            ,j))<=available_resources(j)&& ((BW_need_UL(i,j)*
            P_RB_pair_UL_watt(i,j))<=Ptu)
            BW_cell_need_MPL(j)=BW_cell_need_MPL(j)+BW_need(i
            ,j);
            BW_cell_need_MPL_UL(j)=BW_cell_need_MPL_UL(j)+
            BW_need_UL(i,j);
            throughput_cell_MPL(j)=throughput_cell_MPL(j)+
            data_rate_user_DL(i);
            throughput_cell_MPL_UL(j)=throughput_cell_MPL_UL(
            j)+data_rate_user_UL(i);
            association_MPL(i,j)=1;
            N_users_MPL(j)=N_users_MPL(j)+1;
            user_associated=1;
        else if variable<cells
            variable=variable+1;
        else

```

```

        totally_unsatisfied_user_MPL=
            totally_unsatisfied_user_MPL+1;
        user_associated=1;
    end
end
end
end
end

```

```

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%% RE %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

```

```

totally_unsatisfied_user_RE=0;
for k=1:N
    i=position_dif(k);

    variable=1;
    user_associated=0;
    [num3, idx3] = sort(RE(i,:), 'descend');
    %j=idx1(variable);
    while user_associated==0
        j=idx3(variable);
        if (BW_cell_need_RE(j)+BW_need(i,j))<=
            available_resources(j) && SINR_RSRP(i,j)>=
            SINR_target &&(BW_cell_need_RE_UL(j)+BW_need_UL(i,
            j))<=available_resources(j) && ((BW_need_UL(i,j)*
            P_RB_pair_UL_watt(i,j))<=Ptu)
            BW_cell_need_RE(j)=BW_cell_need_RE(j)+BW_need(i,j
            );
            BW_cell_need_RE_UL(j)=BW_cell_need_RE_UL(j)+
            BW_need_UL(i,j);
            throughput_cell_RE(j)=throughput_cell_RE(j)+
            data_rate_user_DL(i);
            throughput_cell_RE_UL(j)=throughput_cell_RE_UL(j)
            +data_rate_user_UL(i);
            association_RE(i,j)=1;
            user_associated=1;
            N_users_RE(j)=N_users_RE(j)+1;
        else if variable<cells
            variable=variable+1;
        else
            totally_unsatisfied_user_RE=

```

```

        totally_unsatisfied_user_RE+1;
        user_associated=1;
    end

    end

end

end
end

```

%% *proposed algorithm NPA* %%%

```

        totally_unsatisfied_user_NPA=0;
    for k=1:N
        i=position_dif(k);

        variable=1;
        user_associated=0;
        %sort cells for user i based on the proposed
        algorithm
        [num4, idx4] = sort(0.7*MPL(i,:) - 0.3*RSRP(i,:)); %
        proposed algorithm

        while user_associated==0
            j=idx4(variable);
            if (BW_cell_need_NPA(j)+BW_need(i,j))<=
                available_resources(j) && SINR_RSRP(i,j)>=
                SINR_target &&(BW_cell_need_NPA_UL(j)+BW_need_UL(i
                ,j))<=available_resources(j) && ((BW_need_UL(i,j)*
                P_RB_pair_UL_watt(i,j))<=Pt_u)
                BW_cell_need_NPA(j)=BW_cell_need_NPA(j)+BW_need(i
                ,j);
                BW_cell_need_NPA_UL(j)=BW_cell_need_NPA_UL(j)+
                BW_need_UL(i,j);

                throughput_cell_NPA(j)=throughput_cell_NPA(j)+
                data_rate_user_DL(i);
                throughput_cell_NPA_UL(j)=throughput_cell_NPA_UL(
                j)+data_rate_user_UL(i);

                %mark the user as associated and
                update the association matrix
                association_NPA(i,j)=1;
            end
            variable=variable+1;
        end
    end
end

```

```

        user_associated=1;
        N_users_NPA(j)=N_users_NPA(j)+1;
    else
        %if the user cant be associated with cell j, try
        the next cell
        if variable<cells
            variable=variable+1;
        else
            %if no cells available, mark the user as
            unsatisfied
            totally_unsatisfied_user_NPA=
                totally_unsatisfied_user_NPA+1;
            user_associated=1;
        end
    end

end

end

end
end

```

%%%Calculation of link throughput for UL and DL for all algorithms

%%%%%%%%%% throughput RE %%%%%%%%%%%

```

throughput_link_RE=zeros(1,cells-1);
for i=1:cells-1
    k=1;
    while k<=number_of_SCs_cluster
        if BH_link(i,k)~=0
            throughput_link_RE(i)=throughput_link_RE(i)+
                throughput_cell_RE(BH_link(i,k));
        end
        k=k+1;
    end
end
end

```

```

throughput_link_RE_UL=zeros(1,cells-1);
for i=1:cells-1
    k=1;
    while k<=number_of_SCs_cluster
        if BH_link(i,k)~=0
            throughput_link_RE_UL(i)=throughput_link_RE_UL(i)

```

```

        +throughput_cell_RE_UL(BH_link(i,k));
    end
    k=k+1;
end
end

```

```

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%% throughput RSRP
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

```

```

throughput_link_RSRP=zeros(1,cells-1);
for i=1:cells-1
    k=1;
    while k<=number_of_SCs_cluster
        if BH_link(i,k)~=0
            throughput_link_RSRP(i)=throughput_link_RSRP(i)+
                throughput_cell_RSRP(BH_link(i,k));
        end
        k=k+1;
    end
end

```

```

throughput_link_RSRP_UL=zeros(1,cells-1);
for i=1:cells-1
    k=1;
    while k<=number_of_SCs_cluster
        if BH_link(i,k)~=0
            throughput_link_RSRP_UL(i)=
                throughput_link_RSRP_UL(i)+
                throughput_cell_RSRP_UL(BH_link(i,k));
        end
        k=k+1;
    end
end

```

```

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%% throughput MPL %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

```

```

throughput_link_MPL=zeros(1,cells-1);
for i=1:cells-1
    k=1;
    while k<=number_of_SCs_cluster
        if BH_link(i,k)~=0
            throughput_link_MPL(i)=throughput_link_MPL(i)+

```

```

        throughput_cell_MPL(BH_link(i,k));
    end
    k=k+1;
end
end

throughput_link_MPL_UL=zeros(1,cells-1);
for i=1:cells-1
    k=1;
    while k<=number_of_SCs_cluster
        if BH_link(i,k)~=0
            throughput_link_MPL_UL(i)=throughput_link_MPL_UL(
                i)+throughput_cell_MPL_UL(BH_link(i,k));
        end
        k=k+1;
    end
end
end

```

%% throughput NPA
%%

```

throughput_link_NPA=zeros(1,cells-1);
for i=1:cells-1
    k=1;
    while k<=number_of_SCs_cluster
        if BH_link(i,k)~=0
            throughput_link_NPA(i)=throughput_link_NPA(i)+
                throughput_cell_NPA(BH_link(i,k));
        end
        k=k+1;
    end
end
end

```

```

throughput_link_NPA_UL=zeros(1,cells-1);
for i=1:cells-1
    k=1;
    while k<=number_of_SCs_cluster
        if BH_link(i,k)~=0
            throughput_link_NPA_UL(i)=throughput_link_NPA_UL(
                i)+throughput_cell_NPA_UL(BH_link(i,k));
        end
        k=k+1;
    end
end
end

```

```

end

%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%% Number of associated UEs
N_users_associated_MPL=sum(N_users_MPL(:));%-
    true_unsatisfied_users_MPL(:);
N_users_associated_RE=sum(N_users_RE(:));%-
    true_unsatisfied_users_RE(:);
N_users_associated_RSRP=sum(N_users_RSRP(:));%-
    true_unsatisfied_users_RSRP(:);
N_users_associated_NPA=sum(N_users_NPA(:));%-
    true_unsatisfied_users_NPA(:);

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%% Calculation of total cell throughput for UL and DL for all
algorithms
Total_cell_throughput_MPL(iter)=sum(throughput_cell_MPL(:));
Total_cell_throughput_RSRP(iter)=sum(throughput_cell_RSRP(:))
;
Total_cell_throughput_RE(iter)=sum(throughput_cell_RE(:));
Total_cell_throughput_NPA(iter)=sum(throughput_cell_NPA(:));

%%% Total_cell_throughput_our_ICC_DL(iter)=sum(
throughput_cell_our_ICC_DL(:));
Total_cell_throughput_MPL_UL(iter)=sum(throughput_cell_MPL_UL
(:));
Total_cell_throughput_RSRP_UL(iter)=sum(
throughput_cell_RSRP_UL(:));
Total_cell_throughput_RE_UL(iter)=sum(throughput_cell_RE_UL
(:));
Total_cell_throughput_NPA_UL(iter)=sum(throughput_cell_NPA_UL
(:));

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%% Calculation of SINR target in each BH link for both UL and
DL
SNR_BH_link_MPL_target(:)= find_target_SNR_new(number_links ,
throughput_link_MPL ,BW_BH);
SNR_BH_link_RSRP_target(:)= find_target_SNR_new(number_links ,
throughput_link_RSRP ,BW_BH);
SNR_BH_link_RE_target(:)= find_target_SNR_new(number_links ,
throughput_link_RE ,BW_BH);

```

```
SNR_BH_link_NPA_target(:)= find_target_SNR_new(number_links ,
throughput_link_NPA ,BW_BH);
```

```
SNR_BH_link_MPL_target_UL(:)= find_target_SNR_new(
number_links ,throughput_link_MPL_UL ,BW_BH);
SNR_BH_link_RSRP_target_UL(:)= find_target_SNR_new(
number_links ,throughput_link_RSRP_UL ,BW_BH);
SNR_BH_link_RE_target_UL(:)= find_target_SNR_new(number_links
,throughput_link_RE_UL ,BW_BH);
SNR_BH_link_NPA_target_UL(:)= find_target_SNR_new(
number_links ,throughput_link_NPA_UL ,BW_BH);
```

%%%%%%%% Calculation of Power Consumption in each BH link

```
for j=1:(cells-1)
```

%%%%SNR_BH_link_RE_target_UL

```
if SNR_BH_link_RE_target_UL(j)==-10 &&
throughput_link_RE_UL(j)==0
```

```
P_BH_link_Watt_RE_UL(j)=0;
```

```
else
```

```
P_BH_link_RE_UL(j)= SNR_BH_link_RE_target_UL(j)-Gtx-
Grx+Plo+Pl(j)+IL+(kT+10*log10(BW_BH)-NF);
```

```
P_BH_link_Watt_RE_UL(j)=(10^(P_BH_link_RE_UL(j)/10))
/1000;
```

```
end
```

%%SNR_BH_link_RSRP_target_UL

```
if SNR_BH_link_RSRP_target_UL(j)==-10 &&
throughput_link_RSRP_UL(j)==0
```

```
P_BH_link_Watt_RSRP_UL(j)=0;
```

```
else
```

```
P_BH_link_RSRP_UL(j)= SNR_BH_link_RSRP_target_UL(j)-
Gtx-Grx+Plo+Pl(j)+IL+(kT+10*log10(BW_BH)-NF);
```

```
P_BH_link_Watt_RSRP_UL(j)=(10^(P_BH_link_RSRP_UL(j)
/10))/1000;
```

```
end
```

%%%%SNR_BH_link_MPL_target_UL

```

if SNR_BH_link_MPL_target_UL(j)==-10 &&
    throughput_link_MPL_UL(j)==0

    P_BH_link_Watt_MPL_UL(j)=0;
else
    P_BH_link_MPL_UL(j)= SNR_BH_link_MPL_target_UL(j)-Gtx
        -Grx+Plo+Pl(j)+IL+(kT+10*log10(BW_BH)-NF); %%%dBm
    P_BH_link_Watt_MPL_UL(j)=(10^(P_BH_link_MPL_UL(j)/10)
        )/1000;

end

%%%%%%%%SNR_BH_link_NPA_target_UL
if SNR_BH_link_NPA_target_UL(j)==-10 &&
    throughput_link_NPA_UL(j)==0

    P_BH_link_Watt_NPA_UL(j)=0;
else
    P_BH_link_NPA_UL(j)= SNR_BH_link_NPA_target_UL(j)-Gtx
        -Grx+Plo+Pl(j)+IL+(kT+10*log10(BW_BH)-NF); %%%dBm
    P_BH_link_Watt_NPA_UL(j)=(10^(P_BH_link_NPA_UL(j)/10)
        )/1000;

end

%%%%%%%%SNR_BH_link_RE_target
if SNR_BH_link_RE_target(j)==-10 && throughput_link_RE(j)
    ==0

    P_BH_link_Watt_RE(j)=0;
else
    P_BH_link_RE(j)= SNR_BH_link_RE_target(j)-Gtx-Grx+Plo
        +Pl(j)+IL+(kT+10*log10(BW_BH)-NF);
    P_BH_link_Watt_RE(j)=(10^(P_BH_link_RE(j)/10))/1000;
end

%%%%%%%%%%%%SNR_BH_link_RSRP_target
if SNR_BH_link_RSRP_target(j)==-10 &&
    throughput_link_RSRP(j)==0

    P_BH_link_Watt_RSRP(j)=0;
else
    P_BH_link_RSRP(j)= SNR_BH_link_RSRP_target(j)-Gtx-Grx
        +Plo+Pl(j)+IL+(kT+10*log10(BW_BH)-NF);

```

```

        P_BH_link_Watt_RSRP(j)=(10^(P_BH_link_RSRP(j)/10))
            /1000;
    end

    %%%%%%%%% SNR_BH_link_MPL_target
    if SNR_BH_link_MPL_target(j)==-10 && throughput_link_MPL(
        j)==0

        P_BH_link_Watt_MPL(j)=0;
    else
        P_BH_link_MPL(j)= SNR_BH_link_MPL_target(j)-Gtx-Grx+
            Plo+Pl(j)+IL+(kT+10*log10(BW_BH)-NF); %%dBm
        P_BH_link_Watt_MPL(j)=(10^(P_BH_link_MPL(j)/10))
            /1000;

    end

    %%%%%%%%%%% SNR_BH_link_MPL_target
    if SNR_BH_link_NPA_target(j)==-10 && throughput_link_NPA(
        j)==0

        P_BH_link_Watt_NPA(j)=0;
    else
        P_BH_link_NPA(j)= SNR_BH_link_NPA_target(j)-Gtx-Grx+
            Plo+Pl(j)+IL+(kT+10*log10(BW_BH)-NF);
        P_BH_link_Watt_NPA(j)=(10^(P_BH_link_NPA(j)/10))
            /1000;

    end

end

%%%%%%%%%% Calculation of total AN consumption in DL

P_AN_Watt_RE=(BW_cell_need_RE(:)).*P_RB_pair(:);
P_AN_total_Watt_RE(iter)=sum(P_AN_Watt_RE);

P_AN_Watt_RSRP=(BW_cell_need_RSRP(:)).*P_RB_pair(:);
P_AN_total_Watt_RSRP(iter)=sum(P_AN_Watt_RSRP);

P_AN_Watt_MPL=(BW_cell_need_MPL(:)).*P_RB_pair(:);
P_AN_total_Watt_MPL(iter)=sum(P_AN_Watt_MPL);

```

```

P_AN_Watt_NPA=(BW_cell_need_NPA(:)).*P_RB_pair(:);
P_AN_total_Watt_NPA(iter)=sum(P_AN_Watt_NPA);

```

%%%%%%%%% Calculation of total AN consumption in UL

```

for i=1:N
    for j=1:cells
        if association_RE(i,j)==1
            P_AN_total_Watt_RE_UL(iter)=P_AN_total_Watt_RE_UL
                (iter)+P_RB_pair_UL_watt(i,j) .*BW_need_UL(i,j)
                );
        end
    end
end

for i=1:N
    for j=1:cells
        if association_RSRP(i,j)==1
            P_AN_total_Watt_RSRP_UL(iter)=
                P_AN_total_Watt_RSRP_UL(iter)+
                P_RB_pair_UL_watt(i,j) .*BW_need_UL(i,j);
        end
    end
end

for i=1:N
    for j=1:cells
        if association_MPL(i,j)==1
            P_AN_total_Watt_MPL_UL(iter)=
                P_AN_total_Watt_MPL_UL(iter)+P_RB_pair_UL_watt
                (i,j) .*BW_need_UL(i,j);
        end
    end
end

for i=1:N
    for j=1:cells
        if association_NPA(i,j)==1
            P_AN_total_Watt_NPA_UL(iter)=
                P_AN_total_Watt_NPA_UL(iter)+P_RB_pair_UL_watt
                (i,j) .*BW_need_UL(i,j);
        end
    end
end

```

```
        end
    end
end
```

%%%%%%%%%% Calculation of total AN consumption as a sum of UL and DL

```
P_AN_total_Watt_RE_tot(iter)=P_AN_total_Watt_RE(iter)+
    P_AN_total_Watt_RE_UL(iter);
```

```
P_AN_total_Watt_RSRP_tot(iter)=P_AN_total_Watt_RSRP(iter)+
    P_AN_total_Watt_RSRP_UL(iter);
```

```
P_AN_total_Watt_MPL_tot(iter)=P_AN_total_Watt_MPL(iter)+
    P_AN_total_Watt_MPL_UL(iter);
```

```
P_AN_total_Watt_NPA_tot(iter)=P_AN_total_Watt_NPA(iter)+
    P_AN_total_Watt_NPA_UL(iter);
```

%

%%%

%%%%%%%%%% Calculation of total BH consumption in DL

```
P_BH_total_Watt_MPL(iter)=sum(P_BH_link_Watt_MPL);
P_BH_total_Watt_RSRP(iter)=sum(P_BH_link_Watt_RSRP);
P_BH_total_Watt_RE(iter)=sum(P_BH_link_Watt_RE);
P_BH_total_Watt_NPA(iter)=sum(P_BH_link_Watt_NPA);
```

%%%%%%%%%% Calculation of total BH consumption in UL

```
P_BH_total_Watt_MPL_UL(iter)=sum(P_BH_link_Watt_MPL_UL);
P_BH_total_Watt_RSRP_UL(iter)=sum(P_BH_link_Watt_RSRP_UL);
P_BH_total_Watt_RE_UL(iter)=sum(P_BH_link_Watt_RE_UL);
P_BH_total_Watt_NPA_UL(iter)=sum(P_BH_link_Watt_NPA_UL);
```

%%%%%%%%%% Calculation of total DL power consumption (both AN+BH)

```
P_all_total_Watt_MPL(iter)=P_AN_total_Watt_MPL(iter)+
```

```

P_BH_total_Watt_MPL(iter);
P_all_total_Watt_RSRP(iter)=P_AN_total_Watt_RSRP(iter)+
P_BH_total_Watt_RSRP(iter);
P_all_total_Watt_RE(iter)=P_AN_total_Watt_RE(iter)+
P_BH_total_Watt_RE(iter);
P_all_total_Watt_NPA(iter)=P_AN_total_Watt_NPA(iter)+
P_BH_total_Watt_NPA(iter);

```

%%%%%%%%%% Calculation of total UL power consumption (both AN+BH)

```

P_all_total_Watt_MPL_UL(iter)=P_AN_total_Watt_MPL_UL(iter)+
P_BH_total_Watt_MPL_UL(iter);
P_all_total_Watt_RSRP_UL(iter)=P_AN_total_Watt_RSRP_UL(iter)+
P_BH_total_Watt_RSRP_UL(iter);
P_all_total_Watt_RE_UL(iter)=P_AN_total_Watt_RE_UL(iter)+
P_BH_total_Watt_RE_UL(iter);
P_all_total_Watt_NPA_UL(iter)=P_AN_total_Watt_NPA_UL(iter)+
P_BH_total_Watt_NPA_UL(iter);

```

%%%%%%%%%% Total number of PRBs pairs used in DL

```

Sum_RBs_used_MPL(iter)= sum(BW_cell_need_MPL);
Sum_RBs_used_RE(iter)= sum(BW_cell_need_RE);
Sum_RBs_used_RSRP(iter)= sum(BW_cell_need_RSRP);
Sum_RBs_used_NPA(iter)= sum(BW_cell_need_NPA);

```

%%%%%%%%%% Total number of PRBs pairs used in UL

```

Sum_RBs_used_MPL_UL(iter)= sum(BW_cell_need_MPL_UL);
Sum_RBs_used_RE_UL(iter)= sum(BW_cell_need_RE_UL);
Sum_RBs_used_RSRP_UL(iter)= sum(BW_cell_need_RSRP_UL);
Sum_RBs_used_NPA_UL(iter)= sum(BW_cell_need_NPA_UL);

```

%%%%%%%%%% Calculation of total DL energy efficiency (bits/Joule)

```

Total_energy_eff_MPL(iter)=(sum(throughput_cell_MPL(:))/(
P_AN_total_Watt_MPL(iter)+P_BH_total_Watt_MPL(iter)));
Total_energy_eff_RSRP(iter)=(sum(throughput_cell_RSRP(:))/(
P_AN_total_Watt_RSRP(iter)+P_BH_total_Watt_RSRP(iter)));
Total_energy_eff_RE(iter)=(sum(throughput_cell_RE(:))/(
P_AN_total_Watt_RE(iter)+P_BH_total_Watt_RE(iter)));
Total_energy_eff_NPA(iter)=(sum(throughput_cell_NPA(:))/(
P_AN_total_Watt_NPA(iter)+P_BH_total_Watt_NPA(iter)));

```

```

%%%%%%%%%% Calculation of total DL power saving (Joules/bit)
Total_DL_ener_saving_MPL(iter)=(P_AN_total_Watt_MPL(iter)+
    P_BH_total_Watt_MPL(iter))/(sum(throughput_cell_MPL(:)));
Total_DL_ener_saving_RSRP(iter)=(P_AN_total_Watt_RSRP(iter)+
    P_BH_total_Watt_RSRP(iter))/(sum(throughput_cell_RSRP(:)));
;
Total_DL_ener_saving_RE(iter)=(P_AN_total_Watt_RE(iter)+
    P_BH_total_Watt_RE(iter))/(sum(throughput_cell_RE(:)));
Total_DL_ener_saving_NPA(iter)=(P_AN_total_Watt_NPA(iter)+
    P_BH_total_Watt_NPA(iter))/(sum(throughput_cell_NPA(:)));

%%%%%%%%%% Calculation of total UL energy efficiency (bits/Joule)
Total_energy_eff_MPL_UL(iter)=(sum(throughput_cell_MPL_UL(:))
    /(P_AN_total_Watt_MPL_UL(iter)+P_BH_total_Watt_MPL_UL(iter)
    ));
Total_energy_eff_RSRP_UL(iter)=(sum(throughput_cell_RSRP_UL
    (:))/(P_AN_total_Watt_RSRP_UL(iter)+
    P_BH_total_Watt_RSRP_UL(iter)));
Total_energy_eff_RE_UL(iter)=(sum(throughput_cell_RE_UL(:))/(
    P_AN_total_Watt_RE_UL(iter)+P_BH_total_Watt_RE_UL(iter)));
Total_energy_eff_NPA_UL(iter)=(sum(throughput_cell_NPA_UL(:))
    /(P_AN_total_Watt_NPA_UL(iter)+P_BH_total_Watt_NPA_UL(iter)
    ));

%%%%%%%%%% Calculation of total UL power saving (Joules/bit)
Total_UL_ener_saving_MPL(iter)=(P_AN_total_Watt_MPL_UL(iter)+
    P_BH_total_Watt_MPL_UL(iter))/(sum(throughput_cell_MPL_UL
    (:)));
Total_UL_ener_saving_RSRP(iter)=(P_AN_total_Watt_RSRP_UL(iter)
    +P_BH_total_Watt_RSRP_UL(iter))/(sum(
    throughput_cell_RSRP_UL(:)));
Total_UL_ener_saving_RE(iter)=(P_AN_total_Watt_RE_UL(iter)+
    P_BH_total_Watt_RE_UL(iter))/(sum(throughput_cell_RE_UL(:)
    ));
Total_UL_ener_saving_NPA(iter)=(P_AN_total_Watt_NPA_UL(iter)+
    P_BH_total_Watt_NPA_UL(iter))/(sum(throughput_cell_NPA_UL
    (:)));

%%%%%%%%%% Calculation of total UL and DL energy efficiency (bits/
    Joule)
Total_UL_DL_ener_eff_MPL(iter)=(sum(throughput_cell_MPL_UL(:)

```

```

)+sum(throughput_cell_MPL(:)))/(P_AN_total_Watt_MPL_UL(
iter)+P_BH_total_Watt_MPL_UL(iter)+P_AN_total_Watt_MPL(
iter)+P_BH_total_Watt_MPL(iter));
Total_UL_DL_ener_eff_RE(iter)=(sum(throughput_cell_RE_UL(:))+
sum(throughput_cell_RE(:)))/(P_AN_total_Watt_RE_UL(iter)+
P_BH_total_Watt_RE_UL(iter)+P_AN_total_Watt_RE(iter)+
P_BH_total_Watt_RE(iter));
Total_UL_DL_ener_eff_RSRP(iter)=(sum(throughput_cell_RSRP_UL
(:))+sum(throughput_cell_RSRP(:)))/(
P_AN_total_Watt_RSRP_UL(iter)+P_BH_total_Watt_RSRP_UL(iter)
)+P_AN_total_Watt_RSRP(iter)+P_BH_total_Watt_RSRP(iter));
Total_UL_DL_ener_eff_NPA(iter)=(sum(throughput_cell_NPA_UL(:)
)+sum(throughput_cell_NPA(:)))/(P_AN_total_Watt_NPA_UL(
iter)+P_BH_total_Watt_NPA_UL(iter)+P_AN_total_Watt_NPA(
iter)+P_BH_total_Watt_NPA(iter));

```

%%%%%%%%%% Calculation of DL spectral efficiency (bits/s/Hz)

```

Spectral_eff_RE(iter)=Total_cell_throughput_RE(iter)./(
Sum_RBs_used_RE(iter).*BW_per_RB_pair);
Spectral_eff_RSRP(iter)=Total_cell_throughput_RSRP(iter)./(
Sum_RBs_used_RSRP(iter).*BW_per_RB_pair);
Spectral_eff_MPL(iter)=Total_cell_throughput_MPL(iter)./(
Sum_RBs_used_MPL(iter).*BW_per_RB_pair);
Spectral_eff_NPA(iter)=Total_cell_throughput_NPA(iter)./(
Sum_RBs_used_NPA(iter).*BW_per_RB_pair);

```

%%%%%%%%%% Calculation of UL spectral efficiency (bits/s/Hz)

```

Spectral_eff_RE_UL(iter)=Total_cell_throughput_RE_UL(iter)./(
Sum_RBs_used_RE_UL(iter).*BW_per_RB_pair);
Spectral_eff_RSRP_UL(iter)=Total_cell_throughput_RSRP_UL(iter)
)./(Sum_RBs_used_RSRP_UL(iter).*BW_per_RB_pair);
Spectral_eff_MPL_UL(iter)=Total_cell_throughput_MPL_UL(iter)
)./(Sum_RBs_used_MPL_UL(iter).*BW_per_RB_pair);
Spectral_eff_NPA_UL(iter)=Total_cell_throughput_NPA_UL(iter)
)./(Sum_RBs_used_NPA_UL(iter).*BW_per_RB_pair);

```

%%%%%%%%%% Calculation of total UL and DL spectral efficiency (bits/s/Hz)

```

Total_UL_DL_spec_eff_MPL(iter)=(Total_cell_throughput_MPL_UL(
iter)+Total_cell_throughput_MPL(iter))./(
Sum_RBs_used_MPL_UL(iter).*BW_per_RB_pair+Sum_RBs_used_MPL
(iter).*BW_per_RB_pair);
Total_UL_DL_spec_eff_RE(iter)=(Total_cell_throughput_RE_UL(

```

```

        iter)+Total_cell_throughput_RE(iter))./(Sum_RBs_used_RE_UL
        (iter).*BW_per_RB_pair+Sum_RBs_used_RE(iter).*
        BW_per_RB_pair);
    Total_UL_DL_spec_eff_RSRP(iter)=(
        Total_cell_throughput_RSRP_UL(iter)+
        Total_cell_throughput_RSRP(iter))./(Sum_RBs_used_RSRP_UL(
        iter).*BW_per_RB_pair+Sum_RBs_used_RSRP(iter).*
        BW_per_RB_pair);
    Total_UL_DL_spec_eff_NPA(iter)=(Total_cell_throughput_NPA_UL(
        iter)+Total_cell_throughput_NPA(iter))./(
        Sum_RBs_used_NPA_UL(iter).*BW_per_RB_pair+Sum_RBs_used_NPA
        (iter).*BW_per_RB_pair);

    time=toc;
    %save('hotspot_1000_iter_D2D')
end

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%% CALCULATION OF AVERAGES
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%% Average total AN power consumption in UL
P_AN_total_Watt_RSRP_UL_avg(re)=sum(P_AN_total_Watt_RSRP_UL(:))/
    iteration;
P_AN_total_Watt_RE_UL_avg(re)=sum(P_AN_total_Watt_RE_UL(:))/
    iteration;
P_AN_total_Watt_MPL_UL_avg(re)=sum(P_AN_total_Watt_MPL_UL(:))/
    iteration;
P_AN_total_Watt_NPA_UL_avg(re)=sum(P_AN_total_Watt_NPA_UL(:))/
    iteration;

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%% Average total AN power consumption in DL
P_AN_total_Watt_RSRP_DL_avg(re)=sum(P_AN_total_Watt_RSRP(:))/
    iteration;
P_AN_total_Watt_RE_DL_avg(re)=sum(P_AN_total_Watt_RE(:))/
    iteration;
P_AN_total_Watt_MPL_DL_avg(re)=sum(P_AN_total_Watt_MPL(:))/
    iteration;
P_AN_total_Watt_NPA_DL_avg(re)=sum(P_AN_total_Watt_NPA(:))/
    iteration;

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%% Average total BH power consumption in UL

```

```

P_BH_total_Watt_RSRP_UL_avg(re)=sum(P_BH_total_Watt_RSRP_UL(:))/
iteration;
P_BH_total_Watt_RE_UL_avg(re)=sum(P_BH_total_Watt_RE_UL(:))/
iteration;
P_BH_total_Watt_MPL_UL_avg(re)=sum(P_BH_total_Watt_MPL_UL(:))/
iteration;
P_BH_total_Watt_NPA_UL_avg(re)=sum(P_BH_total_Watt_NPA_UL(:))/
iteration;

%%%%%%%%%% Average total BH power consumption in DL
P_BH_total_Watt_RSRP_DL_avg(re)=sum(P_BH_total_Watt_RSRP(:))/
iteration;
P_BH_total_Watt_RE_DL_avg(re)=sum(P_BH_total_Watt_RE(:))/
iteration;
P_BH_total_Watt_MPL_DL_avg(re)=sum(P_BH_total_Watt_MPL(:))/
iteration;
P_BH_total_Watt_NPA_DL_avg(re)=sum(P_BH_total_Watt_NPA(:))/
iteration;

%%%%%%%%%% Average total energy efficiency
Total_energy_eff_RSRP_avg(re)=sum(Total_UL_DL_ener_eff_RSRP(:))/
iteration;
Total_energy_eff_RE_avg(re)=sum(Total_UL_DL_ener_eff_RE(:))/
iteration;
Total_energy_eff_MPL_avg(re)=sum(Total_UL_DL_ener_eff_MPL(:))/
iteration;
Total_energy_eff_NPA_avg(re)=sum(Total_UL_DL_ener_eff_NPA(:))/
iteration;

%%%%%%%%%% Average total UL energy efficiency
UL_energy_eff_RSRP_avg(re)=sum(Total_energy_eff_RSRP_UL(:))/
iteration;
UL_energy_eff_RE_avg(re)=sum(Total_energy_eff_RE_UL(:))/iteration
;
UL_energy_eff_MPL_avg(re)=sum(Total_energy_eff_MPL_UL(:))/
iteration;
UL_energy_eff_NPA_avg(re)=sum(Total_energy_eff_NPA_UL(:))/
iteration;

%%%%%%%%%% Average total DL energy efficiency
DL_energy_eff_RSRP_avg(re)=sum(Total_energy_eff_RSRP(:))/
iteration;

```

```

DL_energy_eff_RE_avg(re)=sum(Total_energy_eff_RE(:))/iteration;
DL_energy_eff_MPL_avg(re)=sum(Total_energy_eff_MPL(:))/iteration;
DL_energy_eff_NPA_avg(re)=sum(Total_energy_eff_NPA(:))/iteration;

%%%%%%%%%%%% Average total DL throughput
Total_cell_throughput_MPL_avg(re)=sum(Total_cell_throughput_MPL
(:))/iteration;
Total_cell_throughput_RE_avg(re)=sum(Total_cell_throughput_RE(:))
/iteration;
Total_cell_throughput_RSRP_avg(re)=sum(Total_cell_throughput_RSRP
(:))/iteration;
Total_cell_throughput_NPA_avg(re)=sum(Total_cell_throughput_NPA
(:))/iteration;

%%%%%%%%%%%% Average total UL throughput
Total_cell_throughput_MPL_UL_avg(re)=sum(
Total_cell_throughput_MPL_UL(:))/iteration;
Total_cell_throughput_RE_UL_avg(re)=sum(
Total_cell_throughput_RE_UL(:))/iteration;
Total_cell_throughput_RSRP_UL_avg(re)=sum(
Total_cell_throughput_RSRP_UL(:))/iteration;
Total_cell_throughput_NPA_UL_avg(re)=sum(
Total_cell_throughput_NPA_UL(:))/iteration;

%%%%%%%%%%%% Average total spectral efficiency
Spectral_eff_RE_avg(re)=sum(Total_UL_DL_spec_eff_RE(:))/iteration
;
Spectral_eff_RSRP_avg(re)=sum(Total_UL_DL_spec_eff_RSRP(:))/
iteration;
Spectral_eff_MPL_avg(re)=sum(Total_UL_DL_spec_eff_MPL(:))/
iteration;
Spectral_eff_NPA_avg(re)=sum(Total_UL_DL_spec_eff_NPA(:))/
iteration;

%%%%%%%%%%%% Average DL spectral efficiency
Spectral_eff_RE_DL_avg(re)=mean(Spectral_eff_RE(:));
Spectral_eff_RSRP_DL_avg(re)=mean(Spectral_eff_RSRP(:));
Spectral_eff_MPL_DL_avg(re)=mean(Spectral_eff_MPL(:));
Spectral_eff_NPA_DL_avg(re)=mean(Spectral_eff_NPA(:));

%% Average DL spectral efficiency
Spectral_eff_RE_UL_avg(re)=mean(Spectral_eff_RE_UL(:));
Spectral_eff_RSRP_UL_avg(re)=mean(Spectral_eff_RSRP_UL(:));

```

```

Spectral_eff_MPL_UL_avg(re)=mean(Spectral_eff_MPL_UL(:));
Spectral_eff_NPA_UL_avg(re)=mean(Spectral_eff_NPA_UL(:));

end

set(0,'DefaultAxesFontSize',11)

N=initial:step:end_value;

perith=3;

figure;

xlabel('Number of UEs');
ylabel('Average total UE power consumption (W)');

grid on;
xlim([initial-perith end_value+perith])

hold all;
plot (N,P_AN_total_Watt_RSRP_UL_avg,'-ro', 'LineWidth',1);

hold all;
plot (N,P_AN_total_Watt_RE_UL_avg,'-g^', 'LineWidth',1);

hold all;
plot (N,P_AN_total_Watt_MPL_UL_avg,'-md', 'LineWidth',1);

hold all;
plot (N,P_AN_total_Watt_NPA_UL_avg,'-*', 'LineWidth',1);

legend5=legend('RSRP','RE','MPL','NPA','Location','NorthEast');
set(legend5,'FontSize',10);

figure;

```

```

xlabel('Number of UEs');
ylabel('Average total UL BH power consumption (W)');
grid on;

xlim([initial-perith end_value+perith])

hold all;
plot (N,P_BH_total_Watt_RSRP_UL_avg,'-ro','LineWidth',1);

hold all;
plot (N,P_BH_total_Watt_RE_UL_avg,'-g^','LineWidth',1);

hold all;
plot (N,P_BH_total_Watt_MPL_UL_avg,'-md','LineWidth',1);

hold all;
plot (N,P_BH_total_Watt_NPA_UL_avg,'-*','LineWidth',1);

legend6=legend('RSRP','RE','MPL','NPA','Location','NorthEast');
set(legend6,'FontSize',10);

figure;

xlabel('Number of UEs');
ylabel('Average total access network DL power consumption (W)');
grid on;

xlim([initial-perith end_value+perith])

hold all;
plot (N,P_AN_total_Watt_RSRP_DL_avg,'-ro','LineWidth',1);

hold all;
plot (N,P_AN_total_Watt_RE_DL_avg,'-g^','LineWidth',1);

hold all;
plot (N,P_AN_total_Watt_MPL_DL_avg,'-md','LineWidth',1);

hold all;
plot (N,P_AN_total_Watt_MPL_DL_avg,'-*','LineWidth',1);

```

```
legend7=legend('RSRP','RE','MPL','NPA','Location','NorthEast');
set(legend7,'FontSize',10);
```

```
figure;
```

```
xlabel('Number of UEs');
ylabel('Average total DL BH power consumption (W)');
grid on;
```

```
xlim([initial-perith end_value+perith])
```

```
hold all;
plot (N,P_BH_total_Watt_RSRP_DL_avg,'-ro', 'LineWidth',1);
```

```
hold all;
plot (N,P_BH_total_Watt_RE_DL_avg,'-g^', 'LineWidth',1);
```

```
hold all;
plot (N,P_BH_total_Watt_MPL_DL_avg,'-md', 'LineWidth',1);
```

```
hold all;
plot (N,P_BH_total_Watt_NPA_DL_avg,'-*', 'LineWidth',1);
```

```
legend8=legend('RSRP','RE','MPL','NPA','Location','NorthEast');
set(legend8,'FontSize',10);
```

```
figure;
```

```
xlabel('Number of UEs');
ylabel('Average total DL network throughput (bps)');
grid on;
```

```
xlim([initial-perith end_value+perith])
```

```
hold all;
plot (N,Total_cell_throughput_RSRP_avg,'-ro', 'LineWidth',1);
```

```
hold all;
plot (N,Total_cell_throughput_RE_avg,'-g^', 'LineWidth',1);
```

```

hold all;
plot (N,Total_cell_throughput_MPL_avg,'-md','LineWidth',1);

hold all;
plot (N,Total_cell_throughput_NPA_avg,'-*','LineWidth',1);

legend9=legend('RSRP','RE','MPL','NPA','Location','NorthEast');
set(legend9,'FontSize',10);

figure;

xlabel('Number of UEs');
ylabel('Average total UL network throughput (bps)');
grid on;

xlim([initial-perith end_value+perith])

hold all;
plot (N,Total_cell_throughput_RSRP_UL_avg,'-ro','LineWidth',1);

hold all;
plot (N,Total_cell_throughput_RE_UL_avg,'-g^','LineWidth',1);

hold all;
plot (N,Total_cell_throughput_MPL_UL_avg,'-md','LineWidth',1);

hold all;
plot (N,Total_cell_throughput_NPA_UL_avg,'-*','LineWidth',1);

legend10=legend('RSRP','RE','MPL','NPA','Location','NorthEast');
set(legend10,'FontSize',10);

figure;

xlabel('Number of UEs');
ylabel('Average total energy efficiency (bits/Joule)');
grid on;

xlim([initial-perith end_value+perith])

hold all;

```

```

plot (N,Total_energy_eff_RSRP_avg,'-ro', 'LineWidth',1);

hold all;
plot (N,Total_energy_eff_RE_avg,'-g^', 'LineWidth',1);

hold all;
plot (N,Total_energy_eff_MPL_avg,'-md', 'LineWidth',1);

hold all;
plot (N,Total_energy_eff_NPA_avg,'-*', 'LineWidth',1);

legend12=legend('RSRP','RE','MPL','NPA','Location', 'NorthEast');
set(legend12,'FontSize',10);

figure;

xlabel('Number of UEs');
ylabel('Average total UL energy efficiency (bits/Joule)');
grid on;

xlim([initial-perith end_value+perith])

hold all;
plot (N,UL_energy_eff_RSRP_avg,'-ro', 'LineWidth',1);

hold all;
plot (N,UL_energy_eff_RE_avg,'-g^', 'LineWidth',1);

hold all;
plot (N,UL_energy_eff_MPL_avg,'-md', 'LineWidth',1);

hold all;
plot (N,UL_energy_eff_NPA_avg,'-*', 'LineWidth',1);

legend13=legend('RSRP','RE','MPL','NPA','Location', 'NorthEast');
set(legend13,'FontSize',10);

figure;

xlabel('Number of UEs');
ylabel('Average total DL energy efficiency (bits/Joule)');

```

```

grid on;

xlim([initial-perith end_value+perith])

hold all;
plot (N,DL_energy_eff_RSRP_avg,'-ro', 'LineWidth',1);

hold all;
plot (N,DL_energy_eff_RE_avg,'-g^', 'LineWidth',1);

hold all;
plot (N,DL_energy_eff_MPL_avg,'-md', 'LineWidth',1);

hold all;
plot (N,DL_energy_eff_NPA_avg,'-*', 'LineWidth',1);

legend14=legend('RSRP','RE','MPL','NPA','Location', 'NorthEast');
set(legend14,'FontSize',10);

figure;

xlabel('Number of UEs');
ylabel('Average total network spectrum efficiency (bps/Hz)');
grid on;

xlim([initial-perith end_value+perith])

hold all;
plot (N,Spectral_eff_RSRP_avg,'-ro', 'LineWidth',1);

hold all;
plot (N,Spectral_eff_RE_avg,'-g^','LineWidth',1);

hold all;
plot (N,Spectral_eff_MPL_avg,'-md','LineWidth',1);

hold all;
plot (N,Spectral_eff_NPA_avg,'-*','LineWidth',1);

legend11=legend('RSRP','RE','MPL','NPA','Location', 'NorthEast');
set(legend11,'FontSize',10);

```

```

figure;

xlabel('Number of UEs');
ylabel('Average total DL spectrum efficiency(bps/Hz)');
grid on;

xlim([initial-perith end_value+perith])

hold all;
plot (N,Spectral_eff_RSRP_DL_avg,'-ro', 'LineWidth',1);

hold all;
plot (N,Spectral_eff_RE_DL_avg,'-g^','LineWidth',1);

hold all;
plot (N,Spectral_eff_MPL_DL_avg,'-md','LineWidth',1);

hold all;
plot (N,Spectral_eff_NPA_DL_avg,'-*','LineWidth',1);

legend10=legend('RSRP','RE','MPL','NPA','Location', 'NorthEast');
set(legend10,'FontSize',10);

```

```

figure;

xlabel('Number of UEs');
ylabel('Average total UL spectrum efficiency ((bps/Hz))');
grid on;

xlim([initial-perith end_value+perith])

hold all;
plot (N,Spectral_eff_RSRP_UL_avg,'-ro', 'LineWidth',1);

hold all;
plot (N,Spectral_eff_RE_UL_avg,'-g^','LineWidth',1);

hold all;
plot (N,Spectral_eff_MPL_UL_avg,'-md','LineWidth',1);

hold all;
plot (N,Spectral_eff_NPA_UL_avg,'-*','LineWidth',1);

```

```

legend11=legend('RSRP','RE','MPL','NPA','Location','NorthEast');
set(legend11,'FontSize',10);

figure;

Y=[sum(Spectral_eff_RSRP_avg)/number_points,sum(Spectral_eff_RE_avg)/
    number_points, sum(Spectral_eff_MPL_avg)/number_points, sum(
    Spectral_eff_NPA_avg)/number_points];
x=[1,2,3,4];
bar(x,Y);
colormap(summer(2));
grid on
l = cell(1);
l{1}='RSRP'; l{2}='RE'; l{3}='MPL'; l{4}='NPA';
set(gca,'xticklabel', l) ;
ylabel('Average total UL and DL network spectrum efficiency ((bps/Hz)
    ');

```

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Γ: Κώδικας αρχείου find_target_SNR_new.m

```
%%%%% find_target_SNR_new %%%%%

function[SNR_target]= find_target_SNR_new(number_links,
    throughput_link_calc,BW_BH)

%SNR
    =[-10,-9,-8,-7,-6,-5,-4,-3,-2,-1,0,1,2,3,4,5,6,7,8,9,10,11,12,13,14,15,16,17,

SNR_target=zeros(1,number_links);

for j=1:number_links
% i=1;
% finished=0;

% if throughput_link_calc(j)<=throughput_supported(1)
%     SNR_target(j)=SNR(1);
%     finished=1;
% end
% while finished==0
%     if ((throughput_link_calc(j)==throughput_supported(i+1))|| ((
    throughput_link_calc(j)<throughput_supported(i+2))) && finished
    ==0
%         SNR_target(j)=SNR(i+1);
%         finished=1;
%     else i=i+1;
%     end
% end

SNR_target(j)=10*log10(2^(throughput_link_calc(j)/BW_BH)-1);

end
```