



Република Македонија

УНИВЕРЗИТЕТ „Св. КИРИЛ И МЕТОДИЈ“

ФАКУЛТЕТ ЗА ЕЛЕКТРОТЕХНИКА И  
ИНФОРМАЦИСКИ ТЕХНОЛОГИИ



Институт за телекомуникации

Скопје

# **КВАЛИТЕТ НА ОРКЕСТРИРАНИ СЕРВИСИ ВО ОКОЛИНА НА ОБЛАК КАЈ 5G МОБИЛНИ МРЕЖИ**

**- ДОКТОРСКА ДИСЕРТАЦИЈА -**

Кандидат:  
м-р Стојан Китанов

Ментор:  
Проф. Д-р Тони Јаневски

Скопје, февруари 2018



Република Македонија

УНИВЕРЗИТЕТ „СВ. КИРИЛ И МЕТОДИЈ“

ФАКУЛТЕТ ЗА ЕЛЕКТРОТЕХНИКА И  
ИНФОРМАЦИСКИ ТЕХНОЛОГИИ

Институт за телекомуникации

Скопје



**Стојан Китанов**

**КВАЛИТЕТ НА ОРКЕСТРИРАНИ СЕРВИСИ ВО  
ОКОЛИНА НА ОБЛАК КАЈ 5G МОБИЛНИ МРЕЖИ**

**- ДОКТОРСКА ДИСЕРТАЦИЈА -**

Скопје, февруари 2018

Оваа ДОКТОРСКА ДИСЕРТАЦИЈА е поднесена до

Универзитет „Св. Кирил и Методиј“ – Скопје  
Факултет за електротехника и информациски технологии

за стекнување со научно звање

## ДОКТОР НА НАУКИ

област на истражување: технички и технолошки науки

поле на истражување: електротехника и информациски технологии

потесна научна област: телекомуникации

Наслов на докторската дисертација:

**Квалитет на оркестрирани сервиси во околина на облак  
кај 5G мобилни мрежи**

Кандидат:

м-р Стојан Китанов,

индекс бр. 01/2011

Ментор:

проф. д-р Тони Јаневски

Комисија:

Проф. д-р Лилјана Гавриловска, претседател

Проф. д-р Тони Јаневски, ментор

Проф. д-р Борислав Поповски, член

Проф. д-р Перо Латкоски, член

Проф. д-р Митко Богданоски, надворешен член

*Посветено на сопругата Драга, ќерката Донка,  
моите родители Драга и Наум и мојата сестра Весна*

## БЛАГОДАРНОСТ

Голема благодарност до мојот ментор проф. д-р Тони Јаневски за неговата помош при изработката на овој труд, кој со својата висока стручност, огромно искуство и знаење постојано ме мотивираше и ме водеше при изработката на оваа докторска дисертација.

Особена благодарност проф. д-р Лилјана Гавриловска раководител на институтот за телекомуникации и раководител на студиската програма за докторските студии, за постојаната поддршка и соработка за време на докторските студии.

Голема благодарност до сите колеги и членови во Институтот за телекомуникации, за исклучително огромната поддршка, соработка и корисните совети при изработката на овој докторски труд.

Благодарност до професорот Едмундо Монтеиро од Универзитетот Квимбра, од Португалија што ми ја даде првичната идеја и вистинската насока за изработка на овој докторски труд.

Голема благодарност до колегите Универзитетот за информатички науки и технологии „Св. Апостол Павле“ – Охрид, колегите од Универзитетот „Мајка Тереза“ – Скопје, колегите од Моторола, колегите од магистерските студии од Универзитетот Есекс, од Обединетото Кралство и колегите од додипломските студии на Факултетот за електротехника и информациски технологии - Скопје за нивната безрезервна поддршка при изработката на овој труд.

Сакам да им се заблагодарам на моите родители Драга и Наум за нивната љубов, поддршка и грижа што постојано ја добивам од нив.

Благодарност и до мојата сестра Весна и нејзиното семејство за нивната безрезервна поддршка.

Конечно особено голема благодарност до сопругата Драга и ќерката Донка што постојано беа тука до мене и ми даваа мотивација и инспирација да ги надминам најтешките моменти при изработката на докторската дисертација.

# Содржина

<b>АПСТРАКТ</b> .....	<b>22</b>
<b>ПРВ ДЕЛ</b> .....	<b>24</b>
<b>1 ВОВЕД</b> .....	<b>24</b>
1.1 ПЕТТА ГЕНЕРАЦИЈА НА МОБИЛНИ МРЕЖИ – 5G .....	24
1.2 ОБРАБОТКА НА ПОДАТОЦИ ВО ОКОЛИНА НА ОБЛАК – ОБЛАК ТЕХНОЛОГИЈА (CLOUD COMPUTING) ....	25
1.3 ОБРАБОТКА НА ПОДАТОЦИТЕ ВО ОКОЛИНА НА МАГЛА – МАГЛА ТЕХНОЛОГИЈА (FOG COMPUTING) ...	26
1.4 МОТИВАЦИЈА ЗА ДОКТОРСКАТА ДИСЕРТАЦИЈА .....	27
1.5 ИСТРАЖУВАЧКИ ПРОБЛЕМ, ПРЕДМЕТ НА ИСТРАЖУВАЊЕ И ХИПОТЕЗА.....	28
1.6 ПРИДОНЕСИ НА ДОКТОРСКАТА ДИСЕРТАЦИЈА.....	30
1.7 ОРГАНИЗАЦИЈА НА ДОКТОРСКАТА ДИСЕРТАЦИЈА .....	32
1.8 ОБЈАВЕНИ ТРУДОВИ ВО РАМКИТЕ НА ДОКТОРСКАТА ДИСЕРТАЦИЈА .....	33
1.8.1 <i>Објавени поглавја во книга</i> .....	33
1.8.2 <i>Објавени трудови во реномирани светски списанија</i> .....	34
1.8.3 <i>Објавени трудови на меѓународни конференции</i> .....	34
<b>2 ПЕТТА ГЕНЕРАЦИЈА НА МОБИЛНИ МРЕЖИ – 5G</b> .....	<b>36</b>
2.1 ПОТРЕБАТА ЗА 5G .....	37
2.2 ПРЕГЛЕД НА ГЕНЕРАЦИИТЕ НА МОБИЛНИ И БЕЗЖИЧНИ МРЕЖИ .....	38
2.3 МИГРАЦИЈА КОН 5G.....	41
2.4 5G СТАНДАРДИЗАЦИЈА И ИМПЛЕМЕНТАЦИЈА .....	42
2.5 ПЕРФОРМАНСНИ ОЧЕКУВАЊА И СЕРВИСНИТЕ ПОБАРУВАЊА ОД 5G.....	43
2.6 5G АПЛИКАЦИИ И СЕРВИСИ .....	46
2.7 5G АРХИТЕКТУРНИ МРЕЖНИ НИВОА .....	48
2.8 ПРЕДЛОГ ДИЗАЈН НА 5G МРЕЖНА АРХИТЕКТУРА.....	50
2.9 5G ПАМЕТЕН МОБИЛЕН УРЕД .....	51
<b>3 ИНТЕРНЕТ НА СЕ</b> .....	<b>54</b>
3.1 ИНТЕРНЕТ НА НЕШТАТА.....	54
3.2 ВЕБ НА НЕШТАТА .....	55
3.3 ИНТЕРНЕТ НА СЕ .....	56
<b>4 ОБРАБОТКА НА ПОДАТОЦИ ВО ОКОЛИНА НА ОБЛАК – CLOUD COMPUTING</b> .....	<b>58</b>
4.1 КАРАКТЕРИСТИКИ НА ОБЛАК ТЕХНОЛОГИЈАТА .....	58
4.2 ОБРАБОТКА НА ПОДАТОЦИТЕ ВО МОБИЛНА ОКОЛИНА .....	59
4.3 МОДЕЛ И АРХИТЕКТУРА НА ОБЛАК ТЕХНОЛОГИЈАТА .....	60
4.4 СЕРВИСНО ОРИЕНТИРАНА АРХИТЕКТУРА НА ОБЛАКОТ .....	62
4.5 МОДЕЛИ ЗА РАСПОРЕДУВАЊЕ НА ОБЛАКОТ .....	64
4.6 БЕНЕФИЦИИ ОД ОБРАБОТКАТА НА ПОДАТОЦИ ВО ОКОЛИНА НА ОБЛАКОТ .....	66
<b>5 ОБРАБОТКА НА ПОДАТОЦИ ВО ОКОЛИНА НА МАГЛА – FOG COMPUTING</b> .....	<b>68</b>
5.1 СПОРЕДБА НА ОБРАБОТКАТА НА ПОДАТОЦИТЕ ВО ОКОЛИНА НА ОБЛАК И МАГЛА.....	69
5.2 АРХИТЕКТУРА НА ОБРАБОТКА НА ПОДАТОЦИТЕ ВО ОКОЛИНА НА МАГЛА .....	71
5.3 СЕ ПРИСУТНОСТ НА УРЕДИТЕ.....	74
5.4 УПРАВУВАЊЕ СО МРЕЖАТА .....	75
5.5 КОНЕКТИВНОСТ ВО ОКОЛИНА НА МАГЛА .....	76
5.6 ПРИВАТНОСТ И СИГУРНОСТ ВО ОКОЛИНА НА МАГЛА.....	77
<b>6 ОБЛАКОТ КАЈ 5G МОБИЛНИТЕ МРЕЖИ</b> .....	<b>79</b>
6.1 ПРИЧИНИ ПОРАДИ КОИ ТЕЛЕКОМУНИКАЦИСКИТЕ ОПЕРАТОРИ ТРЕБА ДА ГО КОРИСТАТ ОБЛАКОТ.....	79
6.2 ОБЛАКОТ КАЈ ТЕЛЕКОМУНИКАЦИСКИТЕ ОПЕРАТОРИ.....	80
6.3 КОНВЕНЦИОНАЛНА ОБРАБОТКА НА ПОДАТОЦИТЕ ВО ОКОЛИНА НА ОБЛАК (CLOUD COMPUTING) КАЈ 5G МОБИЛНИТЕ МРЕЖИ .....	81
6.4 МОБИЛНА ОБРАБОТКА НА ПОДАТОЦИ НА РАБОТ (ИВИЦАТА) (MOBILE EDGE COMPUTING) КАЈ 5G МОБИЛНИТЕ МРЕЖИ.....	86
6.5 ОБРАБОТКА НА ПОДАТОЦИТЕ НА РАБОТ (ИВИЦАТА) НА МРЕЖАТА НАСПРОТИ ОБРАБОТКАТА НА ОБРАБОТКА НА ПОДАТОЦИТЕ ВО ОКОЛИНА НА МАГЛА КАЈ 5G МРЕЖИТЕ .....	88
6.6 ПРИЧИНИ ЗА ПРИМЕНА НА ОБРАБОТКА НА ПОДАТОЦИТЕ ВО ОКОЛИНА НА МАГЛА КАЈ 5G МРЕЖИТЕ ..	91

6.7	МОЖНИ СЦЕНАРИЈА ЗА ПРИМЕНА НА ОБРАБОТКА НА ПОДАТОЦИТЕ ВО ОКОЛИНА НА МАГЛА КАЈ 5G МРЕЖИТЕ.....	92
<b>ВТОР ДЕЛ .....</b>		<b>94</b>
<b>7</b>	<b>МЕХАНИЗАМ ЗА ОРКЕСТРИРАЊЕ (ДИРИГИРАЊЕ) НА СЕРВИСИТЕ ВО ОКОЛИНА НА МАГЛА КАЈ 5G МОБИЛНИТЕ МРЕЖИ .....</b>	<b>94</b>
7.1	ОРКЕСТРАТОР (ДИРИГЕНТ) НА СЕРВИСИТЕ ВО ХИБРИДНА ОКОЛИНА .....	94
7.2	АРХИТЕКТУРА НА 5G МРЕЖАТА ВО ОКОЛИНА НА МАГЛА .....	96
7.3	РАСПРЕДЕЛБА НА РЕСУРСИТЕ ОД ЛОКАЛНО ДИСТРИБУИРАНИТЕ РЕЕР-ТО-РЕЕР МОБИЛНО ОБЛАЧНИ ПРЕСМЕТКОВНИ УРЕДИ .....	99
7.4	РАСПРЕДЕЛБА НА РЕСУРСИ ЗА ПАМЕТНИОТ МОБИЛЕН УРЕД ОД ОБЛАКОТ ИЛИ МАГЛОВИТАТА РАДИО ПРИСТАПНА МРЕЖА .....	100
<b>8</b>	<b>ЕВАЛУАЦИЈА НА КВАЛИТЕТОТ НА ОРКЕСТРИРАНИТЕ СЕРВИСИ ВО ОКОЛИНА НА ОБЛАК И МАГЛА КАЈ 5G МОБИЛНИТЕ МРЕЖИ.....</b>	<b>102</b>
8.1	СИМУЛАЦИСКО СЦЕНАРИО .....	102
8.2	RTT ЛАТЕНТНОСТ ИЛИ ДОЦНЕЊЕ ОД КРАЈ ДО КРАЈ .....	103
8.3	БИТСКИ ПРОТОК (THROUGHPUT).....	104
8.4	ЕНЕРГЕТСКА ЕФИКАСНОСТ .....	135
8.5	ДИСКУСИЈА НА РЕЗУЛТАТИТЕ .....	165
<b>9</b>	<b>АЛГОРИТАМ ЗА ОПТИМАЛНА СЕЛЕКЦИЈА НА 5G БАЗНА СТАНИЦА.....</b>	<b>167</b>
9.1	СЕРВИСНИ ПОБАРУВАЊА ЗА РАЗЛИЧНИ ТИПОВИ НА СЕРВИСИ .....	167
9.2	МОЖНИ АЛГОРИТМИ ЗА ОПТИМАЛНА СЕЛЕКЦИЈА НА РАДИО ПРИСТАПНА МРЕЖА .....	168
9.3	СЦЕНАРИО ЗА ЕВАЛУАЦИЈА НА АЛГОРИТМИТЕ .....	171
9.4	ЕВАЛУАЦИЈА НА ДОБИЕНИТЕ РЕЗУЛТАТИТЕ СПОРЕД АЛГОРИТАМ 1 .....	172
9.5	ЕВАЛУАЦИЈА НА ДОБИЕНИТЕ РЕЗУЛТАТИТЕ СПОРЕД АЛГОРИТАМ 2 .....	179
9.6	ЕВАЛУАЦИЈА НА ДОБИЕНИТЕ РЕЗУЛТАТИТЕ СПОРЕД АЛГОРИТАМ 3 .....	186
9.7	ЕВАЛУАЦИЈА НА ДОБИЕНИТЕ РЕЗУЛТАТИТЕ СПОРЕД АЛГОРИТАМ 4 .....	193
9.8	ЕВАЛУАЦИЈА НА ДОБИЕНИТЕ РЕЗУЛТАТИТЕ СПОРЕД АЛГОРИТАМ 5 .....	200
9.9	ДИСКУСИЈА НА РЕЗУЛТАТИТЕ .....	207
<b>ТРЕТ ДЕЛ .....</b>		<b>208</b>
<b>10</b>	<b>ЗАКЛУЧОК.....</b>	<b>208</b>
10.1	ЗАКЛУЧНИ ЗАБЕЛЕШКИ .....	208
10.2	ПРИДОНЕСИ НА ДОКТОРСКАТА ДИСЕРТАЦИЈА .....	211
<b>РАБОТНА БИБЛИОГРАФИЈА.....</b>		<b>214</b>

## Листа на акроними

<b>0G</b>	Null Generation of Mobile Networks
<b>1G</b>	First Generation of Mobile Networks
<b>2G</b>	Second Generation of Mobile Networks
<b>3D</b>	Three Dimension
<b>3G</b>	Third Generation of Mobile Networks
<b>4A</b>	Anytime Anywhere Anyone Anything
<b>4D</b>	Four Dimension
<b>4G</b>	Fourth Generation of Mobile Networks
<b>5G</b>	Fifth Generation of Mobile Networks
<b>AAA</b>	Authentication Authorization and Accounting
<b>AaaS</b>	Anything as a Service
<b>AMCS</b>	Adaptive Modulation Coding Scheme
<b>AMPS</b>	Advanced Mobile Phone System
<b>AP</b>	Access Point
<b>API</b>	Application Programming Interface
<b>BBU</b>	Base Band Unit
<b>BS</b>	Base Station
<b>BTS</b>	Base Transceiver Station
<b>CaaS</b>	Communication as a Service
<b>CCTV</b>	Circuit Closed Tele-Vision
<b>CDMA</b>	Code Division Multiple Access
<b>CDN</b>	Content Distribution Network
<b>CAGR</b>	Compound Annual Growth Rate
<b>CAPEX</b>	Capital Expenditures
<b>CC</b>	Cloud Computing
<b>CMS</b>	Cloud Management System
<b>CoA</b>	Care of Address
<b>CoAP</b>	Constrained Application Protocol
<b>CRAN</b>	Cloud RAN
<b>DVB</b>	Digital Video Broadcasting
<b>Gbps</b>	Giga bits per second
<b>GPRS</b>	General Packet Radio Service
<b>GSM</b>	Global System for Mobile Communications
<b>D2D</b>	Device-to-Device
<b>E2E</b>	End-to-End
<b>EB</b>	ExaByte
<b>EDGE</b>	Enhanced Data rates for Global Evolution; Enhanced Data rates for GSM Evolution
<b>EEPC</b>	Enhanced Evolved Packet Core
<b>EGPRS</b>	Enhanced GPRS
<b>eMBB</b>	Enhanced Mobile Broad Band
<b>eMBMS</b>	Evolved Multimedia Broadcast Multicast Service
<b>EPC</b>	Evolved Packet Core
<b>ETSI</b>	European Telecommunication Standardization Institute
<b>FA</b>	Foreign Agent
<b>FDD</b>	Frequency Division Duplex
<b>FM</b>	Frequency Modulation
<b>FW</b>	FirmWare



<b>HA</b>	Home Agent
<b>HCRAN</b>	Heterogeneous Cloud Radio Access Network
<b>HD</b>	High Definition
<b>HD-CCTV</b>	High Definition – Circuit Closed Tele-Vision
<b>HPC</b>	High Performance Computing
<b>HPN</b>	High Power Node
<b>HSDPA</b>	High Speed Downlink Packet Access
<b>HSPA</b>	High Speed Packet Access
<b>HSUPA</b>	High Speed Uplink Packet Access
<b>HTTP</b>	HyperText Transfer Protocol
<b>IaaS</b>	Infrastructure as a Service
<b>ICN</b>	Information Centric Network
<b>ICT</b>	Information Communication Technology
<b>ID</b>	Identification
<b>IEEE</b>	Institute of Electrical and Electronics Engineers
<b>IMT</b>	International Mobile Telecommunications
<b>IoE</b>	Internet of Everything
<b>IoS</b>	Internet of Service
<b>IoT</b>	Internet of Things
<b>IoT-GSI</b>	Global Standards Initiative on Internet of Things
<b>IP</b>	Internet Protocol
<b>IP/MPLS</b>	Internet Protocol / Multi Protocol Label Switching
<b>IPv6</b>	IP version 6
<b>IT</b>	Information Technology
<b>ITS</b>	Intelligent Transport Systems
<b>ITU</b>	International Telecommunication Union
<b>ITU-R</b>	International Telecommunication Union – Radiocommunication
<b>Kbps</b>	Kilo bits per second
<b>KPI</b>	Key Performance Indicators
<b>LTE</b>	Long Term Evolution
<b>LTE-A</b>	LTE Advanced
<b>LTE-A Pro</b>	LTE Advanced Pro
<b>M2M</b>	Machine-to-Machine
<b>MAGIC</b>	<b>M</b> obile multimedia, <b>A</b> nytime anywhere, <b>G</b> lobal mobility support, <b>I</b> ntegrated wireless solution, and <b>C</b> ustomized personal service
<b>MANET</b>	Mobile Ad-hoc NETwork
<b>Mbps</b>	Mega bits per second
<b>MC</b>	Mobile Computing
<b>MCC</b>	Mobile Cloud Computing
<b>MCS</b>	Modulation Coding Scheme
<b>MEC</b>	Mobile Edge Computing
<b>m-gaming</b>	mobile gaming
<b>m-governance</b>	mobile governance
<b>m-health-care</b>	mobile-health-care
<b>mlearning</b>	mobile learning
<b>MHz</b>	Mega Hertz
<b>MIMO</b>	Multiple Input Multiple Output
<b>MIP</b>	Mobile IP
<b>mMTC</b>	massive Machine Type Communication
<b>MPLS</b>	Multi Protocol Label Switching

<b>MQTT</b>	Message Queue Telemetry Transport
<b>ms</b>	Millisecond
<b>MSS</b>	Mobile Satellite System
<b>mW</b>	millimeter Wave
<b>NaaS</b>	Networks as a Service
<b>NAT</b>	Network Address Translation
<b>NFV</b>	Network Function Virtualization
<b>OFDM</b>	Orthogonal Frequency Division Multiplexing
<b>OFDMA</b>	Orthogonal Frequency Division Multiple Access
<b>OPEX</b>	Operating Expenditures
<b>OTP</b>	Open Transport Protocol
<b>OTT</b>	Over The Top
<b>OVS</b>	Open Virtual Switch
<b>PaaS</b>	Platform as a Service
<b>PC</b>	Personal Computer
<b>P2M</b>	People to Machine
<b>P2P</b>	People to People
<b>PDB</b>	Packet Delay Budget
<b>PDN</b>	Packet Data Network
<b>PGW</b>	PDN GateWay
<b>PLR</b>	Packet Loss Ratio
<b>PLC</b>	Programming Logic Controller
<b>QoE</b>	Quality of Experience
<b>QoS</b>	Quality of Service
<b>RAN</b>	Radio Access Network
<b>RAT</b>	Radio Access Technology
<b>RF</b>	Radio Frequency
<b>RFID</b>	Radio Frequency ID
<b>RNIS</b>	Radio Network Information Service
<b>RRH</b>	Remote Radio Head
<b>RRM</b>	Radio Resource Management
<b>RSRQ</b>	Reference Signal Received Quality
<b>RTP</b>	Real-time Transport Protocol
<b>RTT</b>	Round Trip Time
<b>SaaS</b>	Software as a Service
<b>SC-FDMA</b>	Single Carrier – Frequency Division Multiple Access
<b>SDN</b>	Software Defined Networking
<b>SGW</b>	Serving GateWay
<b>SLA</b>	Service Level Agreement
<b>SMS</b>	Short Message Service
<b>SSB</b>	Single Side Band
<b>TCP</b>	Transmission Control Protocol
<b>TDD</b>	Time Division Duplex
<b>TDMA</b>	Time Division Multiple Access
<b>TV</b>	Tele-Vision
<b>UDN</b>	Ultra-Dense Networks
<b>UHD</b>	Ultra High Definition
<b>UMTS</b>	Universal Mobile Telecommunication Systems
<b>URLLC</b>	Ultra Reliable Low Latency Communication
<b>V2V</b>	Vehicle-to-Vehicle

<b>VM</b>	Virtual Machine
<b>VoIP</b>	Voice over IP
<b>VPN</b>	Virtual Private Network
<b>WCDMA</b>	Wideband Code Division Multiple Access
<b>WiFi</b>	Wireless Fidelity
<b>WiMAX</b>	Worldwide Interoperability for Microwave Access
<b>WLAN</b>	Wireless Local Area Network
<b>WMN</b>	Wireless Mesh Network
<b>WoT</b>	Web of Things
<b>WPAN</b>	Wireless Personal Area Network
<b>WRC</b>	World Radiocommunication Conference
<b>АЕК</b>	Агенција за Електронски Комуникации
<b>ИКТ</b>	Информатичко Комуникациска Технологија
<b>ИТ</b>	Информатичка Технологија
<b>РФ</b>	Радио Фреквенциска
<b>САД</b>	Соединети Американски Држави
<b>ТВ</b>	Теле-Визија

## Листа на слики

Слика 2.1 Насоки за миграција кон 5G [54].....	42
Слика 2.2 5G СТАНДАРДИЗАЦИЈА И ИМПЛЕМЕНТАЦИЈА СПОРЕД ИМТ-2020 [37] .....	43
Слика 2.3 ТИПОВИ НА СЕРВИСИ ОД 1G ДО 5G [54] .....	46
Слика 2.4 АРХИТЕКТУРНИ НИВОА НА 5G МРЕЖАТА [54].....	49
Слика 2.5 5G МРЕЖНА АРХИТЕКТУРА [11], [57].....	51
Слика 2.6 СЛОЕВИ НА ПРОТОКОЛНИОТ СТЕК КАЈ 5G ПАМЕТНИОТ УРЕД [5].....	52
Слика 2.7 МРЕЖНО НИВО КАЈ 5G ПАМЕТНИОТ УРЕД [5].....	52
Слика 3.1 ПОВРЗАНОСТА КАЈ ИНТЕРНЕТ НА СЕ [29] .....	57
Слика 4.1 МОДЕЛ ЗА (МОБИЛНА) ОБРАБОТКА НА ПОДАТОЦИ ВО ОКОЛИНА НА ОБЛАК [18].....	61
Слика 4.2 АРХИТЕКТУРА ЗА МОБИЛНА ОБРАБОТКА НА ПОДАТОЦИ ВО ОКОЛИНА НА ОБЛАК [17] .....	61
Слика 4.3 СЕРВИСНО ОРИЕНТИРАНА АРХИТЕКТУРА НА ОБЛАКОТ .....	62
Слика 4.4 МОДЕЛ НА ХИБРИДЕН ОБЛАК ЗА ОБРАБОТКА НА ПОДАТОЦИ [69].....	65
Слика 5.1 АРХИТЕКТУРА ЗА ОБРАБОТКА НА ПОДАТОЦИТЕ ВО ОКОЛИНА НА МАГЛА [72].....	72
Слика 5.2 ПОДАТОЧНА И КОНТРОЛНА РАМНИНА НА МРЕЖАТА ЗА ОБРАБОТКА НА ПОДАТОЦИ ВО ОКОЛИНА НА МАГЛА [30] ...	73
Слика 6.1 ИНТЕГРАЦИЈА НА ОБЛАКОТ СО ТЕЛЕКОМУНИКАЦИСКА МРЕЖА [20] .....	81
Слика 6.2 АРХИТЕКТУРА НА 5G МРЕЖАТА ВО ОКОЛИНА НА ОБЛАК СО МОБИЛНА ОБРАБОТКА НА ПОДАТОЦИ [82] .....	82
Слика 6.3 5G МРЕЖА СО CRAN И HCRAN .....	83
Слика 6.4 АРХИТЕКТУРА ЗА МОБИЛНА ОБРАБОТКА НА ПОДАТОЦИТЕ НА РАБОТ (ИВИЦАТА) НА МРЕЖАТА .....	87
Слика 7.1 МОДЕЛ НА ОРКЕСТРИРАЊЕ НА СЕРВИСИТЕ ВО ХИБРИДНА ОКОЛИНА ЗА МАГЛОВИТА ОБРАБОТКАТА НА ПОДАТОЦИТЕ КАЈ 5G МОБИЛНИТЕ МРЕЖИ [54] .....	95
Слика 7.2 АРХИТЕКТУРА ЗА ОБРАБОТКА НА ПОДАТОЦИТЕ ВО ОКОЛИНА НА ОБЛАК КАЈ 5G МОБИЛНИТЕ МРЕЖИ [72] .....	96
Слика 7.3 РАСПРЕДЕЛБА РЕСУРСИ ЗА ОБРАБОТКА НА ПОДАТОЦИ ЗА ПАМЕТНИОТ УРЕД ОД ЛОКАЛНО ДИСТРИБУИРАНИТЕ PEER- TO-PEER МОБИЛЕН ОБЛАК [72] .....	99
Слика 7.4 РАСПРЕДЕЛБА НА РЕСУРСИ ЗА ОБРАБОТКА НА ПОДАТОЦИ ЗА ПАМЕТНИОТ УРЕД ОД ОБЛАКОТ И ОД МАГЛОВИТАТА РАДИО ПРИСТАПНА МРЕЖА (FOGRAN) [72] .....	100
Слика 8.1 СИМУЛАЦИСКО СЦЕНАРИО [110] .....	102
Слика 8.2 СПОРЕДБА НА RTT ЛАТЕНТНОСТА ВО ОКОЛИНА НА ОБЛАК И МАГЛА КАЈ 3G, 4G И 5G RAN .....	104
Слика 8.3 СПОРЕДБА НА БИТСКИОТ ПРОТОК КАЈ 3G МОБИЛНИ МРЕЖИ ВО ОКОЛИНА НА МАГЛА И ОБЛАК ВО ЗАВИСНОСТ ОД БРОЈОТ НА КОРИСНИЧКИ УРЕДИ ПРИ РАСТОЈАНИЕ ОД 0 ДО 500 МЕТРИ ВО DOWNLINK НАСОКА .....	109
Слика 8.4 СПОРЕДБА НА БИТСКИОТ ПРОТОК КАЈ 3G МОБИЛНИ МРЕЖИ ВО ОКОЛИНА НА МАГЛА И ОБЛАК ВО ЗАВИСНОСТ ОД БРОЈОТ НА КОРИСНИЧКИ УРЕДИ ПРИ РАСТОЈАНИЕ ОД 500 ДО 1000 МЕТРИ ВО DOWNLINK НАСОКА .....	109
Слика 8.5 СПОРЕДБА НА БИТСКИОТ ПРОТОК КАЈ 3G МОБИЛНИ МРЕЖИ ВО ОКОЛИНА НА МАГЛА И ОБЛАК ВО ЗАВИСНОСТ ОД БРОЈОТ НА КОРИСНИЧКИ УРЕДИ ПРИ РАСТОЈАНИЕ ОД 1000 ДО 1500 МЕТРИ ВО DOWNLINK НАСОКА .....	109
Слика 8.6 СПОРЕДБА НА БИТСКИОТ ПРОТОК КАЈ 3G МОБИЛНИ МРЕЖИ ВО ОКОЛИНА НА МАГЛА И ОБЛАК ВО ЗАВИСНОСТ ОД БРОЈОТ НА КОРИСНИЧКИ УРЕДИ ПРИ РАСТОЈАНИЕ ОД 1500 ДО 2000 МЕТРИ ВО DOWNLINK НАСОКА .....	110
Слика 8.7 СПОРЕДБА НА БИТСКИОТ ПРОТОК КАЈ 3G МОБИЛНИ МРЕЖИ ВО ОКОЛИНА НА МАГЛА И ОБЛАК ВО ЗАВИСНОСТ ОД БРОЈОТ НА КОРИСНИЧКИ УРЕДИ ПРИ РАСТОЈАНИЕ ОД 2000 ДО 2500 МЕТРИ ВО DOWNLINK НАСОКА .....	110
Слика 8.8 СПОРЕДБА НА БИТСКИОТ ПРОТОК КАЈ 3G МОБИЛНИ МРЕЖИ ВО ОКОЛИНА НА МАГЛА И ОБЛАК ВО ЗАВИСНОСТ ОД РАСТОЈАНИЕТО МЕЃУ КОРИСНИЧКИОТ УРЕД И БАЗНАТА СТАНИЦА ЗА 100 КОРИСНИЧКИ УРЕДИ ВО DOWNLINK НАСОКА..	110
Слика 8.9 СПОРЕДБА НА БИТСКИОТ ПРОТОК КАЈ 3G МОБИЛНИ МРЕЖИ ВО ОКОЛИНА НА МАГЛА И ОБЛАК ВО ЗАВИСНОСТ ОД РАСТОЈАНИЕТО МЕЃУ КОРИСНИЧКИОТ УРЕД И БАЗНАТА СТАНИЦА ЗА 200 КОРИСНИЧКИ УРЕДИ ВО DOWNLINK НАСОКА..	111
Слика 8.10 СПОРЕДБА НА БИТСКИОТ ПРОТОК КАЈ 3G МОБИЛНИ МРЕЖИ ВО ОКОЛИНА НА МАГЛА И ОБЛАК ВО ЗАВИСНОСТ ОД РАСТОЈАНИЕТО МЕЃУ КОРИСНИЧКИОТ УРЕД И БАЗНАТА СТАНИЦА ЗА 300 КОРИСНИЧКИ УРЕДИ ВО DOWNLINK НАСОКА..	111
Слика 8.11 СПОРЕДБА НА БИТСКИОТ ПРОТОК КАЈ 3G МОБИЛНИ МРЕЖИ ВО ОКОЛИНА НА МАГЛА И ОБЛАК ВО ЗАВИСНОСТ ОД РАСТОЈАНИЕТО МЕЃУ КОРИСНИЧКИОТ УРЕД И БАЗНАТА СТАНИЦА ЗА 400 КОРИСНИЧКИ УРЕДИ ВО DOWNLINK НАСОКА..	111
Слика 8.12 СПОРЕДБА НА БИТСКИОТ ПРОТОК КАЈ 3G МОБИЛНИ МРЕЖИ ВО ОКОЛИНА НА МАГЛА И ОБЛАК ВО ЗАВИСНОСТ ОД РАСТОЈАНИЕТО МЕЃУ КОРИСНИЧКИОТ УРЕД И БАЗНАТА СТАНИЦА ЗА 500 КОРИСНИЧКИ УРЕДИ ВО DOWNLINK НАСОКА..	112
Слика 8.13 СПОРЕДБА НА БИТСКИОТ ПРОТОК КАЈ 4G МОБИЛНИ МРЕЖИ ВО ОКОЛИНА НА МАГЛА И ОБЛАК ВО ЗАВИСНОСТ ОД БРОЈОТ НА КОРИСНИЧКИ УРЕДИ ПРИ РАСТОЈАНИЕ ОД 0 ДО 500 МЕТРИ ВО DOWNLINK НАСОКА .....	112
Слика 8.14 СПОРЕДБА НА БИТСКИОТ ПРОТОК КАЈ 4G МОБИЛНИ МРЕЖИ ВО ОКОЛИНА НА МАГЛА И ОБЛАК ВО ЗАВИСНОСТ ОД БРОЈОТ НА КОРИСНИЧКИ УРЕДИ ПРИ РАСТОЈАНИЕ ОД 500 ДО 1000 МЕТРИ ВО DOWNLINK НАСОКА .....	112
Слика 8.15 СПОРЕДБА НА БИТСКИОТ ПРОТОК КАЈ 4G МОБИЛНИ МРЕЖИ ВО ОКОЛИНА НА МАГЛА И ОБЛАК ВО ЗАВИСНОСТ ОД БРОЈОТ НА КОРИСНИЧКИ УРЕДИ ПРИ РАСТОЈАНИЕ ОД 1000 ДО 1500 МЕТРИ ВО DOWNLINK НАСОКА .....	113



















## Листа на табели

ТАБЕЛА 2.1 СПОРЕДБА НА QOS ПАРАМЕТРИТЕ МЕЃУ 4G И 5G МРЕЖИТЕ .....	45
ТАБЕЛА 5.1 СПОРЕДБА НА ОБРАБОТКАТА НА ПОДАТОЦИТЕ ВО ОКОЛИНА НА ОБЛАК И МАГЛА .....	70
ТАБЕЛА 6.1 Главни карактеристики на обработката на податоците на работ (ивицата) од мрежата и обработка на податоците во околина на облак и магла [106] .....	89
ТАБЕЛА 6.2 Разлики во обработката на податоците на работ (ивицата) од мрежата и обработка на податоците во околина на облак и магла .....	90
ТАБЕЛА 8.1 RTT латентност за 3G, 4G и 5G RAN .....	103
ТАБЕЛА 8.2 Модулациска кодна шема (MCS) и врвна битска брзина R за 3G, 4G и 5G RAN во DOWNLINK насока [117] .....	105
ТАБЕЛА 8.3 Модулациска кодна шема (MCS) и врвна битска брзина R за 3G, 4G и 5G RAN во UPLINK насока .....	106
ТАБЕЛА 8.4 Типични вредности за коефициентите за потрошената моќност .....	136

## Апстракт

Огромниот пораст на паметните мобилни уреди предизвика корисниците да побаруваат сè поголем број на сè присутни мобилни широкопојасни сервиси споредливи со фиксниот широкопојасен Интернет. Во таа насока на глобално ниво постојано се зголемува бројот на истражувачките иницијативи за **5G мобилните мрежи**. 5G мрежите ќе делуваат како нервен систем на дигиталното општество, на економијата и на секојдневниот живот на луѓето и нови парадигми на Интернет сервиси, како на пример „Нешто како Сервис“ (Anything as a Service), каде уредите, терминалите, машините, паметните уреди и роботите ќе станат иновативни алатки кои ќе генерираат апликации, сервиси и податоци и истовремено истите ќе ги користат. Со цел да се задоволат барањата за огромните количества за обработка на податоци и сè поголемите интелегентни мрежни побарувања кај 5G мрежите, главен тренд во минатата декада е насочување на обработка, процесирање и складирање на податоците во **Околина на Облак (Cloud Computing)**. Но самиот облак се соочува со огромен број на ограничувања во поглед побарувањата за сè помала латентност (доцнење), висок степен на мобилност, висока скалабилност и извршување на операциите во реално време. Нова парадигма наречена обработка на податоци во **Околина на Магла (Fog Computing)** се појави со цел за да ги разреши ограничувањата кај Облак технологијата. Маглата го проширува Облакот до работ на мрежата до самите кориснички уреди, со што прави дистрибуција на обработката и процесирањето на податоци како и дистрибуција на мрежните сервиси поблиску до крајните корисници. Тоа е архитектура каде дистрибуираните крајни корисници соработуваат со други корисници и облаците со цел да се изврши обработка на податоци, контрола, вмрежување и менаџирање на управувањето со податоци. Примената на Маглата кај 5G мрежите ќе придонесе значително да се подобрат перформансите на мрежата во смисла на спектрална и енергетска ефикасност, понатаму ќе се овозможи директна безжична комуникација на уред со уред, и ќе се даде поддршка на растечкиот тренд на виртуелизација на мрежните функции и одделување на интелигенцијата на мрежната контрола од хардверот на радио делот на мрежата. Овој докторски труд прави евалуација на квалитетот на оркестрираните сервиси во околина на магла кај 5G мрежите преку доцнењето (латентноста), битскиот проток кај корисниците (throughput), и енергетската ефикасност. Воедно е предложен модел за селекција на најдобрата 5G мрежна

*технологија во зависност од типот на сервисите кои имаат одредени побарувања за битски проток, доцнење, енергетска ефикасност и слично. Анализата на резултатите од овој труд покажуваат дека 5G мрежите ќе имаат голема придобивка од имплементација на Магла технологијата, бидејќи Магла технологијата поседува механизми кои ќе се справат со новите сервиси кои допрва доаѓаат, а воедно побаруваат ниска латентност, висок степен на мобилност, висока скалабилност и извршување во реално време.*

**Клучни зборови:** 5G, Cloud Computing (CC), Edge Computing, Fog Computing, Fog Networking, Internet of Everything (IoE), Internet of Things (IoT), Mobile Cloud Computing (MCC), Mobile Edge Computing (MEC), Web of Things (WoT).

# Прв дел

## 1 Вовед

Брзиот развој на телекомуникациите кој се интензивира во последните три декади, како и потребите од генерализирање и обопштување на телекомуникациските мрежи во насока на сервисна интеграција, резултира во континуирано усовршување на мрежните архитектури и механизми со цел да се задоволат сè поголемите барања на корисниците. До сега, развојот во полето на телекомуникациите бележи екстреман прогрес, при што она што било незамисливо пред само 20-тина години, денес станува реалност, преку самата телекомуникациска технологија. На пример: користење на разни услуги (сервиси) кои бараат Gbps проток од мобилни уреди додека корисниците се движат со воз, автомобил или просто пешачат; потоа, достапност до интернет сервисите од кое било место, во кое било време, од кој било мобилен или статичен уред, плаќање на сметки од домашен компјутер или мобилен телефон, постоење на холограмски (3-димензионални) сервиси и уреди, користење на разни сензори кои мерат температура, влажност на воздухот, интензитет на светлина во разни околности, пренос на информациите со брзина на светлина до кое било место на земјата (што пред стотина години за истото било потребно месеци, па и години да се пренесе од еден крај на земјината сфера до друг) и многу други примери кои ги носат современите телекомуникации. 3G безжични и мобилните мрежи обезбедуваат IP конективност за сервиси во реално време и вон реално време со задоволителен квалитет на услуга, а исто така веќе се имплементирани 4G безжични и мобилни мрежи, со далеку подобри перформанси од 3G.

Од друга страна постојат низа нови хетерогени можности за кооперација и меѓумрежно поврзување со 3G и 4G безжичните и мобилните мрежи како што се стандардите 802.11 (WLAN), LTE, LTE-Advanced (LTE-A), IEEE 802.16 Wireless Metropolitan Area Network (WMAN) и безжичните мрежи за пренос на дигитална TV (со висока резолуција). Исто така во последните години се покажуваат особено важни не само во научната средина туку и за индустриски цели, самите PAN (персоналните ad-hoc мрпрпежи) и MANET (мобилните ad-hoc мрежи) мрежи.

### 1.1 Петта Генерација на мобилни мрежи – 5G

Во овој контекст и под особено засилен и континуиран притисок од страна на корисниците и нивните сервисни барања се иницира развој на следната **Петта**



**генерација на мобилни и безжични мрежи – 5G**, чија архитектура треба да ги поддржи постојните и обезбеди брз и лесен развој на нови сервиси. Стандардот 5G е сеуште во развојна фаза [1 – 12]. Моментално постојат само главните концепти, предлози и појава на некои стандарди кои со голема веројатност можат да влезат во состав на 5G. Се очекува во самиот 5G стандард составен дел да бидат стандардите IEEE 802.11ac, IEEE 802.11ad и IEEE 802.11af, IEEE 802.11, 802.16 и 802.21 и повеќе стандарди слични на 4G како што се LTE и LTE-Advanced (Release 10 и поновите Release 11 и 12), LTE-Advanced Pro и мобилниот WiMAX 2.0 (IEEE 802.16m). Кога се зборува за следна генерација на безжични мрежи, тогаш во суштина се подразбира систем составен од безжични системи преку кој се обезбедува континуитет на сервисите на корисникот.

5G ќе побарува појава на поинтелигентни уреди, кои се способни да обезбедат широк опсег на мултимедиски услуги (говор, аудио и видео апликации) до мобилните корисници, со проширена мобилност, поддршка на широкопојасни конекции, огромна процесирачка моќ на мобилниот уред, поддршка на комуникации од типот машина-со-машина, напредни мрежни технологии, подобра искористеност на безжичниот медиум, балансирање на товарот, напредна QoS поддршка на било кој сервис (намалена веројатност за испад, намалена пакетска веројатност за грешка, минимално доцнење (од неколку мили секунди), високи битски брзини по корисник, multi-homing, multi-streaming, итн), како и подолго траење на батеријата, поголема мемориска моќ, кои ќе обезбедат доволно слободен капацитет за контролни информации и голем број на други напредни способности. 5G дефинитивно ќе биде корисничко-ориентиран стандард, каде интелигенцијата на мрежата се спушта до корисничките уреди, така што мобилните уреди ќе може да се поврзат на една или истовремено на повеќе достапни безжични мобилни мрежа и ќе може да ги комбинира потоците од различни технологии. Притоа, се разбира дека интелигенцијата и целата пресметковна и процесирачка работа не треба да се остави на мобилниот уред, туку потребно ќе биде да се унапреди и надгради и останатиот дел од мрежата со дополнителна интелигенција за контрола и дополнителни јазли кои би ги поддржале погоре споменатите способности на 5G мобилните уреди.

## **1.2 Обработка на податоци во околина на облак – Облак технологија (Cloud Computing)**

Паралелно со развојот на мрежите и барањата за нови сервиси и услуги од страна на крајните корисници на мобилните мрежи се појавува и концептот за **обработка на**

податоците во околина на облак или **Облак технологија (Cloud Computing)** во статичка или мобилна средина (**Mobile Cloud Computing**) [13 – 21]. Облак технологијата веќе го промени начинот на кој што се одвива развојот на апликациите и пристапот до самите нив. Обработката на податоци во околина на облак (cloud computing) е обработка заснована на Интернет, каде повеќе поврзани опслужувачи овозможуваат ресурси, софтвер и податоци за компјутерите и другите уреди кои имаат дадено барање до нив, што многу наликува на мрежата за електрична енергија (корисникот упатува барање до облакот – а тој го опслужува при тоа задоволувајќи ги корисничките потреби и барања). Имено анализата и обработката на податочната содржина како што се видео, слики, аудио, анимација итн. (која е присутна во повеќе области како бизнис, екологија, едукација, здравство, социјални мрежи, итн.) од страна на корисниците бара повеќе пресметувачки ресурси отколку што може да ги обезбеди мобилниот уред. Имајќи ги во предвид ограничувањата на мобилните уреди како што се меморија, пресметувачка моќ и пропусен опсег, мобилниот облак може да се искористи за пресметки и испорака на резултатите добиени од податочната содржина до корисниците.

### **1.3 Обработка на податоците во околина на Магла – Магла технологија (Fog Computing)**

Се очекува, во иднина Интернетот да има поголема потреба за подобрување на квалитетот на сервисите и искуството (QoS/QoE), поддржан од услугите кои се оркестрирани на барање (on demand) и се способни да се прилагодат на времето на извршување (процесирање), во зависност од контекстуални услови, со цел да овозможат намалена латентност (доцнење), висока мобилност, висока скалабилност, и извршување реално време. Овие барања може да бидат само делумно исполнети од страна на постојните решенија за обработка на податоците во околина на облак.

Самата конвенционална околина на облакот е комплетно централизирана по природа и не е во можност да обезбеди услуги во реално време со ниска латентност на милијарда IoT уреди на работи од мрежата во исто време. Во процесот на виртуелизација, опслужувачите на облачните услуги ги нудат своите услуги на корисниците од различни географски локации. Ова предизвикува високо ниво на латентност при провизионирање на сервисите [22 - 23].

Нова парадигма наречена **обработка на податоци во околина на магла (Fog Computing)**, или накратко **магла (Fog)** се појави за да ги разреши овие побарувања [24

- 27]. Обработката на податоци во околина на магла ја проширува обработката на податоци до работ на мрежата и нуди услуги на крајните корисници за процесирање на податоци, складирање на податоци и апликации што може да се хостираат на работ (ивицата) од мрежата или и на самите уреди како што се сет топ боксови или пристапни точки. На тој начин латентноста значително се редуцира и се подобрува квалитетот на сервисите и искуството (QoS/QoE) кај крајните корисниците.

Околината на магла ќе даде поддршка на сегашните и идните IoT апликации (индустриска автоматика, транспорт, мрежа на сензори и актуатори) што бараат мобилност и релативно ниска латентност предвидлива во реално време [28 – 29]. Затоа обработката на податоците во околина на магла може да се смета како сериозен кандидат за 5G мрежите, каде облакот ќе биде распространет меѓу корисничките уреди. Потенцијална примена на обработката податоците во околина магла кај 5G мрежите може да се најде во [30]. Тука се наведени неколку можни случаи и сценарија како што се селекција на мрежата во хетерогена околина, позајмување на опсегот од соседните уреди кај комуникациите од типот M2M или D2D и слично.

Околините магла и облак се две технологии кои ќе бидат комплементарни една на друга. Овие комплементарни функции на облакот и маглата ќе им овозможат на корисниците на 5G мрежата да користат нова технологија што ќе одговори на нивните барања за реално време и ниска латентност на апликациите што се извршуваат на работ (ивицата) од мрежата [31], а воедно ќе подржи комплексна анализа и обработка на податоците, како и нивно долготрајно складирање во јадрото на 5G (5G core).

#### **1.4 Мотивација за докторската дисертација**

Миграцијата од облак кон магла во 5G носи неколку предизвици, меѓу кои и поддршка за оркестрирање (диригирање) по потреба (on-demand) и прилагодливост при извршување на еластични и доверливи услуги со помош преку околината на магла.

Мотивиран од таквиот екстремно брзиот развој на телекомуникациите и воопшто на комуникациско-информациската наука, особено огромниот развој во полето на безжичната мобилна технологија во последните десетина години, во рамките на оваа дисертација се презентирани низа на истражувања, анализи, споредби за квалитетот на оркестрираните сервиси во околина на облак кај 5G мобилните мрежи.

Од досегашниот преглед во литературата ретко може да се најде материјал за квалитетот на оркестрираните сервиси во околина на облак кај 5G мобилните мрежи.

Токму главната идеја со оваа дисертација е да допринесе во подетално дефинирање на квалитетот на оркестрираните сервиси во околина на облак кај 5G мобилните мрежи, што ќе даде придонес при формирањето на конечниот изглед на 5G стандардот (за кој сè уште постојат само концепти).

## **1.5 Истражувачки проблем, предмет на истражување и хипотеза**

Во денешните 3G и 4G мобилни и безжични системи, владее една општа хетерогеност на сервиси (мултимедија), хетерогеност од мрежни технологии, хетерогеност од QoS параметри, хетерогеност од QoS алгоритми (посебно за секоја технологија) и особена конвергентност на решенијата кон уникатни модели. Некои мобилни и безжични мрежи (пример, WLAN) нудат поголем податочен проток (Mb/s), т.е. подобар QoS за сервисите во реално време (податоци), но од друга страна нудат помала мобилност. Други (WiMAX, UMTS, LTE, LTE-Advanced, LTE-A Pro), нудат голема поддршка за мобилност (поддржуваат движења од неколку километри на час, на пример: 80 до 150 km/h), а помал битски проток, сосема доволен само за говорниот сервис (сервис во реално време).

Анализата и обработката на податочната содржина од видео, слики, аудио, анимација итн. до корисниците (која е присутна во повеќе области како бизнис, екологија, едукација, здравство, социјални мрежи, итн.) бара повеќе пресметувачки ресурси отколку што може да ги обезбеди мобилниот уред. Имајќи ги во предвид ограничувањата на мобилните уреди како што се меморија, пресметувачка моќ и пропусен опсег, мобилниот облак може да се искористи за пресметки и испорака на резултатите од податочната содржина до корисниците.

Често, сервис-провајдерите за да ги задоволат корисниците, да го зголемат нивниот број (тоа правопрпорционално значи да го зголемат својот компаниски капитал) и да ја намалат потрошувачката во мрежните инвестиции, ја комбинираат старата мрежна опрема (од постарите 2G, 2.5G и 3G мобилни мрежни технологии) со некоја ситна надоградба и ги нудат сервисите што се креирани за 4G мрежите и мобилниот облак. Така настануваат низа на проблеми од таа хетерогеност, особено во интероперабилноста и незадоволувањата на основните QoS параметри и неисполнување на сервисите побарани од страна на корисникот.

Несомнено, самата еволуција кон 5G мобилни уреди наметнува низа нови барања, како: високо ниво на QoS, употреба на посложени алгоритми, повеќе интерфејси (кон

различни мрежни технологии), како и одредена модификација на OSI протоколниот стек. Имено, новите мобилни уреди ќе можат во себе дополнително да имплементираат сензори, Bluetooth, WLAN, GPS и други интерфејси, а сè со цел да можат да понудат разни сервиси за мобилните корисници, како на пример персонални сервиси: за здравје, информации за околината (хотели, мотели, стадиони, бензински станици, ресторани и сл.), локациски зависни сервиси, сервиси за итни случаеви итн.

Исто така во иднина Интернетот ќе ја зголеми потребата за подобрување на квалитетот на сервисите и искуството (QoS/QoE), поддржан од услугите кои се оркестрирани на барање (on demand) и се способни да се прилагодат на времето на извршување (процесирање), во зависност од контекстуални услови, со цел да овозможат намалена латентност (доцнење), висока мобилност, висока скалабилност, и извршување реално време. Овие барања може да биде само делумно да се исполнети од страна на постојните решенија за обработка на податоците во околина на облак.

Како решение на овие проблеми се појавува новата парадигма на обработка на податоци во околина на магла, која е независна од која било мрежна технологија (на пример, HSPA, 3G-LTE, 4G, WLAN, IEEE 802.16m, UMTS, LTE-Advanced итн.) и која што ќе покаже висок степен на квалитет на услуги и искуство QoS/QoE кај корисниците, без која би било апсурдно да се зборува за која било технологија, сервис или комуникација. Токму затоа, се поставуваат прашања од типот: како да се изведе самото протоколно ниво и напредна интелигенција на оркестрирање на механизмите во околина на магла кај идните мобилни и безжични мрежи? Како до подобар квалитет на сервис кај идните 5G мобилни и безжични мрежи (за било кој сервис)? Како да се изградат новите мобилни и безжични IP мрежи при што обработката на податоци би се извршувала во околина на магла? Каде во архитектурата на 5G мрежите да се постават механизмите за оркестрирање за обработка на податоците во околина на магла, а воедно да имаме подобар квалитет на оркестрираните сервиси?

**Предмет на истражување** во рамките на оваа дисертација е анализа и споредба на квалитетот на оркестрираните сервиси во околина на облак кај 5G мобилните мрежи. Притоа е претставен модел и архитектура на 5G мрежата во околина на магла и воедно се разгледани механизмите за оркестрирање на сервисите. Понатаму се презентирани резултати и анализи од симулации и практични експерименти за повеќе сценарија за различни услови и мрежни технологии, при што се разгледува квалитетот на оркестрираните сервиси во околина на магла и нивна споредба во однос на оркестрираните сервиси во околина на облак кај 5G мрежите. Притоа како влезни

податоци се користат различни референти QoS и KPI параметри, како што се врвна битска брзина, пропусен опсег, доцнење и сл., а како излезни податоци ќе бидат презентирани латентноста, throughput по кориснички уред и енергетската ефикасност.

Во истражувањата на оваа докторска дисертација, како **главна (општа) хипотеза** се јавува следнава:

**Воведувањето на механизми и модули за оркестрирање на сервисите во околина на магла (Fog Computing Service Orchestration Mechanisms) допринесува кон високо задоволително ниво на сите QoS параметри и добивање врвни оценки за QoS параметрите за било кои мултимедиски сервиси.**

Првата посебна теза е следнава:

*1) Воведувањето на механизми и модули за оркестрирање на сервисите во околина на магла (Fog Computing Service Orchestration Mechanisms) во 4G хомогени мобилните и безжични IP мрежи допринесува кон високо задоволително ниво на сите QoS параметри за даден мултимедиски сервис.*

Втората посебна теза е следнава:

*2) Воведувањето на механизми и модули за оркестрирање на сервисите во околина на магла (Fog Computing Service Orchestration Mechanisms) во 5G хетерогени мобилните и безжични IP мрежи допринесува кон високо задоволително ниво на сите QoS параметри за било кои дадени мултимедиски сервиси.*

## **1.6 Придонеси на докторската дисертација**

Оваа докторска дисертација ги дава следните придонеси (контрибуции) на дисертацијата:

1. Предложена е нова 5G мобилна мрежна архитектура со напредни целуларни RAT кои се надополнети со напредни безжични локални пристапни мрежи (Wireless Local Area Networks – WLAN или WiFi) и активни оддалечени јазли на бекхаул поврзувањето од радио мрежата па се до основната мрежа;
2. Понуден е еден интелигентен напреден механизам за квалитетот на оркестрираните сервиси во околина на магла кај постојните и идните (5G) хетерогените мобилни и безжични мрежи, со кој се постигнува најдобра цена-перформанси, се одбира/ат најдобра/и мрежа/и (или комбинација од радио пристапни мрежи) за даден мултимедиски сервис да има максимално добар квалитет на услуга. На тој начин се резултира со повисок степен на QoS/QoE кај

сите корисници, односно поголемо задоволство на сите корисници за сервисите и услугите што ги користат.

3. Уште повеќе, придонесот е во обезбедувањето на корисничко-ориентирана мрежа каде корисникот нема потреба да знае преку која мрежна технологија се врши оркестрирање и опслужување на сервисите со неговиот поврзан мобилен уред. Овие механизми за оркестрирање на сервисите во околина на магла се отворени и независни кон сите можни постоечки и идни мобилни и безжични мрежни технологии. Затоа еден ваков механизам за оркестрирање на сервисите во околина на магла доколку се имплементира во 5G мрежите ќе има можност да користи било која радио пристапна технологија, бидејќи е дефиниран независно од технологиите, на мрежно IP ниво. Уште повеќе тој механизам е скалабилен и флексибилен, бидејќи лесно може да се имплементира кај било кој нов радио интерфејс и нова радио пристапна технологија.
4. Исто така, со помош на овие механизми за оркестрирање, еден паметен 5G мобилен уред што ќе комбинира и користи агрегиран сообраќај од сите погодни радио пристапни мрежи за сите користени мултимедиски сервиси, лесно може да ги достигне планираните достижни 5G агрегирани битски брзини кои сега се заговараат (од редот на 50 Gbps за мала мобилност, 10 Gbps за висока мобилност и 1Gbps насекаде вклучувајќи го работ на клетката). На тој начин оваа дисертација дава придонес за високиот степен на QoS/QoE поддршка на сите сервиси, високи битски брзини, подобрена мобилност и сè присутност во идните мобилни 5G мрежи, донесувајќи ја комуникацијата на планетарно ниво, на едно навистина повисоко и поквалитетно рамниште.
5. Се постигнува подобра енергетска ефикасност, кое пак резултира до поголем животен век на батериите кај мобилните кориснички уреди, кое пак од своја страна ќе допринесе до поголемо задоволство на корисниците на мобилни уреди. Исто така подобрата енергетска ефикасност значително влијае врз намалувањето оперативните трошоци за водењето на една мрежа, кај мрежните оператори.

Добиените резултати и можности на квалитетот на оркестрираните сервисите во околина на магла, имаат широка научна примена, и влијаат токму во тоа, овие оркестрирачки механизми во околина на облак да влезат во рамките на финалните стандарди за 5G мрежите, или во најмала мера да учествуваат во креирањето на логиката, парадигмата и архитектурата на 5G мобилните мрежи.

## 1.7 Организација на докторската дисертација

Оваа докторска дисертација е организирана во три дела.

Првиот дел се состои од првите 6 глави. Во првата глава е вовед и ги дава мотивацијата, истражувачкиот проблем, предметот на истражување и хипотезата, придонесите од докторската дисертација и објавените трудови во рамките на оваа дисертација.

Во втората глава се разгледува Петтата генерација на мобилни мрежи – 5G, можната миграција кон 5G и нејзината стандардизација, очекуваните перформанси и сервисни побарувања на 5G. Исто така е објаснета 5G мрежната архитектура, 5G паметниот мобилен уред и можните 5G апликации и сервиси.

Во третата глава е разгледан концептот на Интернет на сè, кој претставува природна еволуција од Интернет на нештата.

Во четвртата глава е разгледан обработката на податоци во околина на облак (Cloud Computing) во фиксна и мобилна средина. Притоа се разгледани различни модели на облакот, сервисно ориентираната архитектура и бенефициите од обработката на податоците во облакот.

Во петтата глава се разгледува обработката на податоци во околина на магла (Fog Computing), што воедно претставува проширување на облак технологијата на работ (ивицата) од мрежата. Притоа е направена споредба со обработката на податоци во околина на облак, а воедно се разгледани главните карактеристики и особини на обработката на податоците во околина на магла.

На крајот од првиот дел во шестата глава се разгледува облакот кај 5G мобилните мрежи. Најпрво се разгледува зошто телекомуникациските оператори треба да го имплементираат облакот во нивната мрежа, понатаму се разгледува облачната архитектурата во јадрениот и радио пристапниот дел на 5G мрежата. Понатаму се разгледува концептот за **мобилен обработка на податоците на работ (ивицата) од мрежата – Mobile Edge Computing (MEC)** и обработка на податоците во околина на магла и воедно се прави нивна споредба. На крајот се разгледани можни сценарија за примена на обработката на податоци во околина на магла кај 5G мобилните мрежи.

Вториот дел од оваа докторска дисертација се состои од следните три глави.

Во седмата глава е предложен модел и архитектура за механизмите за оркестрирање на сервисите во околина на магла кај 5G мобилните мрежи.



Во осмата глава се прави евалуација на квалитетот на оркестрираните сервиси во околина на облак и магла кај 5G мобилните мрежи. Притоа се разгледуваат следниве параметри: латентност (доцнење од крај до крај), битски проток во downlink и uplink насока, и енергетска ефикасност во downlink и uplink насока. Притоа се прави споредба на овие параметри во околина на магла и облак одделно кај 3G, 4G и 5G мобилни мрежи, а потоа се прави заедничка споредба. Од резултатите е заклучено дека во околина на магла за сите параметри се добиваат подобри резултати во споредба со околината на облакот, независно од мобилната мрежа, со што воедно се докажува главната хипотеза и двете специјални тези. Исто така е заклучено дека 5G има далеку подобри перформанси за сите параметри од 3G и 4G мобилните мрежи.

На крајот од вториот дел во деветтата глава се предложени 5 можни алгоритми за оптимална селекција на мобилна мрежа во зависност од побарувањата за сервисот што корисникот го користи. Притоа секој алгоритам бира оптимална мрежа според некој параметар (латентност, битски проток или енергетска ефикасност), врз некои ограничувања. Притоа е направена споредба на добиените резултати кога секој алгоритам ќе се примени, односно нема да се примени. И е заклучено дека секој алгоритам дава подобри резултати, за разлика во случај кога истиот не е применет.

Конечно во третиот дел се наведени заклучоците од оваа докторска дисертација.

## **1.8 Објавени трудови во рамките на докторската дисертација**

Од оваа докторска дисертација произлегоа неколку трудови, кои се објавени во светски списанија со фактор на влијание, реномирани светски списанија, домашни и меѓународни конференции и поглавја во книга.

### **1.8.1 Објавени поглавја во книга**

- Stojan Kitanov, and Toni Janevski. **Fog Computing Mechanisms in 5G Mobile Networks**. *Book Chapter in Networks of the Future: Architectures, Technologies and Implementations*. CRC Press Taylor and Francis Group, Florida, USA, 2017.
- Stojan Kitanov, and Toni Janevski. **Fog Networking for 5G and IoT**. *Book Chapter in 5G Mobile: From Research and Innovations to Deployment Aspects, Architectures, Technologies and Implementations*. Nova Publishers, Inc., 2017.

### **1.8.2 Објавени трудови во реномирани светски списанија**

- Stojan Kitanov, Toni Janevski. **Fog Computing Service Orchestration Mechanisms for 5G Networks.** *Journal of Internet Technology (JIT)*, ISSN 1607-9264, Taiwan, 2018. (2016 IMPACT FACTOR: 1.930).
- Stojan Kitanov, and Toni Janevski. **Quality Evaluation of Cloud and Fog Orchestrated Services in 5G Network.** *European Journal of Information Science and Technology (EJIST)*, Vo l. 1, No. 1, published by University of Information Science and Technology "St. Paul the Apostle, " Ohrid, Macedonia, 2016.
- Stojan Kitanov, and Toni Janevski. **Fog Computing as a Support for 5G Network.** *Journal of Emerging Research and Solutions in ICT (ERSICT)*, Vol. 1, No. 2, published by Faculty of Information and Communication Technologies in Bitola, Macedonia, 2016.

### **1.8.3 Објавени трудови на меѓународни конференции**

- Stojan Kitanov, Toni Janevski. **Energy Efficiency of Fog Computing and Networking Services in 5G Networks.** *Proceedings of the XVII IEEE International Conference on Smart Technologies EUROCON 2017*, Ohrid, Macedonia, 2017.
- Stojan Kitanov, and Toni Janevski. **State of the Art: Fog Computing for 5G Networks.** *Proceedings of the XXIV International Telecommunication Forum TELFOR 2016*, Belgrade, Serbia, 2016.
- Stojan Kitanov, and Toni Janevski. **Energy Efficiency of 5G Mobile Networks in Hybrid Fog and Cloud Computing Environment.** *Proceedings of the II International Conference Recent Trends and Applications in Computer Science and Information Technology RTA-CSIT 2016*, Tirana, Albania, 2016.
- Stojan Kitanov, Toni Janevski. **5G Networks in the Fog Computing Environment.** *Proceedings of the XIII International Conference of Society for Electronics, Telecommunications, Automation and Informatics ETAI 2016*, Struga, Macedonia, 2016.
- Stojan Kitanov, Toni Janevski. **Fog Computing for 5G Networks.** *Accepted paper as a poster presentation on 8th ICT-Innovations International Conference*, Ohrid, Macedonia, 2016.
- Stojan Kitanov, Toni Janevski. **Hybrid Environment Service Orchestration for Fog Computing.** *Proceedings of the 51st International Scientific Conference on Information, Communication and Energy Systems and Technologies ICESST 2016*, Ohrid, Macedonia, 2016.
- Stojan Kitanov, Edmundo Monteiro, Toni Janevski. **5G and the Fog – Survey of Related**

**Technologies and Research Directions.** *Proceedings of the XVIII Mediterranean IEEE Electrotechnical Conference MELECON 2016, Limassol, Cyprus, 2016.*

- Stojan Kitanov, Toni Janevski. **Mobile Cloud Computing in 5G Networks.** *Proceedings of the XII International Conference of Society for Electronics, Telecommunications, Automation and Informatics ETAI 2015, Ohrid, Macedonia, 2015.*
- Stojan Kitanov, Toni Janevski. **State of the Art: Mobile Cloud Computing.** *Proceedings of the Sixth IEEE International Conference on Computational Intelligence, Communication Systems and Networks*, pp. 153-158, Tetovo, Macedonia, 2014.
- Stojan Kitanov, Toni Janevski. **Performance Evaluation of Scheduling Strategies for LTE Networks in Downlink Direction.** *Proceedings of the XI International Conference of Society for Electronics, Telecommunications, Automation and Informatics ETAI 2013, Ohrid, Macedonia, 2013.*
- Stojan Kitanov, Toni Janevski. **Modeling and Analyzing LTE Networks with EstiNet Network Simulator and Emulator,** *Proceedings of the XVIII International Scientific Conference on Information, Communication and Energy Systems and Technologies (ICEST), Ohrid, Macedonia, 2013.*

## 2 Петта генерација на мобилни мрежи – 5G

Денес сите сме сведоци на енормно зголемениот волумен на мобилен сообраќај, на брзиот развој на мобилните широко-појасни мрежи и на појавата на интелигентни мобилни уреди. Според некои предвидувања, се очекува волуменот на глобалниот мобилен сообраќај од 2010 до 2020 година да се зголеми дури за илјада пати. Зголемениот сообраќај на мобилните и безжични мрежи, пред сè се должи на раширувањето на мобилните уреди, како и на зголемениот број на податочно-гладните мобилни уреди, особено паметните телефони (на англ. smart phones).

Друг важен фактор кој влијае врз огромниот пораст на мобилниот сообраќај е зголеменото побарување на напредни мултимедиски сервиси (апликации) како што се UHD (Ultra-High Definition) и 3D видео, како и проширена реалност и искусување. Според [32] и [33] мобилните податочни услуги се во постојан раст од 2007 година, со следниве клучни аспекти до 2021 година:

- Сообраќајот на глобално ниво за мобилните податочни услуги порасна за 69% во 2014;
- Сообраќајот на глобално ниво за мобилните податочни услуги достигна 7,2 егзабајти (ЕВ) на месечно ниво на крај на 2016, во споредба со 4,4 ЕВ на месец на крај на 2015 година;
- Скоро пола милијарда (429 милиони) мобилни уреди и конекции беа додадени во 2016 година, со што вкупниот број на мобилни уреди достигна 8 милијарди во 2016 година, од 7,6 милијарди во 2015 година;
- Сообраќајот на глобално ниво за мобилните податочни услуги ќе порасне близу 10 пати помеѓу 2014 и 2021 година;
- Во 2016 година, волуменот на видео сервисите кои се пренесуваат преку мобилните уреди зафаќа 60 % од глобалниот мобилен податочен сообраќај, а се предвидува пораст на овој процент дури до 75 % во 2018 год.
- Сообраќајот на мобилните податочни услуги ќе расте со композитна годишна стапка на раст (Compound Annual Growth Rate - CAGR) од 77 % од 2016 до 2021 година, достигнувајќи 49 ЕВ на месец до 2021.

Притоа, брзината на пораст на мобилниот податочен сообраќај е далеку поголема од порастот на говорниот сообраќај. Во 2009 година глобалниот мобилен говорен сообраќај е веќе надминат од мобилниот податочен сообраќај во 2009, а кон крајот на 2016 година VoIP сообраќајот учествуваше само со 0,35 % од целиот мобилен сообраќај.

Покрај тоа, придонес кон порастот на глобалниот мобилен податочен сообраќај имаат и социјалните мрежи [34]. Социјалните мрежи се едни од најважните сервиси за корисниците на паметни мобилни уреди, при што создаваат еден нов начин на однесување на корисниците на паметни мобилни уреди.

## 2.1 Потребата за 5G

Порастот на мобилниот сообраќај, како и зголемениот број на поврзани паметни уреди наметнува нов предизвик за изгледот на следната генерација на мобилни и безжични мрежи позната како **Петта генерација на мобилни мрежи** или **5G** (на англ. **Fifth Generation of Mobile Networks**). Според [35], 5G мрежите базирани според стандардите на Меѓународната Унија за Телекомуникации (ITU) се очекува да биде достапна во 2020, при што бројот на корисници ќе достигне околу 550 милиони до крајот на 2022 година.

Се очекува во идното поврзано општество, сите и сèшто да се меѓусебно поврзани – под капата на **Интернет на сè**, т.е. **Internet of Everything (IoE)**, што претставува еволуција на **Интернет на нештата** или **Internet of Things (IoT)** [28]. Во 2022 година се предвидува дека бројот на IoT уреди што ќе бидат поврзани на мобилни и безжични мрежи да достигне над 1,5 милијарди, што претставува дури 70 % од вкупниот број на IoT уреди [35]. На тој начин, една таква 5G мрежна инфраструктура која треба да дојде, заедно со можноста истата да поддржува огромно количество на податоци или Big Data, ќе овозможи градовите да бидат попаметни, т.е. ќе доведе до појава на паметни градови (на англ. Smart cities).

Податоците ќе се генерираат и од луѓето и од машините, и ќе бидат анализирани во реално време, за да можат да обезбедат корисни информации, за навиките на луѓето, за состојбата на сообраќајот на улиците, за здравјето на набљудуваните пациенти, за чистотата на водата и воздухот во градовите, и за безброј други неопходни работи. Мобилните и безжични комуникации ќе играат врвна улога во овозможувањето на ефикасен и безбеден транспорт, преку овозможување на сите возила да комуницираат меѓу себе, разменувајќи важни информации за состојбата на патиштата, па се до самоуправувачки интелегентни возила. Овој тип на *машина-со-машина* (на англ. *Machine-to-Machine (M2M)*) комуникација побарува доверлива комуникација со многу мало доцнење (под 1 ms) и претставува голем предизвик за следната генерација на мрежи.

Концептот на 5G мобилните мрежи е кориснички-центриран концепт, за разлика од операторски-центрираниот концепт кај 3G, или сервисно-центрираниот концепт кај 4G [5]. Тоа значи дека главниот фокус кај 5G мрежите е насочен кон потребите и побарувањата на корисниците. Телекомуникациските оператори ќе се насочат кон инвестирање на нови апликации што ќе обезбеди сè присутно, продорно, непречено, континуирано и разновидно мобилно искуство за крајниот корисник. Апликациите ќе се повеќе персонализирани, и повеќе свесни за контекстот (more context-aware) што ќе овозможи да го препознаваат идентитетот на корисникот, неговата локација како и неговите преференци.

5G мрежите ќе ги овозможат парадигмите на идните Интернет сервисите - future Internet of Services (IoSs) како што се *Нешто како Сервис - Anything as a Service (AaaS)*, каде уредите, терминалите, машините, паметните уреди и роботите ќе станат иновативни алатки кои ќе генерираат апликации, сервиси и податоци и истовремено истите ќе ги користат.

## 2.2 Преглед на генерациите на мобилни и безжични мрежи

Секоја нова генерација на мобилни и безжични мрежи, вообичаено се појавува на секои 10 години. Притоа секоја генерација носи понапредни и посупериорни перформанси (пред сè поголеми битски брзини во downlink и uplink) во споредба со претходните генерации.

Пред 1983 постоеле т.н. **0G** или **Пред 1G** мрежи. Карактеристично за овие мрежи е што сите мобилни и безжични комуникации биле говорно-центрирани и се користеле аналогни системи модулирани со единечен страничен опсег - Single-Side-Band (SSB) [36].

Некаде во 1983 година се појавува **Првата генерација на мобилни и безжични мрежи - 1G**. Сите мобилни и безжични комуникации биле говорно-центрирани и во секоја земја имало свој стандард. Во САД претставник од овие клеточни системи бил AMPS (Advanced Mobile Phone Service), кој бил аналоген систем со FM радио пренос (бидејќи во тоа време дигиталните радио системи биле многу скапи) [36 – 37].

Во 1990 година се појавува **Втората генерација на мобилни и безжични мрежи - 2G**. И во овој период сите безжични и мобилни системи биле главно говорно-центрирани. Покрај говорот имало можност за праќање на кратки пораки – Short Message Service (SMS), како и за пренос на податоци по канална комутација со битски

брзини од 9,6 до 14,4 Kbps. И овде постоеле повеќе стандарди како што се европскиот GSM и Северно Американскиот IS-54, кои биле дигитални системи кои користеле TDMA како повеќекратен пристап. Ова е периодот кога се случила миграцијата од аналогни во дигитални системи, токму на преминот помеѓу 1G и 2G системите. Со тек на времето стандардот GSM бил прифатен речиси во сите земји, со што се добила можност за роаинг. GSM системот е сè уште во употреба [36], [38].

Некаде во 1995 година се појавуваат **2.5G** мрежите, што претставуваат надополнување на 2G мрежите. Со овие мрежи се појавува и можност за пакетски пренос на податочен сообраќај. CDMA (Code Division Multiple Access) системот кој користел 1,25 MHz опсег, бил пуштен во употреба во САД. Во исто време, во Европа GSM системот бил надграден и подобрен со GPRS (General Packet Radio Service), со што се овозможува податочен пренос со битски брзини од 50 до 144 Kbps [39].

Понатаму GSM системот е надграден со EDGE (Enhanced Data rates for GSM Evolution, Enhance Data rates for Global Evolution) познат уште како IMT-Single Carrier (IMT-SC), или EGPRS (Enhanced GPRS), со што се овозможува податочен пренос со битски брзини од 144 до 384 Kbps [40]. Ова е стандард е познат уште како **2.75G**. Денес постои надградена варијанта на EDGE, позната како EDGE Evolved или EDGE Evolution. Овој стандард познат уште како **2.9G** овозможува пакетски податочен пренос со битски брзини од 400 Kbps до 1 Mbps [41].

Од 1999 година се појавува **Третата генерација на мобилни и безжични мрежи - 3G**. Како претставник на 3G се јавува UMTS (Universal Mobile Telecommunication Systems) кој има можност да пренесуваат говор преку комутација на канали и податоци преку комутација на пакети со битски брзини од 144 kbps до 2 Mbps [42 – 43]. За разлика од сите претходни генерации, 3G е првиот меѓународен стандардизиран систем од страна на ITU. Самиот 3G ја користи WCDMA (Wideband Code Division Multiple Access) технологијата, која има опсег од 5 MHz. Оваа технологија работи и во FDD (Frequency Division Duplex) мод и во TDD (Time Division Duplex) мод на работа. Токму затоа, се вели дека со еволуцијата од 2G во 3G системите, имаме еволуција од говорно-центриран во податочно-центрирани системи, или генерално се преминало во операторски-центрирани системи.

Слично на 2G, постојат надградби на 3G и тоа **3.5G**, **3.75G** и **3.9G**. Постојат два стандарди на **3.5G**: HSUPA и HSDPA. HSUPA (High-Speed Uplink Packet Access) го надградува uplink-от со поголеми податочни брзини и капацитет од 1,4, 1,9 и 5,8 Mbps. [44]. Името HSUPA е дадено од страна на Nokia и се користи само кај нејзините

телефоните од Nokia, но 3GPP не го поддржува ова име. HSDPA (High-Speed Downlink Packet Access) е стандард поддржан од 3GPP кој овозможува поголеми битски брзини од: 1,8; 3,6; 7,2 па сè до 14 Mbps.

HSPA или High Speed Packet Access е претставник на **3.75G**. Тој претставува комбинација на HSUPA и HSDPA со што се подобрува перформансите на W-CDMA и на тој начин се постигнуваат врвни битски брзини од 21 Mbps до 28 Mbps [44].

LTE системот е претставник од **3.9G** или **пред 4G** мрежите и се состои од целосна IP мрежа со што се нудат врвни битски брзини од 170 Mbps до 320 Mbps во downlink [45 – 46]. Ова пред сè се должи на употребата на OFDMA (Orthogonal Frequency Division Multiple Access) технологијата во downlink и SC-FDMA (Single Carrier – Frequency Division Multiple Access) технологија во uplink, употреба на MIMO антенски технологии и канален опсег до 20 MHz [44], [47].

Во 2013 година се јавува **Четвртата генерација на мобилни и безжични мрежи - 4G** [36 – 37], [48]. Миграцијата од 3G во 4G значи скок од ниски податочни брзини во големи (широкопојасни) податочни брзини за мобилни сервиси и користење на сите Интернет сервиси преку мобилен. Еден од термините што се користеше за да се опише 4G е зборот **MAGIC**—**M**obile multimedia, **A**nytime anywhere, **G**lobal mobility support, **I**ntegrated wireless solution, and **C**ustomized personal service.

4G се мрежи кои се карактеризираат со високи податочни брзини плус говорен сервис, кој е сервисно-центриран. Кај 4G мрежите се постигнуваат врвни битски брзини од 200 Mbps до 1 Gbps. Моментално постојат два типа на 4G системи. Во САД се развил WiMAX системот (поточно стандардот **IEEE 802.16m**) кој користи OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing), и користи опсег до 20 MHz кој се развил од WLAN [49]. Другиот тип на системи се **LTE-Advanced** системите што претставуваат надградба на LTE-системите, што користи Carrier Aggregation технологија при што симултано може да се поддржат 5 носители на фреквенција, со вкупен пропусен опсег до 100 MHz и постигнува врвни податочни битски брзини до 1Gbps и латентност од 10 ms [47]. Двата видови на 4G системи се во основа доста слични. Сепак, најраспространет ширум земјите во светот е LTE-Advanced.

Денес постои **LTE-Advanced Pro (LTE-A Pro)**, што претставува подобрена верзија на LTE-Advanced, која е дефинирана во рамките на 3GPP спецификациите Release 13 (R13) and Release 14 (R14) [50]. Главните атрибути на LTE-Advanced Pro се: врвни податочни битски брзини од 3 Gbps, канален опсег од 640MHz и латентност од 2



ms. Кај LTE-A Pro ќе биде зголемен бројот носители до 32 што може симултано да биде поддржан со помош на понапредна Carrier Aggregation технологија.

Исто така постои **LTE-M** стандардот кој е варијанта на LTE и е наменет за комуникациите од типот машина со машина [51].

Во 2021 година се очекува да се појави Петтата генерација на мобилни и безжични мрежи - **5G** [5], [7], [11]. 5G треба да се додефинира и стандардизира од страна на стандардизациските тела, конкретно во 3GPP спецификациите Release 15, што се очекува да бидат комплетирани во септември 2018 година. Истата ќе биде кориснички-центрирана, со супер висок капацитет, со широкопојасни мобилни комуникации (високи битски брзини до 50 Gbps), со нови побарувања за архитектурата и дизајнот на системите, кои ќе доведат до енергетски ефикасни системи и ќе се намалат оперативните трошоци на операторите. Во тој поглед, 5G нема да користи само една нова технологија, туку еден цел технолошки екосистем од постојни и идни мобилни и безжични хетерогени мрежи кои ќе работат во голема синергија, давајќи одличен квалитет на сервис (QoS) и највисоко ниво (до сега) на задоволни корисници. Овој премин од 4G во 5G се карактеризира како скок на дизајнерската парадигма од едно-дисциплински сервисно-центриран систем во мулти-дисциплинарен кориснички-центриран систем.

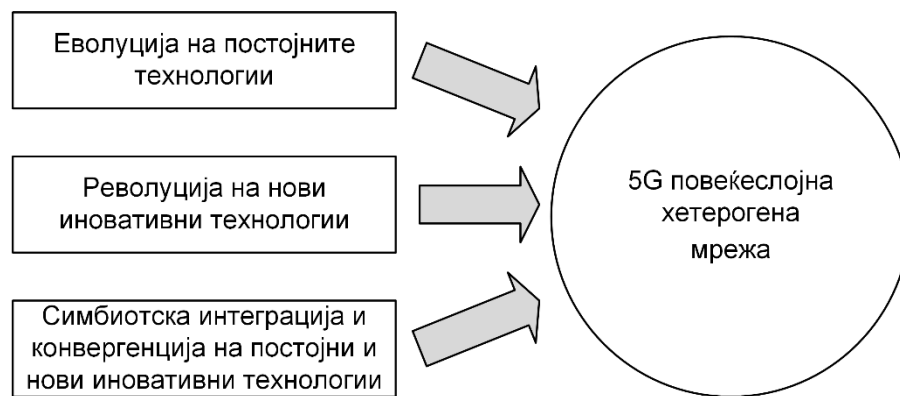
### 2.3 Миграција кон 5G

Постојат три можни патеки, односно насоки за миграцијата кон 5G мрежите (види Слика 2.1) [52 – 53]:

- Постапна еволутивна патека што се фокусира кон натамошни надградби на постојните технологии;
- Револуционерна патека што користи нови иновативни технологии; или
- Симбиотска интеграција и конвергенција на постојните или нови технологии како што се комуникациски, информациски системи, електроника, многу кратни радио пристапни технологии, техники за обработка и пресметка на податоци, комуникации уред со уред, фреквенциски опсези, линкови, сервиси, мултиплексирање, итн.

Како што може да се види на Слика 2.1, 5G ќе биде повеќеслојна хетерогена мрежа што ќе се состои од постојните 2G, 3G, 4G и идните радио пристапни мрежи односно Radio Access Technologies (RATs). Исто така кон 5G може да конвергираат и други

технологии како што се мобилните сателитски системи - Mobile Satellite System (MSS), дигитален видео бродкаст - Digital Video Broadcasting (DVB), безжични локални мрежи - Wireless Local Access Network (WLAN), безжични локални персонални мрежи - Wireless Personal Access network (WPAN), Worldwide Interoperability for Microwave Access network (WiMAX), итн. со повеќе нивоа на покриеност од макро, пико, фемто, релејни и други типови на мали клетки. 5G ќе поддржи широк спектар на апликации и услуги со цел да се задоволат барањата за информатичкото општество во 2020 година и по неа [5], [9].

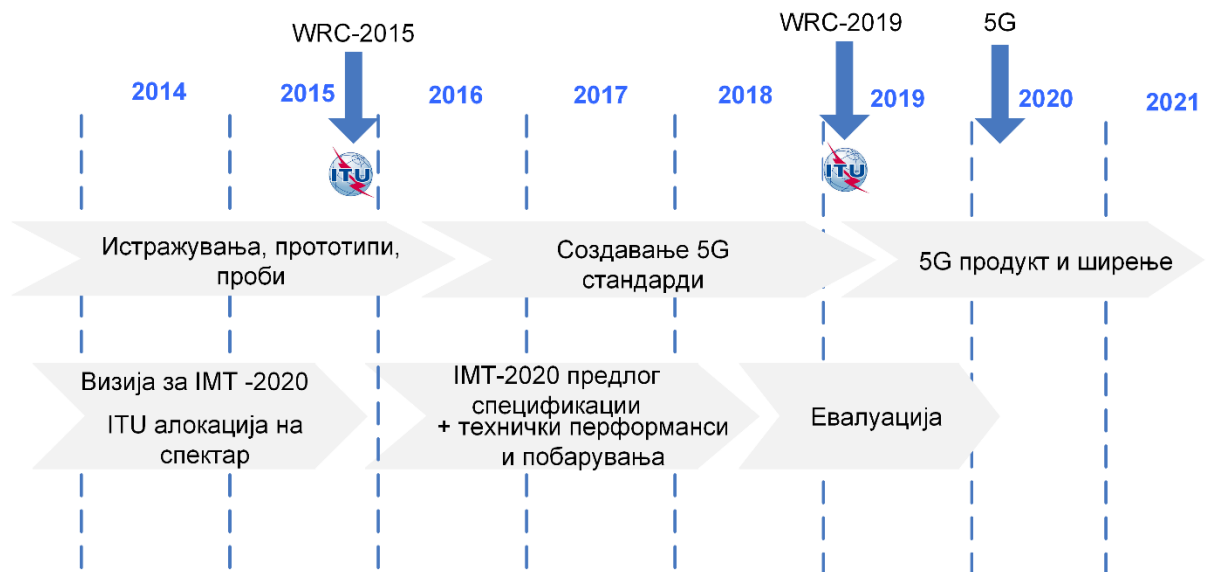


Слика 2.1 Насоки за миграција кон 5G [54]

## 2.4 5G стандардизација и имплементација

Глобалните стандарди се основни канони во истражувањето на сè присутната поврзаност, обезбедувајќи интероперабилност на светско ниво, овозможувајќи повеќе-вендорска хармонизација и економско скалирање. Така, секторот International Telecommunication Union - Radiocommunication (ITU - R) како одговорен за дефинирањето на International Mobile Telecommunications (IMT) спецификациите за секоја следна генерација на клеточни системи, покрај другото ги специфицира стандардите и дефинира крајните рокови за нивно исполнување. Претходно ITU - R во IMT - 2000 ги дефинира 3G стандардите, во IMT - Advanced ги дефинира рамките на 4G стандарди, а следната генерација 5G ќе влезе во рамките на IMT-2020 спецификациите. На последната средба на World Radiocommunication Conference (WRC), во Женева, Швајцарија (2-27 Ноември 2015), ITU - R ги разгледа и ревидира радио регулациите, поставувајќи ги насоките, можностите и целите за идните IMT-2020 системи [37].

На Слика 2.2 е прикажана патеката на стандардизација и имплементација на 5G мрежите според IMT-2020. Сега се наоѓаме во фазата на привршување на прототипите и истражувањата за 5G, како и доделувањето на нов спектар и имплементирањето на одредбите од WRC 2015, како и јасно дефинирање на 5G стандардите и побарувањата. Понатаму следува фазата на стандардизациските активности и развој на продуктите сè до 2020 год. Воедно, се очекува дека првиот бран на 5G мрежи да биде оперативен и активиран околу 2021 год.



Слика 2.2 5G стандардизација и имплементација според IMT-2020 [37]

## 2.5 Перформансни очекувања и сервисните побарувања од 5G

Перформансните очекувања од 5G треба да се дефинираат од повеќе димензии и перспективи и тоа: технолошка перспектива, корисничка перспектива, перспектива на мрежниот оператор, како и сообраќајот и сервисните модели [12], [52 – 53].

Од технолошка перспектива, 5G континуирано ќе еволуира и ќе се надоградува преку постојните радио пристапни технологии, преку развојот на нови радио пристапни технологии или преку симбиотска интеграција и конвергенција на многу технологии со цел да се задоволат барањата на корисниците во иднина.

Од перспектива на корисникот, 5G мобилниот систем ќе го подобри искуството на корисникот во многу аспекти како што се: барања за поголеми битски брзини и капацитет, добри перформанси во смисла на сè опфатна покриеност, доверлив квалитет на услуги и подолг животен век на батеријата на мобилниот уред, лесно за користење и прифатлива цена за претплата, сигурност, доверливост и персонализација на сервисите.

5G треба да понуди корисничко центрирани сервиси, каде корисниците ќе може да направат избор за претплатата на сервисите и ќе може да додадат или да отстранат сервиси или услуги по нивна волја во било кое време.

Од гледна точка на мрежниот оператор 5G треба да обезбеди доволно пропусен опсег и капацитет со цел да се подржи огромниот податочен сообраќај за прифатлива цена. 5G треба да обезбеди многу ниска цена, едноставна инсталација и имплементација и едноставно скалабилни и флексибилни операции со цел да се намалат трошоците за капитални и оперативни надградби (CAPEX и OPEX). 5G мрежата треба да обезбеди компатибилност со постојните мрежи заради заштита на инвестицијата. Идните 5G мрежи треба да поддржат различни типови на сервиси. 5G мрежите ќе претставуваат отворена платформа за сервис, за може да ги поддржат сите типови на мобилни интернет апликации и ќе даде поддршка на пофлексибилен модел на оперативност кој ќе овозможи мрежните оператори и давателите на сервиси и услуги да генерираат сопствени приходи.

Мрежните оператори треба да земат во предвид два модели на сообраќај за 5G: видео мултимедиски протоци со големи битски брзини од серверот кон претплатникот и масивни машина со машина - massive Machine-to-Machine (M2M), или или уред со уред - Device-to-Device (D2D) комуникации [12].

Со цел да се задоволат овие побарувања, 5G системите, во споредба со 4G системите, потребно е да испорачаат за некој ред поголеми магнитуди за клеточниот капацитет и битскиот проток по корисник. 5G ќе биде множество на телекомуникациски технологии што ќе поддржат капацитет за 1000 пати повеќе него денес, и треба да обезбедат одзив со ултра-ниска латентност што е помала од неколку милисекунди. Мрежата треба да обезбеди капацитет од 50 Gbps по клетка, и да гарантира повеќе од 1 Gbps проток по корисник преку супер густо умрежување (super dense networking), без оглед на локацијата на корисникот, вклучувајќи го и работ на клетката. Споредбено со 4G, клеточната спектрална ефикасност ќе се зголеми за 3 до 5 пати, и одзивот на латентноста во контролната, односно сигнализационата рамнина (control plane) ќе се намали за една половина, односно на 50 ms. Дополнително, 5G ќе овозможи одзив со ултра ниска латентност од 1 ms во податочната рамнина, што е еднакво на една десетина од 4G [12], [52 – 53], [55].

Со цел да се овозможи идниот Интернет на сè (forthcoming Internet of Everything (IoE)) да стане реалност [28], 5G треба да овозможи масивна и симултана конективност во 4A (Anytime, Anywhere, Anyone, Anything) насока, односно во било кое време, било каде, за

било кој и за било што, која ќе овозможи да се поврзат еден милион различни мобилни уреди по единица квадратен километар. 5G ќе има флексибилна и интелигентна мрежна архитектура со софтверски базирана структура што ќе и овозможи да ги анализира податоците во реално време и ќе овозможи интелигентни и персонализирани услуги [10].

**Табела 2.1 Споредба на QoS параметрите меѓу 4G и 5G мрежите**

Параметар	4G	5G
Латентност во воздушниот интерфејс кај корисничката рамнина	10 ms	1 ms
Латентност во воздушниот интерфејс кај контролната рамнина	100 ms	50 ms
Цитер	20 ms	0,02 ms
Густина на симултани конекции по единица km <sup>2</sup>	10 <sup>5</sup>	10 <sup>6</sup>
Густина на сообраќаен волумен по единица km <sup>2</sup>	0,5 Tbps/ km <sup>2</sup>	20 Tbps/ km <sup>2</sup>
Мобилност	300 km/h	500 km/h
Спектрална ефикасност по клетка во uplink	1,8 bps/Hz	5 bps/Hz
Спектрална ефикасност по клетка во downlink	2,6 bps/Hz	10 bps/Hz
Врвен Throughput (во downlink) по конекција	100 Mbps до 1 Gbps	10 Gbps до 50 Gbps
Битска брзина на работ (ивицата) на клетката во downlink	0,075 bps/Hz/cell	Било каде 1 Gbps
Битска брзина на работ (ивицата) на клетката во uplink	0,05 bps/Hz/cell	Било каде 0,5 Gbps
Ценовна ефикасност	10 пати	100 пати
Пакетско доцнење на буџетот без гаранција на квалитетот	100 до 300 ms	недефинирано
Пакетско доцнење на буџетот со гаранција на квалитетот	50 до 300 ms	1 ms
Просечна загуба на пакетите за видео бродкаст	10 <sup>-8</sup> (4k UHD)	10 <sup>-9</sup> (8k UHD)
Просечна загуба на пакетите за видео M2M сервиси (без гаранција на квалитетот)	10 <sup>-3</sup>	10 <sup>-4</sup>
Просечна загуба на пакетите за видео M2M сервиси (со гаранција на квалитетот)	10 <sup>-6</sup>	10 <sup>-7</sup>

5G ќе обезбеди доверливо и сигурно функционирање со повеќе од 99 % достапност на мрежата. Притоа мрежата ќе може самостојно да се реконфигурира заради оправување од пад на мрежата или самостојно да се оптимизира. Животниот век на батериите на мобилните уреди ќе се зголеми за 10 пати. Конечно, 5G ќе има ниска цена

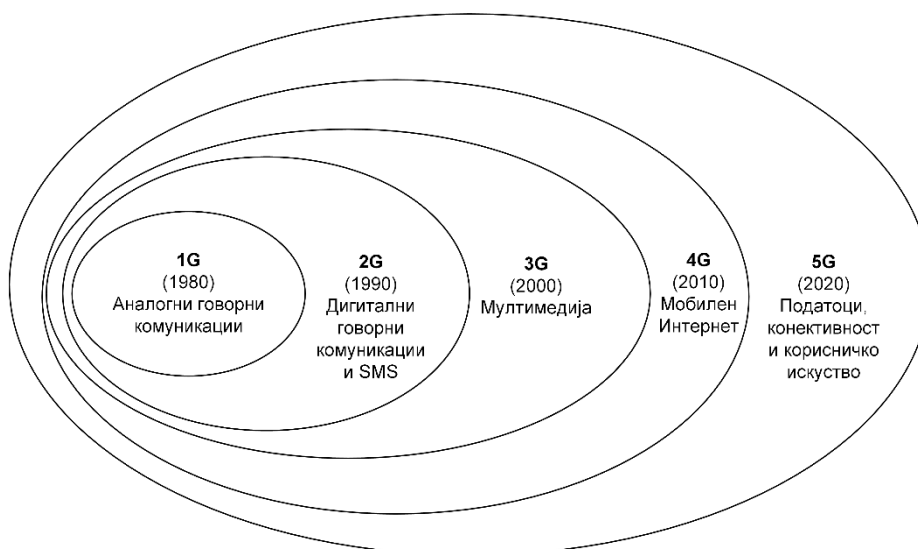
на чинење за инфраструктурата и уредите и ќе биде 50 до 100 пати поефикасна во поглед на искористеноста на енергијата по бит, во споредба со постојните системи [6].

Механизмите за менаџирање на квалитетот на сервисите (QoS) кај 5G мрежите треба да обезбедат приоритет на видео и VoIP сообраќајот спрема сообраќајот за веб пребарување и другите апликации кои трпат толеранција во однос на квалитетот [12]. Некои QoS параметри како што се буџетот за доцнењето на пакетите - Packet Delay Budget (PDB), или максималното доцнење на пакетите и просекот на изгубените пакети - Packet Loss Ratio (PLR) имаат далеку пониски вредности за ред на големина, отколку кај 4G.

Општо земено 5G мрежата треба да има далеку подобри перформанси од 4G мрежата. Табела 1 дава споредба на QoS параметрите помеѓу 4G и 5G мрежите 4G [12], [52 – 53], [55].

## 2.6 5G апликации и сервиси

Типовите на сервиси што може да ги поддржат сите генерации на мобилни и безжични мрежи (од 1G до 5G) се дадени на Слика 2.3. 1G поддржува само аналогни говорна комуникација. 2G обезбедува дигитални говорни комуникации и сервис за кратки пораки - Short Message Service (SMS). 3G поддржува мултимедиски сервиси, како и сервисите на 2G. 4G ги поддржува сервисите на 2G и 3G, и мобилниот интернет. 5G ќе биде главно насочена кон следните типови на сервиси: податоци, конективност и корисничко искуство. Дополнително ќе бидат поддржани сервисите од претходните генерации на мобилни и безжични мрежи.



Слика 2.3 Типови на сервиси од 1G до 5G [54]

5G ќе има корисничко центриран пристап, каде телекомуникациските оператори ќе инвестираат во развој на нови апликации што ќе обезбедат сè присутно, продорно, непречено, континуирано и разновидно мобилно искуство за крајниот корисник [5]. Апликациите ќе станат поперсонализирани, и посвесни за контекстот, што ќе овозможи да се препознае идентитетот на корисникот, неговата локација и преференците на корисникот [56].

Затоа сервисите кои содржат контекст треба да бидат поддржани во 5G, како што се сервисот за екстракција на контекстот, сервисот за препорака, и сервисот за група. Особено важен е сервисот за екстракција или извлекување на контекстот кој прави податочно рударење на мобилните податоци во комбинација со другите форми на податоци како што се податоците од социјалните мрежи, податоците од сензорските мрежи со цел да се извлечат или екстрахираат контекстуални индиции релевантни за корисникот. Сервисите за податочно рударење треба да се во можност да се адаптивни да анализираат голема група на луѓе и големи количества на податоци (big data) со цел да може во реално време да се извлечат збирни трендови во рамките на една популација на корисници. Дополнително, треба да има можност за креирање на сервиси за препорака базирани на збирна група на контексти, отколку на поединечен контекст. Со користење на овие индиции, се креира слој на колективни сервиси за препораки што се прилагодени за единечен корисник или пак група на корисници со такви контекстуални карактеристики [56].

5G може да најде примена во здравството, образованието, мобилната аугментирана реалност, услугите за видео игри, службите за катастрофа, паметните градови, паметните домови, паметните возила, роботика, производството, итн. [52 – 53]. На пример во здравството, 5G може да се користи за итни случаи, за препишување на лекови од далечина, за медицински третман од далечина и слично. Здравствените поврзани уреди кај луѓето ќе праќаат во реално време и витални знаци како што се мозочните бранови, крвниот притисок, и пулсот до експерт за системот во болница со цел да се спречат итните медицински случаи уште пред нивното појавување. Дополнително поврзаните уреди може да вршат мерења за атлетските перформанси на корисникот додека тој/таа вежба, или пак да препорачаат времетраење или зачестеност на некоја вежба.

Во образованието, 5G ќе промовира реалистични образовни услуги со 4D во различни полиња, онлајн образовен сервис и мултилатерален образовен сервис што ќе резултира со ефективно симултано учење. 5G, заедно со одличниот квалитет на вградените камери

во паметните телефони ќе овозможи широка распространетост и преносливост на аугментираната реалност, со чија технологија ќе се овозможи виртуелна графичка слика што ќе се поклопува со физичкиот објект во реално време. Некои примери се: навигација, јавната безбедност, превод во реално време, 3D дизајн и визуелизација, упатства од далечина, помош при купување, итн.

5G ќе овозможи подобро корисничко искуство за видео игрите со користење на холограм со висока дефиниција - High Definition hologram (HD hologram) што ќе овозможи презентација на огромна содржина, имплементација на HDTV холограм и реализација на 50 инчен холограмски дисплеј. Дополнително, сензорот за препознавање ќе овозможи визуелно препознавање и свесност за конкретната ситуација.

Заедно со IoT уредите, 5G ќе овозможи поддршка за службите за катастрофа и тоа за сервис базиран за одредување на локацијата, големата густина на комуникации, сензорите за хемиските мерења во околината и HD-CCTV (High Definition - Closed Circuit Tele-Vision) и сервисот за итен случај кој вклучува препознавање (информација за позицијата), проценка за ситуацијата, ризикот и дејството што треба да се превземе (извршен сервис).

5G може да се користи кај паметните градови, паметните домови и паметните возила за јавен превоз, кај системите за навигација на возилата кои се користат за да се најде саканата дестинација, сервис за дијагностика на возилото, околина на паметен дом што ќе придонесе за заштеда на енергија, или да направи некои препораки според преференците на корисникот (на пример паметниот фрижидер да препорача некој рецепт за готвење, со состојки кои веќе ги има во фрижидерот).

## **2.7 5G архитектурни мрежни нивоа**

5G мрежата ќе биде целосно IP мрежа што ќе овозможи континуирана еволуција и оптимизација на концептот на системот со цел да се обезбеди конкурентска предност за перформансите и цената [5], [9], [11], [56]. Ова ќе го намали товарот на агрегационата точка и сообраќајот директно ќе се пренасочи од базната станица до медиумските порти (media gateways). Мрежната архитектура на 5G ќе содржи неколку нивоа кои се прикажани на Слика 2.4.

Давателите на иновативните сервиси и содржини (Innovative Service and Content Providers) се наоѓаат на највисокото ниво, и во нив се сместени 5G сервисните побарувања и ќе овозможат ново сè присутно и продорно корисничко искуство. Притоа



ќе бидат обезбедени нови сервиси и услуги како што се аугментирана и виртуелна реалност, холограм, мобилна ултра висока дефиниција (mobile ultra-high definition), обработка на податоци во околина на облат, итн.

<b>Даватели на иновативни сервиси и содржини</b>
<b>Платформа со софтверски базирано јадро</b>
<b>Софтверски радио пристапна мрежа (RAN):</b>
<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Облак на работ (ивицата) од радио пристапната мрежа</li> <li>2. Хипер-поврзана радио пристапна мрежа</li> </ol>
<b>Мрежа на паметни уреди</b>

Слика 2.4 Архитектурни нивоа на 5G мрежата [54]

Едно ниво подолу е платформата со софтверски базирано јадро. Овде флексибилна и доверлива IP архитектура ќе конвергира во различни технологии кои ќе формираат единечно 5G јадро, каде различни комплексни и интелегентни телекомуникациски мрежни функции може ефикасно да се имплементираат. 5G јадрото ќе се состои од реконфигурабилни мулти-технологии во единечно јадро наречено супер-јадро, нано-јадро или мастер-јадро [11]. Сите мрежни оператори ќе се поврзани кон единечно мрежно јадро со масивен капацитет, кој ќе ги елиминира сите комплексни и скапи меѓу поврзувања, со кои сега мрежниот оператор се соочува, и ќе го редуцира бројот на мрежните ентитети во врската од крај до крај, со што значително се намалува латентноста. Главната функционалност на 5G јадрото ќе биде платформата на мрежата како сервис или мрежата како услуга - Network as a Service (NaaS) што ќе овозможи конфигурација на сите телекомуникациски и сервисни функции со виртуелен софтвер на програмабилен хардвер [56].

Третото ниво е радио пристапната мрежа - Radio Access Network (RAN) што се состои од Облак на работ (ивицата) од радио пристапната мрежа - EDGE Cloud RAN (EDGE CRAN) и хипер поврзана радио пристапна мрежа. EDGE CRAN го мигрира облакот од давателите на иновативните сервиси и содржини кон радио пристапната мрежа. Со префрлување на складиштето на податоци и компјутерските и пресметковните ресурси поблиску до базната станица, операторите може да го подобрат временскиот одзив, со што се прави побрзо обезбедување на сервисите според барањата на корисниците.

Хипер поврзаната радио пристапна мрежна инфраструктура - Hyper-connected Radio Access Network (RAN) делува како податочна цевка што подржува масивна и ултра брза

конекциска брзина преку ултра густите мрежи Ultra-Dense Networks (UDN) на безжичниот пристап кој се состои од хетерогена распределба на клетките. Хипер радио пристапната мрежа е повеќеслојна хетерогена мрежа која ќе ги содржи постојните 2G, 3G, 4G и идните радио пристапни технологии - future Radio Access Technologies (RATs). Исто така може конвергираат и многу други радио технологии како на пример мобилните сателитски системи - Mobile Satellite System (MSS), дигитален видео бродкаст - Digital Video Broadcasting (DVB), безжични локални мрежи - Wireless Local Access Network (WLAN), безжични локални персонални мрежи - Wireless Personal Access network (WPAN), Worldwide Interoperability for Microwave Access network (WiMAX), итн. со повеќе нивоа на покриеност од макро, пико, фемто, релејни и други типови на мали клетки. Когнитивното радио и софтверскиот дефинирано вмрежување (software defined networking) заедно со постојните или нови модуляции и методи на трансмисија може да се користат за пуштање на нови апликации и сервиси што ќе ја подобрат искористеноста на згуснатиот RF спектар. Инфраструктурата на радио пристапната мрежа е одговорна за кеширање на содржината на клеточно ниво (cellular content caching), распределба на радио ресурсите, мобилност, контрола на интерференција и др.

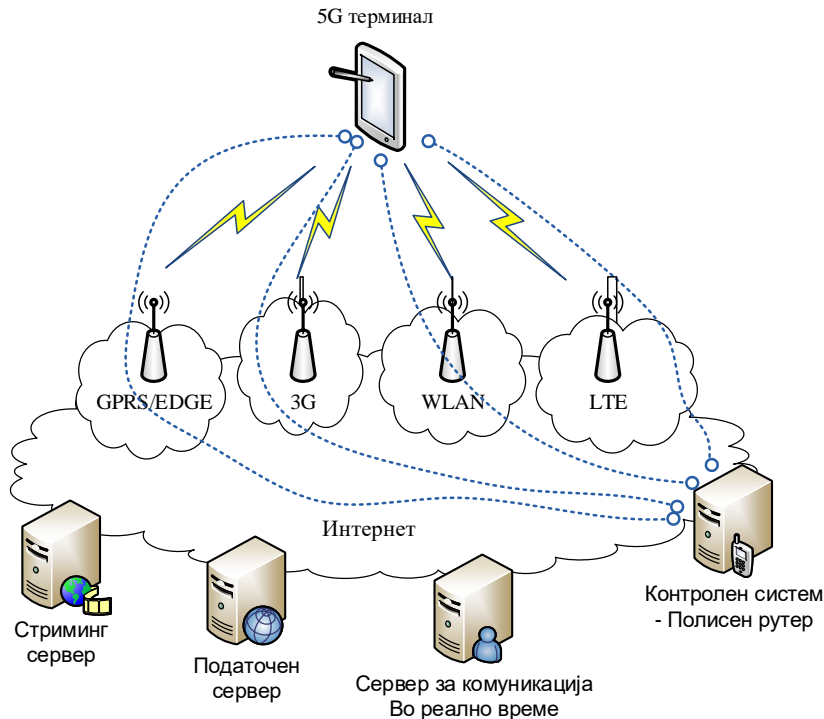
Конечно најниското ниво на 5G мрежната архитектура се состои од различни паметни мобилни уреди, Интернет на нештата - Internet of Things (IoT), Веб на нештата - Web of Things (WoT), итн. Овде спаѓаат лаптопите, паметните телефони, таблетите, фаблетите, преносливите уреди и поврзаните вградени уреди и сензори во моторите, автомобилите, камионите, итн.

Архитектурните нивоа кај 5G ќе бидат примарно дефинирани од сервисните побарувања и следните технологии: нанотехнологијата, квантната криптографија и обработката на податоци во околина на облак во фиксна или мобилна средина.

## **2.8 Предлог дизајн на 5G мрежна архитектура**

Еден предлог дизајн на 5G мрежна архитектура, базирана на интернет модел за интероперабилност, може да се најде во [11], [57]. Архитектурата е прикажана на Слика 2.5 и се состои од кориснички терминал (кој има круцијална улога во новата архитектура) и одреден број на независни, самостојни радио пристапни технологии. Во рамките на корисничкиот терминал секоја од радио пристапните технологии се гледа како

единствен TCP/IP линк кон надворешниот интернет свет. Но потребно е да има различни радио интерфејси за секоја радио пристапна технологија кај мобилниот уред.



Слика 2.5 5G мрежна архитектура [11], [57]

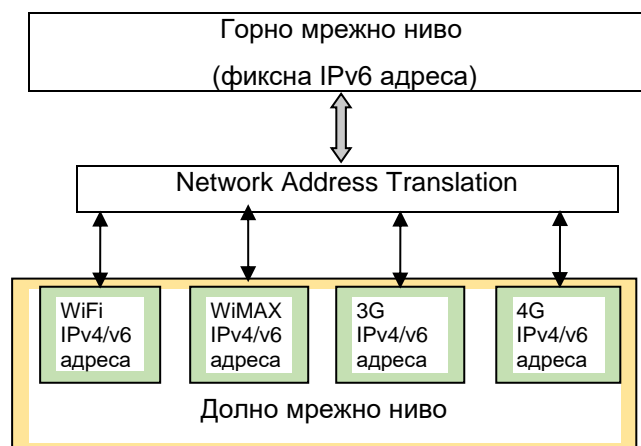
## 2.9 5G паметен мобилен уред

5G мрежата ќе обезбеди сè присутна и продорна конективност со интелигентни способности за да може да се справи со комуникациските побарувања на паметните телефони, паметната ТВ (smart TV) и паметните мали уреди, вклучувајќи ефикасно и ефективно менаџирање на ресурсите. 5G паметниот уред ќе биде потполно автономен уред со можност за реконфигурација, кој ќе биде истовремено прикачен на неколку мобилни и безжични мрежи и ќе ги комбинира протоците на мобилните пристапни технологии (на пример, 2G, 3G или 4G) и/или безжичните пристапни технологии (на пример, WiFi и WiMAX) со одделен и/или интегриран начин (на пример, повеќе конекциска способност) [5]. Секоја мрежна пристапна технологија ќе биде одговорна за справување на мобилноста на корисникот, додека 5G мобилниот терминал ќе го прави финалниот избор за селекција од различните безжични и мобилни мрежи. На Слика 2.5 е даден изгледот на слоевите на протоколниот стек кај 5G паметниот уред и истовремено е направена споредба со класичните OSI нивоа.

Физичкото и податочното ниво од OSI ќе биде базирано на отворено мрежно ниво за пристап - Open Network Access Layer, односно може да се користи било која постојна или нова мобилна и безжична пристапна мрежа, како на пример LTE/LTE-A, LTE-A Pro, WiFi, WiMAX, итн. [5].

OSI Слоеви	Слоеви кај 5G паметниот уред
Апликациско ниво	Апликациско ниво (Апликации, сервиси и услуги, и QoS/QoE менаџирање)
Презентациско ниво	
Сесиско ниво	Отворено транспортно ниво (TCP, RTP, или нова верзија на протокол за симнување)
Транспортно ниво	
Мрежно ниво	Мрежно ниво
Податочно ниво	Отворено мрежно ниво за пристап (LTE-A, WiFi, IEEE 802.16m, итн.)
Физичко ниво	

Слика 2.6 Слоеви на протоколниот стек кај 5G паметниот уред [5]



Слика 2.7 Мрежно ниво кај 5G паметниот уред [5]

Мрежното ниво (види Слика 2.7) ќе содржи од два слоеви: горно мрежно ниво и долно мрежно ниво [5]. Горното мрежно ниво ќе содржи фиксна IPv6 адреса за мобилниот уред што ќе биде имплементирана во мобилниот уред од страна производителот. Во долното мрежно ниво мобилниот IP (MIP) протокол ќе се користи. Бидејќи мобилниот уред ќе биде симултано поврзан на неколку мобилни и безжични мрежи, кај мрежното ниво

мобилниот уред ќе ги одржува различните IP адреси за секој радио интерфејс. Секоја од овие IP адреси ќе претставува Care of Address (CoA) за странскиот агент - Foreign Agent (FA) сместен во мобилниот уред. Овој странски агент ќе врши CoA мапирање помеѓу фиксната IPv6 адреса и CoA за тековната мобилна или безжична мрежа. На тој начин паметниот 5G уред ќе ја одржува повеќе мрежната безжична околина. Транслацијата на мрежните адреси - Network Address Translation (NAT) ќе се врши со помош на мостот (middleware) помеѓу горното и долното мрежно ниво. Дополнително, MIP протоколот може да се користи за одржување на континуитет на сервисите додека уредот стапува во роадинг, или пак се движи од еден безжичен пристап кон друг.

На транспортно ниво ќе се користи отворениот транспортен протокол - Open Transport Protocol (OTP) [5]. Ова ќе овозможи симнување и инсталација на протоколи како што се TCP, RTP, и др., или пак нови транспортни протоколи наменети за специфичен мобилна или безжична мрежа.

Апликациското ниво ќе се користи за QoS и QoE менаџирање. QoS и QoE параметрите ќе се складираат во базата на податоци кај 5G мобилниот уред, кои ќе се користат од страна на интелегентни алгоритми што се извршуваат кај мобилниот уред како процеси на системот, со цел да се обезбеди најдобрата безжична конекција врз основа на QoS и QoE побарувањата и ценовните ограничувања кај корисникот [5].

5G паметните уреди ќе придонесат значително да се забрза конвергенцијата на информатичко комуникациската технологија - Information Communication Technology (ICT) со другите индустрии (на пример, интелегентни транспортни системи - Intelligent Transport Systems (ITS), е-здравство и паметен GRID мрежа - smart grid). Дополнително овие уреди ќе обезбедат информација за статусот на корисникот; на пример здравствената состојба за пациентите во случај на апликација од е-здравството.

Сепак треба да се истакне дека обемиот пораст на сообраќајот и апликациите не оди паралелно со усовршувањето на процесирачките способности на мобилните уреди. Едно можно решение за оваа пречка е да се овозможи мобилните уреди, доколку тоа е можно да ги префрлат или пренасочат нивните задачи кои трошат најмногу енергија кон блиските сервери [58].

### 3 Интернет на сè

Поради равојот на ICT, повеќе кориснички уреди, мрежи и сервиси побаруваат сè покомплексни функции и способности. Во моментот Интернетот прогресивно еволуира од мрежа на меѓусебно поврзани компјутери - Internet of Computers (IoC) кон мрежа на меѓу поврзани објекти, Интернет на нештата - Internet of Things (IoT) и уште повеќе комуникација на било што - any-thing communication, позната како Веб на нештата - Web of Things (WoT) [59]. Следниот чекор во развојот на Интернет на иднината ќе биде чиста еволуција на Интернет на нештата во Интернет на сè [28], што ќе воведи барања за висока мобилност, висока скалабилност, реално време и ниска латентност, а воедно ќе се покренат нови предизвици за сервисите кои се обезбедуваат кон корисникот. Нанотехнологијата, радио фреквенциската идентификација (RFID) и технологиите на сензорските мрежи ќе дадат свој придонес во оваа насока.

#### 3.1 Интернет на нештата

**Интернет на нештата - Internet of Things (IoT)** е систем на меѓу мрежно поврзани паметни физички објекти или нешта во кои е вградена електроника, софтвер, сензори и мрежна поврзаност со цел да се овозможи овие објекти да собираат и разменуваат податоци преку различни мрежни интерфејси и Интернет [28 – 29], [60 – 61]. Во 2013 Иницијативата за глобални стандарди за интернет на нештата - Global Standards Initiative on Internet of Things (IoT-GSI) ги дефинира интернет на нештата како *инфраструктура на информациското општество*.

IoT овозможува објектите да се почувствуваат и/или да се контролираат од далечина преку постојната мрежна инфраструктура. Паметните нешта може да имаат сопствени IP адреси, може да се вградени во комплексни системи, може да користат сензори да добијат информација за нивната околина, и/или да користат актуатори за интеракција со околината. Кога IoT е аугментиран со сензори и актуатори, технологијата станува инстанца на една поопшта класа на сајбер-физички системи, која исто така ги вклучува технологиите на паметни гридови, паметни домови, интелигентни транспортни системи и паметни градови.

Преку експлоатацијата на идентификацијата, фаќањето на податоци (data capture), процесирањето и комуникациските способности, IoT прави нештата да понудат сервиси за сите видови на апликации, додека се одржува бараната приватност. Интернет на нештата ќе креира прилики и можности за директна интеграција меѓу физичкиот свет и

компјутерски базираните системи, што ќе резултира со подобрена ефикасност, прецизност и економски бенефит.

Експертите проценуваат дека IoT ќе се состои од скоро 50 милијарди објекти до 2020 година [62], кои ќе генерираат огромни количества на податоци од различни локации. Во 2022 година се предвидува дека бројот на IoT уреди што ќе бидат поврзани на мобилни и безжични мрежи да достигне над 1,5 милијарди, што претставува дури 70 % од вкупниот број на IoT уреди [35]. Дополнително ќе има потреба за агрегација такво големо количество на податоци (big data), и поефективно индексирање, складирање и процесирање на големото количество на податоци (big data).

### 3.2 Веб на нештата

IoT имаат ограничени можности во интеграцијата на уредите од различни производители во една единствена апликација или систем, бидејќи постојат многу некомпатибилни IoT протоколи. Како резултат интеграцијата на податоците и сервисите од различни уреди е екстремно комплексна и доста скапа. Дополнително, не постои уникатен протокол на апликациско ниво за IoT, што може да оперира преку различни мрежни интерфејси.

Место да се пронаоѓаат нови стандарди, овој проблем може да се реши со користење на постојните добро познати веб протоколи на апликациско ниво, стандарди и блупринтови за поврзување на хетерогени уреди. Ова е познато како **Веб на нештата - Web of Things (WoT)** [59].

WoT претставува IoT со интегрирање на паметните нешта не само на Internet (мрежата), туку и на Веб (апликациско ниво). WoT го обезбедува апликациско ниво што го прави поедноставно креирањето на IoT апликации.

На физичките уреди може да им се пристапи како веб ресурси со користење на стандардните веб протоколи, каде бараните сервиси и апликации на корисниците може да им бидат достапни преку околина на веб базирани сервиси (web-based service environment) или пак преку традиционалните телекомуникации (legacy telecommunications). Затоа интеграцијата на системите и апликациите ќе биде полесна. Сервисите и податоците што се нудат од паметните веб објекти ќе се достапни до голем број на веб програмери, кои пак ќе имаат можност од нив да креираат нови скалабилни и интерактивни апликации кои ќе се корисни за секого.

### 3.3 Интернет на сè

Во иднина секој ден објектите ќе комуницираат меѓусебно едни со други со мрежната интелигенција што овозможува конвергенција, оркестрирање и визуелност преку разни системи. Огромно количества на податоци ќе циркулираат меѓу објектите со цел да се креираат паметни и проактивни околии кои значително ќе го подобрат искуството на корисникот. Ваквите паметни објекти ќе се адаптираат на моменталната ситуација со или без интервенција на човекот. Ова ќе направи IoT и WoT да еволуираат во **Интернет на сè - Internet of Everything (IoE)** [28 – 29], [60 – 61].

IoE претставува паметна врска на луѓето, процесите, податоците и нештата и ги поврзува заедно за да ги направи мрежните врски порелевантни и повредни отколку порано [28 – 29], [60 – 61]. Исто така информацијата се претвора во дејство што ќе креира нови можности, побогато искуство без преседан нови економски прилики за бизнис, за луѓето и за државите.

Главните двигатели што ќе овозможат IoE да стане реалност се: развојот на IP уредите, достапност на широкопојасните сервиси на глобално ниво и појавата на IPv6. Мрежата има критична улога во Интернетот на сè и мора да овозможи паметна и безбедна инфраструктура со можност за скалабилност за да поддржи милијарда уреди кои имаат свест за контекстот (context-aware devices). *Главните елементи на IoE се: луѓето, процесите, податоците и нештата* (види Слика 3.1).

**Луѓето** ќе се поврзани на Интернет со разни уреди, како што се паметните телефони, компјутери, лаптопи, таблети или фаблети, како и преку социјалните мрежи како што се Facebook и LinkedIn. Дополнително самите луѓе ќе станат јазли на интернетот, со статичка информација или пак систем кој постојано предава или емитува информација (на пример здравствената состојба) [61].

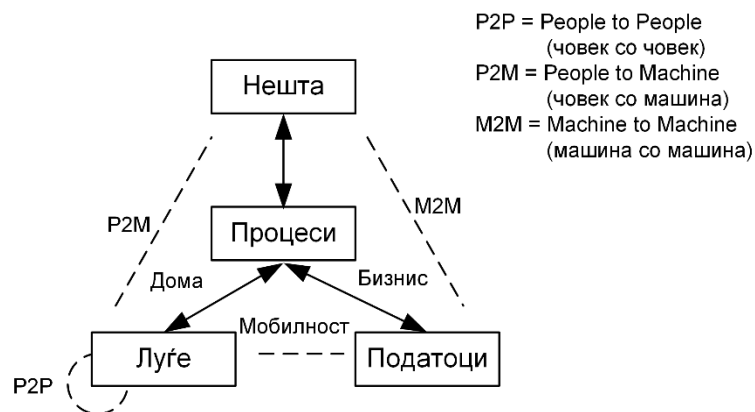
**Податоците** ќе се земаат од паметните нешта, кои понатаму ќе се трансформираат во корисна и значајна информација што ќе се пренеси преку Интернет кон централниот извор (машините, компјутерите и луѓето) за понатамошна обработка или процесирање, анализа и носење на одлука. Трансформатцијата на податоците е многу битна, бидејќи ќе овозможи да се направат брзи и паметни одлуки, а истовремено ќе има поефективна контрола на околината [61].

**Паметните нешта** или **објекти** се состојат од сензори, мерачи, актуатори, потрошувачки уреди и основните средства на претпријатието кои се поврзани меѓусебно и на Интернет. Во IoE, овие паметни нешта ќе насетат многу повеќе податоци, ќе станат



свесни за контекстот и ќе обезбедат експериментална информација за да им се помогне на луѓето и машините да направат значајни и порелевантни одлуки [61].

**Процесите** ги менаџираат луѓето, податоците и нештата за да функционираат заедно. Тие играат важна улога во начинот на комуницирање и соработка меѓу луѓето, податоците и нештата со цел да се испорача економска вредност и општествена придобивка во поврзаниот свет на ЈоЕ. Со точниот процес, врските стануваат позначајни и порелевантни бидејќи точната информација е испорачана кон правата личност во правиот момент на најсоодветен начин [61].



Слика 3.1 Поврзаноста кај Интернет на сè [29]

## 4 Обработка на податоци во околина на облак – Cloud Computing

Идејата за **обработка на податоци во околина на облак**, или **Облак технологија – Cloud Computing (CC)** се базира на основниот принцип на повторно искористување на можностите од информатичката технологија – ИТ [13], [63]. Облак технологијата е парадигма за пресметка и обработка на податоци, во која голем број на системи се меѓусебно поврзани со јавни или приватни мрежи, со цел да обезбедат динамичко скалабилна инфраструктура за апликациите, податоците и складирањето на датотеките [21]. Притоа ресурсите од облакот што се споделуваат (мрежи, сервери, складишта за податоци, апликации и сервиси) може рапидно да се провизионираат и управуваат со минимална интеракција од страна на давателите на сервиси и услуги.

Корисниците на облак технологијата може да ги користат овие ресурси за развој, хостирање и извршување на сервиси и апликации по потреба (on-demand) на флексибилен начин на во било кој уред, било кое време и било кое место во околина на облакот. Со пронаоѓањето на оваа технологија, цената за обработка на податоци, за хостирање на апликации, за складирање на содржината и нивна испорака е значително намалена.

Рамката за обработка на податоци во околина на облак е дефинирана во препораките на ИТУ Y.3501 [14] и Y.3510 [15] и кај NIST стандардите за обработка на податоци во околина на облак [16].

### 4.1 Карактеристики на облак технологијата

Главните карактеристики на облак технологијата [64] се следните:

- *Заеднички споделена инфраструктура* — која користи виртуелен софтверски модел, со кој се овозможува споделување на физичките ресурси, складирањето и мрежните способности. Инфраструктурата на облакот се обидува да го искористи најдоброто од достапната инфраструктура без оглед на моделот на распоредување на огромниот број на корисници.

- *Динамичко провизионирање* — Овозможува провизионирање на сервисите базирани врз тековните побарувања. Ова се прави автоматски со користење на софтвер, кој овозможува експанзија и контракција на сервисните способности, во зависност од потребите. Ваквото динамичко скалирање треба да се направи на тој начин што ќе се задржи доверливоста и сигурноста.

- *Мрежен пристап* — треба да се пристапува преку Интернет од разни уреди како што се персонални компјутери PCs, лаптопи и мобилни уреди со користење на стандардите базирани на апликациско програмскиот интерфејси - APIs (на пример HTTP). Распоредувањето на сервисите во облакот вклучува сè почнувајќи од користење на бизнис апликации па сè до најновите апликации на паметните телефони.

- *Управувано мерење* — користи мерење за управување и оптимизирање на сервисите за да обезбеди известување и информација за наплата. На овој начин корисниците на облакот им се наплатува според тоа колку пати го користеле облакот.

## 4.2 Обработка на податоците во мобилна околина

Мобилните уреди (паметните телефони, таблетите, итн.) станаа есенцијален дел од животот како најефективни и најпогодни алатки за комуникација без ограничувања за времето и просторот. Корисниците на мобилни уреди акумулираат богато искуство на мобилните апликации (iPhone апликации, Google апликации итн.), кои се извршуваат или на мобилните уреди и/или на серверите во далечина преку безжичните мрежи. Брзиот развој на мобилната обработка на податоци (mobile computing (MC)) станува моќен тренд во развојот на информатичката технологија. Но од друга страна мобилните уреди се соочуваат со многу предизвици во поглед на нивните ресурси (животен век на батеријата, капацитет за складирање на податоци и опсегот) и комуникации (мобилноста и сигурноста). Ограничените ресурси значително го влошуваат усовршувањето на квалитетот на услугите и сервисите.

Со брзиот пораст на мобилните апликации и поддршката на обработката на податоци во околина на облак за различни типови на сервиси и услуги за корисниците на мобилни уреди, **мобилната обработка на податоци во околина облак - Mobile Cloud Computing (MCC)** е воведена како интеграција на обработката на податоци во околина на облак во мобилна средина [17], [65 – 66]. Мобилната обработка на податоци во околина на облак носи нови типови на сервиси за корисниците на мобилни уреди кои ќе ги користат поволностите од обработката на податоци во околина на облак.

Мобилната обработка на податоци во околина на облак, наједноставно се однесува на инфраструктура каде процесирањето и складирањето на податоците се случува надвор од мобилниот уред [20]. Мобилните облачни апликации ја преместуваат процесирачката моќ и складирањето на податоци настрана од мобилните уреди во облакот, при што

апликациите и мобилната пресметка се достапни не само за корисниците на паметни уреди, туку и на широк опсег на корисници на мобилни уреди.

Алтернативно мобилната обработка на податоци во околина на облак може да се дефинира како комбинација на мобилен веб и обработка на податоци во околина на облак, што претставува најпопуларна алатка за корисниците на мобилни уреди за пристап до сервисите и апликациите на Интернет.

Мобилната обработка на податоци во околина на облак е парадигма за мобилните апликации каде процесирањето и складирањето на податоците се случува настрана од мобилниот уред во една централизирана платформа која поседува огромна процесирачка моќ, лоцирана во облакот. Пристапот до ваквата платформа е овозможен со безжична врска со помош на тенок клиент или веб прелистувач на мобилните уреди.

Во основа обработката на податоци на облак во мобилна средина може да се однесува на две перспективи [65]:

- *Инфраструктурно базиран мобилен облак* – каде хардверската инфраструктура е статичка и обезбедува облачни сервиси на мобилните корисници;
- *Ад хок мобилен облак* – каде група на мобилни корисници делуваат како облак и обезбедуваат облачни сервиси на други мобилни уреди.

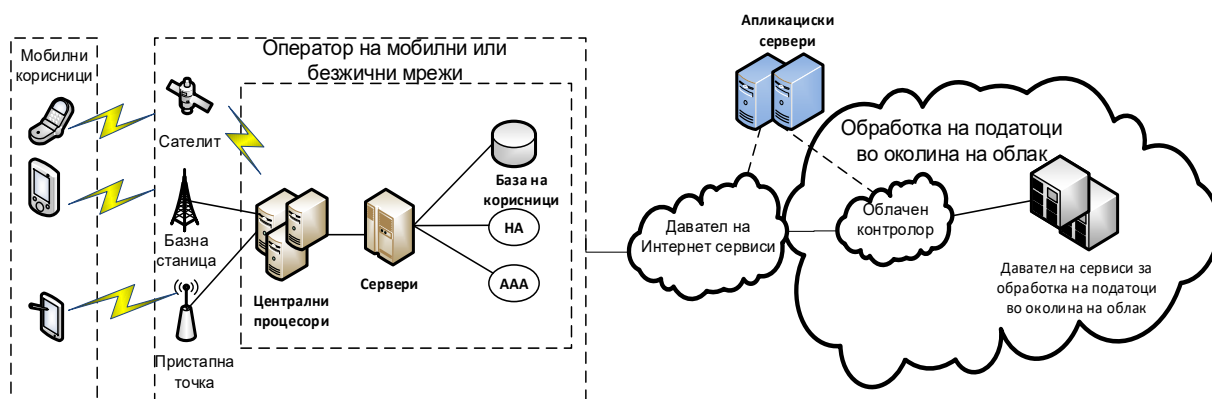
### **4.3 Модел и архитектура на облак технологијата**

Обработката на податоци во обична или мобилна средина се состои од комплексна мрежа и врски меѓу давателите на инфраструктура, давателите на апликации/сервиси, крајните корисниците и креаторите (developers), сите што произведуваат и/или користат апликации и/или сервиси на веб [18]. Таков модел е даден на Слика 4.1.

Давателите на инфраструктура обезбедуваат хардверска и софтверска инфраструктура и/или сервиси и апликации. Давателите на апликации/сервиси се првото ниво на корисници на обработката на податоци во околина на облак. Тие се типични бизнис корисници на облачната инфраструктура и даватели на апликации и/или сервиси. Креаторите се второ ниво на корисници на обработката на податоци во околина на облак. Крајните корисници познати како трето ниво на корисници обработката на податоци во околина на облак. Тие ги користат апликациите што користат сервиси од облакот и водат грижа дали апликацијата работи добро кога е потребно со неопходното ниво на достапност и сигурност.



Слика 4.1 Модел за (мобилна) обработка на податоци во околина на облак [18]



Слика 4.2 Архитектура за мобилна обработка на податоци во околина на облак [17]

Општата архитектура на мобилната обработка на податоци на облак [17] е дадена на Слика 4.2. Како што се гледа мобилните уреди се поврзани со базните станици (примо предавателна базна станица - base transceiver station (BTS), пристапна точка или сателит) кои воспоставуваат врска, а воедно вршат контрола на линковите и функционалните интерфејси меѓу мрежите и мобилните уреди. Сервисните побарувањата на мобилните корисници и општата информација за нив (идентитет и локација) се предава на централните процесори што се поврзани на серверите кои обезбедуваат мобилни мрежни услуги. Овде мрежните оператори обезбедуваат сервиси на мобилните корисници како што е AAA (Authentication Authorization and Accounting) базирана врз домашниот агент – home agent (НА) податоците за корисникот складирани во базата. После тоа барањата на корисниците се испраќаат до облакот преку Интернет. Во облакот,

облачните контролори ги процесираат барањата со цел да им се овозможат бараните сервиси на корисниците на мобилните уреди. Овие сервиси се развиени со концепти на искористеност на обработката (utility computing), виртуелизација и сервисно-ориентирана архитектура (веб апликација, сервери за бази на податоци и др.).

Мобилните апликации веќе се адаптираат на околината на облакот. Но овие апликации се поврзани со инстанци на серверот што се извршуваат во околина на облакот. Поради ова корисниците на мобилната пресметка на податоци во околина на облакот може да се соочат со проблеми како што е метеж поради ограничениот опсег, дисконекција на мрежата и слабеење на сигналот предизвикана од мобилноста на корисниците. Ова ќе предизвика доцнење кога корисниците сакаат да ги користат сервисите на обработката на податоци во мобилна околина, при што QoS и QoE се значително редуцирани.

Клонираните облаци (CloneClouds) и Cloudlets се некои од можните решенија за редукција на мрежното доцнење [17]. Клонираните облаци ги користат блиските компјутери или податочни центри со цел да се зголеми брзината на извршување на апликациите на паметните телефони, со клонирање на целото множество на податоци и апликации од паметниот телефон кон облакот и селективно извршување на некои операции во клоновите и потоа повторно реинтегрирање на резултатите во паметниот телефон. Cloudlet-от е доверлив компјутер со огромни расположливи ресурси, при што поседува добра Интернет врска и е достапен за користење за мобилните уреди што се наоѓаат во негова близина. Корисниците на мобилната обработка на податоци во околина на облак може да го користат cloudlet-от доколку е достапен и доколку тие не сакаат да праќаат податоци кон облакот (можеби поради доцнењето, цената, итн.).

#### 4.4 Сервисно ориентирана архитектура на облакот

Распоредувањето на сервисите во околина на облакот во поглед на бизнис моделите може да е различно во зависност од побарувањата на корисниците [17], [67]. На Слика 4.3 е прикажана повеќеслојна архитектура за обработката на податоци во околина на облак која што ја покажува ефективноста за побарувањата на корисникот.

Софтвер како сервис
Платформа како сервис
Инфраструктура како сервис
Податочни центри

Слика 4.3 Сервисно ориентирана архитектура на облакот

**Податочните центри – Data Centers** обезбедуваат простор за хардверот и инфраструктура за облаците. Одреден број на сервери се поврзани со мрежи кои имаат големи битски брзини со цел да ги обезбедат сервисите на корисниците. Обично податочните центри се поставуваат во места со мала населеност, каде има снабдување со електрична енергија со висока стабилност и мал ризик од несреќа.

**Инфраструктурата како сервис - Infrastructure as a Service (IaaS)** е изградена над нивото на податочните центри. Корисникот не е во можност да ја управува и контролира инфраструктурата на облакот. Но IaaS обезбедува обработка на одредбите (provision processing), складирање на податоци, мрежи и други фундаментални компјутерски ресурси каде корисникот е во можност да воведи и да изврши произведен софтвер кој може да вклучува оперативни системи и апликации.

**Платформата како сервис - Platform as a Service (PaaS)** се наоѓа над IaaS нивото и нуди напредна интегрирана околина за развој, тестирање и распоредување на сопствени апликации и софтвер. Корисникот не може да ја контролира и управува дадената облачна инфраструктура како што се мрежата, серверите, оперативните системи или складиштето (магацинот) за податоци, но може да има контрола врз распоредените апликации и евентуално врз конфигурациите на околината за хостирање на апликации.

**Софтверот како сервис - Software as a Service (SaaS)** е над PaaS нивото и нуди апликации или сервиси што се хостирани на облачната инфраструктура. На овие апликации и сервиси им се пристапува со разни кориснички уреди со помош на тенок клиент интерфејс како што е веб прелистувачот. Корисникот не е во можност да ја менаџира или контролира дадената облачна инфраструктура вклучувајќи ја мрежата, серверите, оперативните системи, складиштето за податоци или пак можностите на индивидуалната апликација. Корисникот може да контролира и управува само ограничен број на специфични кориснички конфигурациски подесувања.

Исто така постојат различни подмножества на овие сервисни нивоа што се однесуваат на одредена индустрија или пазар. Такви модели се на пример мрежата како сервис и комуникацијата како сервис [64], [68].

**Мрежата како сервис - Network as a service (NaaS)** е категорија на облачните сервиси каде на корисникот на облачните сервиси му се дава можност да користи транспортно конекциски сервиси и/или мрежни конекциски сервиси или услуги помеѓу облаците. NaaS сервисите вклучуваат флексибилен и проширен VPN, пропусен опсег по потреба (bandwidth on demand), итн.

**Комуникацијата како сервис - Communications as a service (CaaS)** е категорија на облачните сервиси каде на корисникот на облачни сервиси му се дава можност да користи реално време комуникациски и колаборативни сервиси. CaaS сервисите вклучуваат говор преку IP (VoIP), услугата за инстант пораки и видеоконференција.

#### 4.5 Модели за распоредување на облакот

Во зависност од барањата постојат неколку модели за распоредување на облакот и секој од нив поседува одредени карактеристики што ги поддржува на одреден специфичен начин сервисните побарувањата на корисниците. Моделите на распоредување се приватен облак, облак на заедница, јавен облак, хибриден облак и меѓу облачна пресметка на податоците [67 – 69].

**Приватниот облак (Private Cloud), познат уште како корпоративен облак (Corporate Cloud) или внатрешен облак (Internal Cloud)** претставува сопствена proprietary компјутерска архитектура наменета за една организација, која воедно самата го поставува одржува и управува. Притоа облакот обезбедува сервиси што се хостирани на приватни мрежи. Поставувањето на облачната инфраструктура може да биде во рамките на просториите на самата организација, или на некоја друга локација. Недостатоци на овој модел е во тоа што организацијата треба да го купи, самата да го подеси и самата да ги одржува и менаџира сопствените облаци.

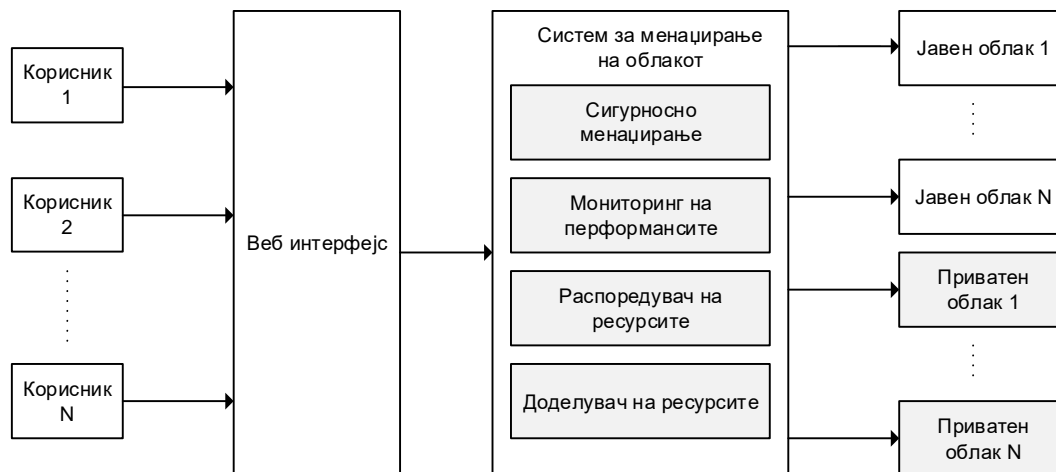
**Облак на заедница (Community Cloud)** е приватна облак инфраструктура што е споделена помеѓу повеќе организации со слични интереси и побарувања. Ова може да помогне во ограничувањето на капиталното проширување бидејќи трошоците се поделени меѓу организациите. Операциите на облакот може да се извршуваат во рамките на некоја од организациите или пак на некоја друга локација.

**Јавен облак (Public Cloud)** е облак инфраструктура која е достапна за јавност врз комерцијална основа од страна на давателот на облачните услуги и сервиси. Ова овозможува корисниците на облакот да развиваат и распоредуваат сервиси во облакот со минимален финансиски трошок, за разлика од останатите капитални проширувања асоцирани со други опции на распоредување. Корисниците се поврзани на облачните податочни центри кои обезбедуваат облачни сервиси и услуги преку јавниот Интернет.

**Хибриден облак (Hybrid Cloud)** е облак инфраструктура која се состои од бројни типови на облак од било кој тип, но облацима имаат можност преку нивните интерфејси да овозможат податоците и/или апликациите да се префрлат од еден облак во друг облак. Ова може да биде комбинација на приватни и јавни облаци кои го поддржуваат барањето



да се зачува некоја информација во рамките на организацијата, а воедно да се понудат услуги во облакот. Хибридниот облак е погодно решение за потребите на претпријатијата, но исто така ја воведува комплексноста кои сервиси и апликации треба да се дистрибуираат преку приватните, јавните или двата типови на облаци.



Слика 4.4 Модел на хибриден облак за обработка на податоци [69]

На Слика 4.4 е прикажан пример на модел за хибриден облак. Во овој тип на облак, системот за менаџирање на облакот - Cloud Management System (CMS) е одговорен за администрирањето на хибридните облаци. CMS системот треба да содржи функционалности за сигурносно менаџирање, распределба на ресурсите (на пример за брза (immediate) распределба, распределба по потреба (on-demand), или за идна употреба), доделувач на ресурси (resource allocator), и мониторинг на активностите и перформансите на претпријатието. Оваа информација може да се користи за бараните ресурси што треба да бидат доделени во иднина. Секој корисник преку веб интерфејс пристапува до CMS системот, кој понатаму во зависност од барањата на корисникот до соодветниот приватен или јавен облак.

**Меѓу облачната пресметка на податоците (Inter-cloud computing)** е модел кој овозможува по потреба и на барање (on demand) да се доделат на ресурси од облакот, како што се процесирање, складирање и мрежа, и распределба на работниот товар (workload) преку меѓу мрежното поврзување на облациите.

#### 4.6 Бенефиции од обработката на податоци во околина на облакот

Обработката на податоци во околина обезбедува многу предности и придобивки за давателите на облачните сервиси, мобилните мрежни оператори и корисниците на облакот како што се [20], [64]:

- Споделување на информации и апликации, без употреба на некој скап и сложен хардвер и софтвер, бидејќи обработката на податоците се извршува во облакот;
- Заштеда на трошоци – компаниите може да ги редуцираат нивните капитални проширувања, а воедно да ги користат оперативните проширувања за зголемување на нивните процесирачки можности.
- Скалабилност/флексибилност — компаниите може да започнат со мал влог и потоа да се прошират доста брзо и евентуално да се вратат назад доколку е потребно. Исто флексибилноста на обработката на податоци во околина на облак им овозможува на фирмите да користат екстра ресурси во време на шпицови, овозможувајќи им да ги задоволат барањата на корисниците на облакот.
- Подобра доверливост на сервисите — сервисите и апликациите што користат редундантни локации може да поддржат бизнис континуитет и оправување од незгода.
- Одржливост — одржувањето го прават давателите на облак сервисите, и пристапот е овозможен преку апликациско програмски интерфејси APIs кои не бараат инсталирање на апликации кај компјутерите, со што дополнително се редуцираат барањата за одржување.
- Мобилен пристап — мобилните работници ја имаат зголемено продуктивноста поради пристапот во системот преку инфраструктура што е достапна од секаде.
- Подобрени карактеристики и функционалности на мобилните уреди преку новите облачни апликации;
- Лесен пристап до облакот со помош на веб пребарувач;
- Можност било која апликација да се сподели и да ѝ се пристапи од повеќе кориснички мобилни уреди;
- Полесна дистрибуција на облачните апликации до самите корисници (Broad reach and dissemination of mobile cloud computing applications);
- Зголемен животен век на батериите кај мобилните уреди;
- Подобрено складирање на податоците и нивно процесирање, бидејќи мобилната обработка на податоци во околина на облак ќе им овозможи на корисниците на мобилни уреди да складираат и/или да пристапат и процесираат големи податоци како што се 3D

графичка визуелизација и анимација во екологија, глобални климатски решенија, финансиски ризици, здравство и медицинско образование, декодирање на геном проекти, итн., со употреба на безжични и мобилни мрежи во околина на облакот каде постои систем со високи пресметковни перформанси - High Performance Computing (HPC) system; и

- Можност за систем за учење од далечина во околина на облак.

## 5 Обработка на податоци во околина на магла – Fog Computing

Во иднина Интернетот на сè ќе постане линк помеѓу екстремно комплексни поврзани организации (на пр. телекомуникациски оператори, транспортни услуги, финансиски услуги, здравствени и државни сервиси, стоки и др.), што ќе ја обезбедат основната инфраструктура на информатичко комуникациската технологија (ИКТ) што ќе ги поддржи бизнис процесите и активностите на целото општество во целина [28], [61]. Многу често овие процеси и активности се поддржани од оркестрирани облачни сервиси, каде одреден број на сервиси соработуваат меѓусебно за да се постигне целта во бизнисот [13].

Иако обработката на податоци во околина на облак во фиксна или мобилна средина е добро решение за 5G за да се справи со добар дел од идниот Интернет, сепак облакот не може да се справи со некои идни Интернет сервиси и апликации. Ова е поради тоа што Интернетот ќе ја влоши потребата за подобар QoS/QoE квалитет, поддржан од сервисите кои се оркестрирани (диригирани) по потреба и се во можност да се адаптираат при нивното извршување, во зависност од условите на контекстот со цел да се овозможи намалена латентност, висок степен на мобилност, висока скалабилност и извршување во реално време. Новиот бран на Интернет на нештата покрај ниска латентност и следење на локацијата ќе побарува поддршка за моментна мобилност и гео-дистрибуција. Овие побарувања може делумно да се исполнат со постојните решенија за обработка на податоци во околина на облакот [10]. Покрај тоа постојните механизми на облакот за безбедност и сигурност како што се софистицирана контрола за пристап и енкрипција не се можност постојано да спречат неовластен пристап на податоците.

Неодамна се појави новата парадигма позната како **обработка на податоците во околина на магла - Fog Computing**, со цел да се справи со овие побарувања [24], [70]. Обработката на податоци во околина на магла прави проширување на облакот до работ на мрежата. Маглата ќе ги искомбинира проучувањата на мобилните комуникации, микро облаците, дистрибуираните системи и големото количество на податоци што го користат корисниците. Обработката на податоци во околина на магла претставува сценарио каде голем број на хетерогени (безжични и понекогаш автономни) сè присутни и децентрализирани уреди комуницираат и евентуално соработуваат едни со други и со мрежата за да се извршат задачите за складирање и процесирање на податоците без некоја интервенција од трета страна [25]. Овие задачи ги поддржуваат основните мрежни функции или нови сервиси и апликации што се извршуваат во sand-boxed

средина. Корисниците добиваат стимулации да изнајмуваат дел од нивните уреди за хостирање на овие сервиси. Главните карактеристики на маглата се нивната близина до корисничките уреди, нивната густа географска дистрибуција и нивната поддршка за мобилност. Затоа парадигмата на маглата е добро позиционирана за анализа на огромно количество на податоци во реално време. Сервисите се хостираат на работ (ивицата) на мрежата или во самите кориснички уреди како што се сет-топ-боксови или пристапни точки [26]. На тој начин, маглата ја редуцира сервисната латентност и го подобрува QoS квалитетот, со што се резултира во супериорно корисничко искуство. Маглата ги поддржува новите Интернет на сè апликации кои побаруваат предвидлива латентност во реално време (индустриска автоматика, транспортен систем, мрежа на сензори и актуатори).

### **5.1 Споредба на обработката на податоците во околина на облак и магла**

Постоењето на маглата ќе биде овозможено од новите трендови во користењето на технологијата од една страна и усовршувањата на техногии што ја овозможуваат маглата да постои од друга страна. Споредба меѓу обработката на податоци во околина на магла и облак [26] е дадено во Табела 5.1.

Обработката на податоци во околина на магла е насочено за мобилните корисници, додека обработката на податоци во околина на облак е насочено општо за интернет корисниците. Облакот обезбедува глобална информација земена од цел свет, додека маглата обезбедува ограничена локална информација и сервис што се однесува за специфична локација. Облачните сервиси се лоцирани во рамките на Интернетот, а магловитите сервиси се лоцирани на работ (ивицата) од мрежата.

Постои само еден поскок (хоп) меѓу паметните кориснички уреди и серверот за обработка на податоци во околина на магла. Постојат повеќе поскоци (хопови) меѓу паметните корисничките уреди и серверот за обработка на податоци во околина на облак. Обработката на податоци во околина на магла содржи голем број на сервери, додека пак обработката на податоци во околина на магла содржи мал број на сервери. Латентноста и цитер доцнењето се многу ниски во околина на маглата, додека пак во околина на облакот тие имаат високи вредности.

Центрите за обработка на податоци во околина на облак се централизирани, додека пак нодовите (јазлите) за обработка на податоци во околина на магла се густо гео-дистрибуирани. Сигурноста во облакот е недефинирана, додека во маглата може да се

дефинира. Хардверот во облакот содржи доволно големо и скалабилно складиште за податоци, и огромна снага за обработка на податоци. Од друга страна хардверот во маглата содржи ограничено складиште за податоци и ограничена снага за обработка на податоци и безжичен интерфејс. Конечно распоредувањето (воведувањето) на облакот е централизиран и се одржува од страна на ОТТ давателите на услуги, додека маглата е дистрибуирана во регионални области и се одржува од локалните бизниси, кои се наоѓаат во близина на крајните корисници и затоа корисниците имаат поголема доверба во нив.

**Табела 5.1 Споредба на обработката на податоците во околина на облак и магла**

	<b>Обработка на податоци во околина на облак</b>	<b>Обработка на податоци во околина на магла</b>
Целна група	Општи Интернет корисници	Мобилни корисници
Тип на сервис	Глобална информација земена од целиот свет	Ограничена локална информација што се однесува за специфична локација
Локација на сервисот	Во рамките на Интернетот	На работ на локалната мрежа
Растојание меѓу клиентот и серверот	Повеќе поскоци (хопови)	Единечен поскок (хоп)
Број на сервери	Неколку	Многу
Латентност	Висока	Ниска
Цитер доцнење	Високо	Многу ниско
Гео-дистрибуција	Централизирана	Дистрибуирана
Сигурност	Недефинирана	Може да се дефинира
Хардвер	Доволно големо и скалабилно складиште на податоци, и огромна снага за обработка на податоци	Ограничено складиште за податоци и ограничена снага за обработка на податоци и безжичен интерфејс
Распоредување (воведување)	Централизирано и одржувано од страна на ОТТ давателите на сервис	Дистрибуирано во регионални области одржувано од страна на локални бизниси

Парадигмата за обработка на податоци во околина на облак претставува практично и ефикасно решение кое ќе го разреши не совпаѓањето меѓу физичкото растојание од корисникот до локалниот магацин или шопинг центар и комуникациското растојание од корисникот до облачниот сервер [71]. Во околина на облак локалниот шопинг центар или магацин треба да ја постави информацијата во облачниот сервер кој се наоѓа на

значително голема далечина и од него мобилните корисници да ја добијат бараната локална информација. Во околина на магла серверот ќе е поставен внатре во шопинг центарот или магацинот и директно ќе ја испрати информацијата што ја бараат мобилните корисници. На тој начин физичкото растојание се изедначува со комуникациското растојание и корисниците може да побараат сервиси за кои е неопходно мало доцнење. Со минимизација на комуникациското растојание, обработката на податоците во околина на магла ги носи следниве предности:

- *За мобилните корисници:* споредено со облакот, маглата може да обезбеди подобар квалитет на сервисот со далеку поголема битска брзина, намалена латентност и време на одзив. Уште повеќе намалувањето на цената на чинење за сметка на пропусниот опсег неопходен за пренос на податоци низ backbone делот од мрежата, корисниците ќе имаат бенефиции од намалената цена на чинење за сервисот.

- *За мрежата:* со избегнување на дуплираниот сообраќај меѓу облакот и корисникот, не само што се заштедува пропусен опсег во backbone делот на мрежата, туку и потрошувачката на енергија во јадрото на мрежата е значително намалена, што придонесува до одржлив развој на мрежата.

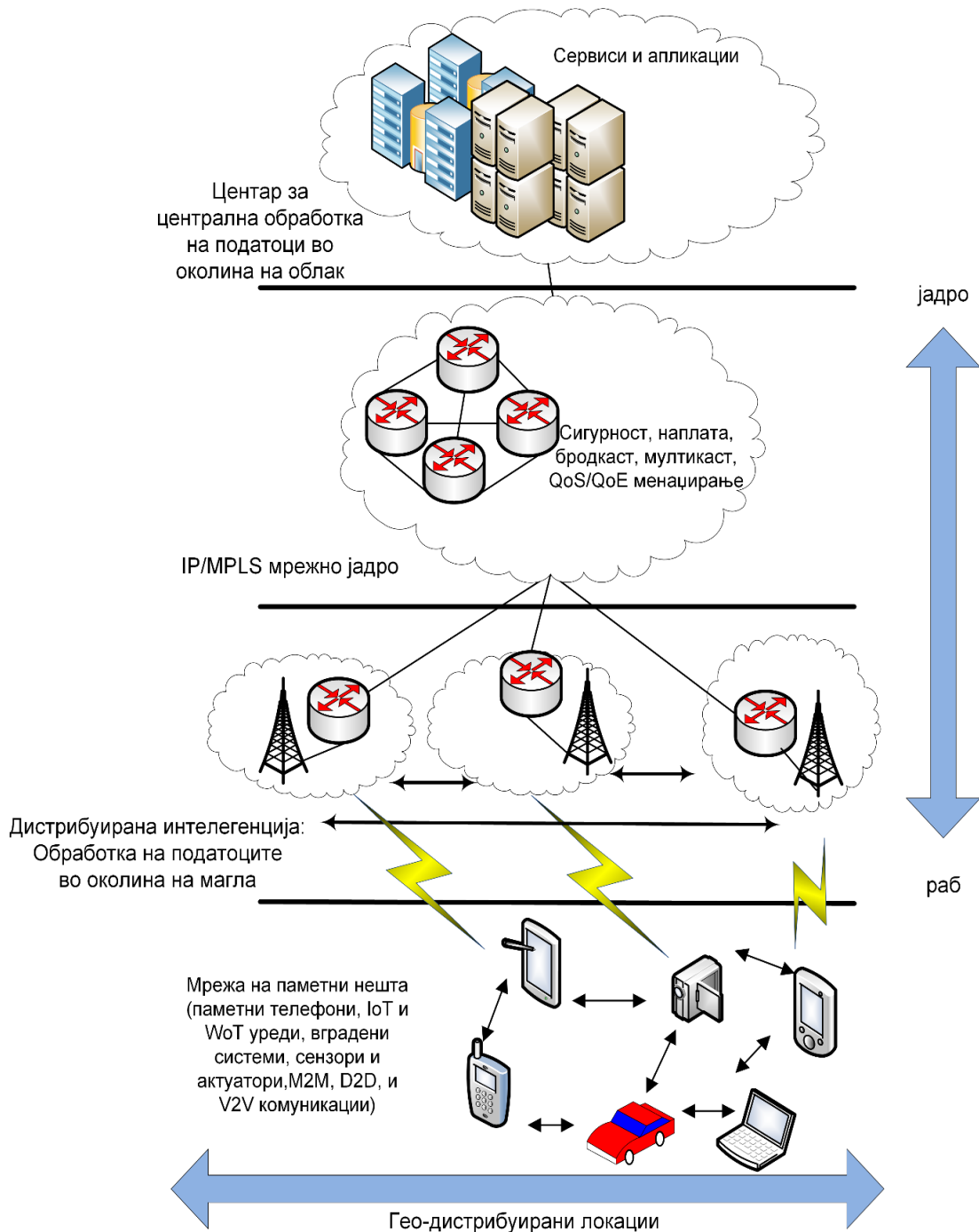
Облакот и маглата формираат заемно корисен меѓу-зависен континуум [30]. Тие се меѓу-зависни, на пример координацијата на уредите во маглата може да се потпре на облакот. Тие се исто заемно корисни бидејќи одредени функции по природа е подобро да се извршуваат во маглата, додека други да се извршуваат во облакот.

## 5.2 Архитектура на обработка на податоците во околина на магла

Архитектурата на обработката на податоци во околина на магла користи еден или повеќе колаборативни кориснички уреди или уреди на работ на корисникот за да извршат значителна количина на складирање на податоци, комуникација и управување (менаџирање) [30].

На Слика 5.1 е даден изгледот на архитектурата за обработка на податоци во околина на магла. Таа се состои од централизиран центар за обработка на податоци во околина на облакот, IP/MPLS јадро на мрежата, RAN мрежа со дистрибуирана интелигенција за обработка на податоци во околина на магла и мрежа на паметни нешта. Секој паметен уред е поврзан кон еден од уредите на маглата во RAN мрежата. Уредите на маглата може да се поврзани едни со други и секој од нив да се поврзан со центарот за обработка на податоци во околина на облак преку IP/MPLS јадрото на мрежата.

RAN мрежата е всушност средното ниво на магла што се состои гео-дистрибуирани паметни сервери за обработка на податоците во околина на магла кои се поставени на работ на мрежата, на пример паркови, автобуски терминали, трговски центри, итн. Секој сервер на маглата е високо виртуелизиран компјутерски систем и е опремен со големо складиште за чување на податоци и со објект за обработка на податоци и безжична комуникација [26].



Слика 5.1 Архитектура за обработка на податоците во околина на магла [72]



Улогата на серверите на маглата е да ги поврзат паметните мобилни уреди и нешта со облакот [25]. Гео-дистрибуираните паметни сервери на маглата директно комуницираат со уредите на мобилните корисници преку единечен хоп на безжична комуникација со користење на безжичните интерфејси како што се LTE, WiFi, Bluetooth, итн. Тие може самостојно да ги обезбедат предефинираните сервисни апликации за мобилните корисници без некоја асистенција од облакот или Интернет. Покрај тоа серверите на маглата се поврзани со облакот со цел да се искористат функциите и апликативните алатки од облакот.



Слика 5.2 Податочна и контролна рамнина на мрежата за обработка на податоци во околина на магла [30]

Мрежата за обработка на податоци во околина на магла ги содржи податочната и контролната рамнина, што ќе овозможи постоење различни апликации со различни комуникациски протоколи преку сите нивоа на OSI системот [30]. Ова е прикажано на Слика 5.2.

Податочната рамнина на маглата е фокусирана на 5G мобилната мрежа, Интернет на нештата и идниот Интернет на сè. Податочната рамнина на маглата може да најде примена кај следново:

- Повлекување на ресурсите за процесирање, чување и пропусниот опсег од локалните клиенти [73];
- Повлекување на локалната содржина;
- Кеширање на содржината на работ на мрежата со цел да се намали оптеретувањето на мрежата;
- Менаџирање на локалниот пропусен опсег на мрежата согласно приоритетот на секоја сесија и индивидуалните преференци со цел да се постигне скалабилно, економично и прецизно контролирање на капацитетот [74];
- Дистрибуирано формирање на зракот преведено од страна на клиентот со цел да се подобри битскиот проток и доверливоста [75];
- Клиент со клиент комуникација (Peer-to-Peer комуникација); и
- Cloudlet-и и микро податочни-центри.

Контролната рамнина на маглата е главно фокусирана на контролата на физичкиот сајбер систем и аналитиката во реално време. Контролната рамнина на маглата може да најде примена во следново:

- Over the Top (OTT) менаџирање на содржината и провизионирање на мрежата, со користење на корисничките клиент уреди како што се универзалниот локатор на ресурси - Universal Resource Locator (URL) wrapping, тагирање на содржината, следење на локацијата, мониторинг на однесувањето на корисникот со цел побрзо да се иновираат мрежни сервиси;
- Fog-RAN: радио пристапна мрежата предводена од маглата, со мигрирање на облакот од јадрото на мрежата кон радио пристапниот дел на мрежата;
- Контрола од страна на клиентот при селекција на мрежа во хетерогена средина [76];
- Контрола на приватноста на складирањето на податоците во облакот од страна на клиентот [77];
- Менаџирање на сесијата и сигнализирање за товарот на работ на мрежата, со цел да се намали оптеретувањето во јадрото на мрежата;
- Густо насетување за состојбите на мрежата како што се бројот на ресурсни блокови што се користат, со употреба на комбинација на пасивно примените мерења за нивото на примениот сигнал (на пример RSRQ), активно пробување (на пример воз на пакети), корелација на битскиот проток на апликацијата и историско податочно рударење [78]; и
- Аналитика на работ (ивицата) од мрежата и рударење на протоци во реално време со употреба на облачните центри и магловитите уреди [79].

Некои од главните карактеристики за обработката на податоците во околина на маглата се објаснети во продолжение.

### 5.3 Сè присутност на уредите

Главниот фактор кој ќе ја донесе маглата во реалноста е сè присутноста на уредите, чиј пораст е управуван од страна на корисничките уреди и сензорите и актуаторите, што ќе овозможи присуство и употреба на уредите насекаде околу нас за различни сервиси и апликации. Со намалувањето на димензиите на уредот, преносливоста на уредот е зголемена. Но исто така и потрошувачката на енергија е редуцирана, што може да биде критична за некои контекст апликации. Ова може да се реши со технологиите на

пакувањето и технологиите за управување со енергија како што се Системот на чип (System on Chip) и Системот за пакувани технологии (System in Package Technologies), 3D микробатерии, РФ енергетска обработка на податоци (RF powered Computing) и други што имаат за цел да креираат помали и поавтономни мобилни уреди што ќе работат подолго за минимална цена [25].

#### 5.4 Управување со мрежата

Конфигурирањето и одржувањето на многу разновидни сервиси што се извршуваат на многу разновидни уреди само ќе ги влоши постојните проблеми на управување. Затоа при обработка на податоци во околина на магла хетерогените уреди и сервисите што се извршуваат кај нив треба да се управуваат на похомоген начин со следните технологии: виртуелизација на мрежната функција - Network Function Virtualization (NFV); мали облаци на работ за да хостираат сервиси во близина или до самите крајни точки (endpoints); и пристапи од типот peer-to-peer (P2P)- и сензорски мрежи за автокоординација за апликациите [25].

NFV претставува реакција на телекомуникациските оператори поради нивниот недостаток за ажурност и константна потреба за доверливи инфраструктури. NFV е можност динамички да воведо мрежни сервиси или кориснички сервиси по потреба. Софтверски дефинираните мрежи - Software Defined Networks (SDNs) се едни од главните што ќе ја овозможат појавата на NFV. На пример, рутерот може да се гледа како SDN-конфигурирана виртуелна инфраструктура, каде и сервисните апликации се воведени во близина на местото каде тие ќе се користат, што ќе резултира во поефтини и поажурни операции. Сепак можностите на NFV сè уште не стигнуваат до крајните кориснички уреди и сензори.

Телекомуникациските оператори започнаа да распоредуваат облаци во нивните Long Term Evolution (LTE) мрежи во близина на работ (ивицата) од мрежата (до корисникот), бидејќи еволуираното пакетско јадро - Evolved Packet Core (EPC) поефикасно ќе ги испорача неопходните сервиси поблиску до корисниците (на работ од мрежата) и ќе го ограничи сообраќајот тука, со што ќе го редуцира сообраќајното оптоварување со помош на SDN мрежите. Маглата ќе овозможи уредите да постанат виртуелна платформа, што може да изнајми одреден капацитет за складирање и обработка на податоци за да може да се извршуваат апликациите на нив.

Пристапите од типот peer-to-peer (P2P) и сензорски мрежи ја експлоатираат локалноста и овозможуваат крајните точки да соработуваат едни со други со цел да постигнат слични или подобри резултати од облакот и може да се имплементираат во околината на магла. Апликацијата на маглата може да се гледа како мрежа за дистрибуција на содржината - Content Distribution Network (CDN) каде податоците се разменуваат меѓу peer ентитетите. Како резултат на тоа, апликациите и податоците не е неопходно да се сместени во централизираните податочни центри.

Како дел од мрежата некои кориснички уреди или сензори може да делуваат како мини-облаци во обработката на податоци во околина на магла. Мини облаците може да се имплементираат со користење на droplet-и или мали парченца на код што се извршува на сигурносен начин со минимална интеракција од централните елементи за координација, и на тој начин се намалуваат непотребните и несаканите праќања (uploads) кон централните сервери на корпоративните податочни центри. Корисниците се во можност да задржат контрола и сопственост на нивните податоци и апликации, а воедно и скалабилноста е подобрена.

## **5.5 Конективност во околина на магла**

Присуството на многу мобилни уреди кои користат и генерираат огромно количество на податоци на работ на мрежата може да предизвикаат големо тесно грло во околина на магла [25]. На физичко ниво следниве технологии може да се справат со овој проблем: LTE-Advanced, LTE-Advanced Pro, WiFi ac, Bluetooth Low Energy, ZigBee, итн.

На мрежно ниво, секој јазел треба да е во можност да делува како рутер за неговите соседи и да биде отпорен на појавата јазлово протекување - node churn (јазли што влегуваат и ја напуштаат мрежата) и на мобилноста. Мобилните ад-хок мрежи - Mobile Ad-hoc Networks (MANETs) и безжичните меш мрежи - Wireless Mesh Networks (WMNs) може да ги обезбедат овие функционалности [25]. MANET ќе овозможи формирање на густо населени мрежи без да има некои побарувања за претходно постоење на фиксна и скапа инфраструктура.

WMNs од друга страна користат меш рутери (mesh routers) во нивното јадро. Јазлите може да користат меш рутери за да добијат конективност, или пак преку други јазли ако немаат директен линк со рутерите за воспоставување на врска. Рутерите ќе овозможат пристап до другите мрежи како што се клеточните мрежи, Wi-Fi, итн.

На повисоките нивоа веќе постојат некои протоколи за IoT, како што се Message Queue Telemetry Transport (MQTT) и Constrained Application Protocol (CoAP), кои овозможуваат мала потрошувачка на ресурсите и отпорност при пад на мрежата [25]. Мрежата и IoT протоколите може да ги искористат бенефициите од локалноста, бидејќи тие веќе нема да имаат потреба постојано да праќаат податоци према целиот свет, освен при некои потенцијални проблеми на натрупување во работ на мрежата. Податочната локалност исто така има позитивно влијание врз приватноста на податоците.

## 5.6 Приватност и сигурност во околина на магла

Најголемата грижа на корисниците на маглата е сопственоста на податоците - data ownership, односно сигурноста и приватноста на податоците [27], [80]. Еден начин за одржување на приватноста е со складирање на енкриптираната сензитивна содржина во конвенционалните облаци. Но постојните механизми за заштита на податоците во околина на облак не успеале да спречат крадење на податоци, особено оние од внатрешниот натрапник.

Сепак вредноста на украдената информација може да се редуцира. Ова може да се постигне со превентивен напад со праќање на дезинформација, со користење на некоја од следниве дополнителни сигурности особини: профилирање на однесувањето на корисникот (user behavior profiling), замки (decoys) или пак комбинација на двете [80].

Профилирањето на однесувањето на корисникот се користи да се моделира нормалното однесување на корисникот, односно како, кога и колку често корисникот пристапува до своите податоци во облакот [80]. Таквите профили содржат волуметриски информации, на пример кон колку датотеки се пристапува и колку често. Појавата на абнормален пристап во корисничката информација може да се одреди со мониторинг на нормалното однесување на корисникот, базирано врз основа на типот и количеството на пренесената информација.

Замките се големо количество на безвредна информација (bogus information) што може да биде генерирана по потреба. Замките се користат за:

(1) потврдување дали пристапот кон податоците е овластен кога информација за абнормален пристап е детектирана

(2) да го збунат натрапникот со непотребно количество на информација [80].

Опслужувачките замки (serving decoys) ќе го збунат натрапникот да верува дека тој/таа има земено корисна информација, но всушност нема. Нападите може да се

спречат со распоредување на вакви замки во околината на магла со помош на центарот за сервисите на корисниците или пак со личните онлајн социјални мрежни профили на индивидуалните корисници.

Комбинацијата на замките со профилирањето на однесувањето на корисникот ќе обезбеди значително ниво на сигурност во околина на магла и ќе ја подобри точноста при детекцијата. Кога пристапот до информацијата е точно идентификувана како неовластен пристап, сигурносниот систем на маглата ќе прати огромни количества на безвредна информација према натрапникот. На тој начин податоците на корисникот се заштитени од неовластен пристап. Кога абнормалниот пристап во околина на магла не е препознаен непотребната информација може да се врати од маглата и да се смета дека пристапот е сосема легитимен и нормален. Вистинскиот сопственик на податоците ќе идентификува кога замките се вратени од маглата. Затоа легитимниот корисник може да одговори на одзивот од маглата на разни начини, како што се предизвик прашањата (challenge questions), за да го информира сигурносниот систем на маглата дека има погрешно детектирано неовластен пристап. Во овој момент постојните механизми за сигурност не го даваат ова ниво на сигурност [80].

## 6 Облакот кај 5G мобилните мрежи

Општо гледано, големите Over The Top (OTT) играчи имаат водечка улога во пазарот на обработката на податоци во околина на облак. Dropbox, Apple, и Google се главни даватели на персоналниот облак (personal cloud) providers, додека Salesforce.com, Google, и Microsoft водат во SaaS пазарот. Amazon е најчесто користен за PaaS и IaaS сервисите.

Еден дел од пазарот на обработката на податоци во околина на облак ќе им припадне и на телекомуникациските оператори. За разлика од OTT играчите, телекомуникациските оператори имаат неодамна влезено во пазарот на обработката на податоците во околина на облакот [68].

### 6.1 Причини поради кои телекомуникациските оператори треба да го користат облакот

Постојат две главни причини зошто телекомуникациските оператори се вклучуваат во обработката на податоци во околина на облак. Првата е да ги искористи поволностите од обработката на податоци во околина на облак за IT оптимизација (пониски трошоци, и поголема еластичност и брзина). Втората е да се искористат новите бизнис можности.

Телекомуникациските оператори имаат предност во неколку сегменти. Всушност тие имаат конкурентска предност на локално ниво, каде ќе ја имаат придобивката од локалното комерцијално присуство, за разлика од многу OTT играчи.

Дополнително, една од главните инвестиции на телекомуникациските оператори е поставување на податочни центри во повеќето земји. Благодарение на нивната мрежна инфраструктура, тие имаат од крај до крај пристап кој го гарантира континуитетот и квалитетот на сервисите. Ова можеби не е клучно прашање за повеќето корисници, кои повеќе би биле заинтересирани за заштита на податоците која се обезбедува од локалниот давател на сервиси. Како такви телекомуникациските оператори имаат инфраструктура да обезбедат IaaS продукти самостојно, или пак да бидат потпомогнати од други фирми во форма на партнерство.

Покрај тоа телекомуникациските оператори обезбедуваат комуникациски-базирани SaaS сервиси, што повеќето OTT играчи не се во можност да ги обезбедат во овој момент, со елементи на унифицирана фиксна-мобилна комуникација или видео конференција. Поради нивната близина до коорисницните мрежните оператори можат да им понудат облачни услуги со минимално доцнење, односно минимална латентност. Тие исто можат да им понудат услуги на корисниците кои може да се флексибилни и еластични во

поглед на фреквенцискиот опсег. Дополнително корисниците имаат поголема доверба и сигурност кај мрежните оператори отколку кај повеќето интернет брендови.

Во рамките на пазарниот сегмент на персоналните облаци, повеќето телекомуникациски оператори нудат сервис за чување на податоци во комплет со фиксни или мобилни тарифи, како начин да генерираат дополнителни приходи.

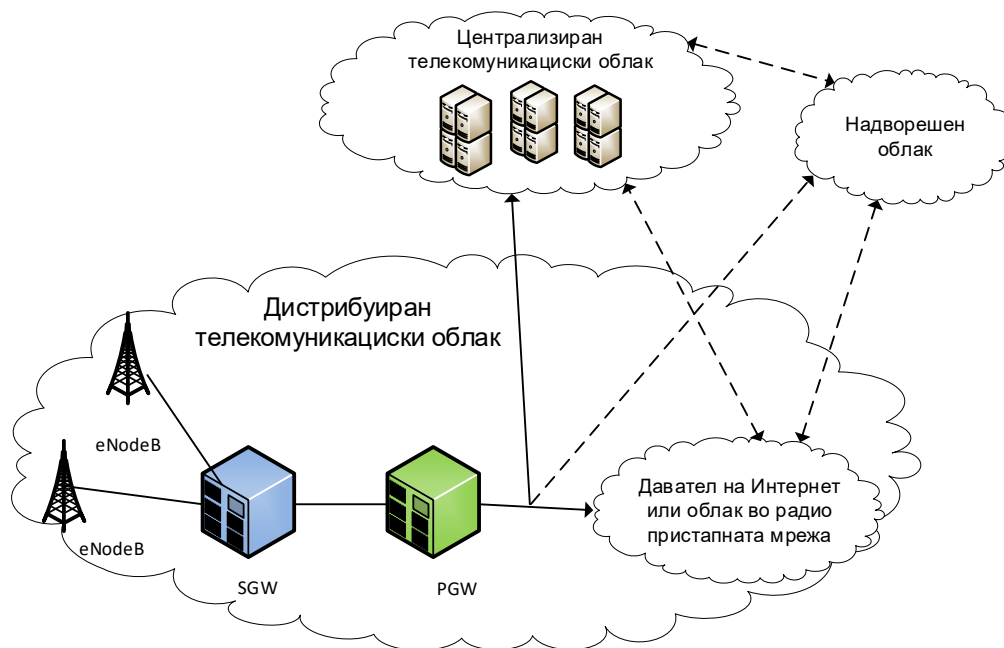
Уште повеќе, телекомуникациските оператори може да ја унапредат обработката на податоци во околина на облакот за едно повисоко ниво со додавање на динамичко скалабилна комуникација при нудењето на облачните сервиси. Со потенцирање на важноста на адаптивната конективност, следната фаза на обработката на податоци на облак се вика мрежата како сервис или *Networking as a Service (NaaS)*. Овој концепт се базира на унифицираната рамка за компјутерска пресметка и комуникација. Наместо да се прави контрола на мрежата и компјутерската пресметка со посебни ентитети, облачното вмрежување со минимална снага може да ги оптимизира распределбите на ресурсите земајќи ги во предвид мрежните и компјутерските ресурси како унифицирана целина.

## **6.2 Облакот кај телекомуникациските оператори**

Моментално телекомуникациските оператори прават напори за најдобра и најоптимизирана употреба на нивните средства и како идните инвестиции во мрежата да бидат на иста линија со моделите на облакот [81]. Една таква опција е да се користи мрежната опрема за хостирање на серверски модули за креирање на телекомуникациски дистрибуирани облаци (*telecom-grade clouds*). Ова вклучува мешавина на централизиран облак и дистрибуиран облак (*Mobile Edge Cloud*) што ќе ја користи радио пристапната мрежа (*RAN*) и *RAN* елементите како што е покажано на Слика 4.5. Моментално хостирањето на содржината и апликациите во *RAN* станува доста популарно. Со поставување на складот на податоци и компјутерските ресурси блиску или до самата базна станица, операторите може да го подобрат времето на одзив за сервисите кои ги бараат корисниците при различни радио услови. Ова е корисно при контролата на згуснат сообраќај, или при адаптација на битската брзина при видео протоци. На страната на мрежата, кеширањето во клетката (*cell site caching*) може да го редуцира побарувањето на задниот дел од мрежата (*backhaul network*) и евентуално да одигра улога при ограничувањето на сигнализацијата при јадрото на мрежата (*core network*). Подобрувањето на перформансите на апликацијата и мрежната ефикасност се две



примарни предности кои се постигнуваат со поставување на содржината блиску до радио пристапниот дел на мрежата или до крајните корисници. Една таква апликација каде перформансите на апликацијата и мрежната ефикасност заеднички соработуваат во дистрибуиран модел на облак е LTE Broadcast што користи evolved Multimedia Broadcast Multicast (eMBMS) технологија.

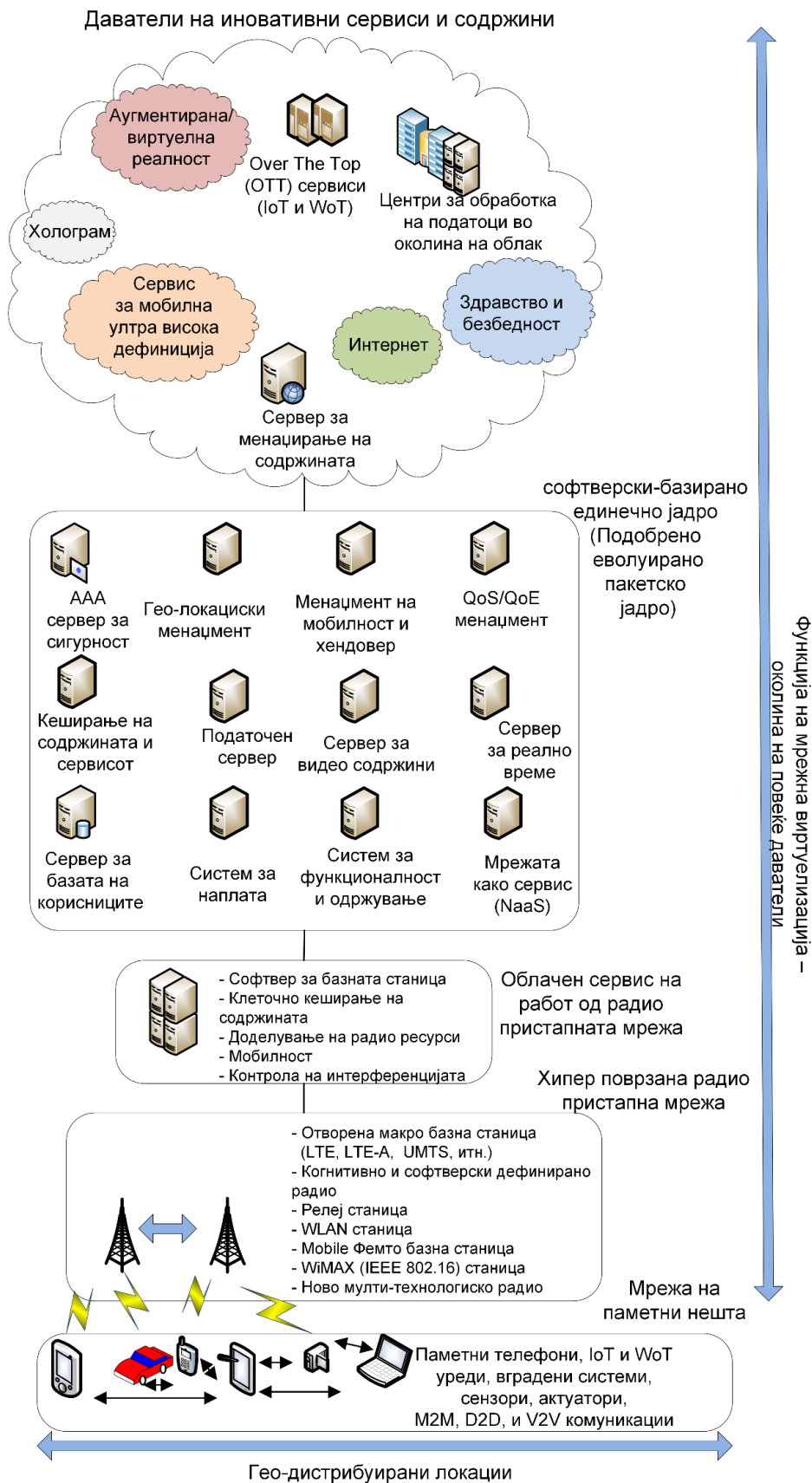


Слика 6.1 Интеграција на облакот со телекомуникациска мрежа [20]

### 6.3 Конвенционална обработка на податоците во околина на облак (Cloud Computing) кај 5G мобилните мрежи

Архитектурата на 5G мрежата со мобилна обработка на податоци во околина на облак [82] е прикажана на Слика 4.6 и се базира врз основа на архитектурните нивоа објаснети во Поглавјето 2.7.

На врвот од архитектурата се наоѓаат даватели на иновативни сервиси и содржини (Innovative Service and Content Providers) кои обезбедуваат Over The Top (OTT) апликации и сервиси како што се аугментирана и виртуелна релност, холограм, ултра висока мобилна дефиниција, обработка на податоци во околина на облак итн.



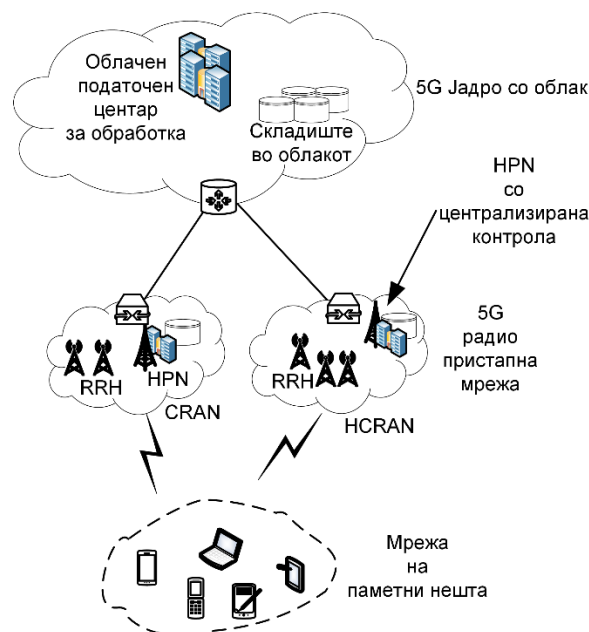
Слика 6.2 Архитектура на 5G мрежата во околина на облак со мобилна обработка на податоци [82]

Софтверски базираното единечно јадро се наоѓа под иновативните даватели на сервиси и содржини и претставува подобро еволуирано пакетско јадро - Enhanced Evolved Packet Core (EEPC) кое ги обезбедува функциите на јадрото на мрежата како што се наплата, мобилност и хендовер, гео-локациски менаџмент, AAA (Authorization Authentication and Accounting) сервер за сигурност, како и мрежата како сервис - Network as a Service (NaaS) која ќе овозможи конфигурација на сите телекомуникациски и сервисни функции со помош на виртуелен софтвер на програмабилен хардвер.

5G радио пристапниот дел на мрежата се состои од EDGE Cloud RAN (EDGE CRAN) сервис и хипер поврзана радио пристапна мрежа [82].

Бидејќи паметните мобилни уреди имаат ограничени можности за складирање и обработка на податоците ова се решава со префрлување на складирањето и процесирањето на податоците од паметниот мобилен уред кон облачните центри. Сепак ова побарува огромен опсег и ниска латентност.

Со цел да се надмине овој проблем EDGE CRAN прави поместување на облачните функционалности за обработка на податоците во радио пристапната мрежа [83 – 84]. Но складирањето на апликациите и процесирањето на сите радио сигнални функции се централизирани во серверот за обработка на податоците во околина на облак над 5G јадрото. Притоа милијарда паметни уреди ќе треба да пренесуваат податоци и разменуваат информација доволно брзо со Base Band Unit (BBU pool), кој побарува огромен опсег и ниска латентност.



Слика 6.3 5G мрежа со CRAN и HCRAN

Како решение на овој проблем предложени се хетерогени облачни радио пристапни мрежи - Heterogeneous Cloud Radio Access Networks (HCRANs) во кои податочната и контролната рамнина се разделени [83], [85], како што е покажано на Слика 6.3. Централизираната облачна функција е поместена од BBU pool во CRANs кон високо енергетски јазли High Power Nodes (HPNs) во H-CRANs. HPNs се користат да обезбедат моментна покриеност и ги извршуваат функциите на контролната рамнина. Брзиот пакетски податочен пренос во корисничката рамнина е овозможен со Remote Radio Heads (RRHs). HPNs се поврзани кон BBU pool со backhaul линкови за координација на интерференцијата.

Но и самите HCRANs имаат свои недостатоци. Податочниот сообраќај преку fronthaul меѓу RRHs и централизираните BBU pool побарува многу редувантна информација, кои дополнително ги влошува ограничувањата на fronthaul-от. Покрај тоа HCRANs не ги искористуваат во целост можностите за складирање и обработка на податоци кај уредите на работ (ивицата) од мрежата, како што се RRHs и паметните кориснички уреди, што од друга страна допринесува да се зголеми затрупувањето на fronthaul-от и BBU pool. Конечно, операторите мора да воведат огромен број на фиксни RRHs и HPNs во HCRANs со цел да се задоволат барањата врвниот капацитет, што од друга страна прави сериозна загуба кога волуменот на сообраќајот не е значително голем.

Хипер поврзаната радио пристапна мрежа се состои од постојните 2G, 3G, 4G и идни радио пристапни технологии - Radio Access Technologies (RATs) што ќе овозможат кеширање на содржината на ниво на клетка, распределба на радио ресурсите, мобилност, контрола на интерференцијата, и др. Конечно најдолниот дел на архитектурата ја сочинува мрежата на паметни нешта која се состои од паметни мобилни телефони и уреди, кориснички уреди за Интернет на нештата - Internet of Things (IoT) и кориснички уреди за Веб на нештата Web of Things (WoT).

Целосна виртуелизација на функциите на мрежата - Network Function Virtualization (NFV) ќе заземе место кај 5G, со цел да се задоволат сервисните побарувања. Мрежната виртуелизација ги повлекува потребните физички ресурси или логички елементи во мрежата, со користење постојните технологии како што се когнитивното и софтверски дефинирано радио кај радио пристапната мрежа на 5G, софтверски дефинираното вмрежување – Software Defined Networking (SDN) и облачните сервиси кај јадрото на [86].

NFV функциите треба да ја покријат контролата и менаџирањето на QoS, полисата на сервисот и давањето приоритет на сообраќајот. Мрежните функции како што се

обработка на сигнали и патеката за обработка (path computation) ќе се виртуелизираат и ќе се пратат во облаците за мрежен менаџмент. Ова ќе ја олесни работата на мрежата, ќе ја намали потрошувачката на енергија од крај до крај и ќе го отвори патот за нови флексибилни комуникациски сервиси. Главната функционалност за обработка на податоци во околина на облак кај 5G јадрото ќе биде платформата за мрежата како сервис - Network as a Service (NaaS) која ќе овозможи конфигурација на сите телекомуникациски и сервисни функции со виртуелизиран софтвер на програмабилен хардвер [82].

5G ќе вклучува мешавина на централизиран и дистрибуиран облак кај RAN елементите [82]. Со носењето на облакот во радио пристапната мрежа, познато како Cloud RAN (CRAN), односно со носење на базната станица од клетка во облак, или сместувањето на складиштето за податоци и компјутерските ресурси блиску до клетката, операторите ќе може да го гарантираат потребниот договор за нивото на сервисите - Service Level Agreement (SLA) и ќе може подобро да ги поддржат апликациите што се осетливи на доцнење како што се виртуелни десктопи - virtual desktops или упатства за електронско програмирање. Тие исто ќе го подобрат времето на одзив, со што ќе направат сервисите побрзо да се достават до корисниците без оглед на радио условите. Ова е корисно при контролата на згуснат сообраќај, или при адаптација на битската брзина при видео протоци. На страната на мрежата, кеширањето во клетката (cell site caching) може да го редуцира побарувањето на задниот дел од мрежата (backhaul network) и евентуално да одигра улога при ограничувањето на сигнализацијата при јадрото на мрежата (core network).

Бидејќи 5G RAN ќе се состои од густо распоредени микро, пико и фемто клетки, обработката на податоци во околина на облак значително ќе ги намали доцнењето преку безжичниот комуникациски канал, и предавателната снага за предавањето на обработка на податоци во облакот. Уште повеќе мобилниот уред лесно може да лоцира точка за пристап кон облакот (cloud access point). Линковите со милиметарски бранови должини - Millimeter wave (mW) links, масивното MIMO и мулти клеточната кооперација може да се користат за подобрување на спектралната ефикасност, со намалување на времето потребно за пренесување на барањата на корисниците за обработка на податоците према облакот [58].

Мобилната обработка на податоци кај 5G мрежата треба да поддржи сервиси со богат контекст, како што се сервис за екстракција на контекстот, сервис за препорака и сервис за групна приватност [20], [82], [87] каде ќе се изгради ниво на препорачани облачни

што креира излез кој ќе биде прилагоден кон еден или повеќе корисници со такви контекстуални карактеристики.

#### **6.4 Мобилна обработка на податоци на работ (ивицата) (Mobile Edge Computing) кај 5G мобилните мрежи**

Неодамна мобилните уреди станаа важна алатка за учење, забава, социјалните мрежи, и за добивање на нови информации од вестите и бизнисот [88]. Но поради ограничувањето на ресурсите на мобилните уреди (процесирачката моќ, животниот век на батериите, и капацитетот за чување на податоци) мобилните корисници не го добиваат истиот квалитет како конвенционалните десктоп корисници [17]. Со појавата на мобилната обработка на податоци во околина на облак, ограничените можности за обработка и чување на податоците кај паметните мобилни уреди се реши со префрлување нивно префрлување во облакот. Многу облачни услуги како што се мобилно здравство (m-health-care) [89 – 90], мобилно учење (mlearning) [91], мобилни видео игри (m-gaming) [92] и мобилно владеење (m-governance) [93] се веќе директно достапни од мобилните уреди [94].

Но сето предизвикува оптеретување на мрежата бидејќи се јавува потреба за поголем пропусен опсег и ниска латентност, бидејќи податоците треба да се пренесат од мобилните уреди кон облачните податочни центри. Се очекува дека потребата за фреквенциски опсег ќе се дуплира секоја година [35], [95]. Уште повеќе, Интернет на нештата, како и идниот Интернет на сè, ќе овозможи уредите со ограничени ресурси да се поврзани на Интернет [28], [96].

За да се надмине горенаведениот проблем како можно решение е предложено Cloudlet-от, каде мобилните уреди ги праќаат податоците за обработка на сервер со помалку ресурси, но е во близина на корисничките уреди, при што се користи Wi-Fi мрежа за пристапување [97]. Но овој пристап е помалку ефективен заради следниве две причини. Прво на Cloudlet-от може да се пристапи само преку Wi-Fi пристапна точка. Второ Cloudlet-от поседува помалку ресурси од облакот, што значи не е скалабилен во провизионирањето на ресурсите и сервисите.

Затоа како подобро решение е предложено **Мобилната обработка на податоци на работ (ивицата) од мрежата – Mobile Edge Computing (MEC)** [98 – 99]. MEC е модел за овозможување на бизнис ориентирана облачна платформа во рамките на радио пристапната мрежа во близина на мобилните корисници со цел да опслужи апликации што се осетливи на доцнење и апликации што се свесни за контекстот (context aware).

Ваквиот пристап е иницијатива на ETSI, каде процесирањето на податоците и нивното складирање се случува на работ во радио пристапната мрежа во базната станица, наместо во податочните центри на облакот со цел да се креираат нови апликациски и сервисни можности. На тој начин MEC успева да ја намали латентноста, го ублажува застојот на мрежата во јадрото, овозможува ефикасно управување на сообраќајот и отвора можност сервисите од другите индустрии да бидат испорачани за критичните апликации преку мобилната мрежа.

Овој пристап овозможува иновативна мрежна архитектура каде можностите за обработка на податоци во околина на облак и околината на ИТ сервисите се конвергирани во мобилната мрежа.



**Слика 6.4 Архитектура за мобилна обработка на податоците на работ (ивицата) на мрежата**

На Слика 6.4 е прикажан изгледот на MEC архитектурата. Како што се гледа ентитетот мобилната пресметка на податоци на работ (ивицата) од мрежата се наоѓа веднаш до радио пристапната мрежа. Овој ентитет работи со downstream податочен проток од облакот до мобилниот терминал и upstream податочен проток од мобилниот терминал према облакот. MEC платформата се состои од стандардни ИТ сервери и

мрежни уреди внатре или надвор од базната станица [100]. Надворешните апликациите се воведуваат и извршуваат во виртуелните машини – Virtual Machines (VMs) [101] поврзани со мрежните уреди. Исто така постои можност MEC платформата да се имплементира со стандарди ИТ сервери каде мрежниот уред е имплементиран како софтверски ентитет, како на пример отворен виртуелен свич – Open Virtual Switch или Open vSwitch (OVS) [102].

Во платформата на MEC се вклучени следните основни модуларни функции: рутирање, изложување на способноста на мрежата и управување. Модулот за рутирање е одговорен за препраќање на пакетите меѓу MEC платформата и радио пристапната мрежа и јадрото на мобилната мрежа, како и во рамките на самата MEC платформа. Модулот за изложување на способноста на мрежата овозможува овластено информирање за радио мрежниот информациски сервис – Radio Network Information Service (RNIS) и управувањето со радио ресурсите – Radio Resource Management (RRM). Модулот за управување дава поддршка за AAA сигурносната функција, како и менаџирање на надворешните апликации во самата MEC платформа. Тука е вклучено и оркестрирањето (диригирањето) на поставувањето на апликацијата и овластување за изложување на способноста на мрежата [100].

MEC овозможува мобилната мрежа да еволуира на иновативен начин за да се справи со зголемениот волумен на сообраќајот, кои произлегуваат од разни домени во 5G ерата што се групираат како подобрен мобилен широкопојасен интернет – enhanced Mobile BroadBand (eMBB) [103], масивен тип на машина со машина комуникации – massive Machine Type Communication (mMTC) [104] и ултра-доверливи и со ниска латентност комуникации – Ultra-Reliable and Low Latency Communication (URLLC) [105].

## **6.5 Обработка на податоците на работ (ивицата) на мрежата наспроти обработката на податоците во околина на магла кај 5G мрежите**

И покрај поволностите што мобилната пресметка на податоци на работ на мрежата, сепак таа има одредени ограничувања, во споредба со пристапот на обработка на податоци во околина на магла. За да се согледаат овие ограничувања треба да се направи споредба меѓу овие два концепти.

Во Табела 6.1 се сумирани главните карактеристики на мобилната обработка на податоците на работ (ивицата) од мрежата и обработката на податоците во околина на магла [106].



**Табела 6.1 Главни карактеристики на обработката на податоците на работ (ивицата) од мрежата и обработка на податоците во околина на облак и магла [106]**

	<b>Мобилна обработка на податоци на работ во мрежата</b>	<b>Обработка на податоци во околина на магла</b>
Хостирање на апликацијата	Ограничена	Да
Податочни сервиси на работ	Да	Да
Управување на уредите и апликациите	Да	Да
Сигурност и безбедност	Делумно решение со VPN или FW	Целосно E2E решение, заштита на податоците, на ниво на сесијата и хардвер
Еластичност при обработката на податоци / повлекување на ресурси	Не	Да
Модуларен хардвер	Не	Да
Виртуелизација со поддршка во Windows	Треба да се додефинира	Да
Високо ниво на достапност за контрола во реално време	Не	Да

Обработката на податоци на работ на мрежата (MEC) е развиен од страна на ETSI и производителите на телекомуникациска опрема со цел да се испорача стандардизирана MEC архитектура и индустриско стандардизирани апликациско програмски интерфејси за надворешните апликации. Овој концепт претставува контрола и управување на самостоен краен уред индивидуално или преку сет на софтверски функции во облачен домен во радио пристапниот дел на мрежата. Уредите и ентитетите што прават пресметка на работ на мрежата во рамките на облачниот домен се или самостојни или се меѓусебно поврзани преку приватни мрежи со вообичаена безбедност и мал степен на интероперабилност. Во последно време овој пристап на пресметка на податоци на работ на мрежата настојува да го рedefинира опсегот на пресметката на податоци на работ со вклучување на некои функции од обработката на податоци во околина на магла, како што е интероперабилност, локална безбедност и др. Но сепак ова не се проширува кон облакот или низ домените [106].

Од друга страна обработката на податоци во околина на магла е концепт кој е предложен од CISCO и други производители на Интернет опрема и претставува комплетно дистрибуирана мрежа, повеќеслојна облачна архитектура за обработка на податоци, каде постојат милијарда уреди како дел од IoT, многу локални облаци на работ (ивицата) од мрежата – магла и главен хиперскалабилен облачен податочен центар. Единечната апликација од маглата е дистрибуирана низ таквите уреди, низ облачни компоненти вградени во јазлите на различни нивоа на мрежата, на пример во радио

пристапната мрежа, мулти сервисниот раб (multi-service edge), јадрото на мрежата (на IP/MPLS рутерите и свичовите, во gateways-вите на мобилното пакетско јадро итн). На тој начин облакот е поблиску до корисниците на мобилни уреди и е во можност да понуди ултра ниска латентност, побрз одзив, висок пропусен опсег како и пристап до радио информацијата во реално време што ќе се користи од апликациите и сервисите за да се понуди сервиси што се однесуваат на контекстот .

**Табела 6.2 Разлики во обработката на податоците на работ (ивицата) од мрежата и обработка на податоците во околина на облак и магла**

Реден број	Мобилна обработка на податоци на работ во мрежата	Обработка на податоци во околина на магла
1	Свесност на уредот за постоење на само неколку сервиси, а не и за целиот домен	Независност на уредот, негова свесност за постоењен целиот домен на маглата
2	Ограничена контрола во доменот на работ	Ги контролира сите уреди во доменот
3	Не е свесен за облакот	Го проширува облакот на ниво на магла во континуитет
4	Ограничен дофат на мрежата	Комплетен дофат на мрежата
5	Нема свесност за IoT вертикалата	Поддршка за повеќе IoT вертикали
6	Не постои интеграција на IoT вертикалата	Интегрира повеќе вертикали
7	Ги користи контролорите на работ (ивицата) од мрежата што се фокусирани на упатување и контролирање на уредите	Користи магловити јазли што се ширум распространети и способни да извршуваат различни функции како контрола во реално време, хостирање и управување на апликацијата
8	Сигурноста е ограничена само кон уредите	Постои сигурност од крај до крај преку сопственоста на податоците
9	Не е дизајнирано со виртуелизација	Овозможува огромна виртуелизација
10	Аналитиката е насочена кон единечен уред	Магловитата аналитика овозможува собирање, процесирање и анализа на податоците од повеќе уреди на работ (ивицата) од мрежата за анализа, машинско учење, детекција на аномалија и оптимизација на системот
11	Обработката на податоците на работ (ивицата) од мрежата е типично вградена и го контролира работ на мрежата. Одредени уреди бараат стриктна контрола во реално време, а некои уреди не и обработка на податоци на работ на мрежата е во можност да ги изврши овие функции	Обработката на податоци во околина на магла ги користи уредите и вграден механизам за контрола на работ на мрежата. Но обработката на податоци во околина на магла исто така овозможува користење на виртуелни машини што хостираат меки програмабилни логички контролори (soft PLC) за употреба при контрола во реално време

Во споредба со обработката на податоците на работ (ивицата) од мрежата (Mobile Edge Computing), кај обработката на податоците во околина на магла (Fog Computing)

уредите на работ (ивицата) од мрежата самостојно може да се оптимизираат меѓу себе и збирно да вршат мерење и управување на остатокот од мрежата. Обработката на податоци во околина на магла исто ги преместува оперативните функции на дигиталните објекти на Информациските центрични мрежи - Information Centric Networks (ICNs) и виртуелизираните функции во Софтверски дефинирани мрежи - Software Defined Networks (SDNs) на работ на мрежата [30].

Во Табела 6.2 се дадени разликите меѓу мобилната обработка на податоците на работ (ивицата) од мрежата и обработката на податоците во околина на магла. И покрај тоа што овие два концепти се меѓусебно различни, сепак два концепта споделуваат слична визија, која се води од предвидувањата за иднината што ќе се карактеризира со Интернет на нештата, Интернет на сè, Опипливот Интернет (Tactile Internet) и постоењето на соодветна мобилна и безжична поврзаност.

Од изложеното може да се заклучи дека обработката на податоци во околина на магла е подобро применливо решение кај 5G мобилните мрежи. Сепак подобри резултатите се постигнуваат доколку се комбинираат двата концепти [107].

## **6.6 Причини за примена на обработка на податоците во околина на магла кај 5G мрежите**

Постојат четири главни причини зошто обработката на податоци во околина на магла е добро решение за 5G [30]:

**1. Процесирање во реално време и контрола на сајбер физичкиот систем - cyber-physical system.** Аналитиката на податоците што се прави на работ на мрежата, како и дејствата што се овозможени преку контролните јамки, многу често имаат стриктни побарувања за времето понекогаш од редот на милисекунди што би можеле да се извршуваат само на работ на мрежата. Ова особено е битно за Опипливиот Интернет - Tactile Internet, што овозможува интерфејси од типот на виртуелна реалност меѓу луѓето и уредите.

**2. Когнитивност или свест за целите од страна на клиентот.** Апликациите може да се овозможат ако се знае за побарувањата и преференците на клиентите. Ова е особено точно кога приватноста и доверливоста не може да се потпри на облакот, или пак кога сигурноста е појачана со скратувањето на местата каде што информацијата патува.

**3. Подобрена ефикасност со повлекување на мирните и неупотребени локални ресурси.** Тивките и неупотребените гигабајти на многу уреди, потрошената енергија во

состојба на мирување, можноста за насетување и безжичната поврзаност може да се повлечат искористат во рамките на мрежата во околина на магла.

**4. Агилност или брза иновација и дозволиво проширување (affordable scaling).** Вообичаено е побрзо и поефтино да се експериментира со клиентите и уредите на работ на мрежата. Наместо да се чека производителите на големите кутии внатре во мрежата да прилагодат некоја иновација, во светот на маглата мал тим може да ги искористи предностите на апликативниот програмски интерфејс - Application Programming Interface (API) и алатките за развој на софтвер - Software Development Kit (SDK) на паметните телефони, како и пролиферацијата на мобилните апликации и да понуди мрежен интерфејс преку сопствен API.

### **6.7 Можни сценарија за примена на обработка на податоците во околина на магла кај 5G мрежите**

Во продолжение се опишани некои можни сценарија каде обработката на податоци во околина на магла може да се примени кај 5G [30].

**Сценарио 1:** *густо-насетување (crowd-sensing) на состојбите на 5G базната станица.* Преку збир на 5G кориснички уреди може да се влијае на состојбите на 5G базната станица каде одреден број на користени ресурсни блокови, со употреба во комбинација на пасивно примените мерења за сигналот (на, RSRQ), активно пробување active probing (на пример воз на пакети), корелација на битската брзина на апликацијата и историско податочо рударење [78].

**Сценарио 2:** *Over The Top (OTT) провизионирање на мрежата и управување на содржината.* Традиционалниот пристап за иновација на мрежата е да се воведат нова кутија внатре во самата мрежа. Маглата од друга страна пак директно ги подигнува „нештата“ и телефоните и ја отстранува целата зависност меѓу кутиите во мрежата. Со употреба на крајните кориснички уреди како што се завивањето на универзалниот локатор на ресурси - Universal Resource Locator (URL), тагирање на содржината, следење на локацијата, мониторинг на однесувањето на корисникот мрежните сервиси може да се иновираат значително побрзо [30].

**Сценарио 3:** *Селекција на мрежата во хетерогена средина.* Постојењето на хетерогени мрежи (на пример, LTE, фемто, WiFi) е клучна карактеристика во 5G. Наместо контролата да ја врши операторот, 5G ќе има корисничко центриран пристап каде секој клиент може да ги следи сопствените локални услови и да донесе одлука кон

која мрежа да се приклучи [5]. Со стохастичноста и хистерезисот, такви дејства може да се појават на глобално ниво за да се конвергира кон саканата конфигурација [76]

**Сценарио 4:** *Позајмување на опсег од соседите при комуникации од типот V2V, M2M, или D2D.* Кога повеќе уреди се блиску едни до други, еден уред може да побара другите уреди да го поделат нивниот опсег со симнување на некои други делови од истата датотека и да го пренесат преку технологиите WiFi Direct, уред со уред, итн. [73].

**Сценарио 5:** *Формирање на дистрибуиран зрак.* Маглата исто може да се примени на физичко ниво, со експлоатација на повеќе кориснички MIMO за да се подобри битскиот проток и доверливоста кога клиентот може да комуницира со повеќе пристапни точки, или базни станици. За uplink, формирањето на повеќе кориснички зрак (multi-user beam-forming) се користи за клиентите да пратат повеќе податочни стримови кон повеќе пристапни точки - Access Points (APs), или базни станици - Base Stations (BSs) simultaneously. За downlink, интерференциското нулирање може да се користи со цел клиентот да биде во можност да декодира паралелни пакети од повеќе APs или BSs. Сето ова може да се изведе на страната на клиентот [75].

Како заклучок облакот кај 5G мрежата ќе е дифузно распространет помеѓу уредите на клиентот и тоа со честа мобилност, односно облакот ќе постане магла [56]. Сè повеќе ќе се извршува виртуелна мрежна функционалност во околина на магла, што ќе обезбеди *сè мобилно присутен (ubiquitous)* сервис за корисниците. Ова ќе овозможи појава на нови сервисни парадигми како на пример било што како сервис - Anything as a Service (AaaS) каде уредите, терминалите, машините, паметните нешта и роботите ќе станат иновативни алатки кои ќе продуцираат и користат апликации, сервиси и податоци.

## Втор дел

### 7 Механизам за оркестрирање (диригирање) на сервисите во околина на магла кај 5G мобилните мрежи

5G мрежата со нејзините механизми за обработка на податоците во околина на облак не е во можност да се справи идните Интернет сервиси и апликации. Ова е поради тоа што традиционалните механизми за оркестрирање (диригирање) на сервисите што се применети кај облачните сервиси не се соодветни за огромниот број на сервиси во околина на магла што допрва доаѓа, бидејќи тие не може ефективно да се справат со барањата за намалена латентност, висок степен на мобилност и извршување во реално време [13]. Покрај тоа во претходното поглавје беше истакната важноста на примената на податоците во околина на магла кај 5G мобилните мрежи. Затоа треба да се мисли кон нов пристап наречен 5G мрежата во околина на магла.

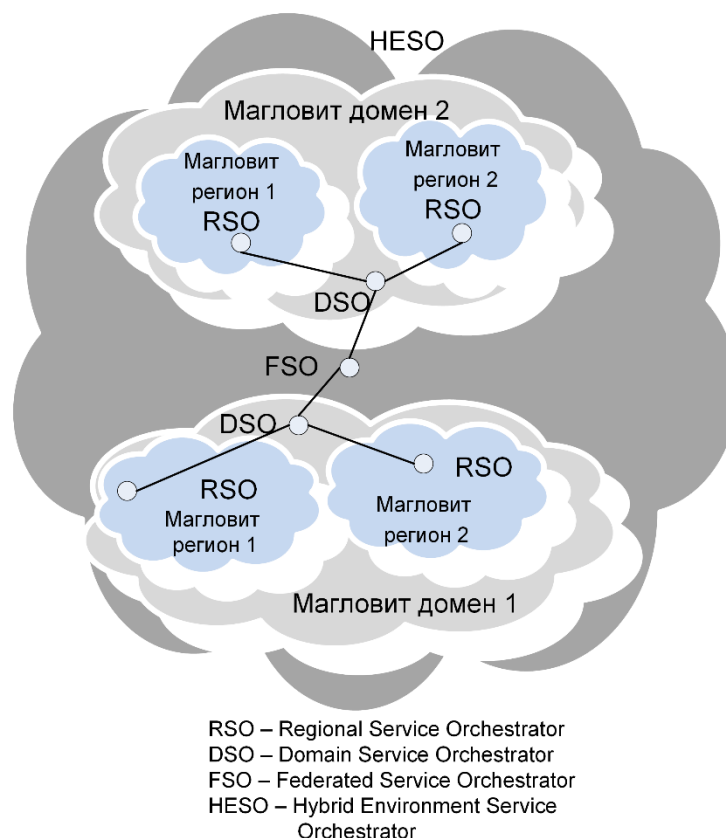
#### 7.1 Оркестратор (диригент) на сервисите во хибридна околина

Во магловитата околина кај 5G мобилните мрежи потребен е т.н. нов **оркестратор (диригент) на сервисите во хибридна околина - Hybrid Environment Services Orchestrator (HESO)**, што ќе биде во можност да осигура доверливост на отворени, огромни динамички сервиси во околина на магла [56], [108]. HESO оркестраторот ќе биде одговорен за композицијата на сервисните елементи што се достапни во околина на магла (на пример насетување, конективност, складирање, процесирање, платформа сервиси и софтверски сервиси) во покомплексни маглен сервиси (на пример насетување на густината на сообраќајот и сервиси за планирање на патувањето) што ќе бидат понудени во околина на магла. Извршувањето на маглените сервиси може да вклучи повеќе компоненти и ентитети ширум распространети, со што се зголемува комплексноста во поглед на процесот на носење на одлука при доделувањето на ресурсите за да се постигнат бараните нивоа за QoS/QoE. Со цел да се координира извршувањето на сервисите во околина на магла, механизмите на оркестрирање треба да се синхронизираат и да ги комбинираат операциите на различни сервисни елементи со цел да се постигнат спецификациите на компонираат маглен сервис, вклучувајќи ниска латентност, скалабилност и доверливост.

HESO во околина на магла треба да работи во лесно каплиран мод (loosely coupled mode), резултирајќи во решение со неколку нивоа: регионален оркестратор на сервиси - Regional Service Orchestrator (RSO), доменски оркестратор на сервиси - Domain Service

Orchestrator (DSO) и федеративен оркестратор на услуги - Federated Service Orchestrator (FSO), како што е покажано на Слика 7.1.

RSOs се лоцирани на работ во околина на маглата и овозможуваа полу-автономни операции за различни магловити региони. Ова овозможува дистрибуција на товарот со што се обезбедува скалабилност и поблиска присутност до крајните корисници со значително ниско ниво на латентност.



Слика 7.1 Модел на оркестрирање на услугите во хибридна околина за магловитата обработка на податоците кај 5G мобилните мрежи [54]

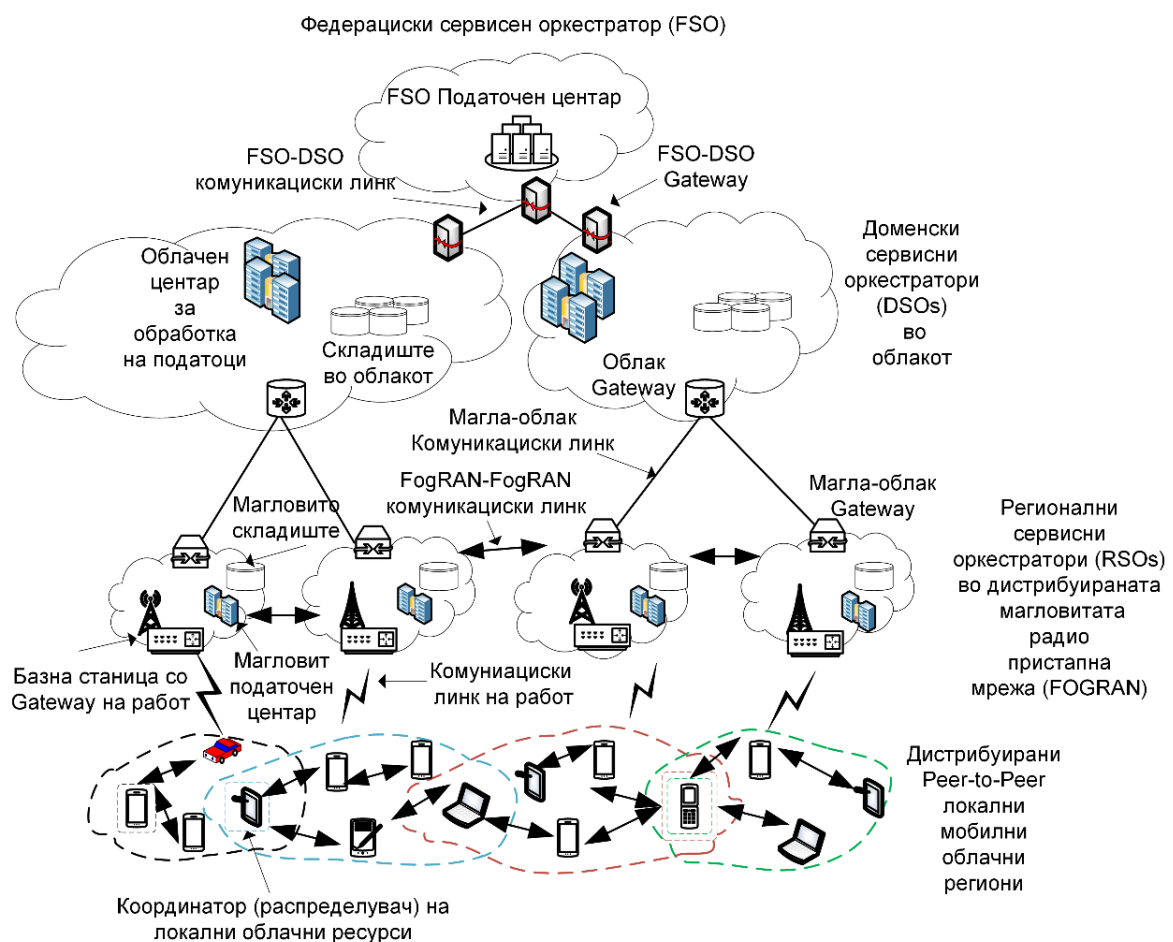
DSOs е одговорен за маглените домени и ги надгледува долните RSO-а. Ова ниво подржува механизми кои овозможуваат кооперативност помеѓу различни региони во рамките на доменот.

FSO овозможува плодна интеракција меѓу различни маглени домени. Тој е одговорен за управување меѓу различни маглени домени, и слично како DSO-та треба да е прописно прилагоден да работи во федеративната околина на облаците. FSO дава поддршка за механизмите за соработка меѓу различни маглени домени (што припаѓаат на различни ентитети или пак се администрираат од различни сопственици) и ќе го овозможи креирањето на мулти доменска околина на маглата - Multi-Domain Fog Environment кој ќе биде во можност да поддржи сè присутност на услугите.

HESO моделот е флексибилен и скалабилен и може да се имплементира во било кој технолошки стандард. Особено, неговата примена е важна за употреба на критични случаи на IoT уредите и опипливиот интернет - Tactile Internet [109] што побарува 1 ms латентност од крај до крај со цел да се овозможи интерфејси од типот на виртуелна реалност меѓу луѓето и машините, и аналитика на огромно количество на податоци што бара процесирање во реално време со стриктни побарувања за времето која може да се изврши исклучиво во околина на магла.

## 7.2 Архитектура на 5G мрежата во околина на магла

Врз основа моделот за оркестрирање на сервисите во хибридна околина за магловита обработка на податоци кај 5G мобилните мрежи на Слика 7.2 е прикажана архитектура на 5G мобилната мрежа во околина на магла. Архитектурата се состои од неколку нивоа.



Слика 7.2 Архитектура за обработка на податоците во околина на облак кај 5G мобилните мрежи [72]



Највисоките две нивоа се лоцирани во 5G јадрото.

Највисокото ниво е федеративниот оркестратор на сервиси - Federated Service Orchestrator (FSO) кој овозможува плодна интеракција меѓу различни облачни доменски оркестратори на сервиси - cloud computing Domain Service Orchestrators (DSOs). FSO со неговите федеративни механизми и со неговиот FSO податочен центар овозможува соработка и размена на податоците меѓу комуникациските линкови. Домените може да припаѓаат на различни ентитети и може да се управувани од различни авторитети. На тој начин се креира мулти-доменска магловита околина, што ќе поддржи сè присутни сервиси.

Следното ниво ги содржи облачните центри за обработка на податоци или облачните доменски оркестратори на сервисите - cloud computing Domain Service Orchestrators (DSOs). Секој DSO е одговорен за единечен домен и ги надгледува неколку магловити радио пристапни регионални сервисни оркестратори - FogRAN Regional Service Orchestrators (RSOs). Ова ниво поддржува механизми за федерација да овозможи кооперација и размена на податоци меѓу различни магловити региони во рамките на еден домен. Ова е овозможено со помош на облачните - cloud gateways, магла – облак комуникациските линкови и магла – облак gateway. Секој центар за обработка на податоците во околина на облак содржи центри, сервери со високи пресметковни перформанси за големо количество на податоци и складиште со огромен капацитет за чување на податоци.

Третото ниво е нивото за дистрибуирана обработка на податоци во околина на магла и е лоцирано во радио пристапниот дел на 5G мрежата. Ова ниво се состои од магловити радио пристапни регионални сервисни оркестратори - FogRAN Regional Service Orchestrators (RSOs). Секој RSO овозможува полуавтономна операција на поединечен локален облачен регион. Секој RSO може да е поврзан со друг RSO и секој од нив е поврзан накај облакот. Ова овозможува дистрибуција на товарот што овозможува скалабилност и поголема близина до крајните корисници со што се постигнува значително пониска латентност.

Нивото за обработка на податоци во околина на магла се состои од гео-дистрибуирани магловити уреди што се воведени на работ (ивицата) од мрежата. Ваквите уреди, кои може да се магловит податочен центар или магловито складиште, поседуваат доволно интелигенција за процесирање, обработка, времено складирање на примената информација. Магловитите уреди директно комуницираат со мобилните корисници преку рабниот gateway и безжична врска со единечен поскок со употреба на безжичните

интерфејси како што се LTE, WiFi, Bluetooth, итн. Тие може независно да ги обезбедат предефинираните сервисни апликации према мобилните корисници без некоја асистенција од облакот или Интернетот. Дополнително магловитите сервери се поврзани кон облакот со цел да ги искористи целосно функциите и апликациските алатки од облакот.

Конечно, најниското ниво се состои од локални облачни региони, формирани од група на паметни мобилни уреди како што се паметни телефони, IoT, сензори, кои насетуваат многу настани и ги пренесуваат овие податоци кон погорно ниво за обработка на податоци во околина на магла, за понатамошна обработка доколку е потребно. Во рамките на овој регион паметните уреди се или корисници на ресурсите или даватели на ресурси. Уредите формираат таканаречен локален дистрибуиран реет-to-реет мобилен облак, каде секој уред ги споделува ресурсите во истиот локален облак. Во рамките на локалниот облак уредите избираат координатор или распределувач на ресурсите во локалниот облак - local cloud resource scheduler (coordinator), кој управува со ресурсните побарувања и доделувањето на задачите спрема уредите во локалниот облак или магловитиот податочен центар доколку е неопходно. Одлуката за избор на локалниот распределувач на ресурсите пред сè зависи од поврзаноста кон локалната мрежа, перформансите на централната единица за процесирање (CPU), животниот век на батеријата, итн. Еден уред може да биде опслужен од неколку магловити радио пристапни мрежи (FOGRANs) и еден уред може да е избран како локален распределувач на ресурсите за неколку локални облачни региони.

Локалниот дистрибуиран реет-to-реет мобилен облак има свои силни страни, како што е простор за складирање на податоци, процесирачка моќ, пропусен опсег и слично. Работниот товар на апликацијата се управува на дистрибуиран начин. Отсуството на централизација обезбедува скалабилност, додека експлоатацијата на корисничките ресурси ја редуцира цената на чинење на сервисот. Локалниот облак е во можност да се прилагоди на испади на мрежата и на динамичката промена на мрежната топологија со транзиентна популација на уреди, а притоа да обезбеди прифатлива конективност и перформанси.

Во продолжение во следните секции е објаснето распределувањето на облачните ресурси кај паметниот уред.

### 7.3 Распределба на ресурсите од локално дистрибуираните Peer-to-Peer мобилно облачни пресметковни уреди

Распределувањето на облачните ресурси во дистрибуираниот peer-to-peer мобилен облачен регион е даден на Слика 7.3. Паметниот уред 1 побарува облачни ресурси од локалниот координатор на облачните ресурси за обработка на податоци. Ова барање вклучува информација за типот на задачата што уредот треба да ја изврши, колку ресурси уредот поседува и колку дополнителни ресурси се неопходни за извршување на задачата.



Слика 7.3 Распределба ресурси за обработка на податоци за паметниот уред од локално дистрибуираните Peer-to-Peer мобилен облак [72]

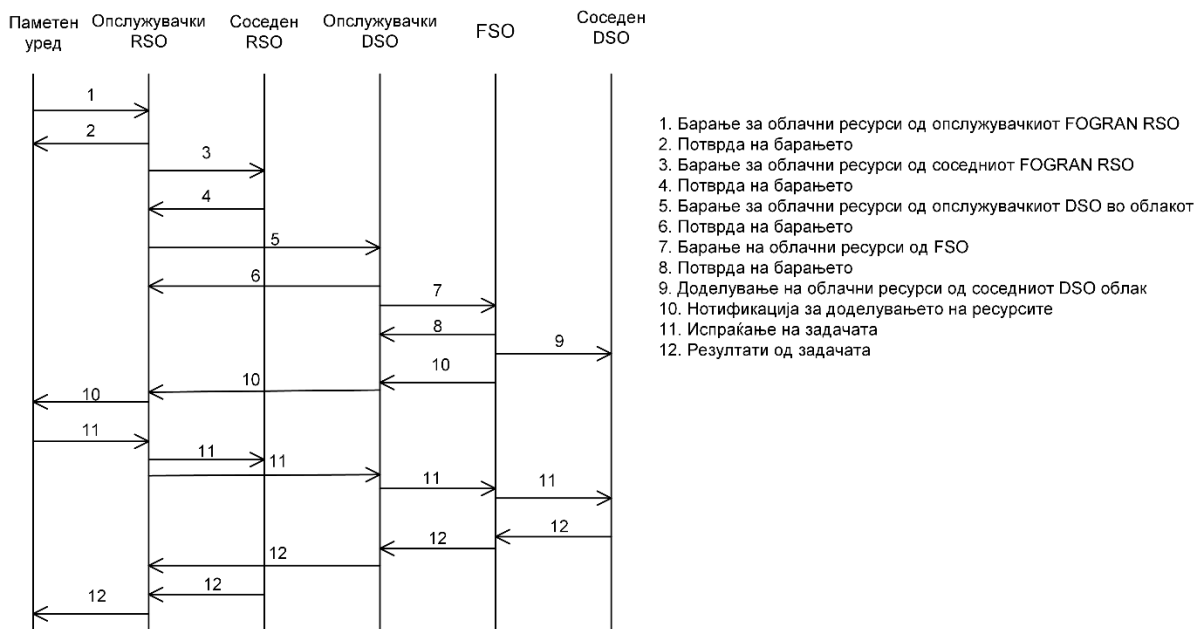
Локалниот координатор на облачните ресурси го потврдува ова барање и започнува процедура за побарување на достапни облачни ресурси од другите паметни уреди. Кога неопходните достапни облачни ресурси ќе бидат пронајдени на пример кај паметниот уред 2, локалниот распределувач на ресурсите ги доделува истите на паметниот уред 1 и истиот го информира за доделувањето на ресурсите. Доколку е потребно локалниот координатор може да распредели ресурси од неколку паметни уреди.

Кога локалните облачни ресурси се доделени на паметниот уред 1, тој започнува да ја праќа задачата кон давателот на облачни ресурси (паметниот уред 2). Паметниот уред 2 праќа потврда за приемот на задачата што треба да ја изврши и започнува обработка на истата согласно инструкциите при побарувањето на задачата. Кога ќе се добијат

результатите од обработката на задачата, паметниот уред 2 ги враќа резултатите према паметниот уред 1 и истовремено го информира координаторот на облачни ресурси дека неговите облачни ресурси се ослободени.

#### 7.4 Распределба на ресурси за паметниот мобилен уред од облакот или магловитата радио пристапна мрежа

Доколку облачните ресурси што се обезбедени кон корисничкиот уред од локалниот дистрибуиран облак се недоволни, тогаш корисничкиот уред ќе побара ресурси од магловитата радио пристапна мрежа со која е опслужен или од центарот за обработка на податоци од облакот. Ова е прикажано на Слика 7.4.



Слика 7.4 Распределба на ресурси за обработка на податоци за паметниот уред од облакот и од магловитата радио пристапна мрежа (Fog RAN) [72]

Паметниот уред побарува облачни ресурси од регионалниот сервисен оркестратор – RSO што го опслужува. Ова барање вклучува информација за тоа каков тип на задача уредот треба да изврши и колку ресурси се неопходни за извршување на таа задача.

По приемот на барањето, опслужувачкиот RSO го потврдува приемот на барањето и проверува дали е во можност да го опслужи ова барање. Доколку опслужувачкиот RSO поседува доволно облачни ресурси, тој ќе испрати нотификација за доделување на облачните ресурси на паметниот уред.

Доколку опслужувачкиот RSO не поседува доволно ресурси за процесирање на барањето од корисничкиот уред, тој ќе го исконтактира соседниот RSO. Неколку

соседни RSOs можат да бидат контактирани. Соседниот RSO ќе врати со позитивна или негативна потврда на тоа барање во зависност од тоа дали ги поседува потребните ресурси. Ако соседниот RSO прати позитивна потврда тој ќе испрати нотификација за доделување на облачните ресурси кон паметниот мобилен уред преку опслужувачкиот RSO.

Ако соседниот RSO прати негативен одговор, тогаш опслужувачкиот RSO ќе го препрати ова барање кон опслужувачкиот DSO. Опслужувачкиот DSO праќа потврда и прави проверка дали ја неопходната информација што ја побарува корисничкиот уред. Ако опслужувачкиот DSO ги содржи неопходните облачни ресурси, ќе го извести паметниот уред преку опслужувачкиот RSO.

Ако опслужувачкиот DSO не ја содржи потребна информација, тогаш ќе го препрати ова барање кон FSO. FSO праќа потврда за ова барање и почнува да побарува DSOs што ќе се во можност да го обработат побарувањето од мобилниот уред. Кога таков DSO ќе се пронајде, FSO ќе ги додели облачните ресурси на соодветниот DSO и ќе го извести опслужувачкиот DSO за доделувањето на ресурсите. Неколку соседни DSOs можат да бидат доделени за обработка на барањето на мобилниот уред. Опслужувачкиот DSO ќе ја прати оваа нотификација кон мобилниот уред, преку опслужувачкиот RSO.

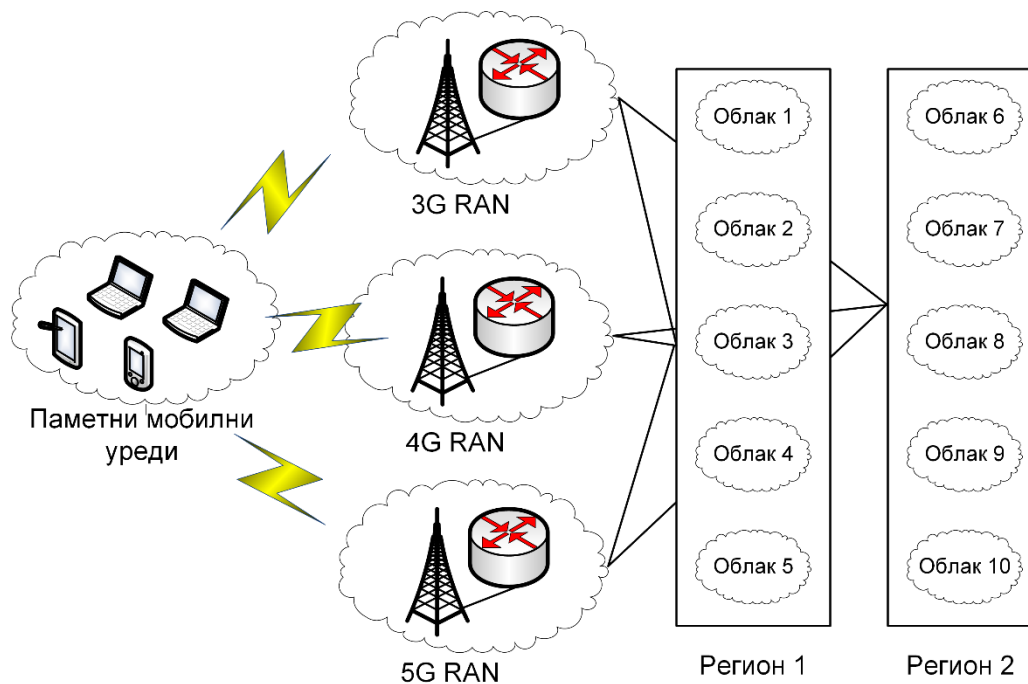
Кога нотификацијата е примена од паметниот уред, тој ќе започне да го препраќа барањето кон соодветниот давател на облачните ресурси. Давателите на облачните ресурси ќе го процесираат ова барање и ќе ги пратат резултатите назад кон паметниот уред.

## 8 Евалуација на квалитетот на оркестрираните сервиси во околина на облак и магла кај 5G мобилните мрежи

Постојат повеќе начини за евалуација на квалитетот на оркестрираните сервиси во околина на облак и магла кај 5G мобилните мрежи. Евалуацијата може да се изврши во поглед на Round Trip Time (RTT) латентноста или доцнењето од крај до крај, понатаму со помош на битскиот проток, и енергетската ефикасност за пренесените бити низ единица потрошена моќност или енергетска ефикасност за потрошената моќност по бит [110 – 112]. До сега не е пронајдено слично истражување за евалуација на квалитетот на оркестрираните сервиси во околина на облак кај 5G мобилните мрежи.

### 8.1 Симулациско сценарио

Симулациското сценарио е дадено на Слика 8.1. Тоа се состои од единечен регион во кој се лоцирани група на паметни уреди, кои се истовремено поврзани на 3G, 4G и 5G радио пристапни мрежи (RANs). Базните станици на овие радио пристапни мрежи се наоѓаат на иста локација и се претпоставува дека имаат еднаква покриеност.



Слика 8.1 Симулациско сценарио [110]

Секоја радио пристапна мрежа е поврзана на 10 облаци. Првите пет облаци се во ист географски регион со радио пристапните мрежи и останатите 5 облаци се во различен

географски регион со радио пристапните мрежи. Притоа облакот 1 е најблиску до радио пристапните мрежи, а облакот 10 е најоддалечен од радио пристапните мрежи.

Паметните мобилните уреди се претпоставува дека имаат еднакви способности и се симултано опслужувани од трите видови на радио пристапни мрежи и десетте облаци. Во продолжение ќе се разгледува само еден паметен мобилен уред, освен ако не е поинаку кажано.

Ова симулациско сценарио лесно може да се конструира во МАТЛАБ. Добиените резултати во следните секции претставуваат просечна вредност од 10 симулации.

## 8.2 RTT Латентност или доцнење од крај до крај

RTT латентноста, односно доцнењето од крај до крај е времето потребно да се случи единечна податочна трансакција. Тоа е време неопходно податочниот пакет да патува од изворот до дестинацијата и повторно назад кон изворот. RTT латентноста меѓу корисничката опрема према било кој облак е еднаква на:

$$RTT = RTT_{RAN} + RTT_{RAN-CLOUD} \quad (1)$$

каде  $RTT_{RAN}$  ја претставува RTT RAN латентноста за 3G, 4G и 5G (магловитите) радио пристапните мрежи, а  $RTT_{RAN-CLOUD}$  ја претставува RTT латентноста помеѓу радио пристапната мрежа и облакот.

Доколку постои магловит јазел за обработка на податоци во радио пристапната мрежа (FogRAN) и ако информацијата што ја побарува корисникот се содржи во магловитиот јазел, тогаш RTT латентноста за било кој кориснички уред изнесува:

$$RTT = RTT_{RAN} \cdot \quad (2)$$

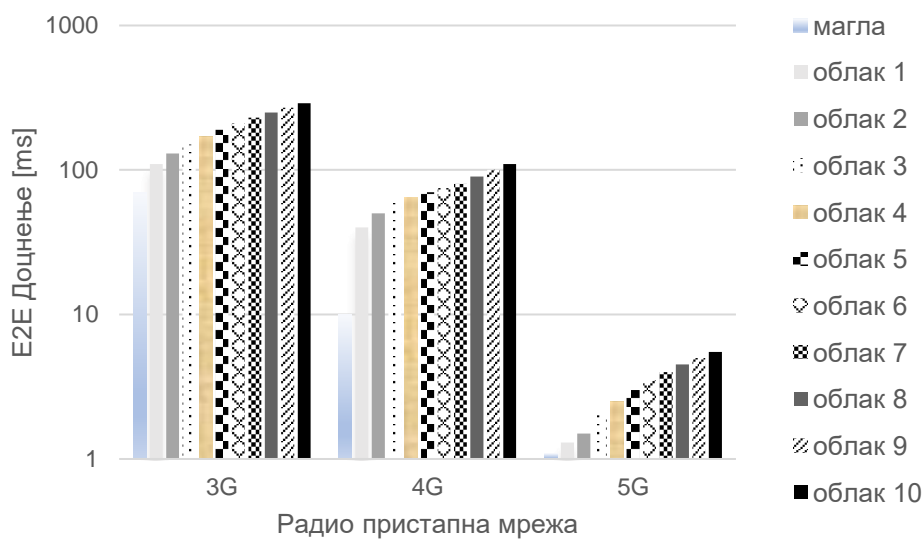
Табела 8.1 RTT латентност за 3G, 4G и 5G RAN

Параметар	Тип на радио пристапна мрежа		
	3G	4G	5G
RTT_RAN Латентност [ms]	70	10	0,5 - 1
RTT_RAN-CLOUD латентност [ms]	40 – 250	30-100	1 - 5

Просечните вредности за  $RTT_{RAN}$  и  $RTT_{RAN-CLOUD}$  се дадени во Табела 8.1. кои се земени од референтна литература [52 – 53], [113]. За симулациски цели се користат случајно генерирани вредности за  $RTT_{RAN}$  и  $RTT_{RAN-CLOUD}$ . Притоа е земено облакот 1 да е најблиску до радио пристапните мрежи со најниска  $RTT_{RAN-CLOUD}$  латентност, RAN –

CLOUD latency, а облакот 10 да е најоддалечен од радио пристапните мрежи, со највисока  $RTT_{\text{RAN-CLOUD}}$  латентност, поради големиот број на поскоци (хопови).

Симулациските резултати за RTT латентноста во околина на облак и магла за 3G RAN, 4G RAN и 5G RAN се прикажани на Слика 8.2. Може да се примети дека RTT латентноста се зголемува од облакот 1 кон облакот 10 за било која радио пристапна мрежа, бидејќи облакот 1 е најблиску базните станици на радио пристапните мрежи со тоа и латентноста е најмала, а облакот 10 е најдалеку од базните станици на радио пристапните мрежи. Исто така RTT латентноста кај 5G RAN е значително пониска од RTT латентноста на 3G RAN и 4G RAN [114 – 115].



Слика 8.2 Споредба на RTT латентноста во околина на облак и магла кај 3G, 4G и 5G RAN

### 8.3 Битски проток (Throughput)

Throughput-от (битскиот проток) е количеството на податоци што може да помине од изворот до дестинацијата за одредено време [116]. Протоколот по корисник за секоја радио пристапна мрежа  $R$  може да се пресмета како однос меѓу врвната битска брзина  $R_{\text{max}}$  на радио пристапната мрежа и бројот на корисници  $N$  изнесува помножен со некој коефициент  $\mu$ :

$$R = \mu \cdot \frac{R_{\text{max}}}{N}. \quad (3)$$

Притоа  $\mu$  претставува тежински коефициент кој прави моделирање на проблемот тесно грло за битските протоци кои носат сервиси од облаците. Поради огромниот број



на протоци за различни сервисни побарувања од различни облаци, битскиот проток по корисник даден со изразот (3) се намалува за одреден фактор.

Тежинскиот коефициент  $\mu$  може да прими вредности меѓу 0,8 и 1 и неговата вредност зависи од тоа колку облакот е оддалечен од радио пристапната мрежа. Ако облакот е поблиску до базната станица на радио пристапната мрежа тогаш коефициентот  $\mu$  има повисока вредност, а ако облакот е пооддалечен од базната станица на радио пристапната мрежа тогаш коефициентот  $\mu$  ќе има пониска вредност. Во случај ако корисничкиот уред користи сервис што се наоѓа во околина на магла, односно во радио пристапната мрежа, тогаш тежинскиот коефициент  $\mu$  е еднаков на 1.

Бројот на корисници, односно кориснички уреди  $N$  е земено да варира од 100 до 1000, со чекор на зголемување 100.

**Табела 8.2 Модулациска кодна шема (MCS) и врвна битска брзина  $R$  за 3G, 4G и 5G RAN во downlink насока [117]**

3G RAN		4G RAN		5G RAN	
MCS	Врвна битска брзина (Mbps)	MCS	Врвна битска брзина (Mbps)	MCS	Врвна битска брзина (Mbps)
64 QAM / MIMO 4x4	672	64 QAM / MIMO 8x8	3900	256 QAM / MIMO 16x16	50000
64 QAM / MIMO 2x2	84	64 QAM / MIMO 4x4	1000	256 QAM / MIMO 4x4	40000
64 QAM / MIMO 1x4	42	64 QAM / MIMO 2x2	600	128 QAM / MIMO 8x8	30000
16 QAM / MIMO 4x4	21	64 QAM	450	128 QAM / MIMO 4x4	20000
16 QAM / 15 codes	14,4	16 QAM / MIMO 4x4	390	128 QAM	15000
16 QAM / 10 codes	7,2	16 QAM / MIMO 2x2	300	64 QAM / MIMO 8x8	10000
16 QAM / 5 codes	3,6	16 QAM /	150	64 QAM / MIMO 4x4	5000
QPSK / 5 codes	1,8	QPSK / MIMO 4x4	100	64 QAM /	2500
8PSK	0,72	QPSK / MIMO 2x2	50	16 QAM / MIMO 4x4	1500
4PSK	0,384	QPSK	10	16 QAM	1000

Врвната битска брзина  $R_{\max}$  за секоја радио пристапна мрежа (3G, 4G или 5G) пред сè зависи од адаптивната модулациска кодна шема – Adaptive Modulation Coding Scheme (AMSC), која врши компензација на шумот и другите фактори кои негативно влијаат на корисниот сигнал со цел да се испорача поголем капацитет и подобра покриеност во присуство на шум и други пречки. Во зависност од растојанието меѓу корисничкиот уред и радио пристапната мрежа, во области каде ниво на сигналот е добро се користи модулација со повисока битска брзина и помалку робусно кодирање. Додека пак во области каде нивото на сигналот е слабо или пак постојат повеќе мулти-патни рефлексии, се користи модулација со помала битска брзина и повеќе робусно кодирање со цел да се минимизираат грешките. Во Табела 8.2 и Табела 8.3 се дадени можните модулациски кодни шеми за 3G, 4G и 5G радио пристапните мрежи во downlink и uplink насока респективно [117 – 118].

**Табела 8.3 Модулациска кодна шема (MCS) и врвна битска брзина  $R$  за 3G, 4G и 5G RAN во uplink насока**

3G RAN		4G RAN		5G RAN	
<i>MCS</i>	<i>Врвна битска брзина (Mbps)</i>	<i>MCS</i>	<i>Врвна битска брзина (Mbps)</i>	<i>MCS</i>	<i>Врвна битска брзина (Mbps)</i>
64 QAM / MIMO 4x4	168	64 QAM / MIMO 4x4	1500	256 QAM / MIMO 8x8	30000
64 QAM / MIMO 2x2	50	64 QAM / MIMO 2x2	900	256 QAM / MIMO 4x4	20000
64 QAM / MIMO 1x4	22	64 QAM / MIMO 1x2	800	128 QAM / MIMO 8x8	15000
16 QAM / MIMO 4x4	16	64 QAM	500	128 QAM / MIMO 4x4	10000
16 QAM / 15 codes	11,5	16 QAM / MIMO 4x4	150	128 QAM	8000
16 QAM / 10 codes	5,8	16 QAM / MIMO 2x2	100	64 QAM / MIMO 8x8	5000
16 QAM / 5 codes	2	16 QAM /	75	64 QAM / MIMO 4x4	3000
QPSK / 5 codes	1,8	QPSK / MIMO 4x4	50	64 QAM /	1500
8PSK	0,384	QPSK / MIMO 2x2	25	16 QAM / MIMO 4x4	1000
4PSK	0,153	QPSK	5	16 QAM	900

Во реалноста на кое растојание која модулациска кодна шема ќе биде применета е оставено да одлучува самиот телекомуникациски оператор. Во симулациите на овој докторски труд е земено максималното растојание меѓу корисникот и базната станица да изнесува 5000 метри, при што на секои 500 метри се прави промена на модулациската кодна шема.

Во продолжение следуваат резултатите за битскиот проток (throughput) по корисник и тоа:

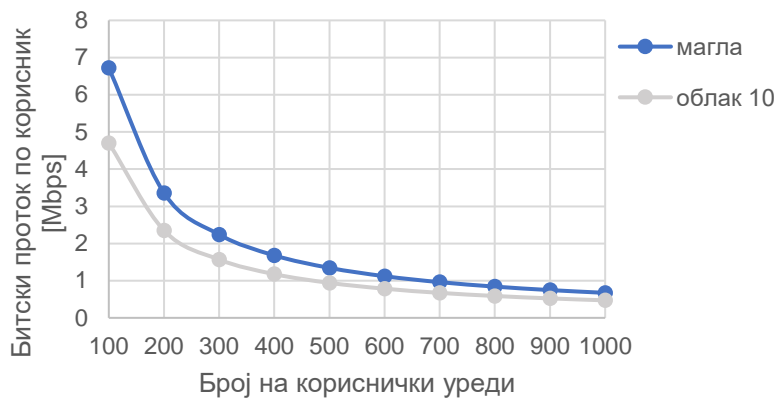
#### 1. Downlink насока

- Споредба на битскиот проток кај 3G мобилни мрежи во околина на магла и облак во зависност од бројот на кориснички уреди при дадено растојание на Слика 8.3 – Слика 8.7;
- Споредба на битскиот проток кај 3G мобилни мрежи во околина на магла и облак во зависност растојанието при даден број на кориснички уреди на Слика 8.8 – Слика 8.12;
- Споредба на битскиот проток кај 4G мобилни мрежи во околина на магла и облак во зависност од бројот на кориснички уреди при дадено растојание на Слика 8.13 – Слика 8.17;
- Споредба на битскиот проток кај 4G мобилни мрежи во околина на магла и облак во зависност растојанието при даден број на кориснички уреди на Слика 8.18 – Слика 8.22;
- Споредба на битскиот проток кај 5G мобилни мрежи во околина на магла и облак во зависност од бројот на кориснички уреди при дадено растојание на Слика 8.23 – Слика 8.27;
- Споредба на битскиот проток кај 5G мобилни мрежи во околина на магла и облак во зависност растојанието при даден број на кориснички уреди на Слика 8.28 – Слика 8.32;
- Споредба на битскиот проток кај 3G, 4G и 5G мобилни мрежи во околина на магла во зависност од бројот на кориснички уреди при дадено растојание на Слика 8.33 – Слика 8.37;
- Споредба на битскиот проток кај 3G, 4G и 5G мобилни мрежи во околина на магла и облак во зависност растојанието при даден број на кориснички уреди на Слика 8.38 – Слика 8.42;

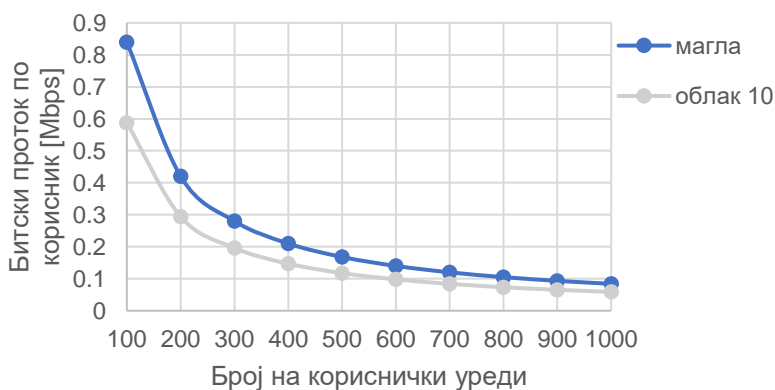
## 2. Uplink насока

- Споредба на битскиот проток кај 3G мобилни мрежи во околина на магла и облак во зависност од бројот на кориснички уреди при дадено растојание на Слика 8.43 – Слика 8.47;
- Споредба на битскиот проток кај 3G мобилни мрежи во околина на магла и облак во зависност растојанието при даден број на кориснички уреди на Слика 8.48 – Слика 8.52;
- Споредба на битскиот проток кај 4G мобилни мрежи во околина на магла и облак во зависност од бројот на кориснички уреди при дадено растојание на Слика 8.53 – Слика 8.57;
- Споредба на битскиот проток кај 4G мобилни мрежи во околина на магла и облак во зависност растојанието при даден број на кориснички уреди на Слика 8.58 – Слика 8.62;
- Споредба на битскиот проток кај 5G мобилни мрежи во околина на магла и облак во зависност од бројот на кориснички уреди при дадено растојание на Слика 8.63 – Слика 8.67;
- Споредба на битскиот проток кај 5G мобилни мрежи во околина на магла и облак во зависност растојанието при даден број на кориснички уреди на Слика 8.68 – Слика 8.72;
- Споредба на битскиот проток кај 3G, 4G и 5G мобилни мрежи во околина на магла во зависност од бројот на кориснички уреди при дадено растојание на Слика 8.73 – Слика 8.77; и
- Споредба на битскиот проток кај 3G, 4G и 5G мобилни мрежи во околина на магла и облак во зависност растојанието при даден број на кориснички уреди на Слика 8.78 – Слика 8.82.

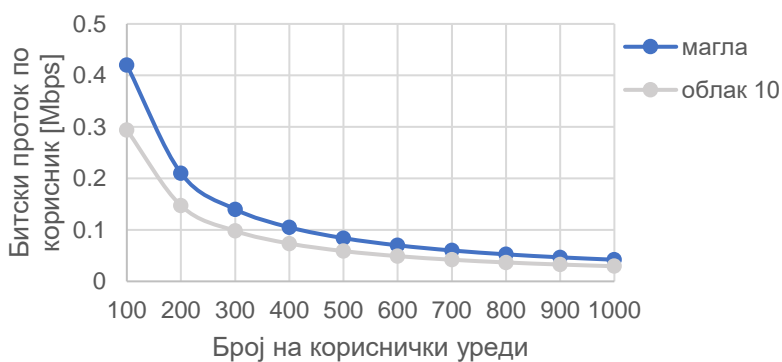
Од сите графици може да се види дека битскиот проток по корисник се намалува со зголемување на бројот на кориснички уреди и со зголемување на растојанието. 5G мобилната мрежа има далеку поголем битски проток од 3G и 4G мобилните мрежи. Исто така битскиот во околина на магла е поголем од битскиот проток во околина на облак, независно дали се работи за 3G, 4G или 5G.



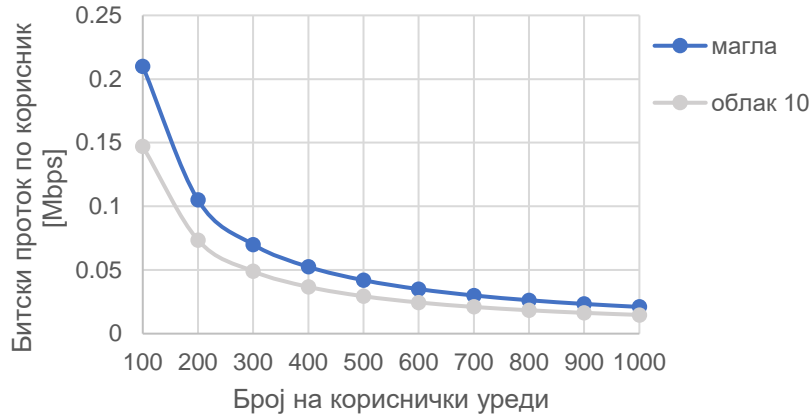
Слика 8.3 Споредба на битскиот проток кај 3G мобилни мрежи во околина на магла и облак во зависност од бројот на кориснички уреди при растојание од 0 до 500 метри во downlink насока



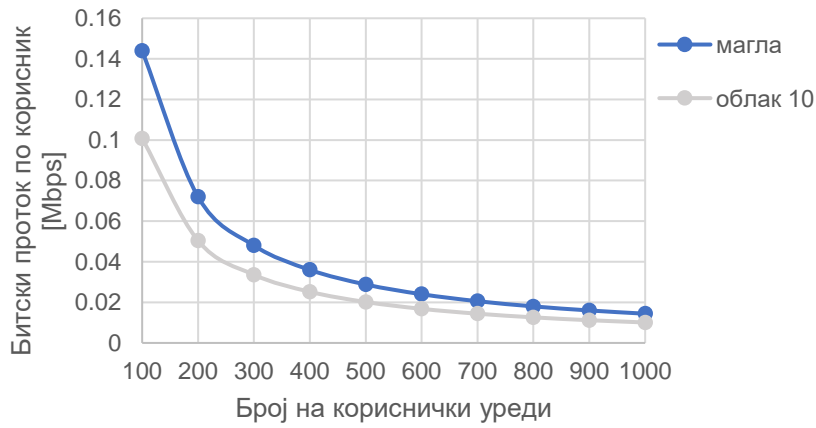
Слика 8.4 Споредба на битскиот проток кај 3G мобилни мрежи во околина на магла и облак во зависност од бројот на кориснички уреди при растојание од 500 до 1000 метри во downlink насока



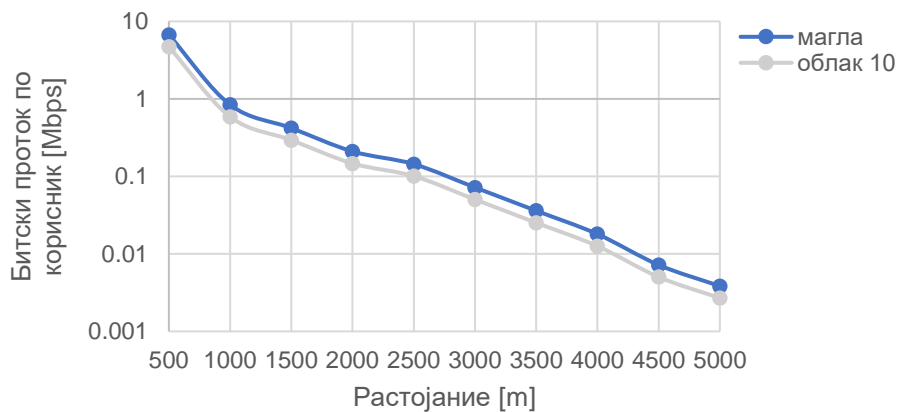
Слика 8.5 Споредба на битскиот проток кај 3G мобилни мрежи во околина на магла и облак во зависност од бројот на кориснички уреди при растојание од 1000 до 1500 метри во downlink насока



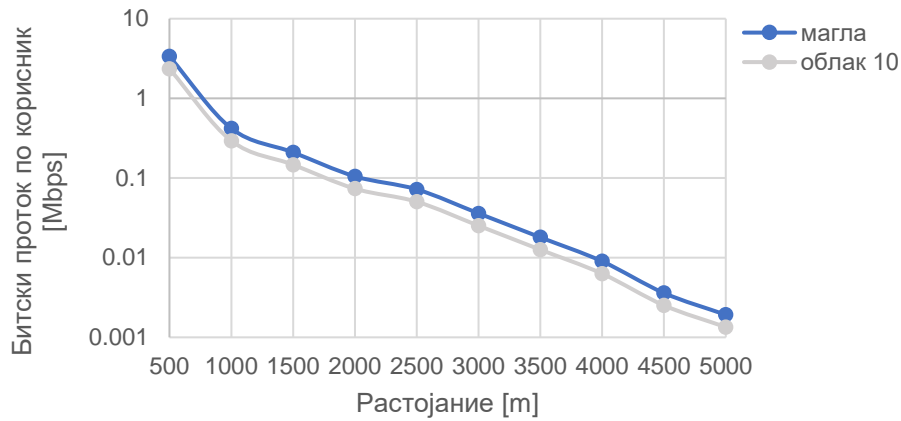
Слика 8.6 Споредба на битскиот проток кај 3G мобилни мрежи во околина на магла и облак во зависност од бројот на кориснички уреди при растојание од 1500 до 2000 метри во downlink насока



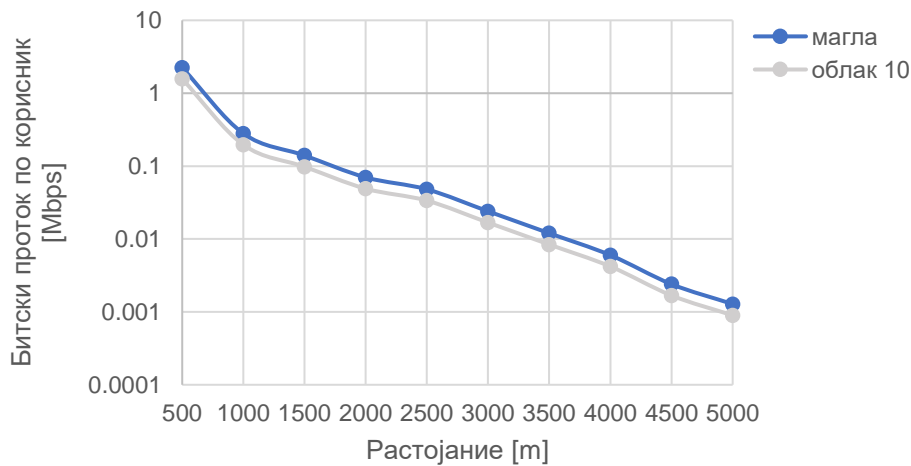
Слика 8.7 Споредба на битскиот проток кај 3G мобилни мрежи во околина на магла и облак во зависност од бројот на кориснички уреди при растојание од 2000 до 2500 метри во downlink насока



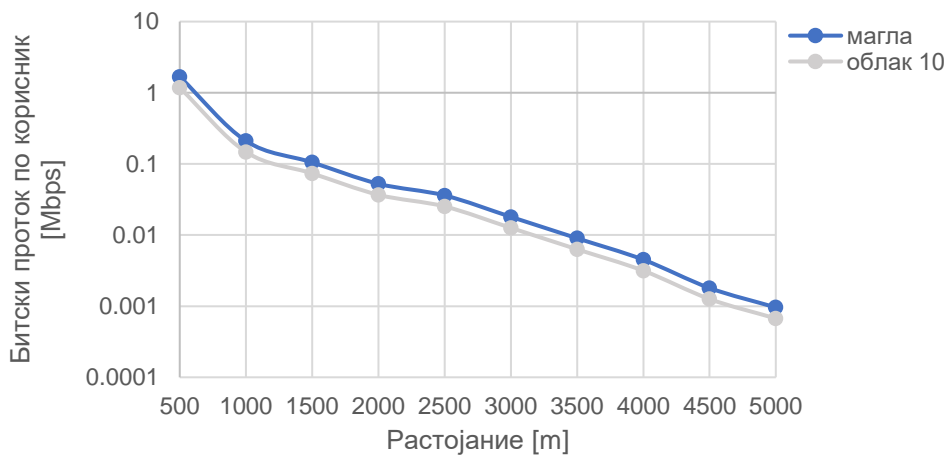
Слика 8.8 Споредба на битскиот проток кај 3G мобилни мрежи во околина на магла и облак во зависност од растојанието меѓу корисничкиот уред и базната станица за 100 кориснички уреди во downlink насока



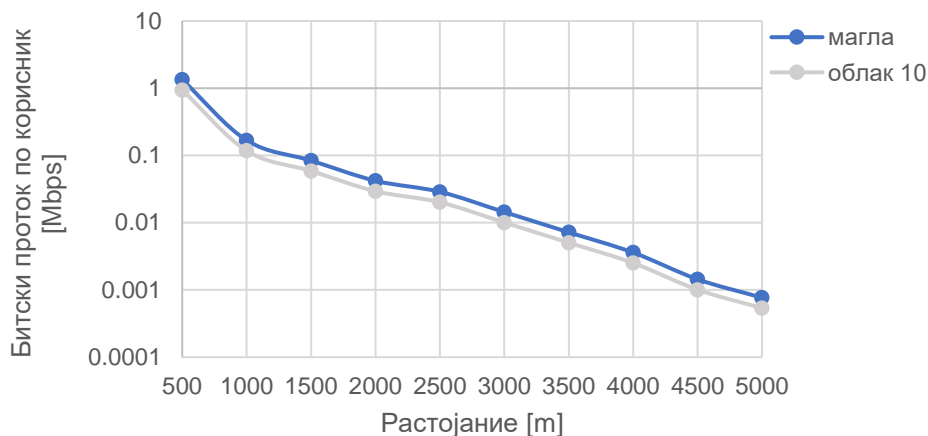
Слика 8.9 Споредба на битскиот проток кај 3G мобилни мрежи во околина на магла и облак во зависност од растојанието меѓу корисничкиот уред и базната станица за 200 кориснички уреди во downlink насока



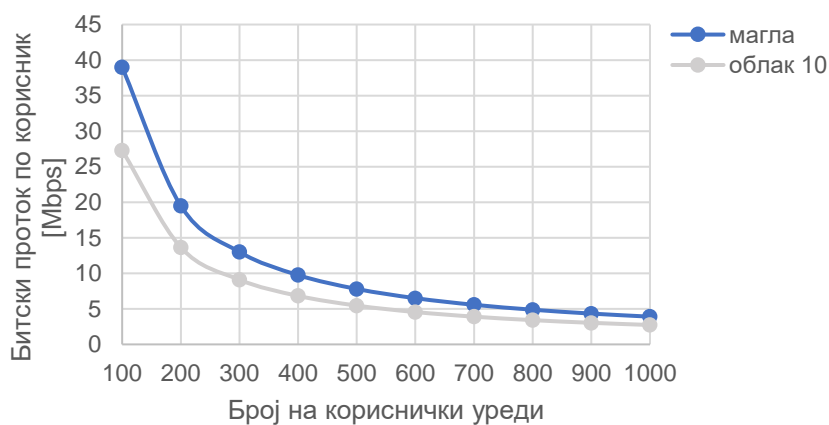
Слика 8.10 Споредба на битскиот проток кај 3G мобилни мрежи во околина на магла и облак во зависност од растојанието меѓу корисничкиот уред и базната станица за 300 кориснички уреди во downlink насока



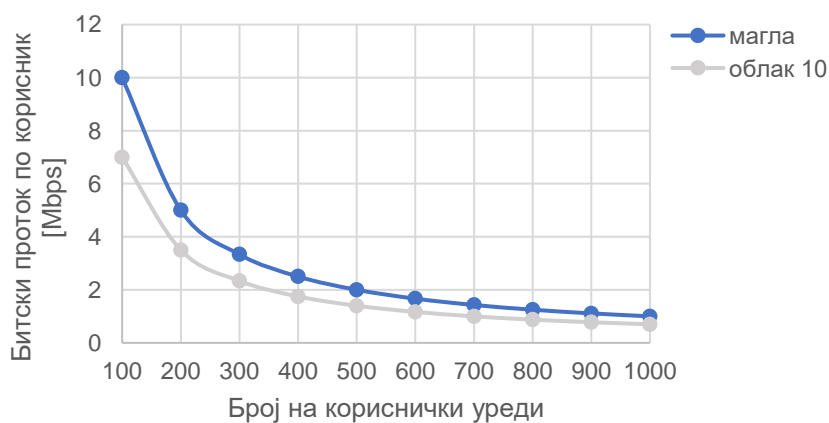
Слика 8.11 Споредба на битскиот проток кај 3G мобилни мрежи во околина на магла и облак во зависност од растојанието меѓу корисничкиот уред и базната станица за 400 кориснички уреди во downlink насока



Слика 8.12 Споредба на битскиот проток кај 3G мобилни мрежи во околина на магла и облак во зависност од растојанието меѓу корисничкиот уред и базната станица за 500 кориснички уреди во downlink насока

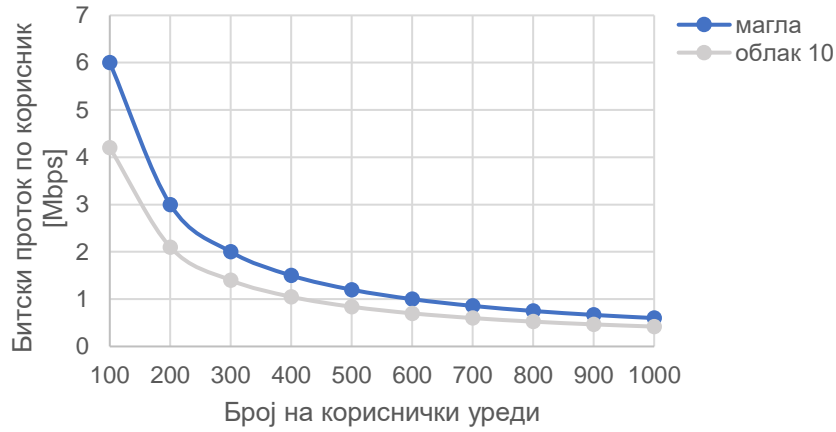


Слика 8.13 Споредба на битскиот проток кај 4G мобилни мрежи во околина на магла и облак во зависност од бројот на кориснички уреди при растојание од 0 до 500 метри во downlink насока

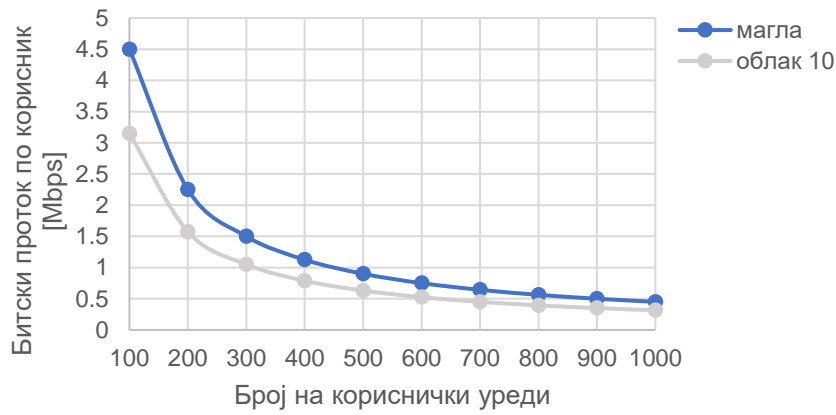


Слика 8.14 Споредба на битскиот проток кај 4G мобилни мрежи во околина на магла и облак во зависност од бројот на кориснички уреди при растојание од 500 до 1000 метри во downlink насока

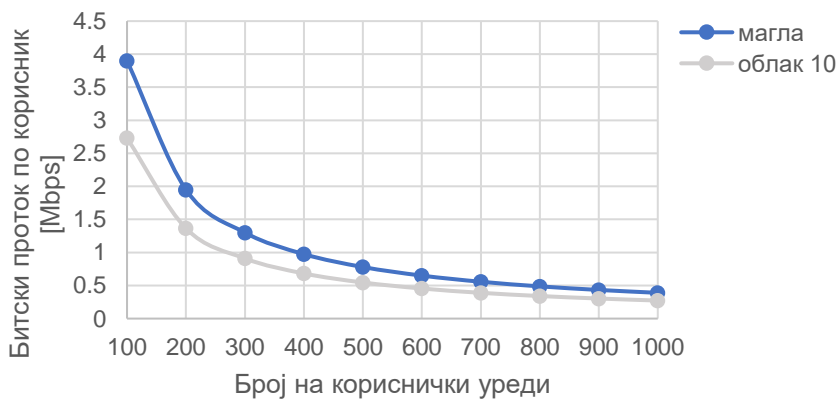




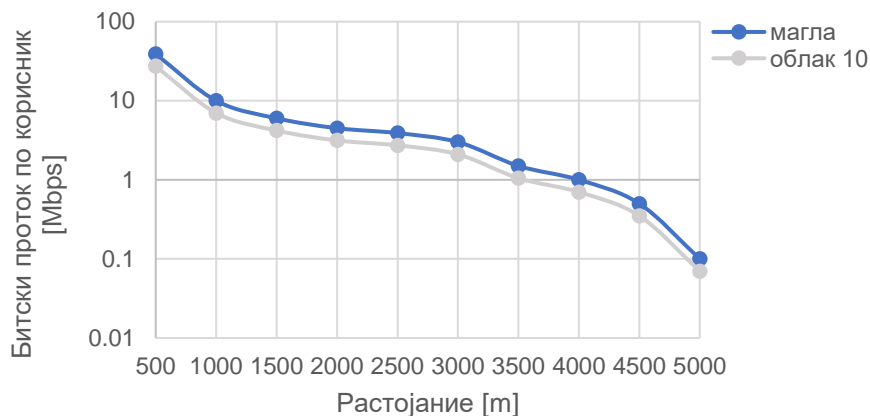
Слика 8.15 Споредба на битскиот проток кај 4G мобилни мрежи во околина на магла и облак во зависност од бројот на кориснички уреди при растојание од 1000 до 1500 метри во downlink насока



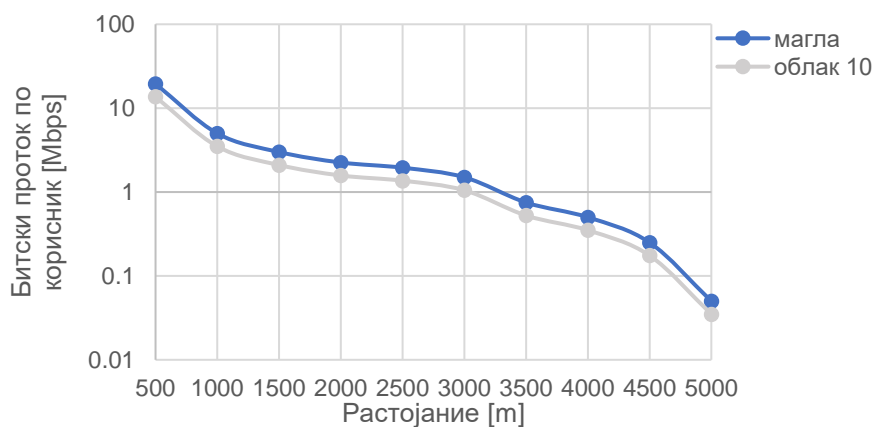
Слика 8.16 Споредба на битскиот проток кај 4G мобилни мрежи во околина на магла и облак во зависност од бројот на кориснички уреди при растојание од 1500 до 2000 метри во downlink насока



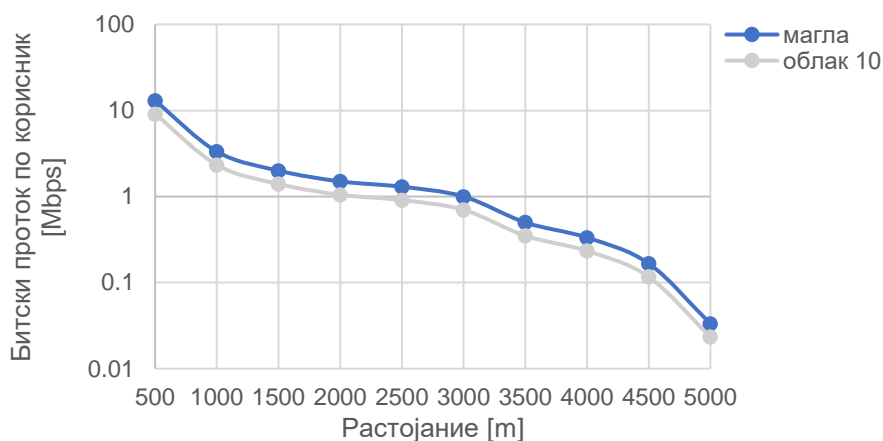
Слика 8.17 Споредба на битскиот проток кај 4G мобилни мрежи во околина на магла и облак во зависност од бројот на кориснички уреди при растојание од 2000 до 2500 метри во downlink насока



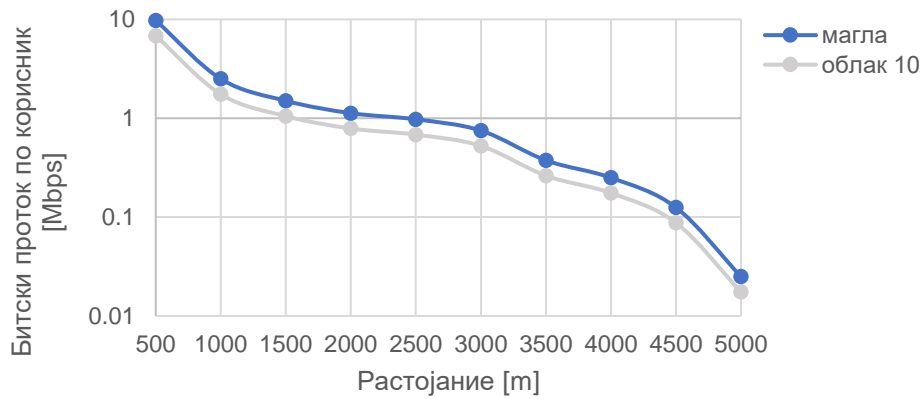
Слика 8.18 Споредба на битскиот проток кај 4G мобилни мрежи во околина на магла и облак во зависност од растојанието меѓу корисничкиот уред и базната станица за 100 кориснички уреди во downlink насока



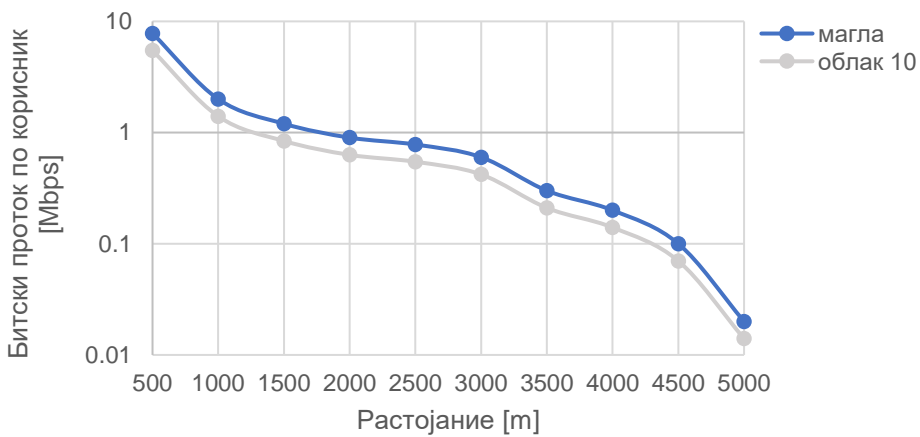
Слика 8.19 Споредба на битскиот проток кај 4G мобилни мрежи во околина на магла и облак во зависност од растојанието меѓу корисничкиот уред и базната станица за 200 кориснички уреди во downlink насока



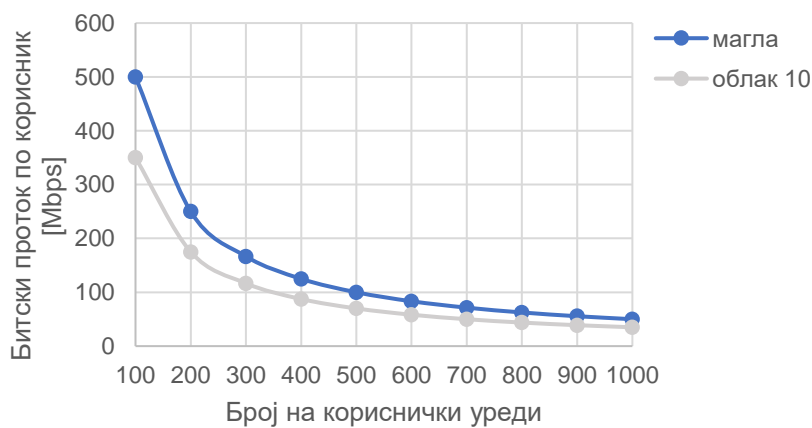
Слика 8.20 Споредба на битскиот проток кај 4G мобилни мрежи во околина на магла и облак во зависност од растојанието меѓу корисничкиот уред и базната станица за 300 кориснички уреди во downlink насока



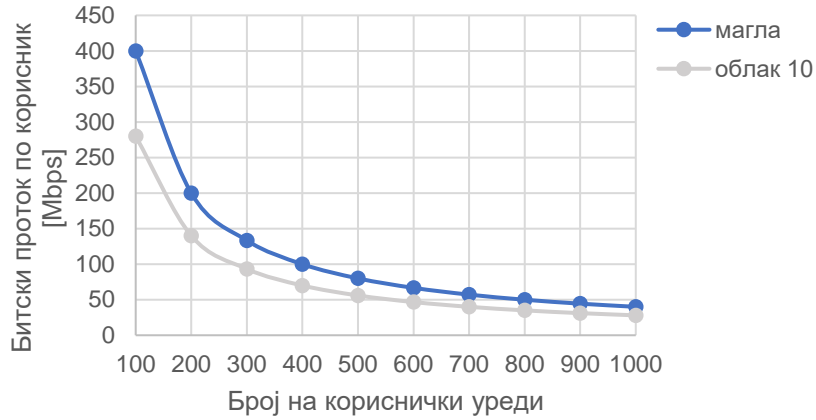
Слика 8.21 Споредба на битскиот проток кај 4G мобилни мрежи во околина на магла и облак во зависност од растојанието меѓу корисничкиот уред и базната станица за 400 кориснички уреди во downlink насока



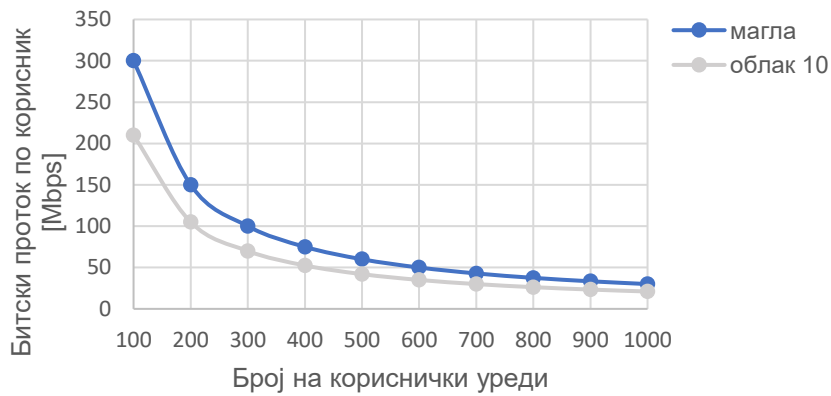
Слика 8.22 Споредба на битскиот проток кај 4G мобилни мрежи во околина на магла и облак во зависност од растојанието меѓу корисничкиот уред и базната станица за 500 кориснички уреди во downlink насока



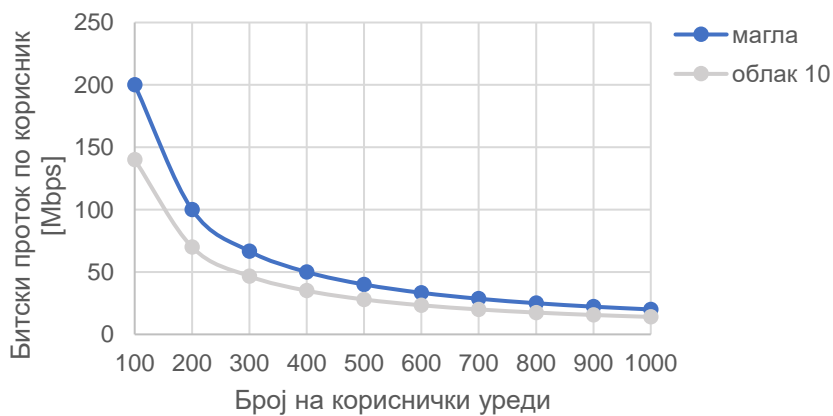
Слика 8.23 Споредба на битскиот проток кај 5G мобилни мрежи во околина на магла и облак во зависност од бројот на кориснички уреди при растојание од 0 до 500 метри во downlink насока



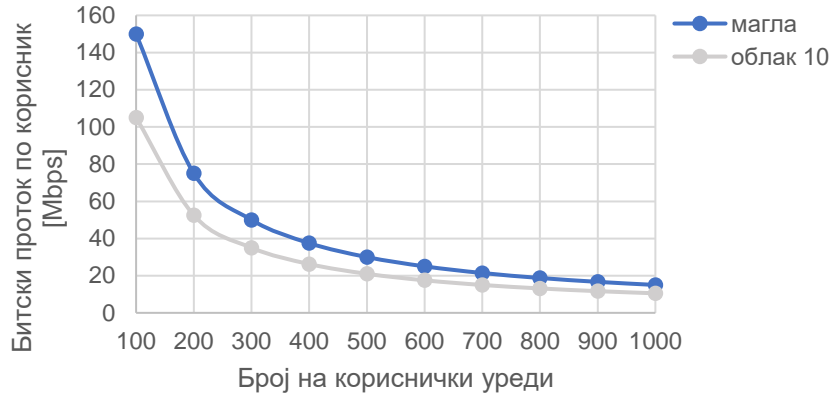
Слика 8.24 Споредба на битскиот проток кај 5G мобилни мрежи во околина на магла и облак во зависност од бројот на кориснички уреди при растојание од 500 до 1000 метри во downlink насока



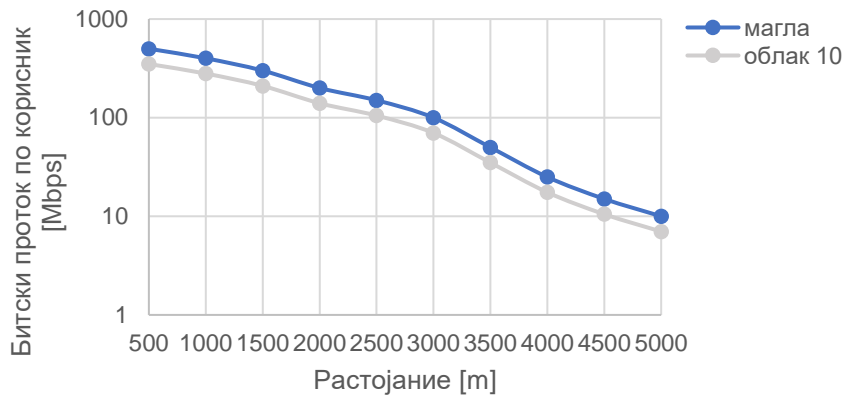
Слика 8.25 Споредба на битскиот проток кај 5G мобилни мрежи во околина на магла и облак во зависност од бројот на кориснички уреди при растојание од 1000 до 1500 метри во downlink насока



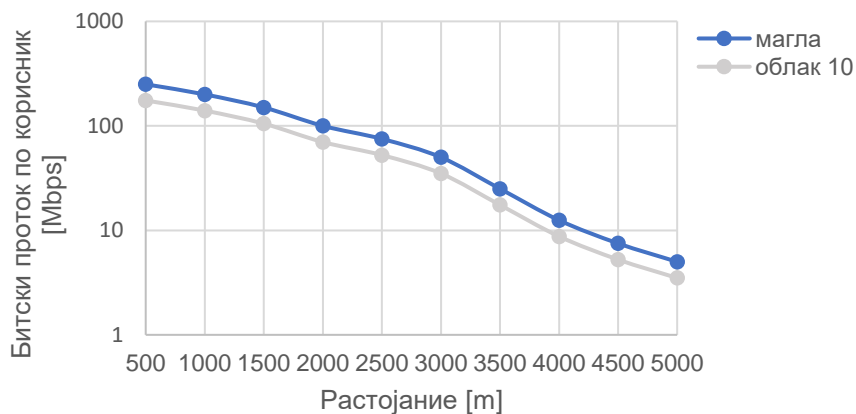
Слика 8.26 Споредба на битскиот проток кај 5G мобилни мрежи во околина на магла и облак во зависност од бројот на кориснички уреди при растојание од 1500 до 2000 метри во downlink насока



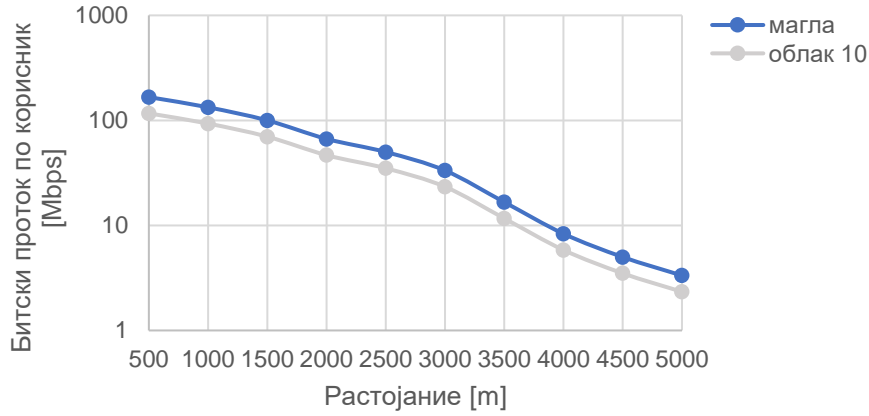
Слика 8.27 Споредба на битскиот проток кај 5G мобилни мрежи во околина на магла и облак во зависност од бројот на кориснички уреди при растојание од 2000 до 2500 метри во downlink насока



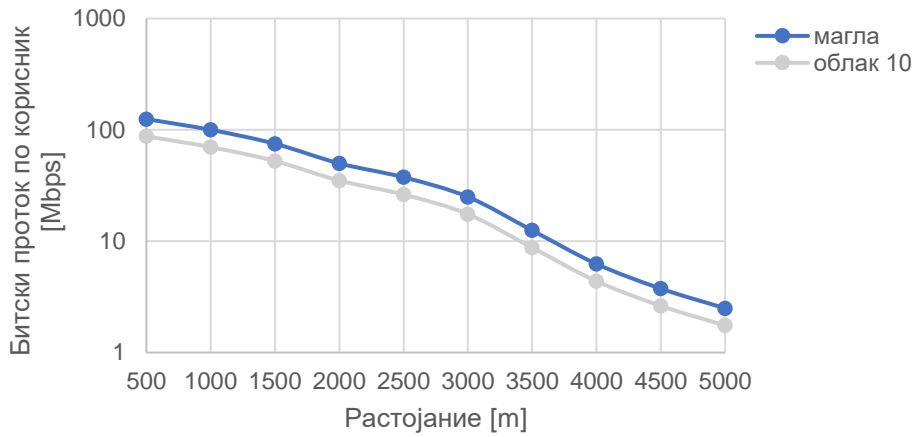
Слика 8.28 Споредба на битскиот проток кај 5G мобилни мрежи во околина на магла и облак во зависност од растојанието меѓу корисничкиот уред и базната станица за 100 кориснички уреди во downlink насока



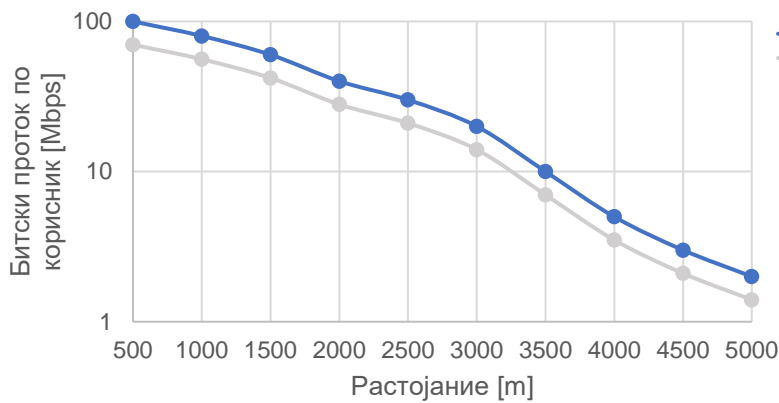
Слика 8.29 Споредба на битскиот проток кај 5G мобилни мрежи во околина на магла и облак во зависност од растојанието меѓу корисничкиот уред и базната станица за 200 кориснички уреди во downlink насока



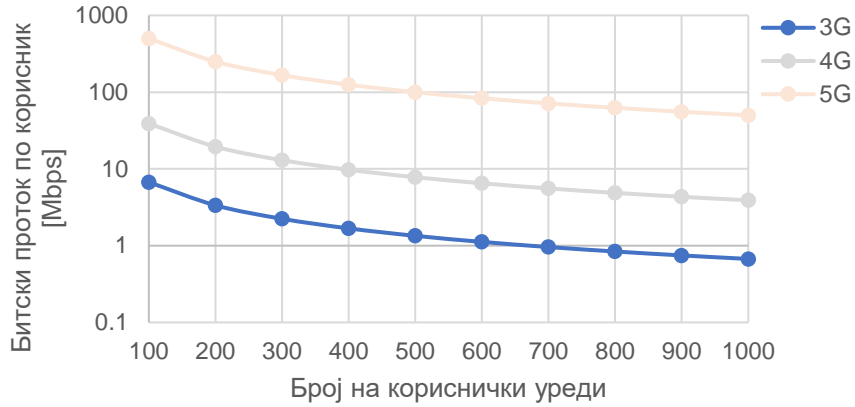
Слика 8.30 Споредба на битскиот проток кај 5G мобилни мрежи во околина на магла и облак во зависност од растојанието меѓу корисничкиот уред и базната станица за 300 кориснички уреди во downlink насока



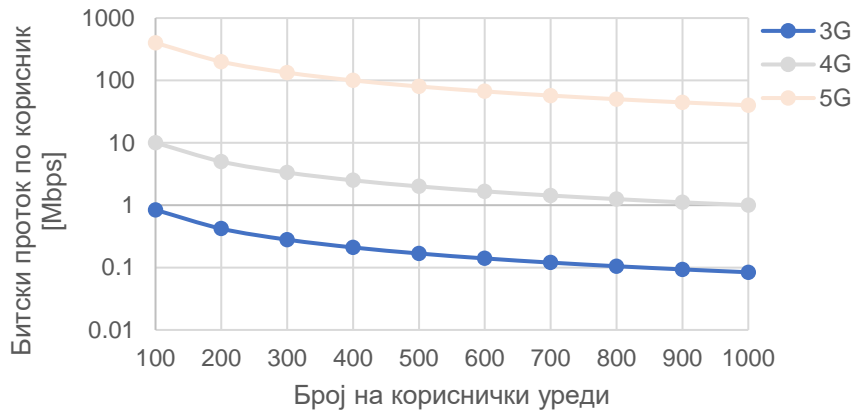
Слика 8.31 Споредба на битскиот проток кај 5G мобилни мрежи во околина на магла и облак во зависност од растојанието меѓу корисничкиот уред и базната станица за 400 кориснички уреди во downlink насока



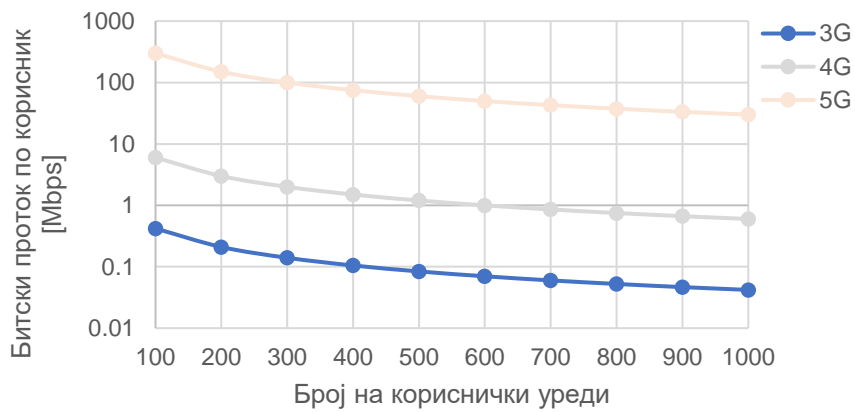
Слика 8.32 Споредба на битскиот проток кај 5G мобилни мрежи во околина на магла и облак во зависност од растојанието меѓу корисничкиот уред и базната станица за 500 кориснички уреди во downlink насока



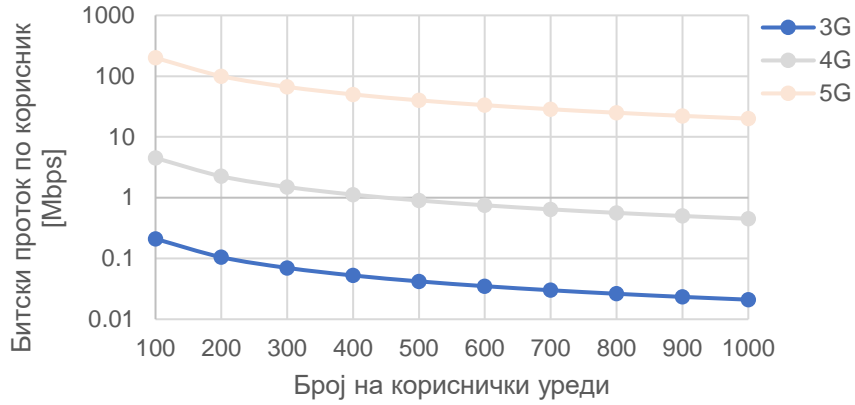
Слика 8.33 Споредба на битскиот проток кај 3G, 4G и 5G мобилни мрежи во околина на магла во зависност од бројот на кориснички уреди при растојание од 0 до 500 метри во downlink насока



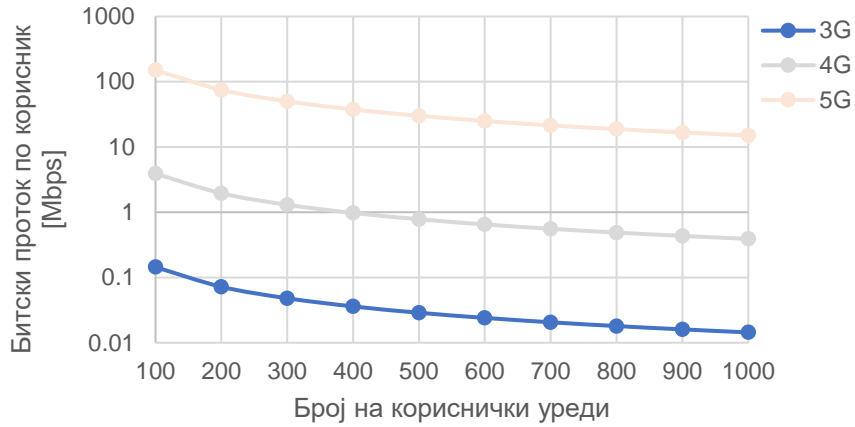
Слика 8.34 Споредба на битскиот проток кај 3G, 4G и 5G мобилни мрежи во околина на магла во зависност од бројот на кориснички уреди при растојание од 500 до 1000 метри во downlink насока



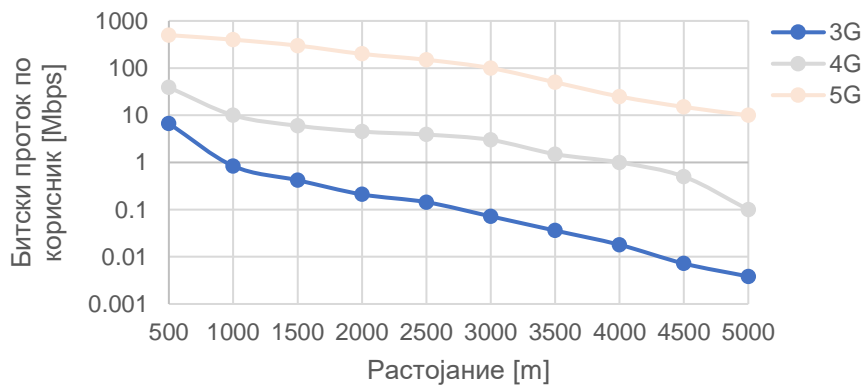
Слика 8.35 Споредба на битскиот проток кај 3G, 4G и 5G мобилни мрежи во околина на магла во зависност од бројот на кориснички уреди при растојание од 1000 до 1500 метри во downlink насока



Слика 8.36 Споредба на битскиот проток кај 3G, 4G и 5G мобилни мрежи во околина на магла во зависност од бројот на кориснички уреди при растојание од 1500 до 2000 метри во downlink насока

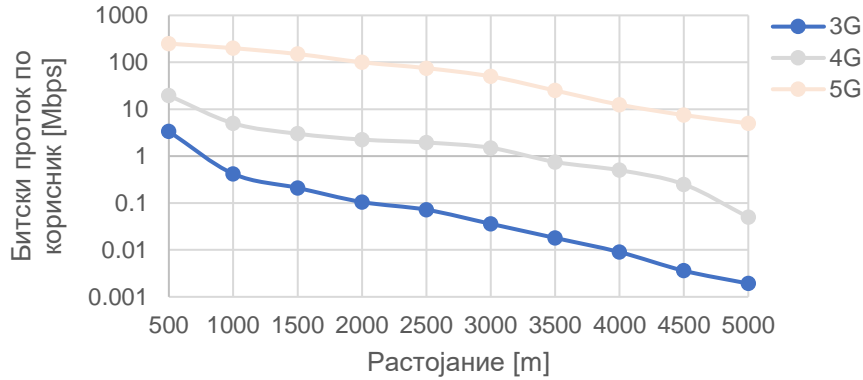


Слика 8.37 Споредба на битскиот проток кај 3G, 4G и 5G мобилни мрежи во околина на магла во зависност од бројот на кориснички уреди при растојание од 2000 до 2500 метри во downlink насока

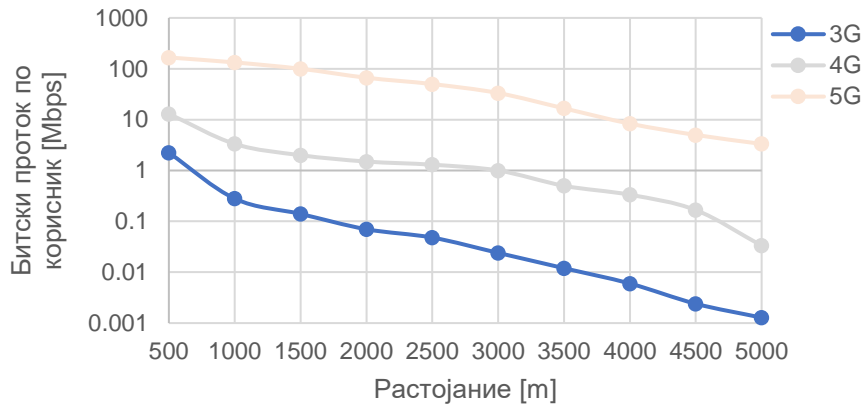


Слика 8.38 Споредба на битскиот проток кај 3G, 4G и 5G мобилни мрежи во околина на магла во зависност од растојанието меѓу корисничкиот уред и базната станица за 100 кориснички уреди во downlink насока

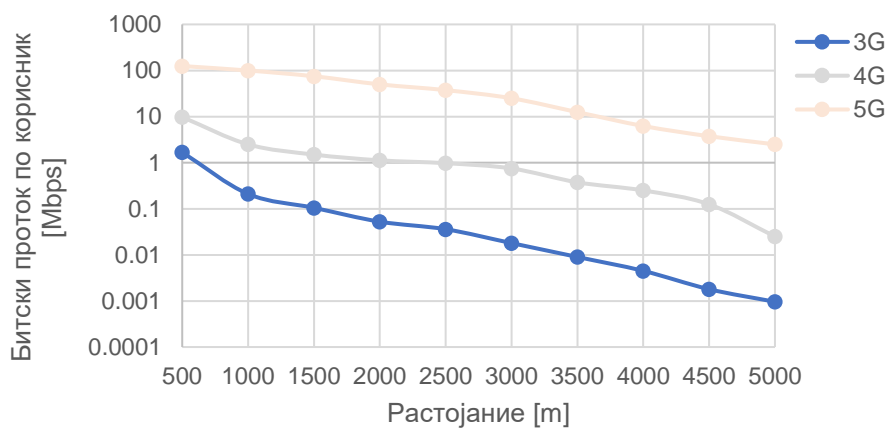




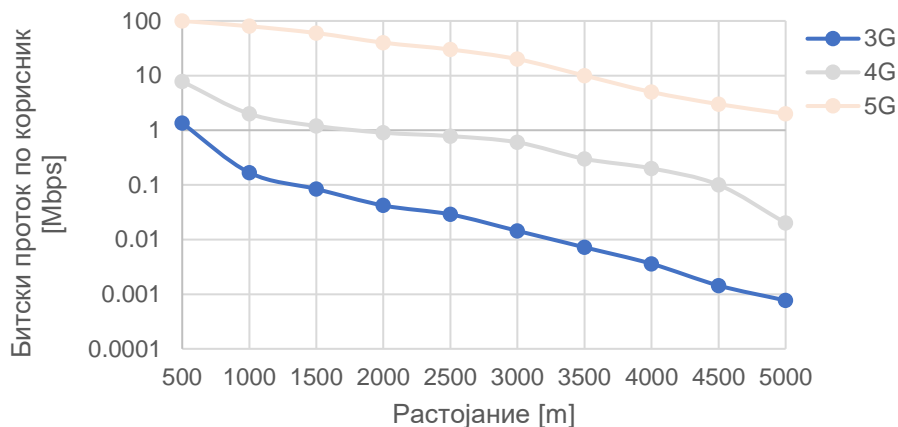
Слика 8.39 Споредба на битскиот проток кај 3G, 4G и 5G мобилни мрежи во околина на магла во зависност од растојанието меѓу корисничкиот уред и базната станица за 200 кориснички уреди во downlink насока



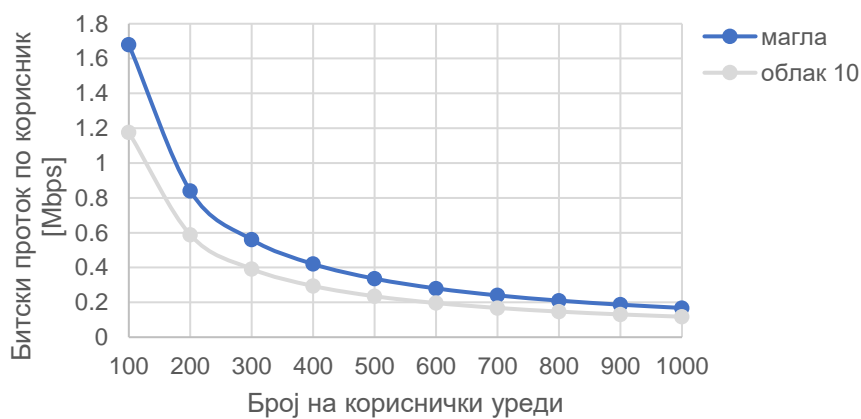
Слика 8.40 Споредба на битскиот проток кај 3G, 4G и 5G мобилни мрежи во околина на магла во зависност од растојанието меѓу корисничкиот уред и базната станица за 300 кориснички уреди во downlink насока



Слика 8.41 Споредба на битскиот проток кај 3G, 4G и 5G мобилни мрежи во околина на магла во зависност од растојанието меѓу корисничкиот уред и базната станица за 400 кориснички уреди во downlink насока



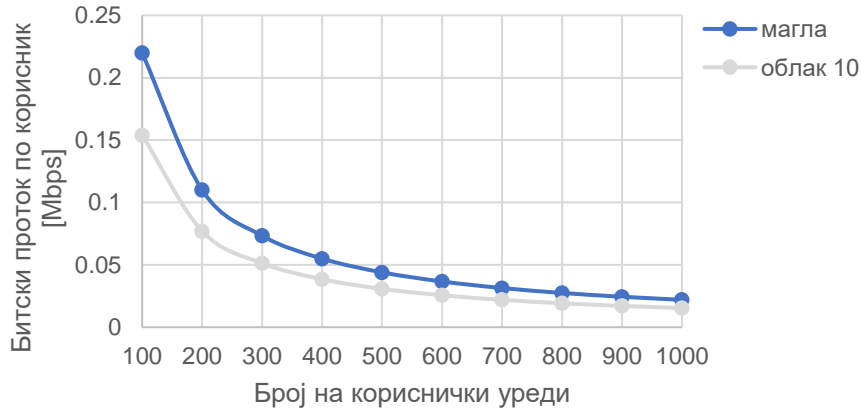
Слика 8.42 Споредба на битскиот проток кај 3G, 4G и 5G мобилни мрежи во околина на магла во зависност од растојанието меѓу корисничкиот уред и базната станица за 400 кориснички уреди во downlink насока



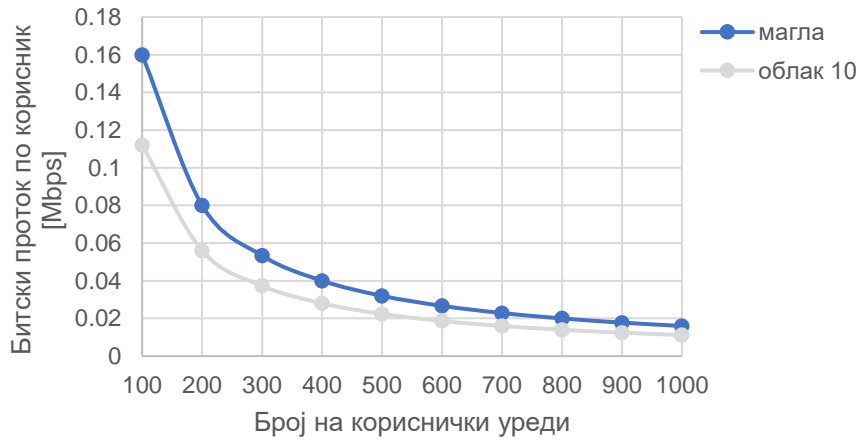
Слика 8.43 Споредба на битскиот проток кај 3G мобилни мрежи во околина на магла и облак во зависност од бројот на кориснички уреди при растојание од 0 до 500 метри во uplink насока



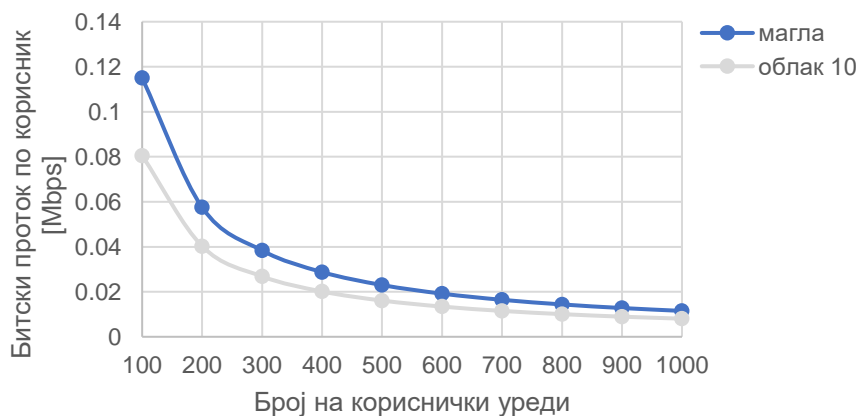
Слика 8.44 Споредба на битскиот проток кај 3G мобилни мрежи во околина на магла и облак во зависност од бројот на кориснички уреди при растојание од 500 до 1000 метри во uplink насока



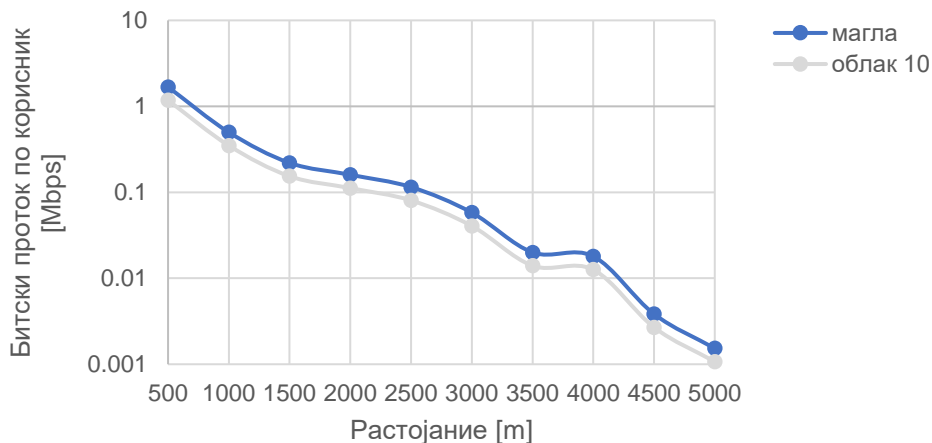
Слика 8.45 Споредба на битскиот проток кај 3G мобилни мрежи во околина на магла и облак во зависност од бројот на кориснички уреди при растојание од 1000 до 1500 метри во uplink насока



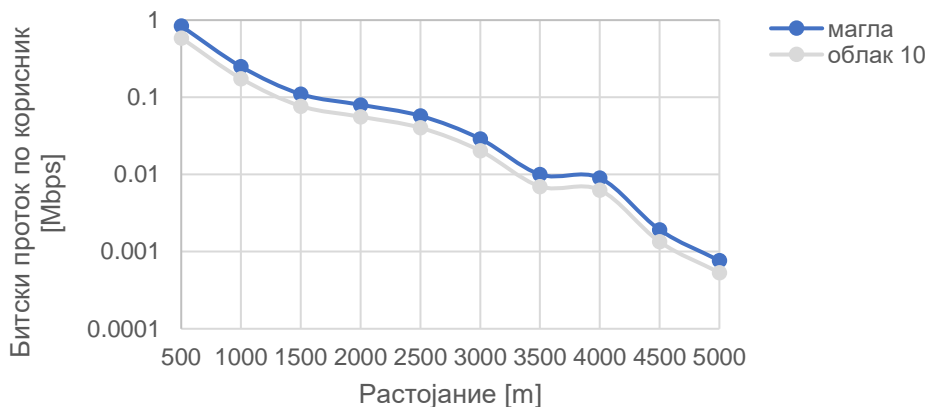
Слика 8.46 Споредба на битскиот проток кај 3G мобилни мрежи во околина на магла и облак во зависност од бројот на кориснички уреди при растојание од 1500 до 2000 метри во uplink насока



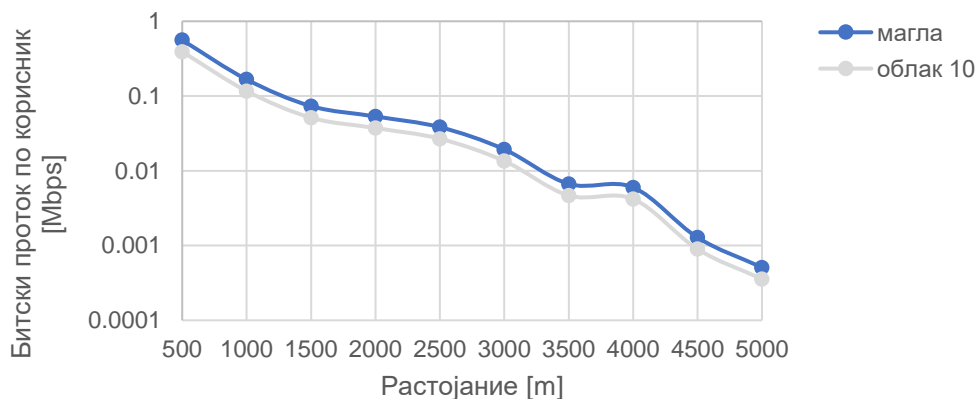
Слика 8.47 Споредба на битскиот проток кај 3G мобилни мрежи во околина на магла и облак во зависност од бројот на кориснички уреди при растојание од 2000 до 2500 метри во uplink насока



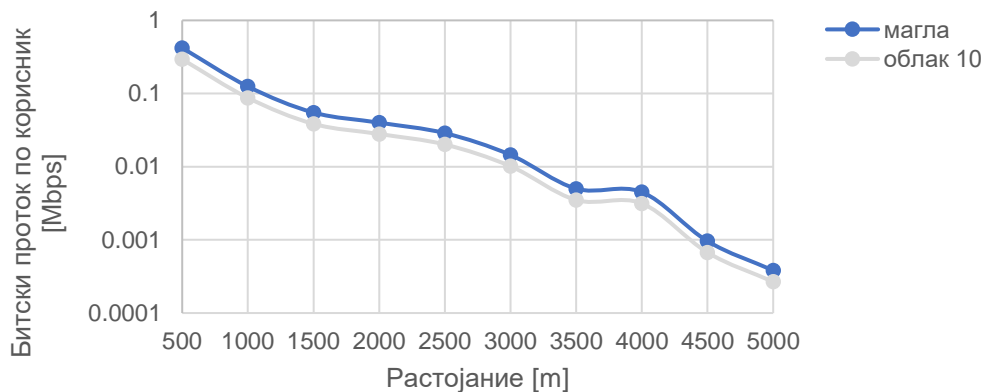
Слика 8.48 Споредба на битскиот проток кај 3G мобилни мрежи во околина на магла и облак во зависност од растојанието меѓу корисничкиот уред и базната станица за 100 кориснички уреди во uplink насока



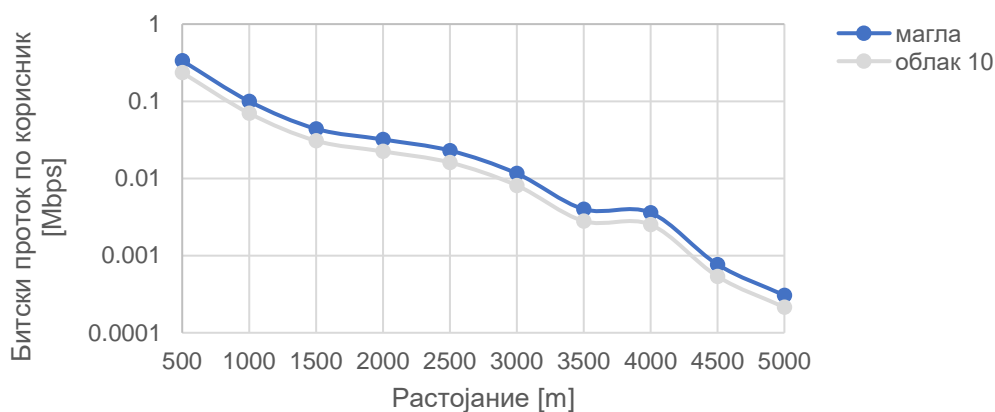
Слика 8.49 Споредба на битскиот проток кај 3G мобилни мрежи во околина на магла и облак во зависност од растојанието меѓу корисничкиот уред и базната станица за 200 кориснички уреди во uplink насока



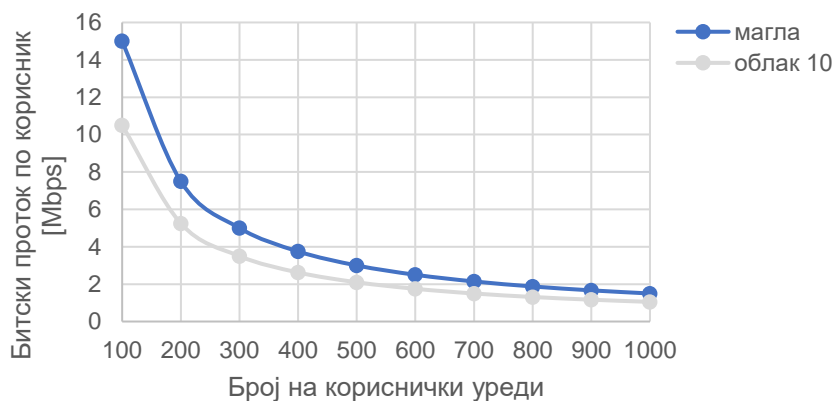
Слика 8.50 Споредба на битскиот проток кај 3G мобилни мрежи во околина на магла и облак во зависност од растојанието меѓу корисничкиот уред и базната станица за 300 кориснички уреди во uplink насока



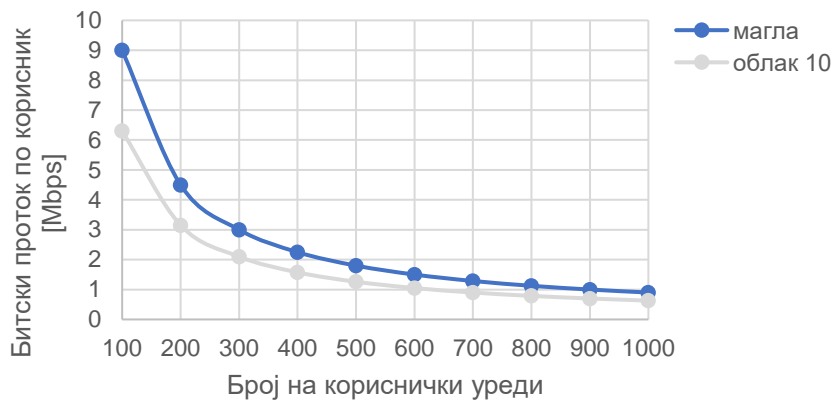
Слика 8.51 Споредба на битскиот проток кај 3G мобилни мрежи во околина на магла и облак во зависност од растојанието меѓу корисничкиот уред и базната станица за 400 кориснички уреди во uplink насока



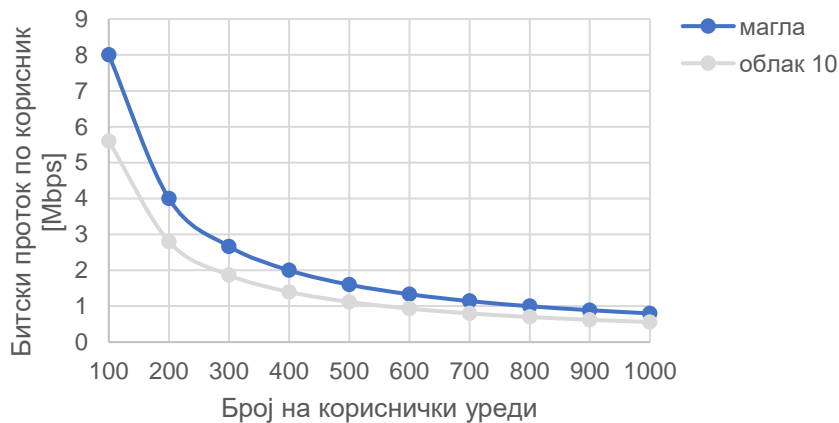
Слика 8.52 Споредба на битскиот проток кај 3G мобилни мрежи во околина на магла и облак во зависност од растојанието меѓу корисничкиот уред и базната станица за 500 кориснички уреди во uplink насока



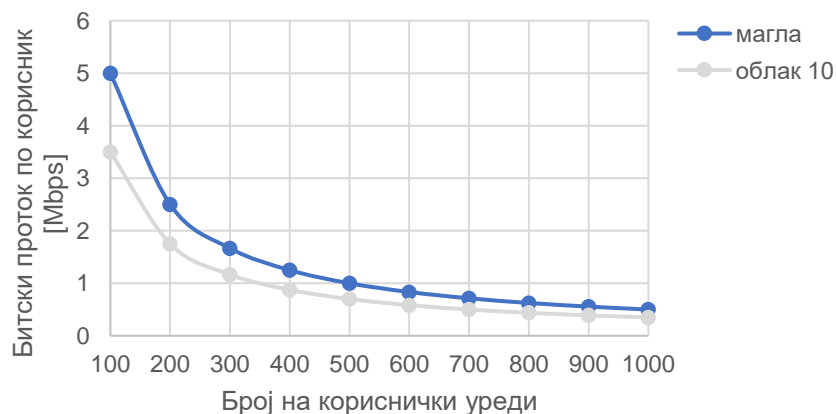
Слика 8.53 Споредба на битскиот проток кај 4G мобилни мрежи во околина на магла и облак во зависност од бројот на кориснички уреди при растојание од 0 до 500 метри во uplink насока



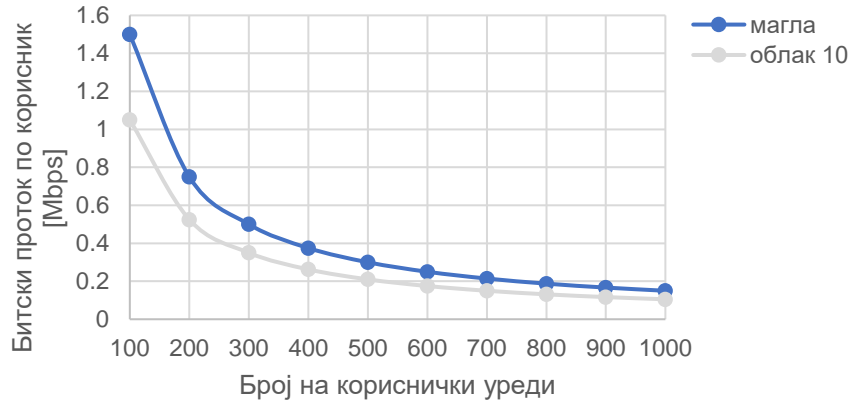
Слика 8.54 Споредба на битскиот проток кај 4G мобилни мрежи во околина на магла и облак во зависност од бројот на кориснички уреди при растојание од 500 до 1000 метри во uplink насока



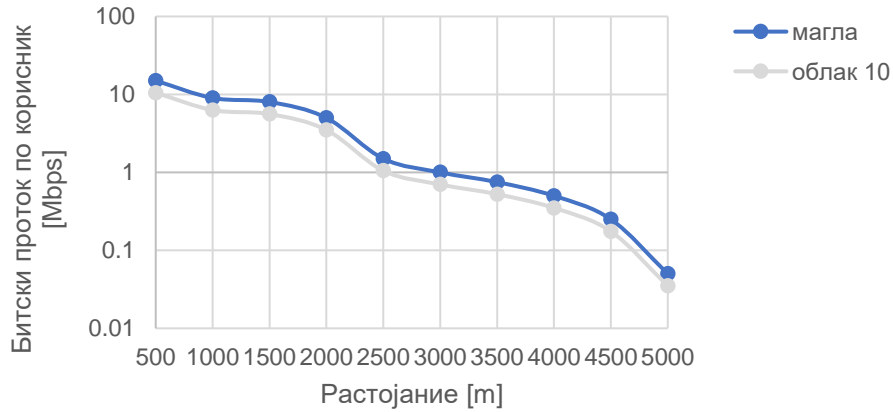
Слика 8.55 Споредба на битскиот проток кај 4G мобилни мрежи во околина на магла и облак во зависност од бројот на кориснички уреди при растојание од 1000 до 1500 метри во uplink насока



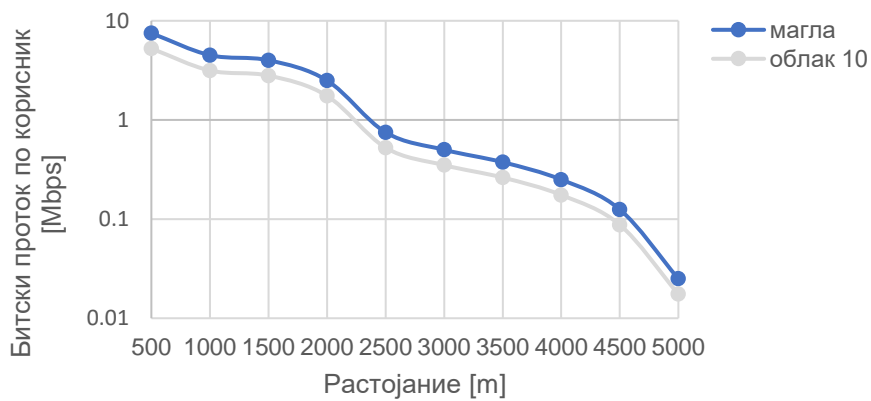
Слика 8.56 Споредба на битскиот проток кај 4G мобилни мрежи во околина на магла и облак во зависност од бројот на кориснички уреди при растојание од 1500 до 2000 метри во uplink насока



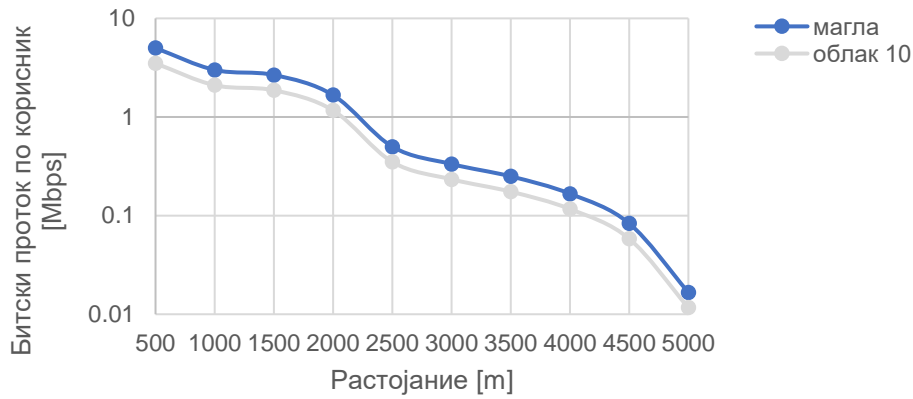
Слика 8.57 Споредба на битскиот проток кај 4G мобилни мрежи во околина на магла и облак во зависност од бројот на кориснички уреди при растојание од 2000 до 2500 метри во uplink насока



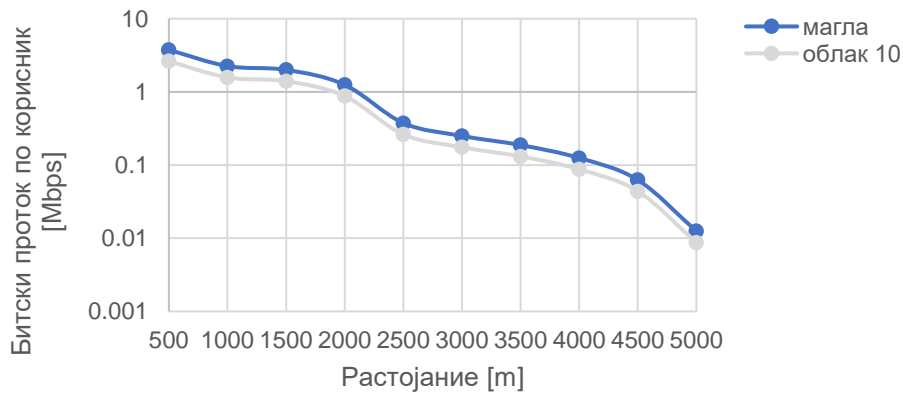
Слика 8.58 Споредба на битскиот проток кај 4G мобилни мрежи во околина на магла и облак во зависност од растојанието меѓу корисничкиот уред и базната станица за 100 кориснички уреди во uplink насока



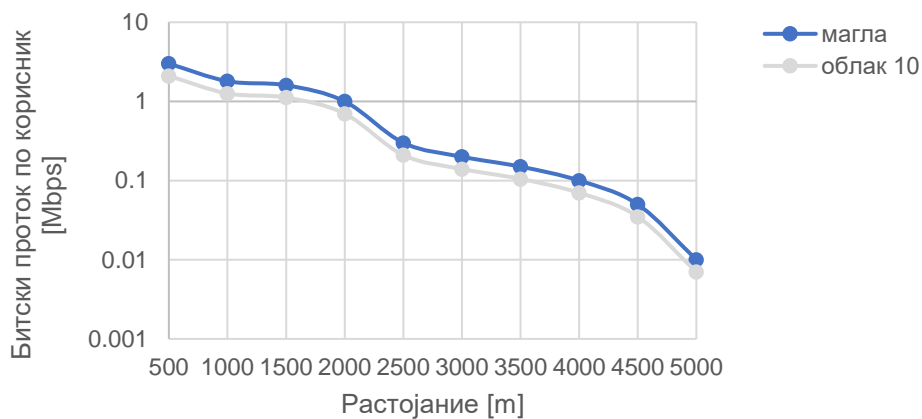
Слика 8.59 Споредба на битскиот проток кај 4G мобилни мрежи во околина на магла и облак во зависност од растојанието меѓу корисничкиот уред и базната станица за 200 кориснички уреди во uplink насока



Слика 8.60 Споредба на битскиот проток кај 4G мобилни мрежи во околина на магла и облак во зависност од растојанието меѓу корисничкиот уред и базната станица за 300 кориснички уреди во uplink насока

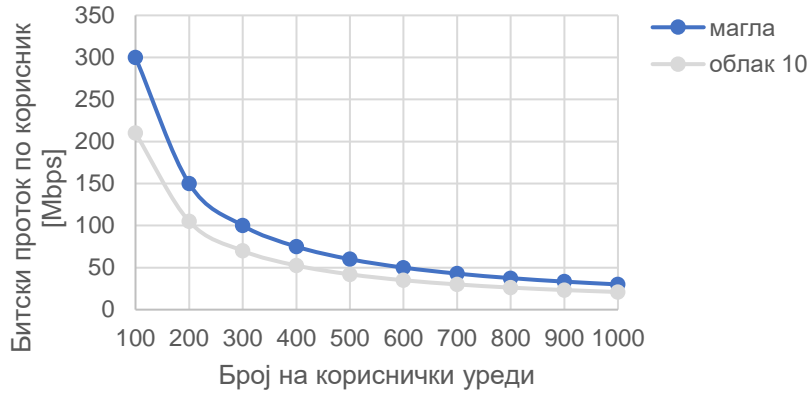


Слика 8.61 Споредба на битскиот проток кај 4G мобилни мрежи во околина на магла и облак во зависност од растојанието меѓу корисничкиот уред и базната станица за 400 кориснички уреди во uplink насока

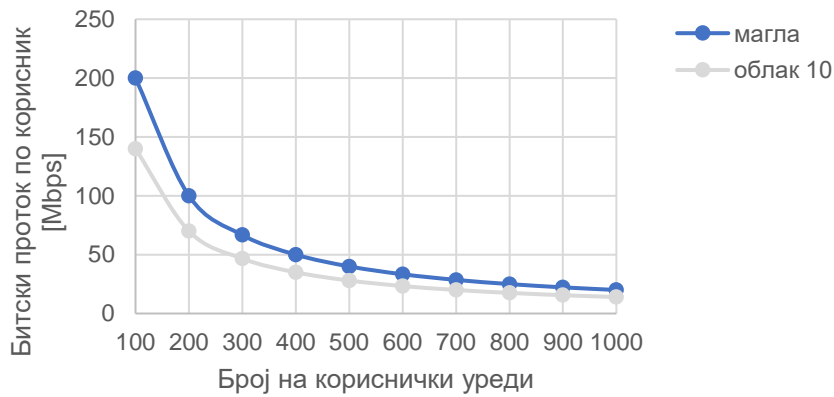


Слика 8.62 Споредба на битскиот проток кај 4G мобилни мрежи во околина на магла и облак во зависност од растојанието меѓу корисничкиот уред и базната станица за 500 кориснички уреди во uplink насока

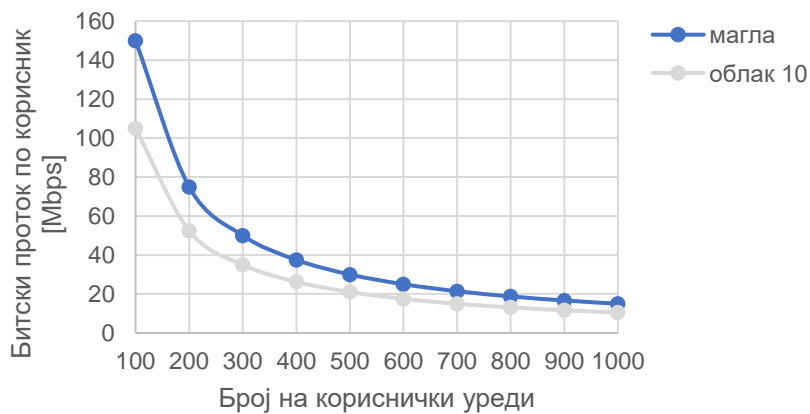




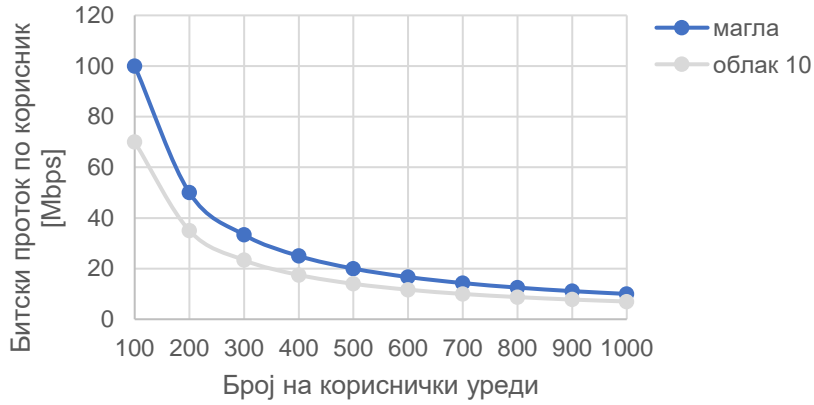
Слика 8.63 Споредба на битскиот проток кај 5G мобилни мрежи во околина на магла и облак во зависност од бројот на кориснички уреди при растојание од 0 до 500 метри во uplink насока



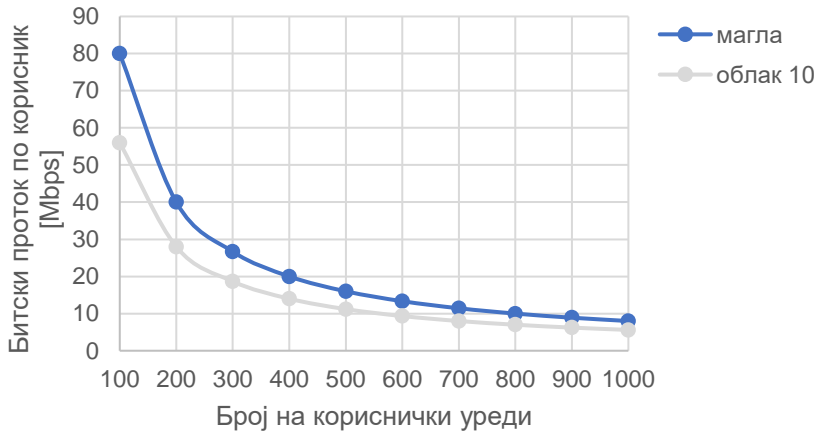
Слика 8.64 Споредба на битскиот проток кај 5G мобилни мрежи во околина на магла и облак во зависност од бројот на кориснички уреди при растојание од 500 до 1000 метри во uplink насока



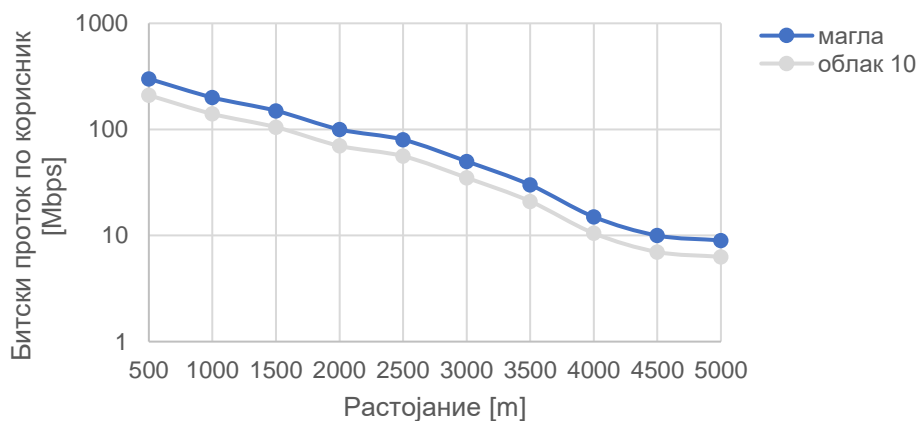
Слика 8.65 Споредба на битскиот проток кај 5G мобилни мрежи во околина на магла и облак во зависност од бројот на кориснички уреди при растојание од 1000 до 1500 метри во uplink насока



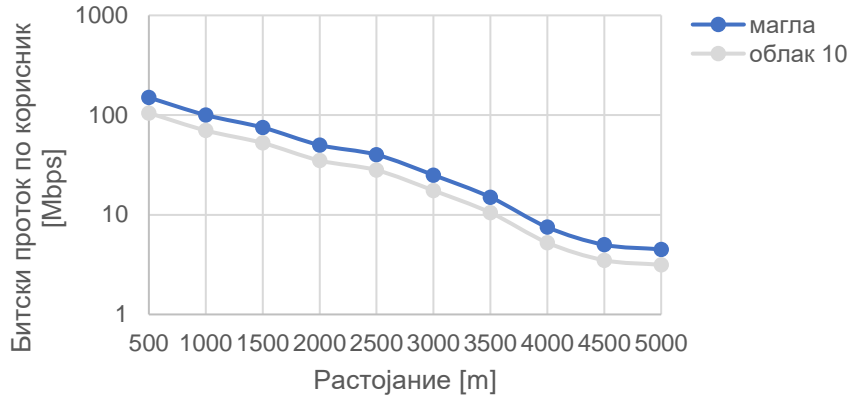
Слика 8.66 Споредба на битскиот проток кај 5G мобилни мрежи во околина на магла и облак во зависност од бројот на кориснички уреди при растојание од 1500 до 2000 метри во uplink насока



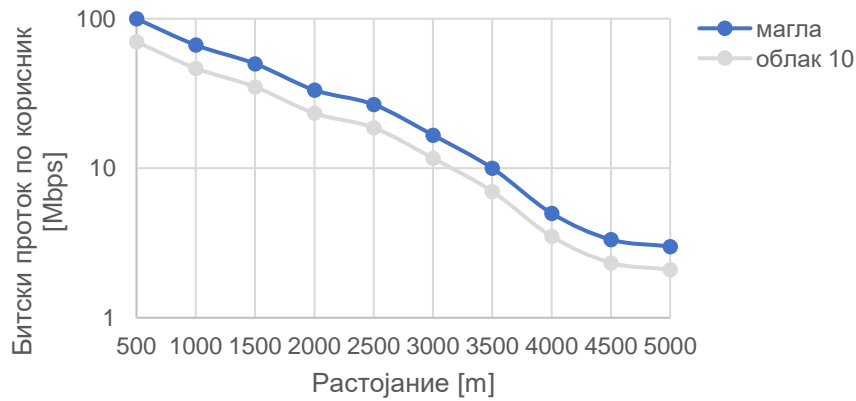
Слика 8.67 Споредба на битскиот проток кај 5G мобилни мрежи во околина на магла и облак во зависност од бројот на кориснички уреди при растојание од 2000 до 2500 метри во uplink насока



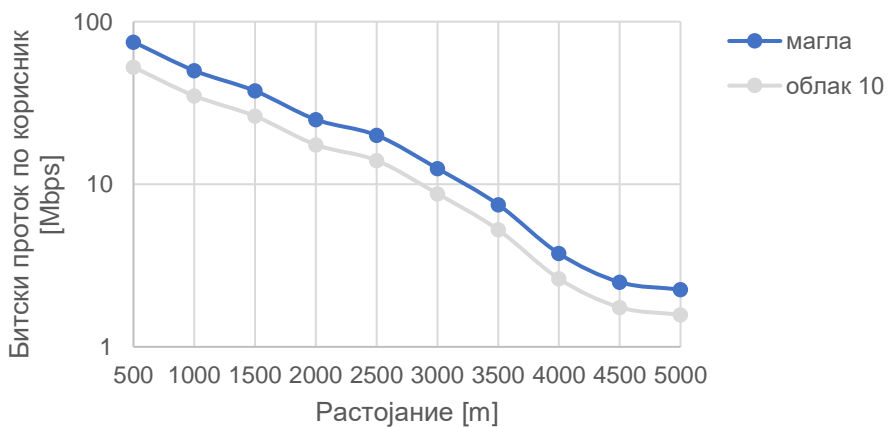
Слика 8.68 Споредба на битскиот проток кај 5G мобилни мрежи во околина на магла и облак во зависност од растојанието меѓу корисничкиот уред и базната станица за 100 кориснички уреди во uplink насока



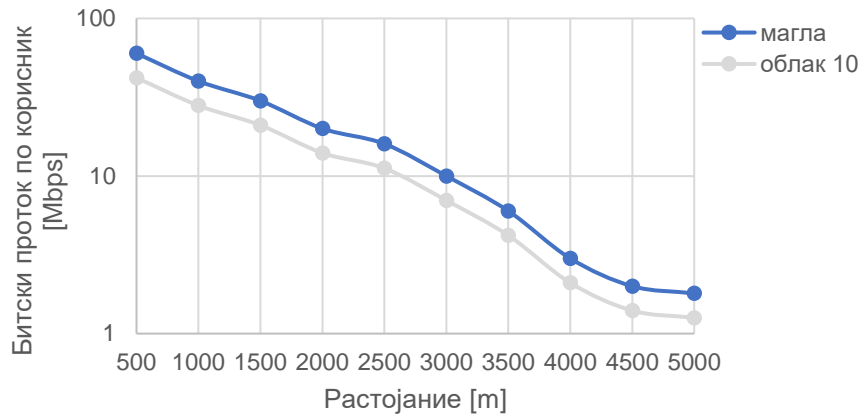
Слика 8.69 Споредба на битскиот проток кај 5G мобилни мрежи во околина на магла и облак во зависност од растојанието меѓу корисничкиот уред и базната станица за 200 кориснички уреди во uplink насока



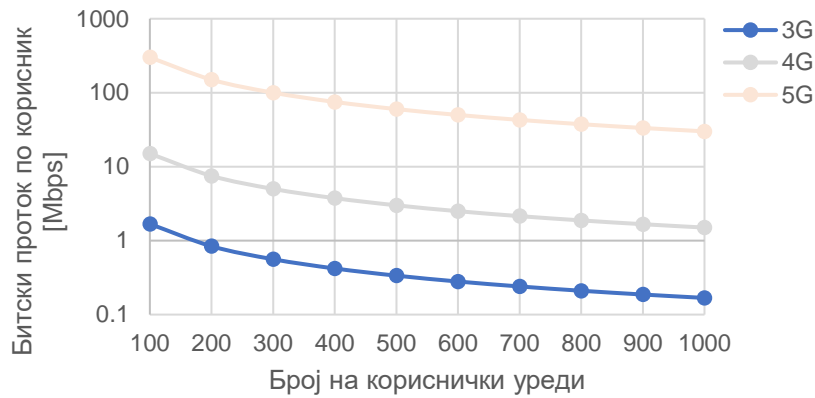
Слика 8.70 Споредба на битскиот проток кај 5G мобилни мрежи во околина на магла и облак во зависност од растојанието меѓу корисничкиот уред и базната станица за 300 кориснички уреди во uplink насока



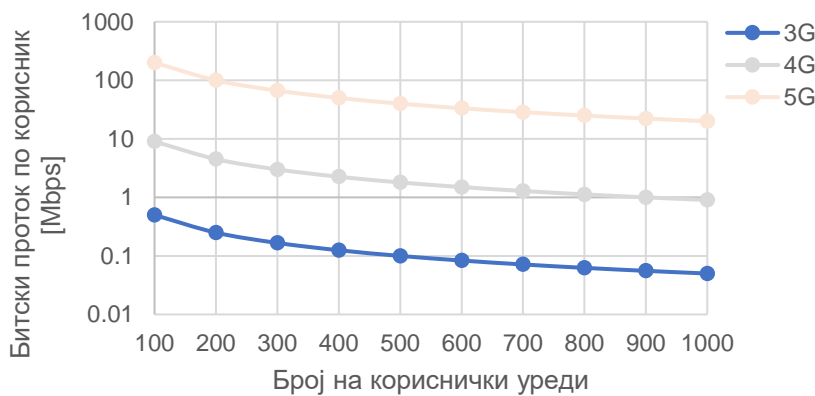
Слика 8.71 Споредба на битскиот проток кај 5G мобилни мрежи во околина на магла и облак во зависност од растојанието меѓу корисничкиот уред и базната станица за 400 кориснички уреди во uplink насока



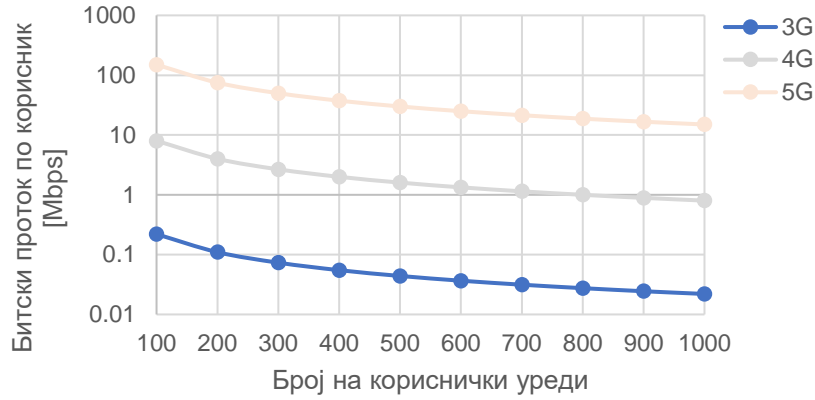
Слика 8.72 Споредба на битскиот проток кај 5G мобилни мрежи во околина на магла и облак во зависност од растојанието меѓу корисничкиот уред и базната станица за 500 кориснички уреди во uplink насока



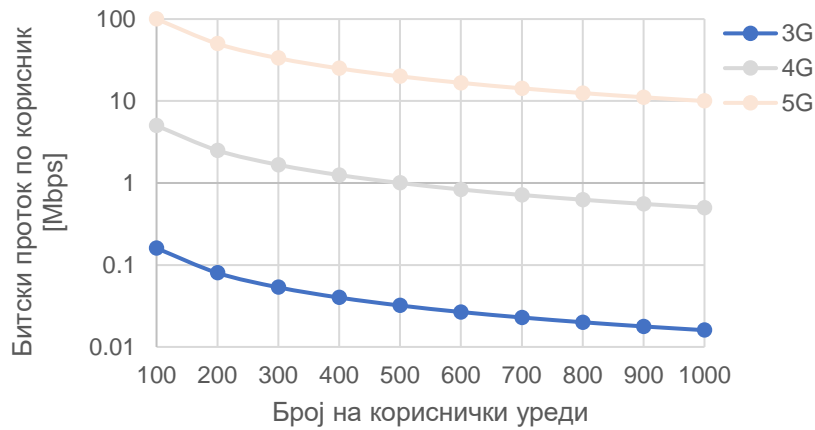
Слика 8.73 Споредба на битскиот проток кај 3G, 4G и 5G мобилни мрежи во околина на магла во зависност од бројот на кориснички уреди при растојание од 0 до 500 метри во uplink насока



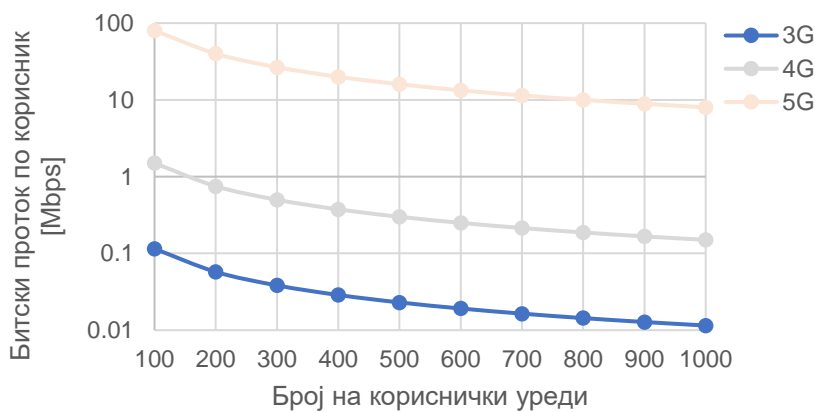
Слика 8.74 Споредба на битскиот проток кај 3G, 4G и 5G мобилни мрежи во околина на магла во зависност од бројот на кориснички уреди при растојание од 500 до 1000 метри во uplink насока



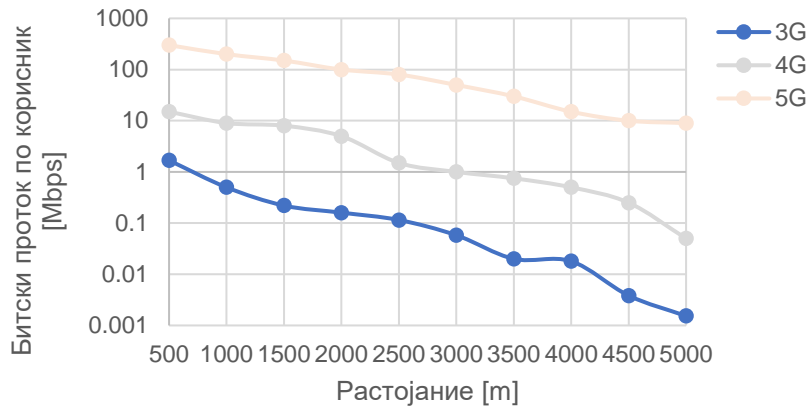
Слика 8.75 Споредба на битскиот проток кај 3G, 4G и 5G мобилни мрежи во околина на магла во зависност од бројот на кориснички уреди при растојание од 1000 до 1500 метри во uplink насока



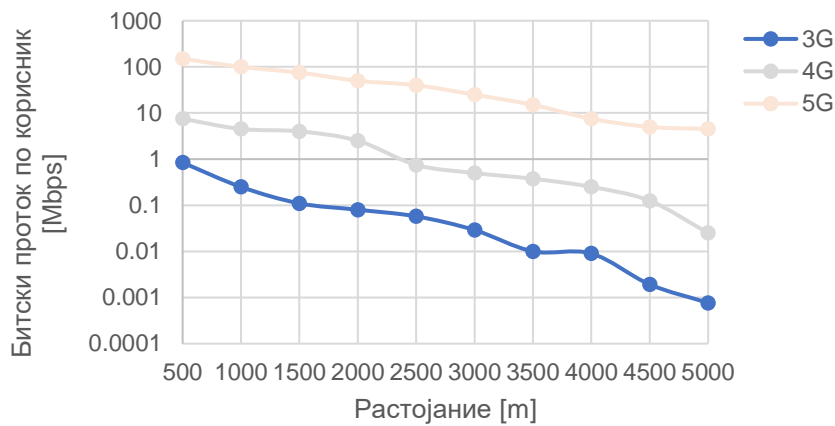
Слика 8.76 Споредба на битскиот проток кај 3G, 4G и 5G мобилни мрежи во околина на магла во зависност од бројот на кориснички уреди при растојание од 1500 до 2000 метри во uplink насока



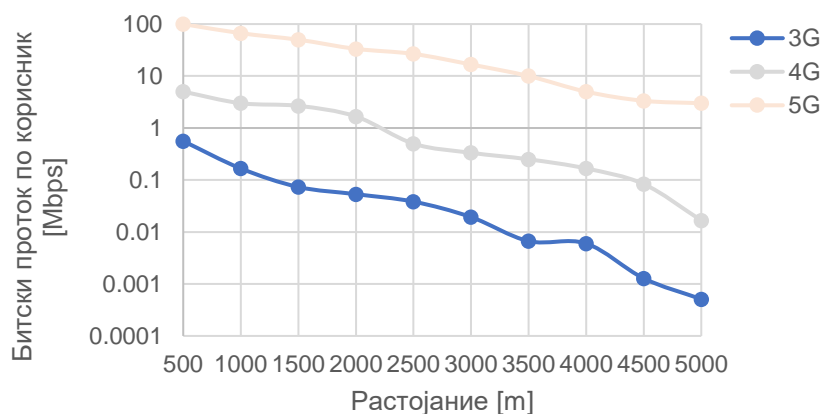
Слика 8.77 Споредба на битскиот проток кај 3G, 4G и 5G мобилни мрежи во околина на магла во зависност од бројот на кориснички уреди при растојание од 2000 до 2500 метри во uplink насока



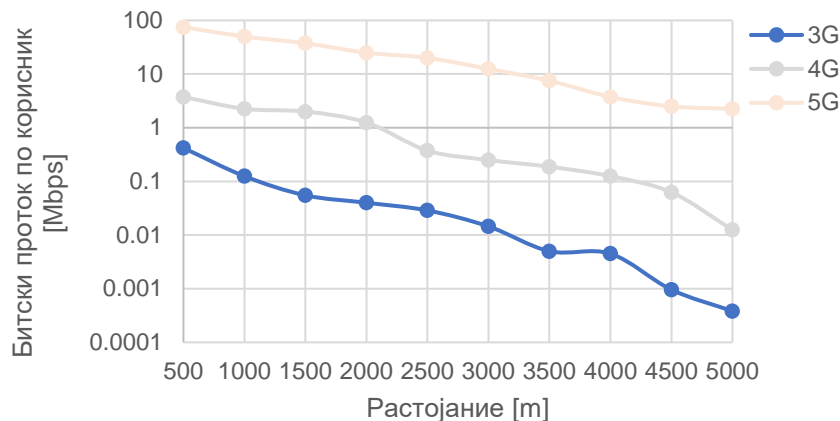
Слика 8.78 Споредба на битскиот проток кај 3G, 4G и 5G мобилни мрежи во околина на магла во зависност од растојанието меѓу корисничкиот уред и базната станица за 100 кориснички уреди во uplink насока



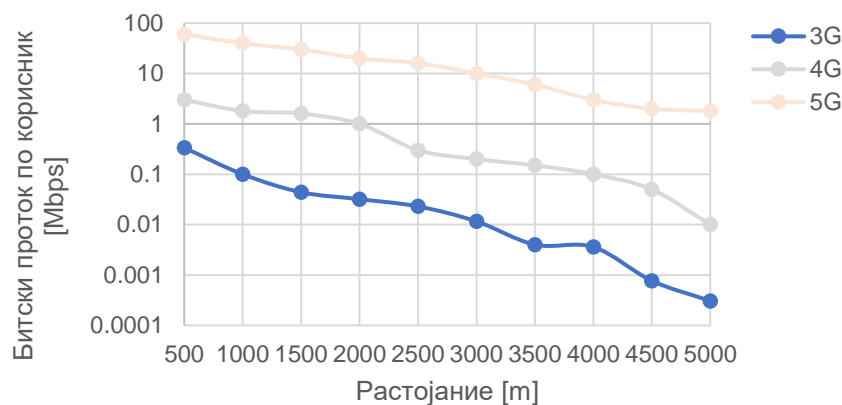
Слика 8.79 Споредба на битскиот проток кај 3G, 4G и 5G мобилни мрежи во околина на магла во зависност од растојанието меѓу корисничкиот уред и базната станица за 200 кориснички уреди во uplink насока



Слика 8.80 Споредба на битскиот проток кај 3G, 4G и 5G мобилни мрежи во околина на магла во зависност од растојанието меѓу корисничкиот уред и базната станица за 300 кориснички уреди во uplink насока



Слика 8.81 Споредба на битскиот проток кај 3G, 4G и 5G мобилни мрежи во околина на магла во зависност од растојанието меѓу корисничкиот уред и базната станица за 400 кориснички уреди во uplink насока



Слика 8.82 Споредба на битскиот проток кај 3G, 4G и 5G мобилни мрежи во околина на магла во зависност од растојанието меѓу корисничкиот уред и базната станица за 500 кориснички уреди во uplink насока

#### 8.4 Енергетска ефикасност

Намалувањето на потрошената моќност од страна на мрежите и уредите е од огромна важност за економската и еколошката одржливост на индустријата. Општиот принцип во индустријата за минимизација на потрошувачката на енергија кај мрежата и корисничкиот уред треба да ги опфати сите генерации на технологија, кој е препознаен како еколошка цел, исто така значително влијае врз намалувањето оперативните трошоци за водењето на една мрежа [119]. Дополнително намалувањето на потрошувачката на енергија ќе резултира до поголем животен век на батериите кај мобилните кориснички уреди, кое пак од своја страна ќе допринесе до поголемо задоволство на корисниците на мобилни уреди.

Еден од можните начини за намалување на потрошувачката на енергија кај 5G мобилните мрежи е со имплементација на маглата. Еден од параметрите со кои може да се испита потрошувачката на енергија кај било која мрежа е со помош на енергетската ефикасност [117], [120].

Енергетската ефикасност  $EE$  го претставува количеството на податоци што може да се пренесе низ потрошената моќност, обично низ една клетка и претставува однос меѓу битскиот проток по корисник  $R$  и моќноста  $P$ :

$$EE = \frac{R \left[ \frac{\text{[bit/s/cell]}}{\text{[Joule/s/cell]}} \right]}{P \left[ \frac{\text{[bit]}}{\text{[Joule]}} \right]} \quad (4)$$

Реципрочната вредност на енергетската ефикасност претставува потрошената енергија по бит по корисник  $E$  и претставува однос меѓу потрошената моќност по корисник во клетка  $P$  и просечниот битски проток по корисник во клетка  $R$ :

$$E = \frac{1}{EE} = \frac{P \left[ \frac{\text{[Joule/s/cell]}}{\text{[bit/s/cell]}} \right]}{R \left[ \frac{\text{[Joule]}}{\text{[bit]}} \right]} \quad (5)$$

Во релациите (4) и (5)  $R$  претставува битски проток по корисник и за него е веќе дискутирано во Секцијата 8.3.

Потрошената моќност  $P$  може да се изрази преку битскиот проток  $R$  со помош на следнава линеарна релација [121]:

$$P = \alpha R + \beta \quad (6)$$

каде  $\alpha$  е коефициент кој ја дава моќноста неопходна за битскиот пренос на податоци (во downlink или uplink насока), а  $\beta$  е коефициент кој ја дава моќноста во мирување [122]. Во Табела 8.4 се дадени вредностите на овие коефициенти за 3G, 4G и 5G мобилни мрежи.

**Табела 8.4 Типични вредности за коефициентите за потрошената моќност**

Мобилна мрежа	$\alpha$ [mW/Mbps] (downlink насока)	$\alpha$ [mW/Mbps] (uplink насока)	$\beta$ [mW]
3G	122,12	868,98	817,88
4G	51,97	438,39	1288,04
5G	6,5	65	11475,97



Во продолжение следуваат резултатите за енергетската ефикасност и тоа:

### 3. Downlink насока

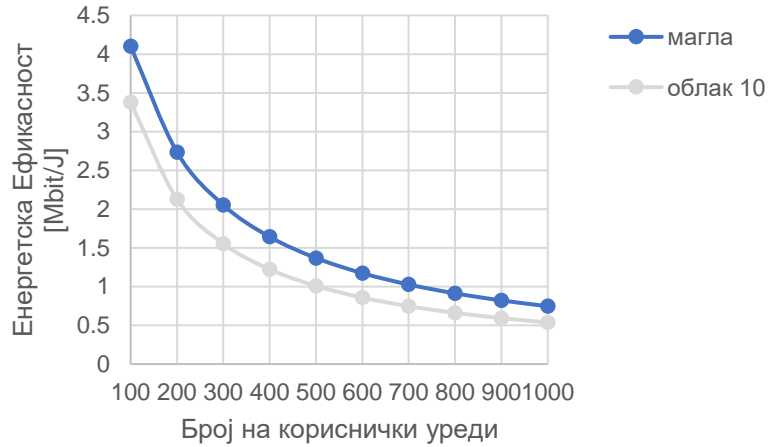
- Споредба на енергетската ефикасност кај 3G мобилни мрежи во околина на магла и облак во зависност од бројот на кориснички уреди при дадено растојание на Слика 8.83 – Слика 8.87;
- Споредба на енергетската ефикасност кај 3G мобилни мрежи во околина на магла и облак во зависност растојанието при даден број на кориснички уреди на Слика 8.88 – Слика 8.92;
- Споредба на енергетската ефикасност кај 4G мобилни мрежи во околина на магла и облак во зависност од бројот на кориснички уреди при дадено растојание на Слика 8.93 – Слика 8.97;
- Споредба на енергетската ефикасност кај 4G мобилни мрежи во околина на магла и облак во зависност растојанието при даден број на кориснички уреди на Слика 8.98 – Слика 8.102;
- Споредба на енергетската ефикасност кај 5G мобилни мрежи во околина на магла и облак во зависност од бројот на кориснички уреди при дадено растојание на Слика 8.103 – Слика 8.107;
- Споредба на енергетската ефикасност кај 5G мобилни мрежи во околина на магла и облак во зависност растојанието при даден број на кориснички уреди на Слика 8.108 – Слика 8.112;
- Споредба на енергетската ефикасност кај 3G, 4G и 5G мобилни мрежи во околина на магла во зависност од бројот на кориснички уреди при дадено растојание на Слика 8.113 – Слика 8.117;
- Споредба на енергетската ефикасност кај 3G, 4G и 5G мобилни мрежи во околина на магла и облак во зависност растојанието при даден број на кориснички уреди на Слика 8.118 – Слика 8.122;

### 4. Uplink насока

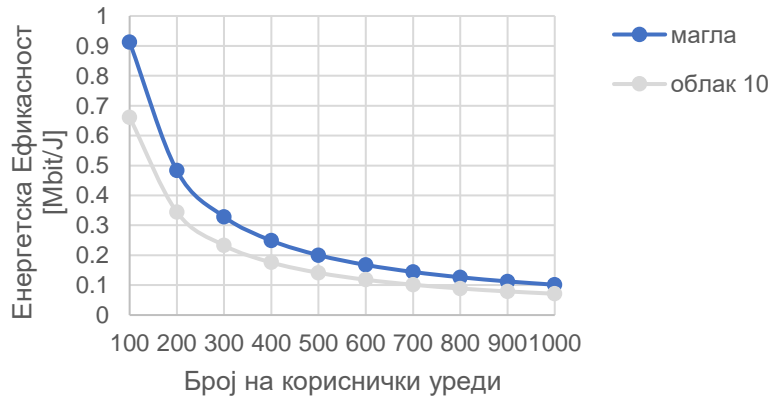
- Споредба на енергетската ефикасност кај 3G мобилни мрежи во околина на магла и облак во зависност од бројот на кориснички уреди при дадено растојание на Слика 8.123 – Слика 8.127;
- Споредба на енергетската ефикасност кај 3G мобилни мрежи во околина на магла и облак во зависност растојанието при даден број на кориснички уреди на Слика 8.128 – Слика 8.132;

- Споредба на енергетската ефикасност кај 4G мобилни мрежи во околина на магла и облак во зависност од бројот на кориснички уреди при дадено растојание на Слика 8.133 – Слика 8.137;
- Споредба на енергетската ефикасност кај 4G мобилни мрежи во околина на магла и облак во зависност растојанието при даден број на кориснички уреди на Слика 8.138 – Слика 8.142;
- Споредба на енергетската ефикасност кај 5G мобилни мрежи во околина на магла и облак во зависност од бројот на кориснички уреди при дадено растојание на Слика 8.143 – Слика 8.147;
- Споредба на енергетската ефикасност кај 5G мобилни мрежи во околина на магла и облак во зависност растојанието при даден број на кориснички уреди на Слика 8.148 – Слика 8.152;
- Споредба на енергетската ефикасност кај 3G, 4G и 5G мобилни мрежи во околина на магла во зависност од бројот на кориснички уреди при дадено растојание на Слика 8.153 – Слика 8.157; и
- Споредба на енергетската ефикасност кај 3G, 4G и 5G мобилни мрежи во околина на магла и облак во зависност растојанието при даден број на кориснички уреди на Слика 8.158 – Слика 8.162.

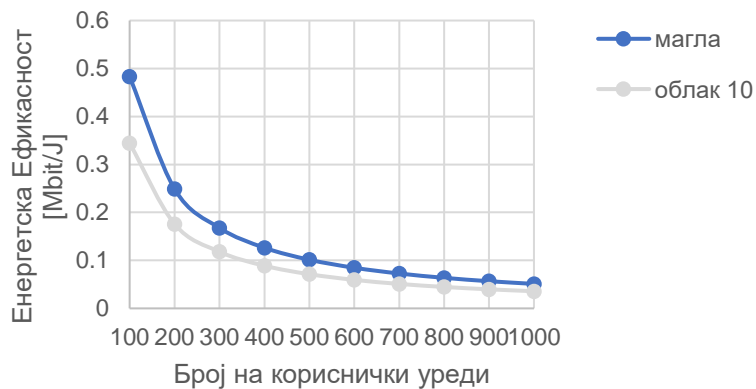
Од сите графици може да се види дека енергетската ефикасност се намалува со зголемување на бројот на кориснички уреди и со зголемување на растојанието. 5G мобилната мрежа има далеку подобра енергетска ефикасност од 3G и 4G мобилните мрежи. Исто така енергетската ефикасност кај 3G, 4G или 5G мобилните мрежи во околина на магла има подобри вредности, него во околина на облак.



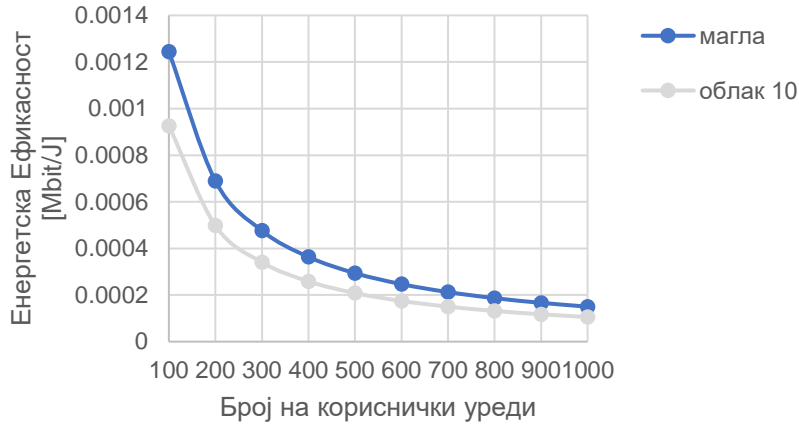
Слика 8.83 Споредба на енергетската ефикасност кај 3G мобилни мрежи во околина на магла и облак во зависност од бројот на кориснички уреди при растојание од 0 до 500 метри во downlink насока



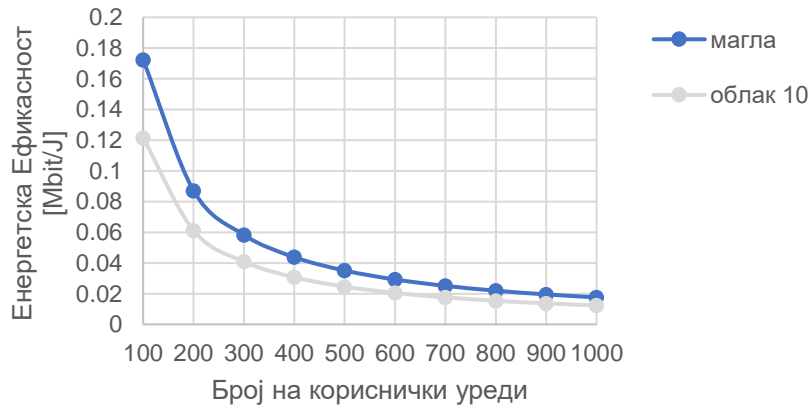
Слика 8.84 Споредба на енергетската ефикасност кај 3G мобилни мрежи во околина на магла и облак во зависност од бројот на кориснички уреди при растојание од 500 до 1000 метри во downlink насока



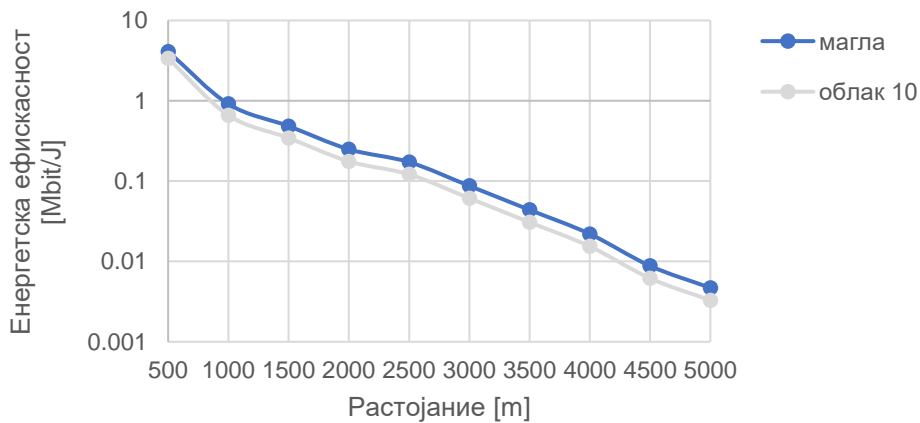
Слика 8.85 Споредба на енергетската ефикасност кај 3G мобилни мрежи во околина на магла и облак во зависност од бројот на кориснички уреди при растојание од 1000 до 1500 метри во downlink насока



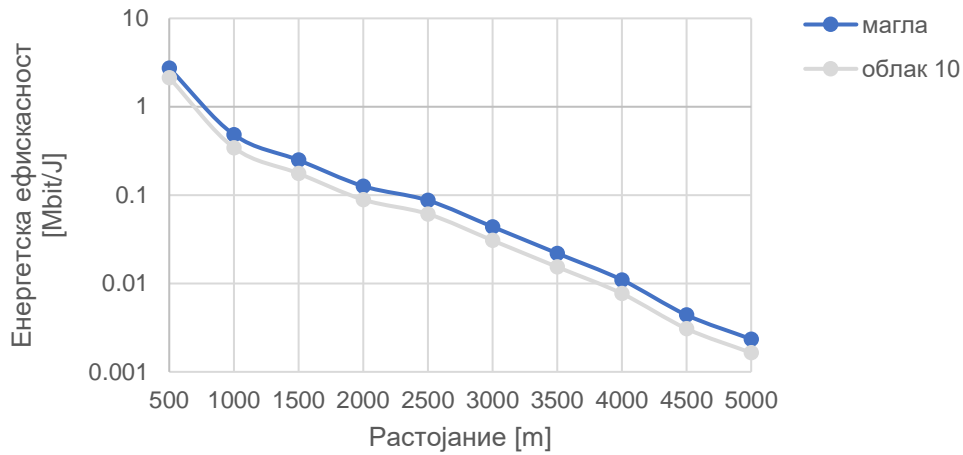
Слика 8.86 Споредба на енергетската ефикасност кај 3G мобилни мрежи во околина на магла и облак во зависност од бројот на кориснички уреди при растојание од 1500 до 2000 метри во downlink насока



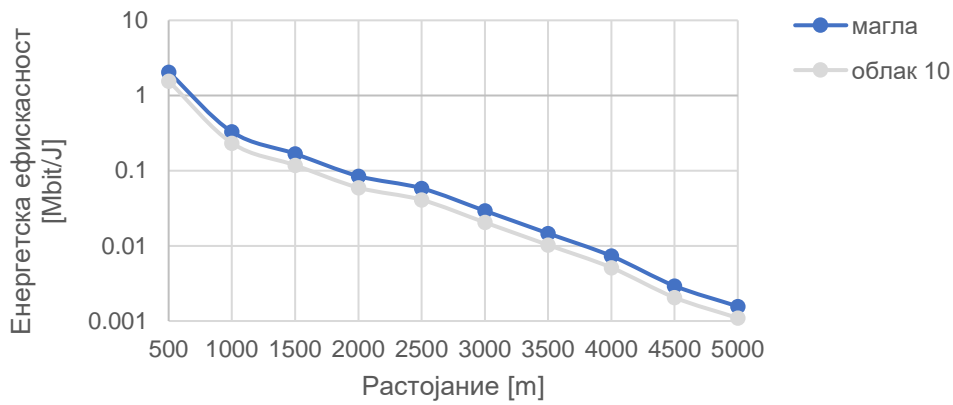
Слика 8.87 Споредба на енергетската ефикасност кај 3G мобилни мрежи во околина на магла и облак во зависност од бројот на кориснички уреди при растојание од 2000 до 2500 метри во downlink насока



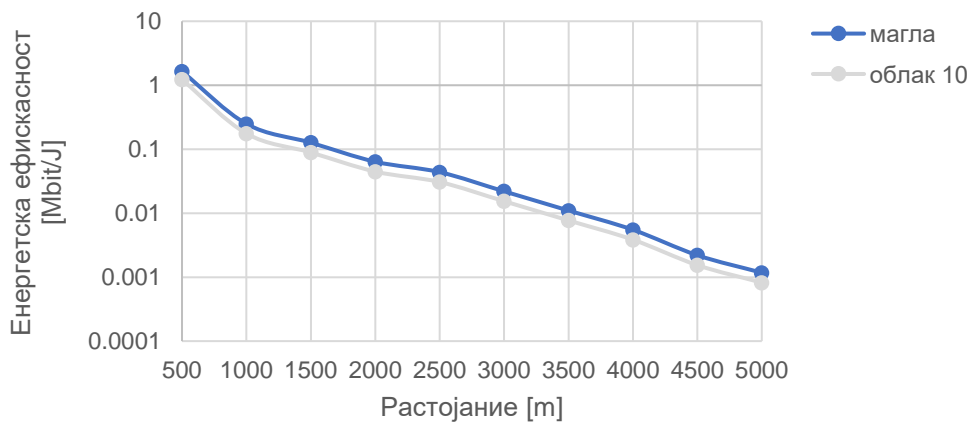
Слика 8.88 Споредба на енергетската ефикасност кај 3G мобилни мрежи во околина на магла и облак во зависност од растојанието меѓу корисничкиот уред и базната станица за 100 кориснички уреди во downlink насока



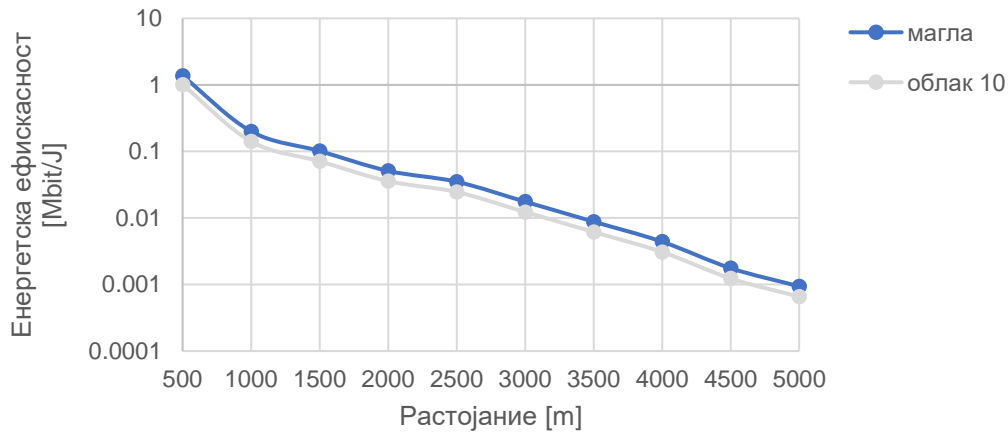
Слика 8.89 Споредба на енергетската ефикасност кај 3G мобилни мрежи во околина на магла и облак во зависност од растојанието меѓу корисничкиот уред и базната станица за 200 кориснички уреди во downlink насока



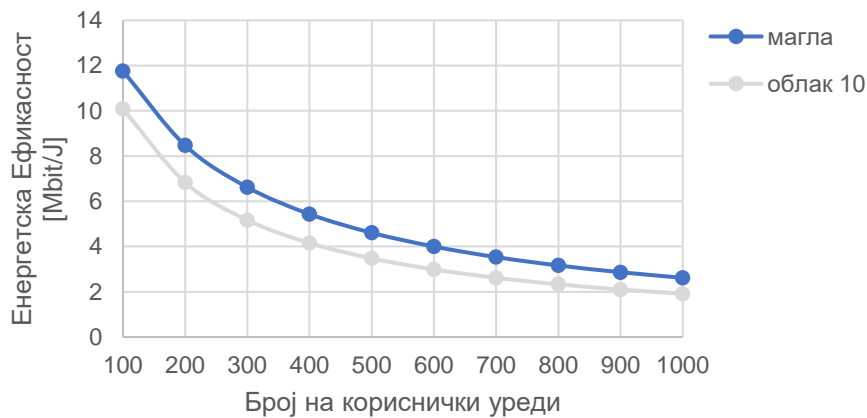
Слика 8.90 Споредба на енергетската ефикасност кај 3G мобилни мрежи во околина на магла и облак во зависност од растојанието меѓу корисничкиот уред и базната станица за 300 кориснички уреди во downlink насока



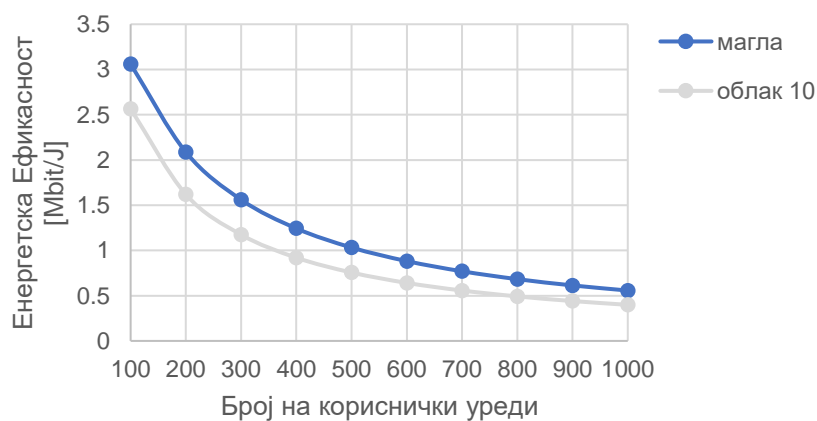
Слика 8.91 Споредба на енергетската ефикасност кај 3G мобилни мрежи во околина на магла и облак во зависност од растојанието меѓу корисничкиот уред и базната станица за 400 кориснички уреди во downlink насока



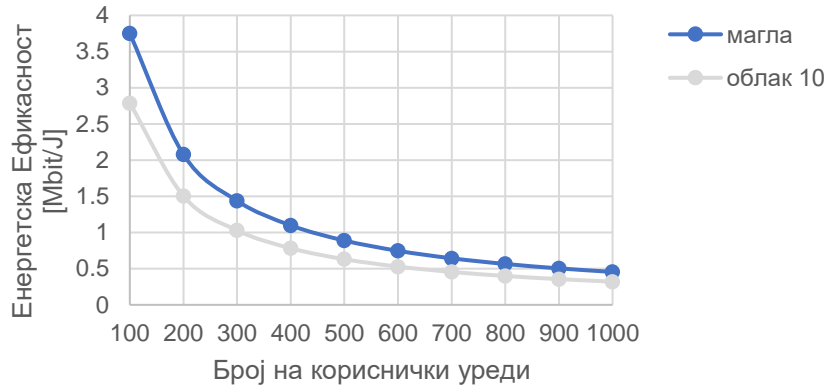
Слика 8.92 Споредба на енергетската ефикасност кај 3G мобилни мрежи во околина на магла и облак во зависност од растојанието меѓу корисничкиот уред и базната станица за 500 кориснички уреди во downlink насока



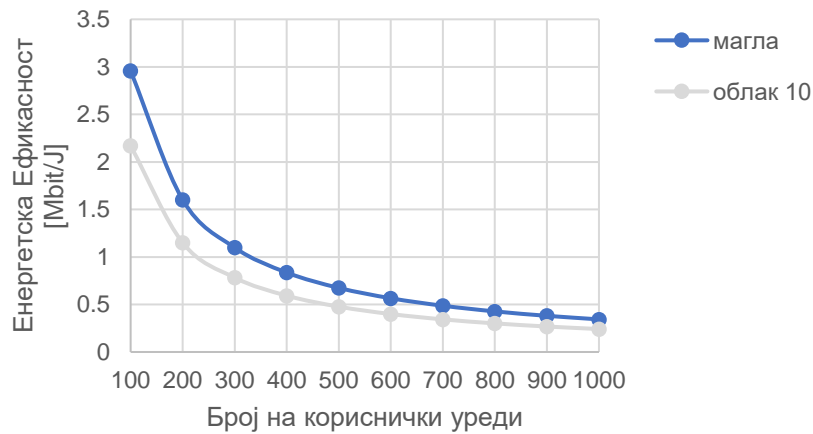
Слика 8.93 Споредба на енергетската ефикасност кај 4G мобилни мрежи во околина на магла и облак во зависност од бројот на кориснички уреди при растојание од 0 до 500 метри во downlink насока



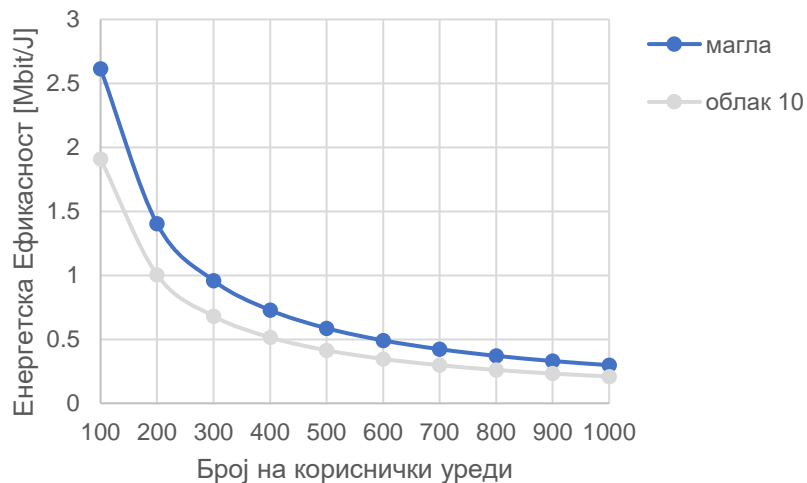
Слика 8.94 Споредба на енергетската ефикасност кај 4G мобилни мрежи во околина на магла и облак во зависност од бројот на кориснички уреди при растојание од 500 до 1000 метри во downlink насока



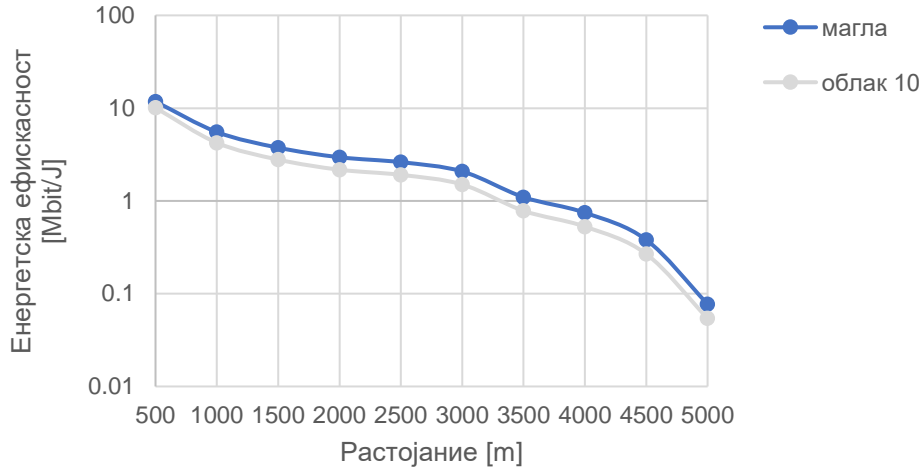
Слика 8.95 Споредба на енергетската ефикасност кај 4G мобилни мрежи во околина на магла и облак во зависност од бројот на кориснички уреди при растојание од 1000 до 1500 метри во downlink насока



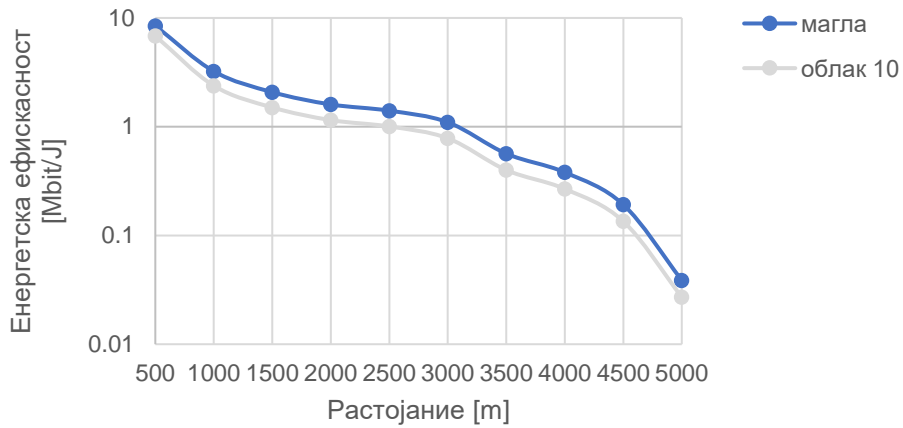
Слика 8.96 Споредба на енергетската ефикасност кај 4G мобилни мрежи во околина на магла и облак во зависност од бројот на кориснички уреди при растојание од 1500 до 2000 метри во downlink насока



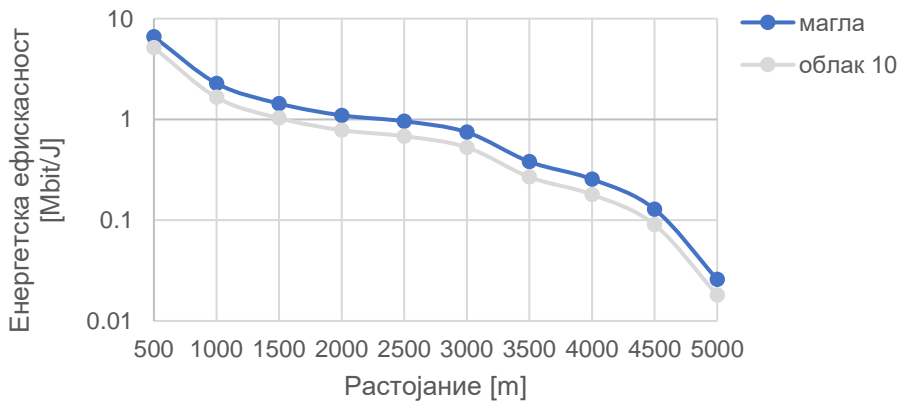
Слика 8.97 Споредба на енергетската ефикасност кај 4G мобилни мрежи во околина на магла и облак во зависност од бројот на кориснички уреди при растојание од 2000 до 2500 метри во downlink насока



Слика 8.98 Споредба на енергетската ефикасност кај 4G мобилни мрежи во околина на магла и облак во зависност од растојанието меѓу корисничкиот уред и базната станица за 100 кориснички уреди во downlink насока

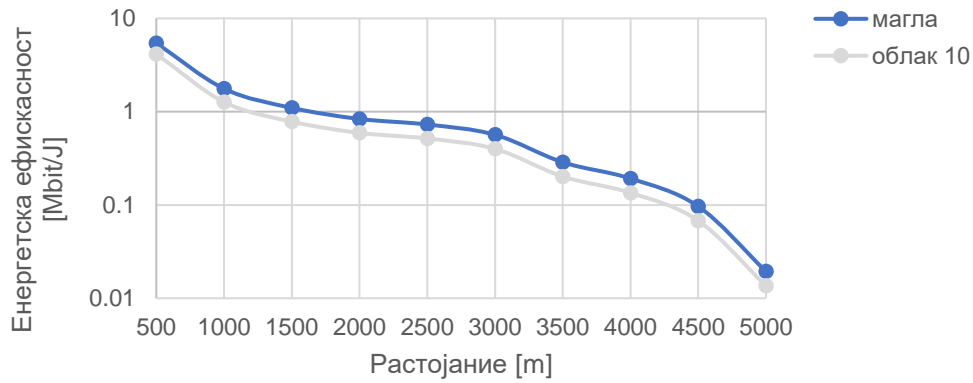


Слика 8.99 Споредба на енергетската ефикасност кај 4G мобилни мрежи во околина на магла и облак во зависност од растојанието меѓу корисничкиот уред и базната станица за 200 кориснички уреди во downlink насока

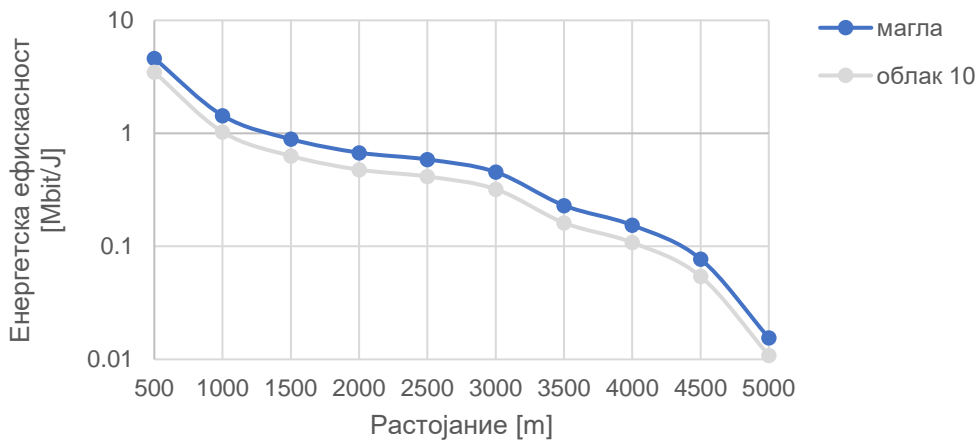


Слика 8.100 Споредба на енергетската ефикасност кај 4G мобилни мрежи во околина на магла и облак во зависност од растојанието меѓу корисничкиот уред и базната станица за 300 кориснички уреди во downlink насока

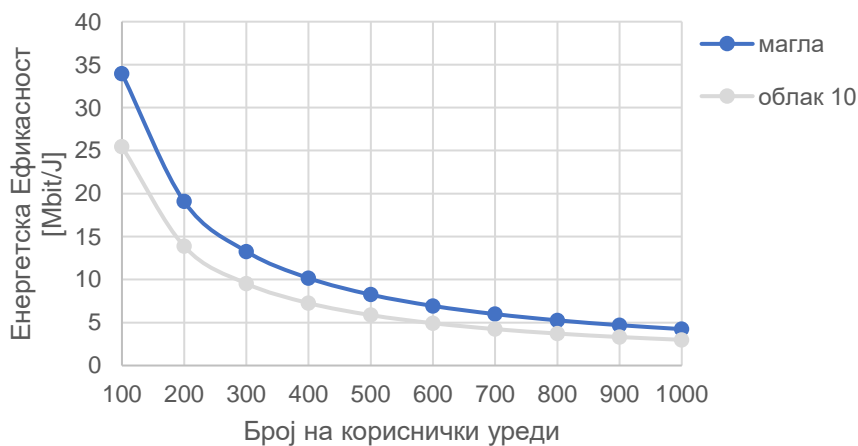




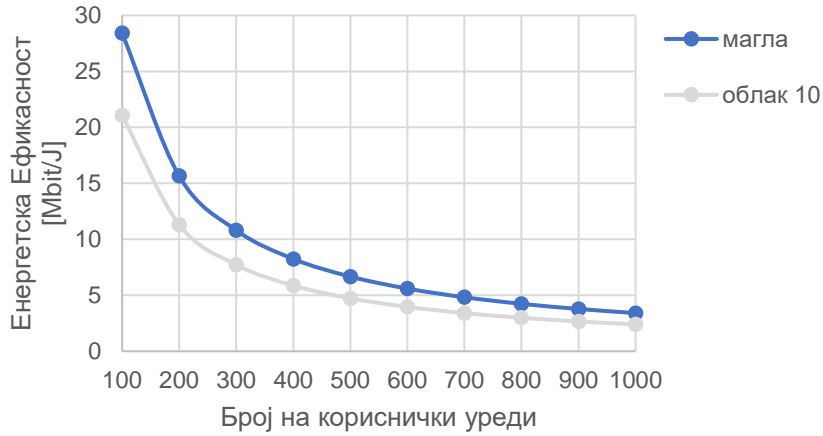
Слика 8.101 Споредба на енергетската ефикасност кај 4G мобилни мрежи во околина на магла и облак во зависност од растојанието меѓу корисничкиот уред и базната станица за 400 кориснички уреди во downlink насока



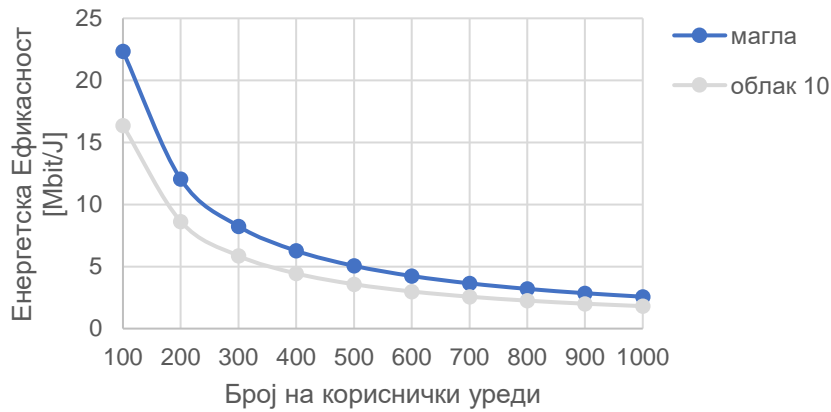
Слика 8.102 Споредба на енергетската ефикасност кај 4G мобилни мрежи во околина на магла и облак во зависност од растојанието меѓу корисничкиот уред и базната станица за 500 кориснички уреди во downlink насока



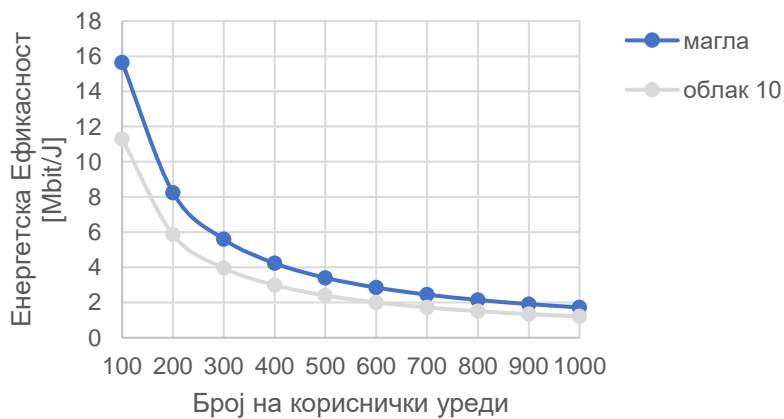
Слика 8.103 Споредба на енергетската ефикасност кај 5G мобилни мрежи во околина на магла и облак во зависност од бројот на кориснички уреди при растојание од 0 до 500 метри во downlink насока



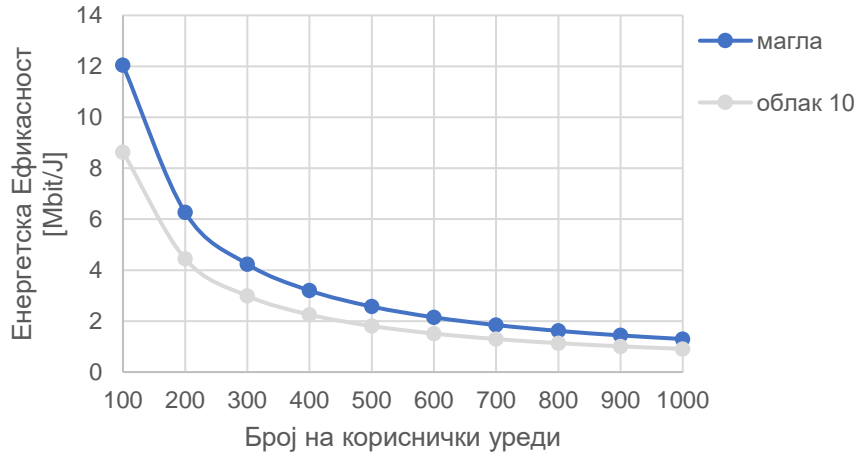
Слика 8.104 Споредба на енергетската ефикасност кај 5G мобилни мрежи во околина на магла и облак во зависност од бројот на кориснички уреди при растојание од 500 до 1000 метри во downlink насока



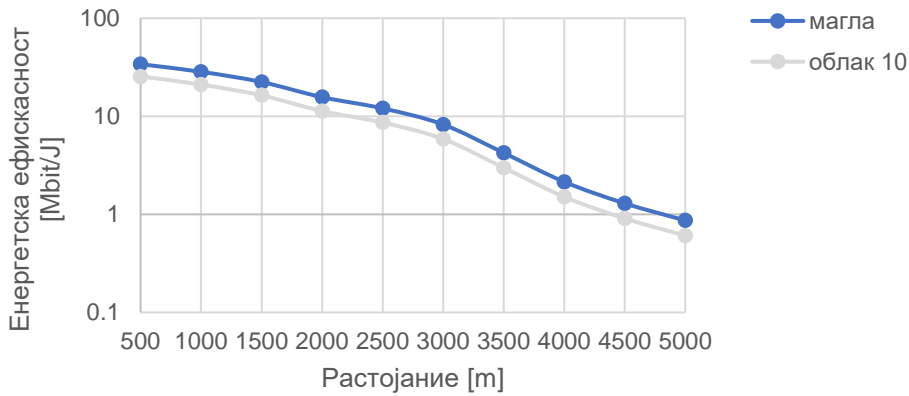
Слика 8.105 Споредба на енергетската ефикасност кај 5G мобилни мрежи во околина на магла и облак во зависност од бројот на кориснички уреди при растојание од 1000 до 1500 метри во downlink насока



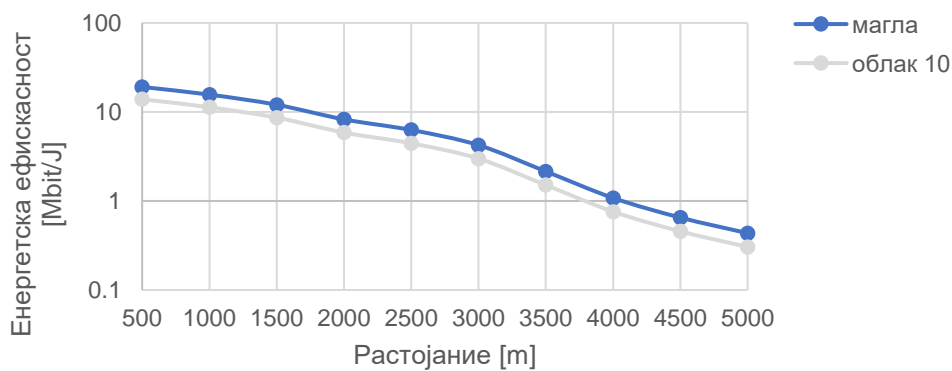
Слика 8.106 Споредба на енергетската ефикасност кај 5G мобилни мрежи во околина на магла и облак во зависност од бројот на кориснички уреди при растојание од 1500 до 2000 метри во downlink насока



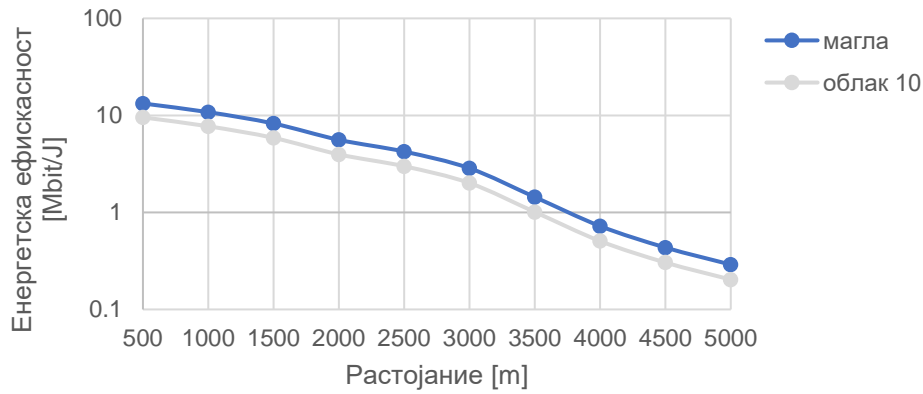
Слика 8.107 Споредба на енергетската ефикасност кај 5G мобилни мрежи во околина на магла и облак во зависност од бројот на кориснички уреди при растојание од 2000 до 2500 метри во downlink насока



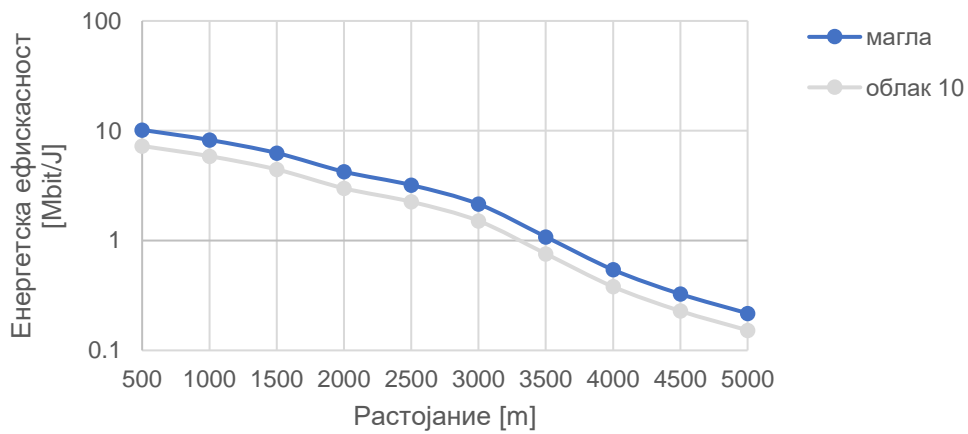
Слика 8.108 Споредба на енергетската ефикасност кај 5G мобилни мрежи во околина на магла и облак во зависност од растојанието меѓу корисничкиот уред и базната станица за 100 кориснички уреди во downlink насока



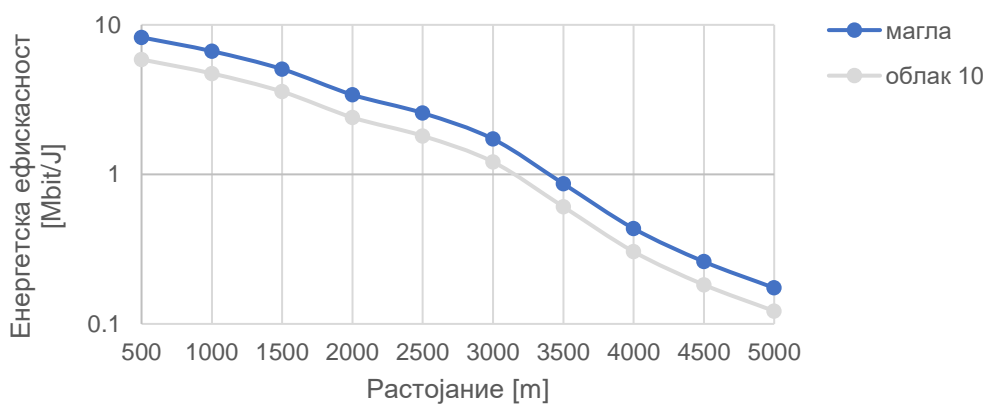
Слика 8.109 Споредба на енергетската ефикасност кај 5G мобилни мрежи во околина на магла и облак во зависност од растојанието меѓу корисничкиот уред и базната станица за 200 кориснички уреди во downlink насока



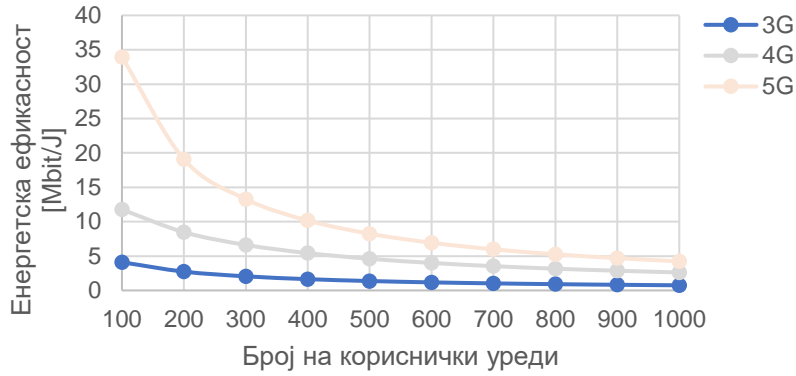
Слика 8.110 Споредба на енергетската ефикасност кај 5G мобилни мрежи во околина на магла и облак во зависност од растојанието меѓу корисничкиот уред и базната станица за 300 кориснички уреди во downlink насока



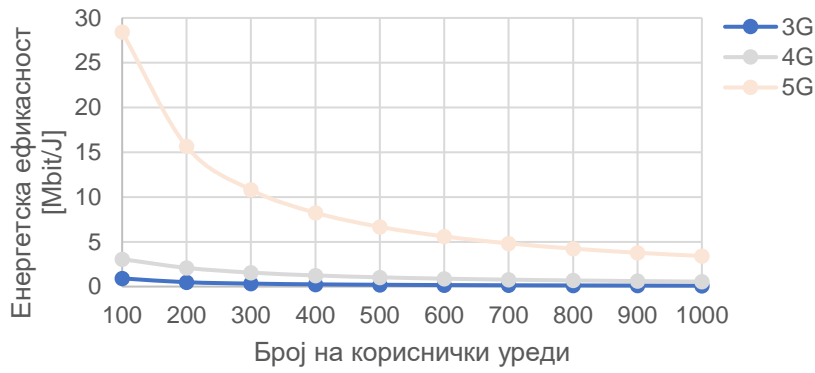
Слика 8.111 Споредба на енергетската ефикасност кај 5G мобилни мрежи во околина на магла и облак во зависност од растојанието меѓу корисничкиот уред и базната станица за 100 кориснички уреди во downlink насока



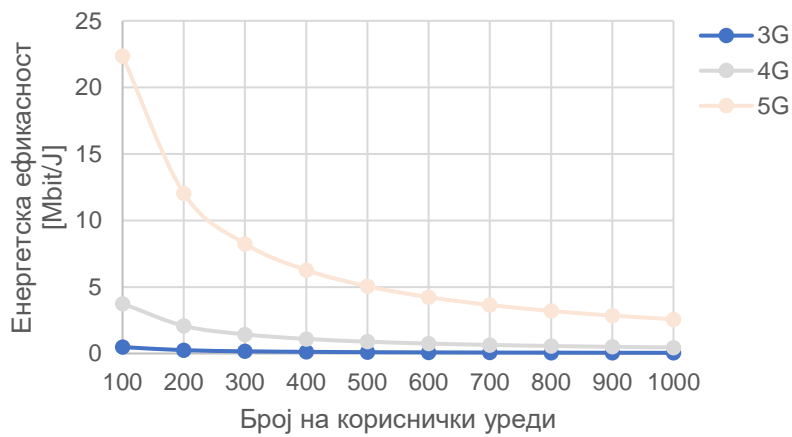
Слика 8.112 Споредба на енергетската ефикасност кај 5G мобилни мрежи во околина на магла и облак во зависност од растојанието меѓу корисничкиот уред и базната станица за 500 кориснички уреди во downlink насока



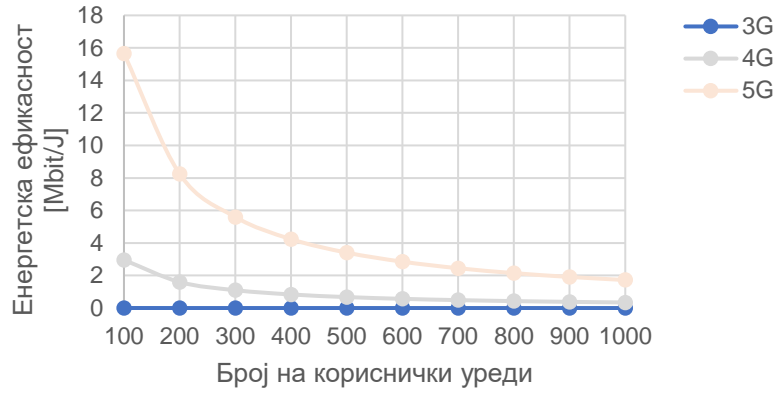
Слика 8.113 Споредба на енергетската ефикасност кај 3G, 4G и 5G мобилни мрежи во околина на магла во зависност од бројот на кориснички уреди при растојание од 0 до 500 метри во downlink насока



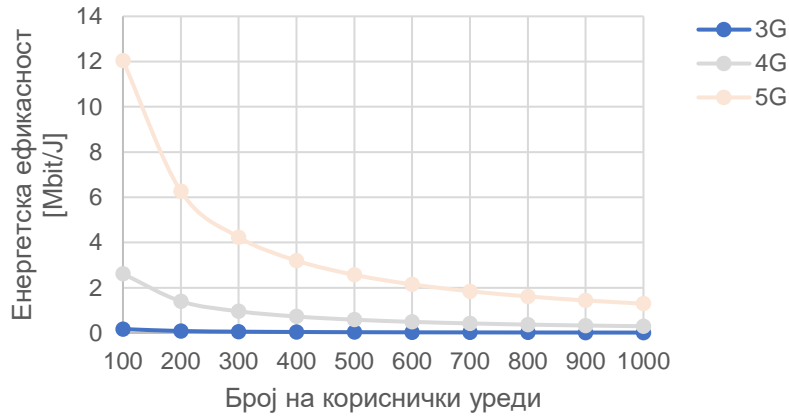
Слика 8.114 Споредба на енергетската ефикасност кај 3G, 4G и 5G мобилни мрежи во околина на магла во зависност од бројот на кориснички уреди при растојание од 500 до 1000 метри во downlink насока



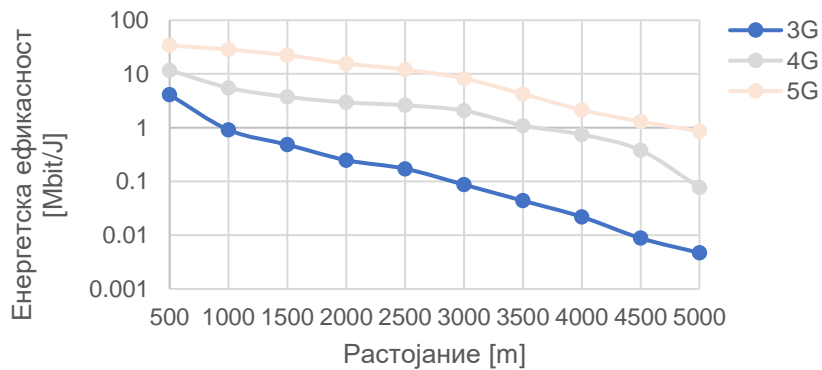
Слика 8.115 Споредба на енергетската ефикасност кај 3G, 4G и 5G мобилни мрежи во околина на магла во зависност од бројот на кориснички уреди при растојание од 1000 до 1500 метри во downlink насока



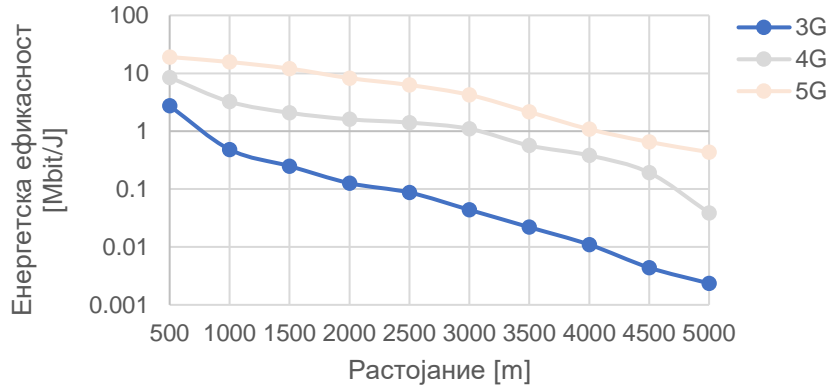
Слика 8.116 Споредба на енергетската ефикасност кај 3G, 4G и 5G мобилни мрежи во околина на магла во зависност од бројот на кориснички уреди при растојание од 1500 до 2500 метри во downlink насока



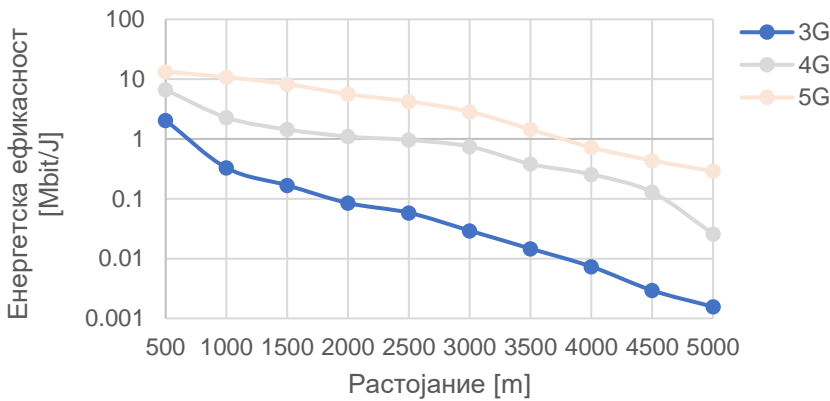
Слика 8.117 Споредба на енергетската ефикасност кај 3G, 4G и 5G мобилни мрежи во околина на магла во зависност од бројот на кориснички уреди при растојание од 2000 до 2500 метри во downlink насока



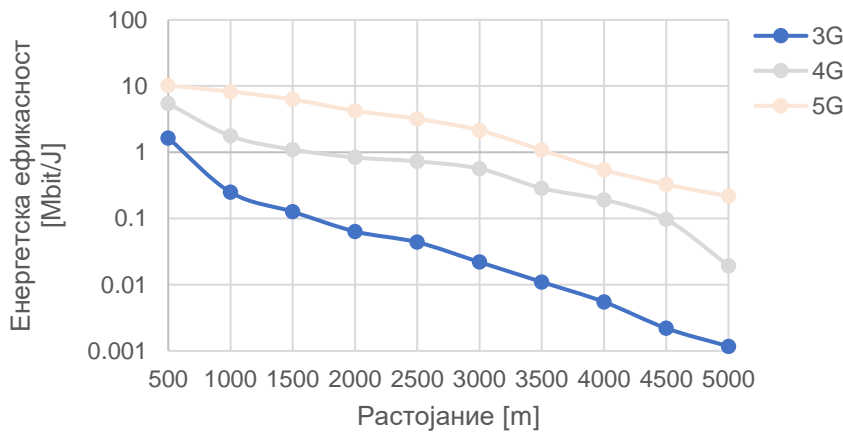
Слика 8.118 Споредба на енергетската ефикасност кај 3G, 4G и 5G мобилни мрежи во околина на магла во зависност од растојанието меѓу корисничкиот уред и базната станица за 100 кориснички уреди во downlink насока



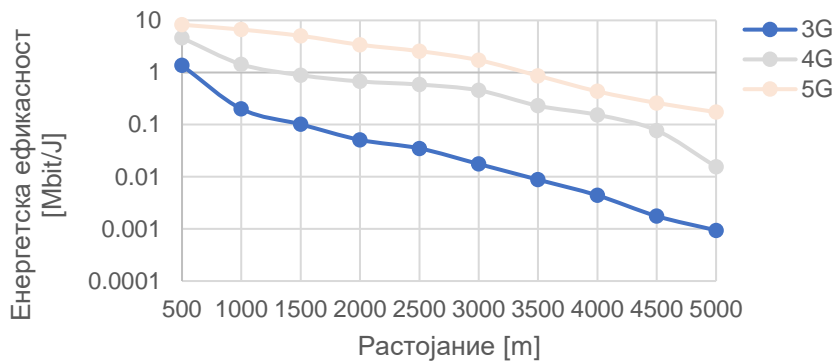
Слика 8.119 Споредба на енергетската ефикасност кај 3G, 4G и 5G мобилни мрежи во околина на магла во зависност од растојанието меѓу корисничкиот уред и базната станица за 200 кориснички уреди во downlink насока



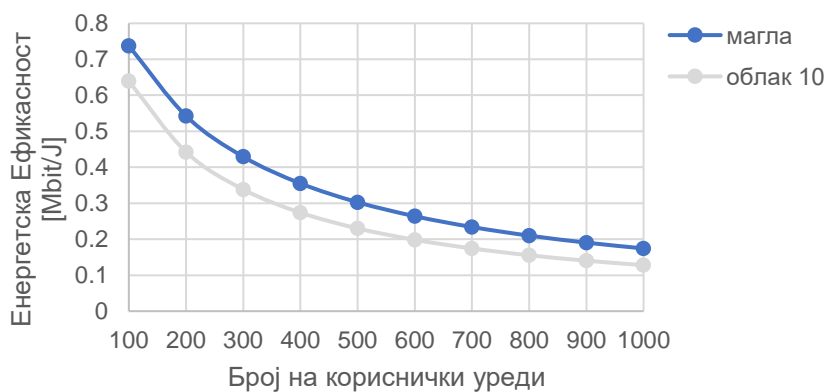
Слика 8.120 Споредба на енергетската ефикасност кај 3G, 4G и 5G мобилни мрежи во околина на магла во зависност од растојанието меѓу корисничкиот уред и базната станица за 300 кориснички уреди во downlink насока



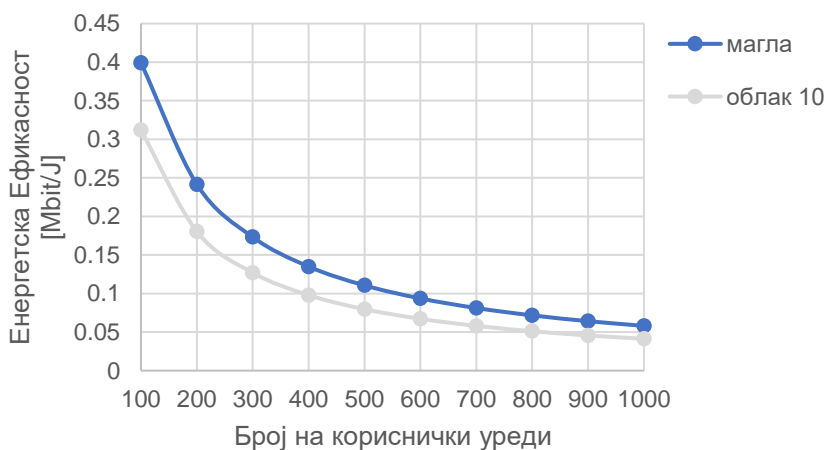
Слика 8.121 Споредба на енергетската ефикасност кај 3G, 4G и 5G мобилни мрежи во околина на магла во зависност од растојанието меѓу корисничкиот уред и базната станица за 400 кориснички уреди во downlink насока



Слика 8.122 Споредба на енергетската ефикасност кај 3G, 4G и 5G мобилни мрежи во околина на магла во зависност од растојанието меѓу корисничкиот уред и базната станица за 500 кориснички уреди во downlink насока

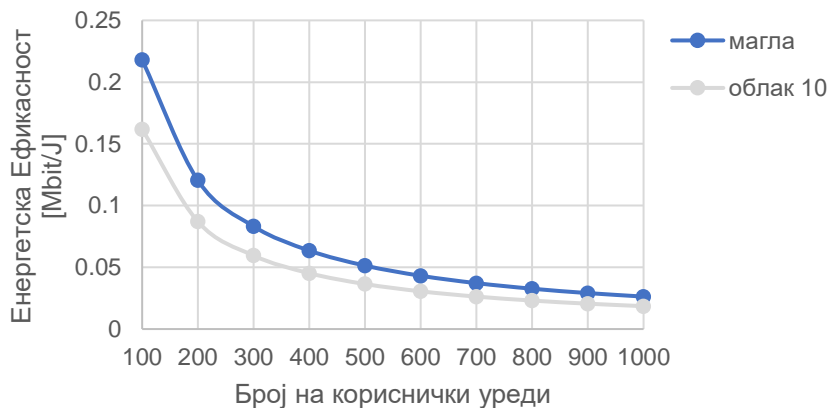


Слика 8.123 Споредба на енергетската ефикасност кај 3G мобилни мрежи во околина на магла и облак во зависност од бројот на кориснички уреди при растојание од 0 до 500 метри во uplink насока

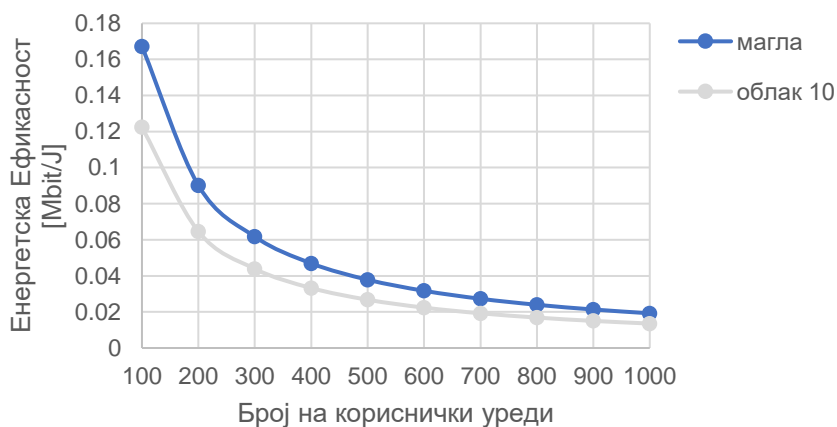


Слика 8.124 Споредба на енергетската ефикасност кај 3G мобилни мрежи во околина на магла и облак во зависност од бројот на кориснички уреди при растојание од 500 до 1000 метри во uplink насока





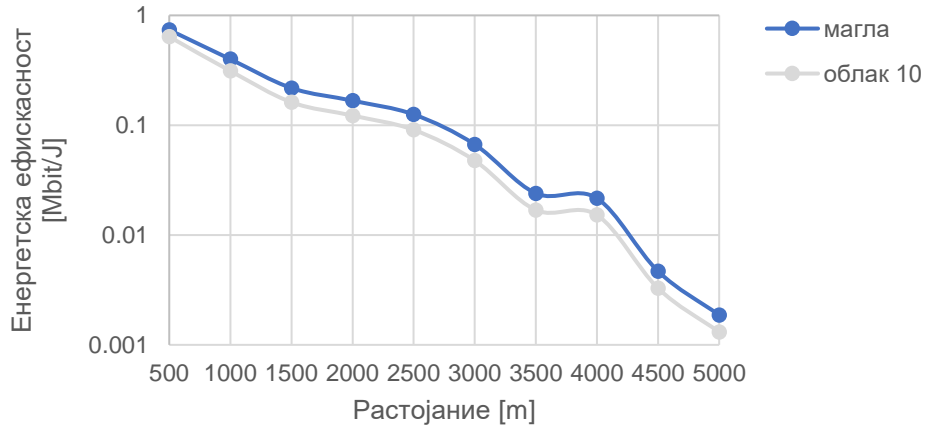
Слика 8.125 Споредба на енергетската ефикасност кај 3G мобилни мрежи во околина на магла и облак во зависност од бројот на кориснички уреди при растојание од 1000 до 1500 метри во uplink насока



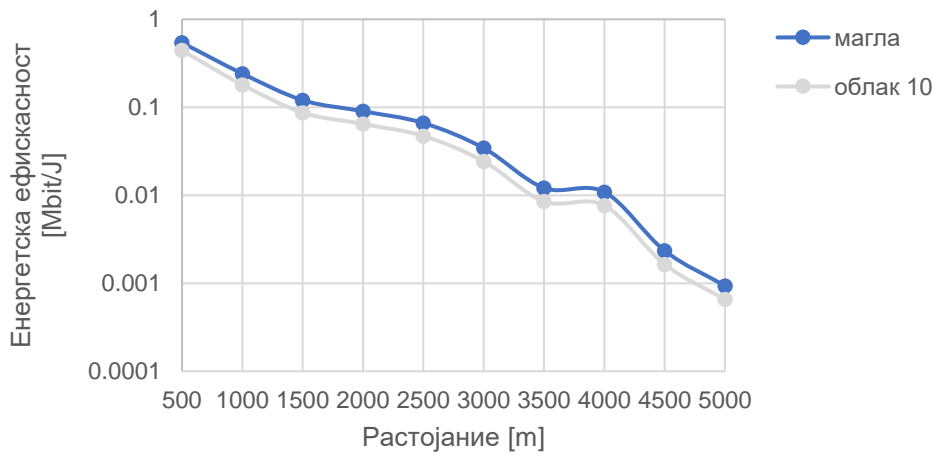
Слика 8.126 Споредба на енергетската ефикасност кај 3G мобилни мрежи во околина на магла и облак во зависност од бројот на кориснички уреди при растојание од 1500 до 2000 метри во uplink насока



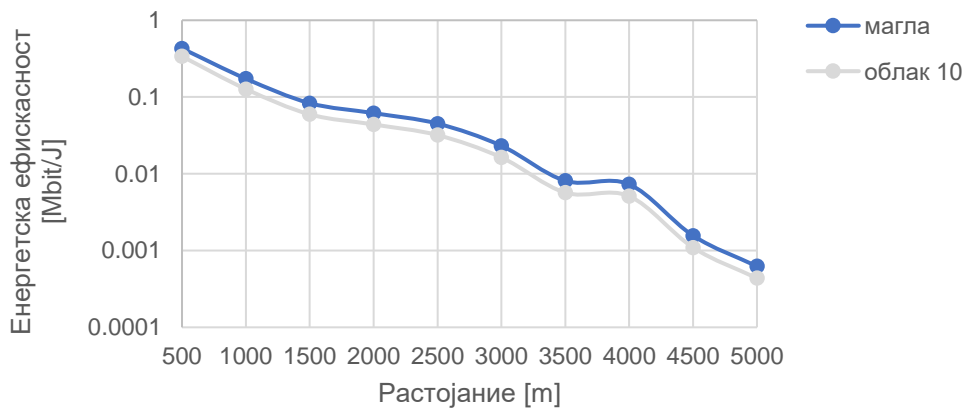
Слика 8.127 Споредба на енергетската ефикасност кај 3G мобилни мрежи во околина на магла и облак во зависност од бројот на кориснички уреди при растојание од 2000 до 2500 метри во uplink насока



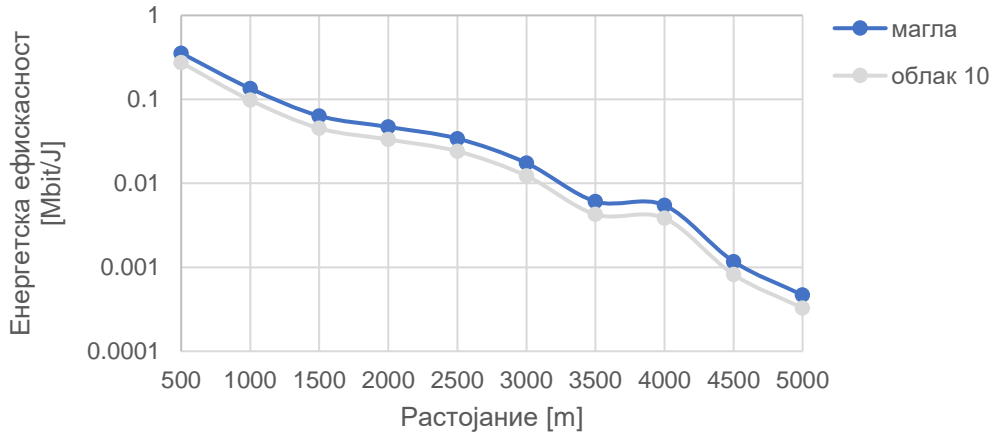
Слика 8.128 Споредба на енергетската ефикасност кај 3G мобилни мрежи во околина на магла и облак во зависност од растојанието меѓу корисничкиот уред и базната станица за 100 кориснички уреди во uplink насока



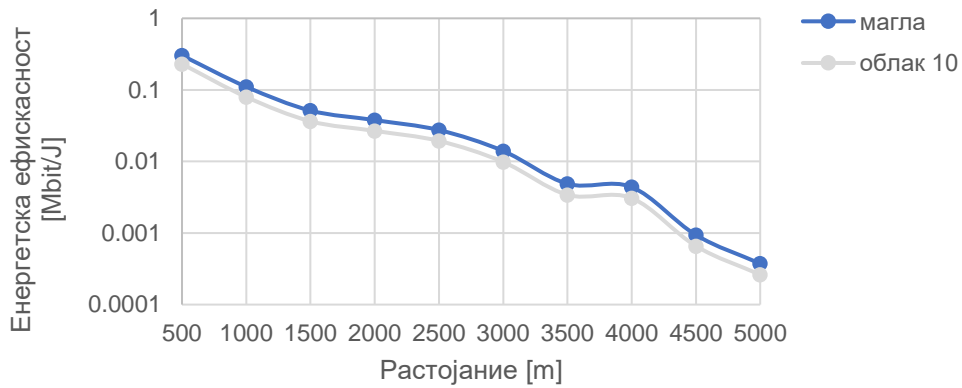
Слика 8.129 Споредба на енергетската ефикасност кај 3G мобилни мрежи во околина на магла и облак во зависност од растојанието меѓу корисничкиот уред и базната станица за 200 кориснички уреди во uplink насока



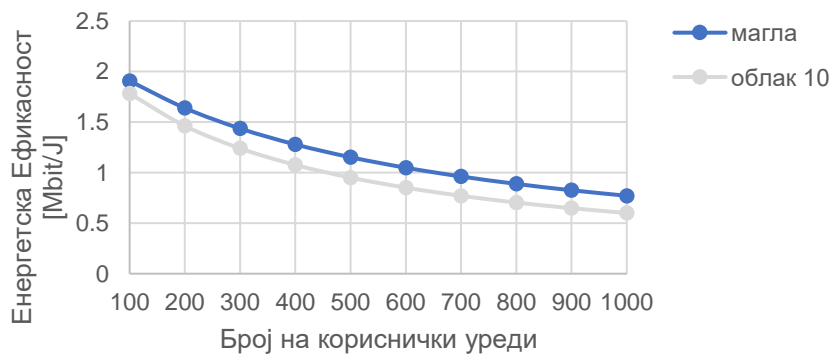
Слика 8.130 Споредба на енергетската ефикасност кај 3G мобилни мрежи во околина на магла и облак во зависност од растојанието меѓу корисничкиот уред и базната станица за 300 кориснички уреди во uplink насока



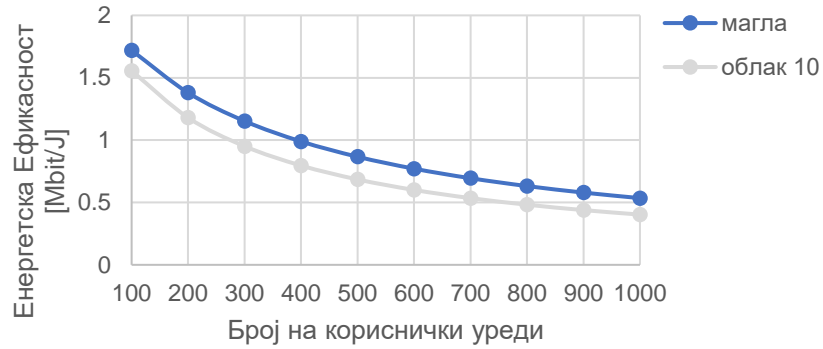
Слика 8.131 Споредба на енергетската ефикасност кај 3G мобилни мрежи во околина на магла и облак во зависност од растојанието меѓу корисничкиот уред и базната станица за 400 кориснички уреди во uplink насока



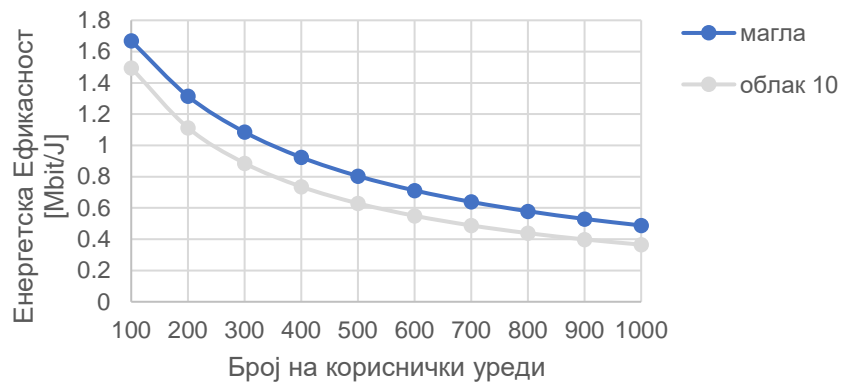
Слика 8.132 Споредба на енергетската ефикасност кај 3G мобилни мрежи во околина на магла и облак во зависност од растојанието меѓу корисничкиот уред и базната станица за 500 кориснички уреди во uplink насока



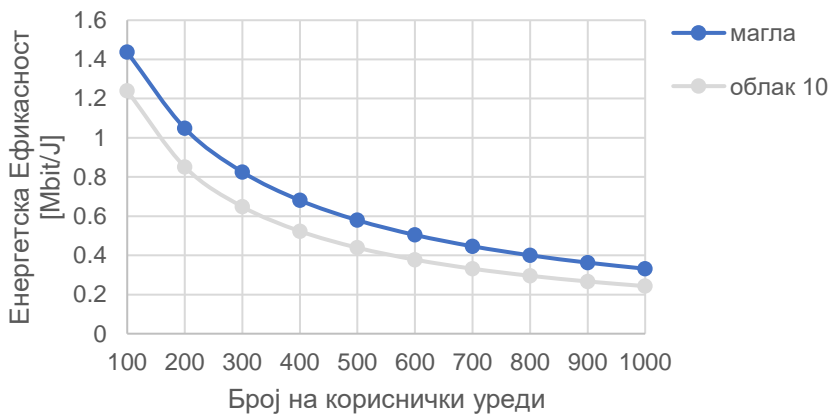
Слика 8.133 Споредба на енергетската ефикасност кај 4G мобилни мрежи во околина на магла и облак во зависност од бројот на кориснички уреди при растојание од 0 до 500 метри во uplink насока



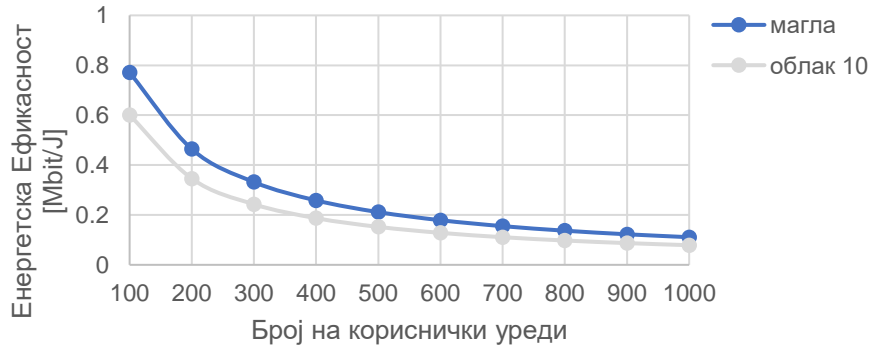
Слика 8.134 Споредба на енергетската ефикасност кај 4G мобилни мрежи во околина на магла и облак во зависност од бројот на кориснички уреди при растојание од 500 до 1000 метри во uplink насока



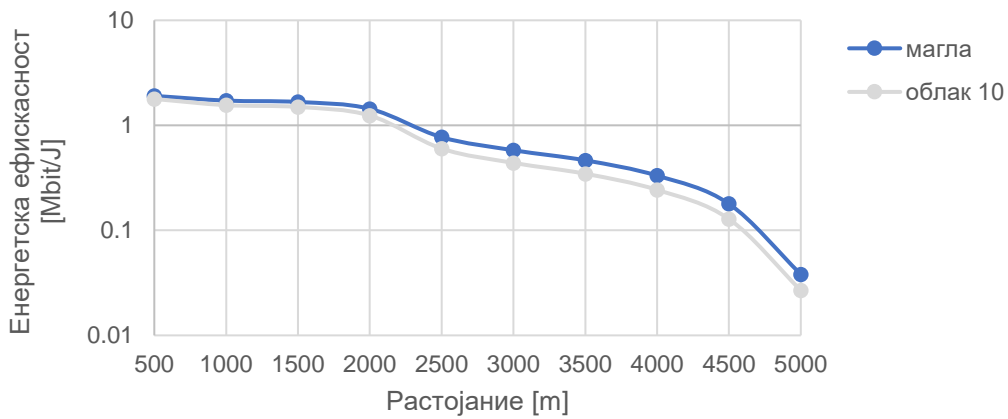
Слика 8.135 Споредба на енергетската ефикасност кај 4G мобилни мрежи во околина на магла и облак во зависност од бројот на кориснички уреди при растојание од 1000 до 1500 метри во uplink насока



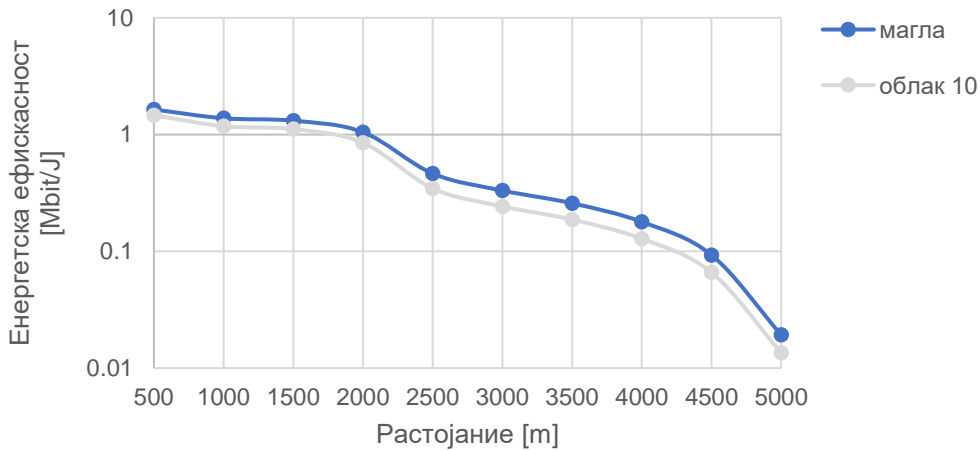
Слика 8.136 Споредба на енергетската ефикасност кај 4G мобилни мрежи во околина на магла и облак во зависност од бројот на кориснички уреди при растојание од 1500 до 2000 метри во uplink насока



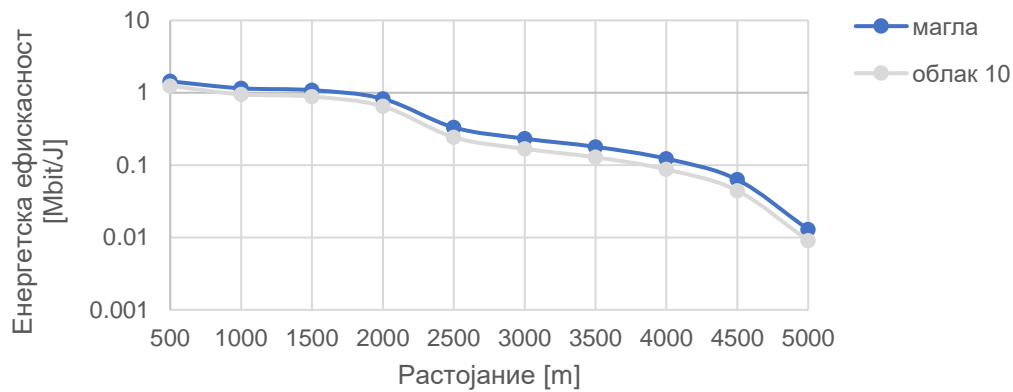
Слика 8.137 Споредба на енергетската ефикасност кај 4G мобилни мрежи во околина на магла и облак во зависност од бројот на кориснички уреди при растојание од 2000 до 2500 метри во uplink насока



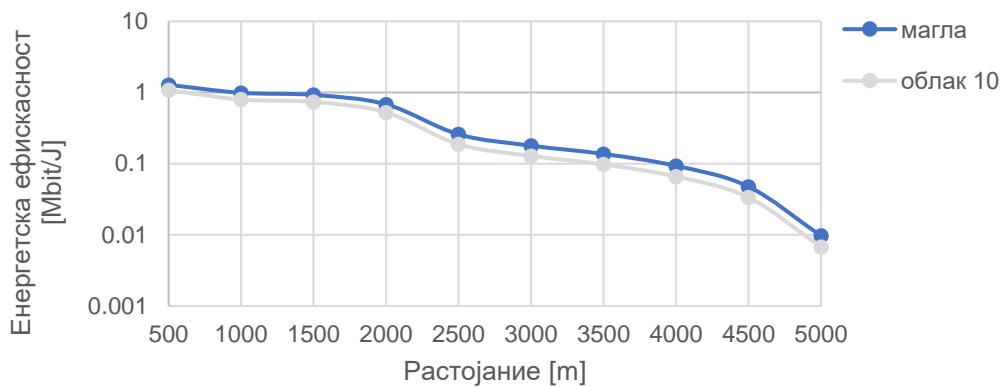
Слика 8.138 Споредба на енергетската ефикасност кај 4G мобилни мрежи во околина на магла и облак во зависност од растојанието меѓу корисничкиот уред и базната станица за 100 кориснички уреди во uplink насока



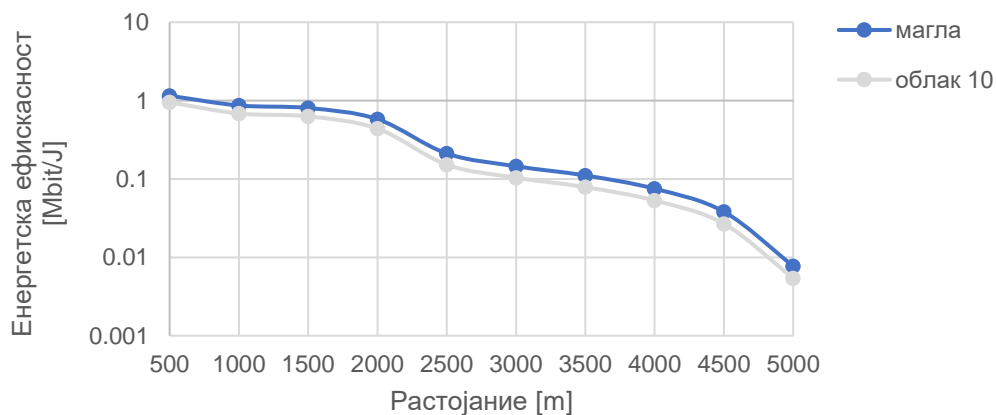
Слика 8.139 Споредба на енергетската ефикасност кај 4G мобилни мрежи во околина на магла и облак во зависност од растојанието меѓу корисничкиот уред и базната станица за 200 кориснички уреди во uplink насока



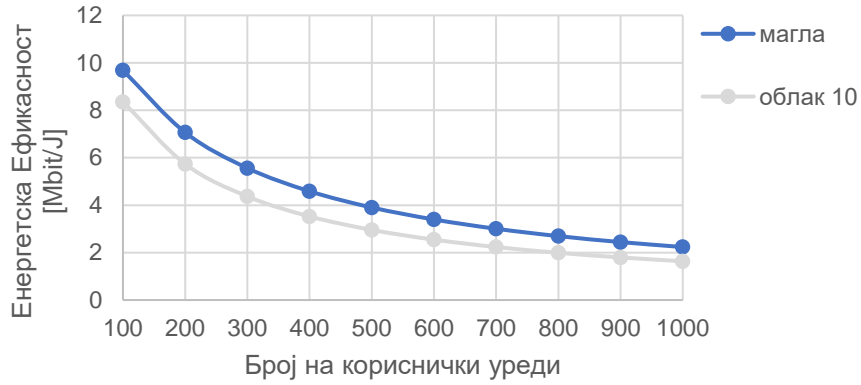
Слика 8.140 Споредба на енергетската ефикасност кај 4G мобилни мрежи во околина на магла и облак во зависност од растојанието меѓу корисничкиот уред и базната станица за 300 кориснички уреди во uplink насока



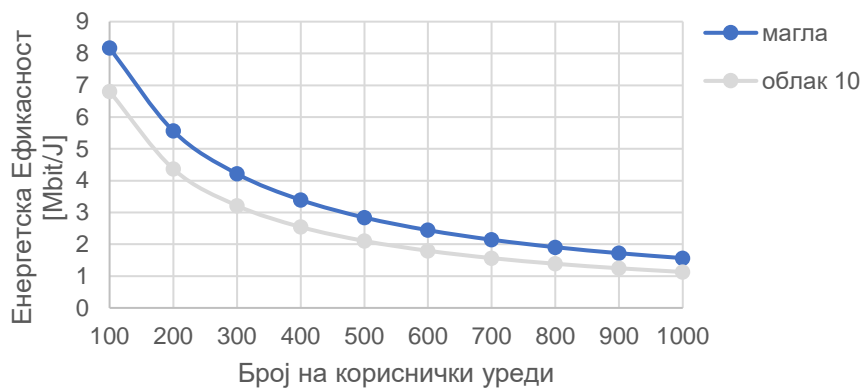
Слика 8.141 Споредба на енергетската ефикасност кај 4G мобилни мрежи во околина на магла и облак во зависност од растојанието меѓу корисничкиот уред и базната станица за 400 кориснички уреди во uplink насока



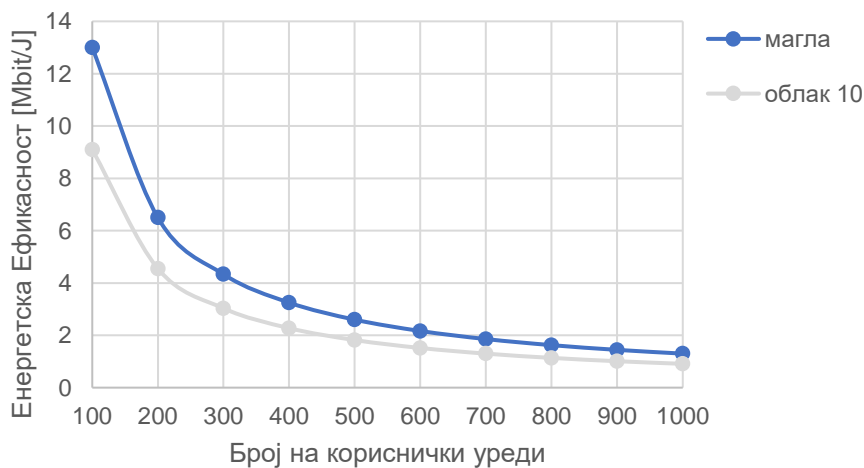
Слика 8.142 Споредба на енергетската ефикасност кај 4G мобилни мрежи во околина на магла и облак во зависност од растојанието меѓу корисничкиот уред и базната станица за 500 кориснички уреди во uplink насока



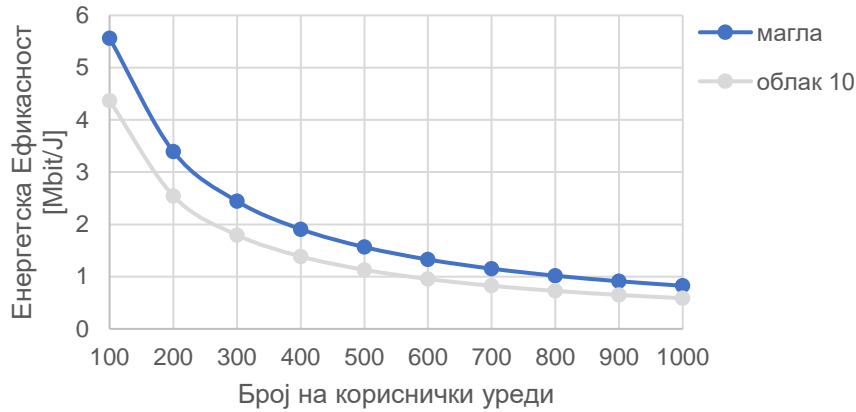
Слика 8.143 Споредба на енергетската ефикасност кај 5G мобилни мрежи во околина на магла и облак во зависност од бројот на кориснички уреди при растојание од 0 до 500 метри во uplink насока



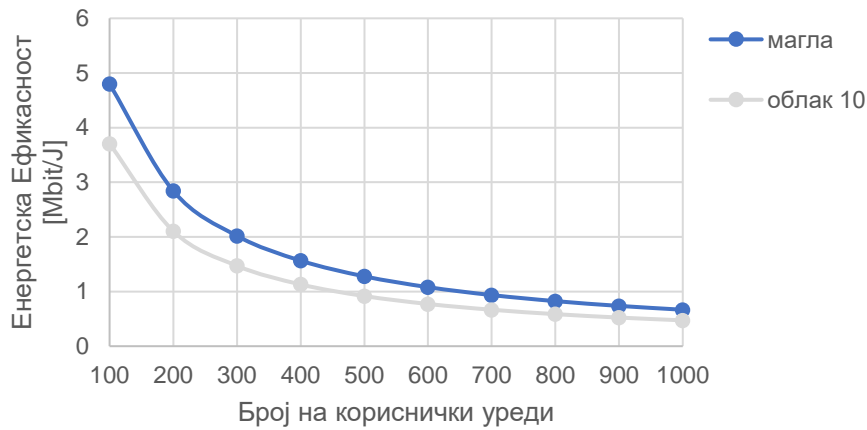
Слика 8.144 Споредба на енергетската ефикасност кај 5G мобилни мрежи во околина на магла и облак во зависност од бројот на кориснички уреди при растојание од 500 до 1000 метри во uplink насока



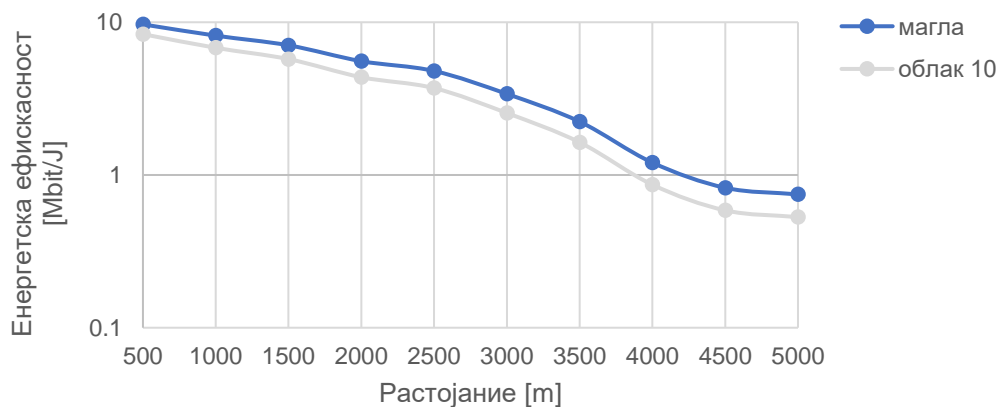
Слика 8.145 Споредба на енергетската ефикасност кај 5G мобилни мрежи во околина на магла и облак во зависност од бројот на кориснички уреди при растојание од 1000 до 1500 метри во uplink насока



Слика 8.146 Споредба на енергетската ефикасност кај 5G мобилни мрежи во околина на магла и облак во зависност од бројот на кориснички уреди при растојание од 1500 до 2000 метри во uplink насока

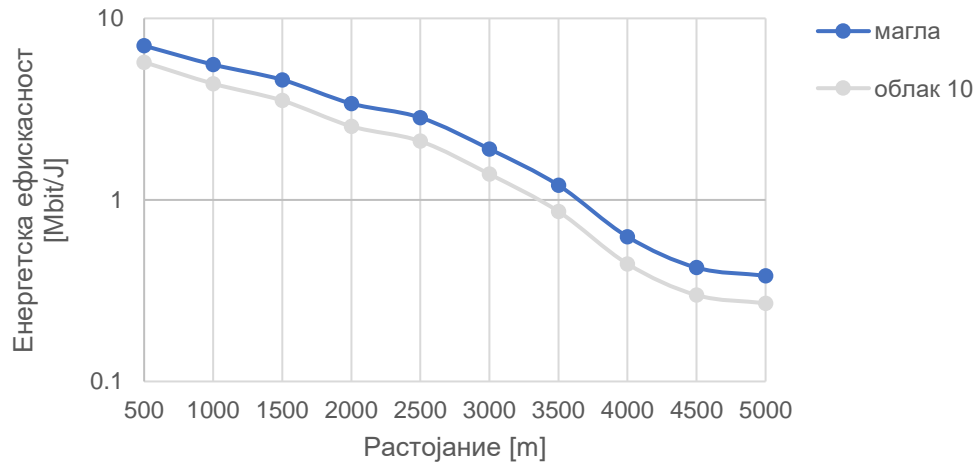


Слика 8.147 Споредба на енергетската ефикасност кај 5G мобилни мрежи во околина на магла и облак во зависност од бројот на кориснички уреди при растојание од 2000 до 2500 метри во uplink насока

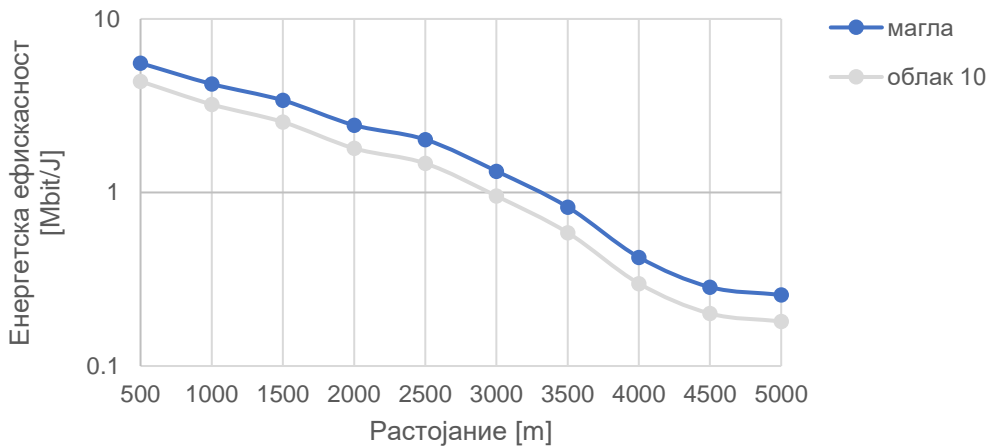


Слика 8.148 Споредба на енергетската ефикасност кај 5G мобилни мрежи во околина на магла и облак во зависност од растојанието меѓу корисничкиот уред и базната станица за 100 кориснички уреди во uplink насока

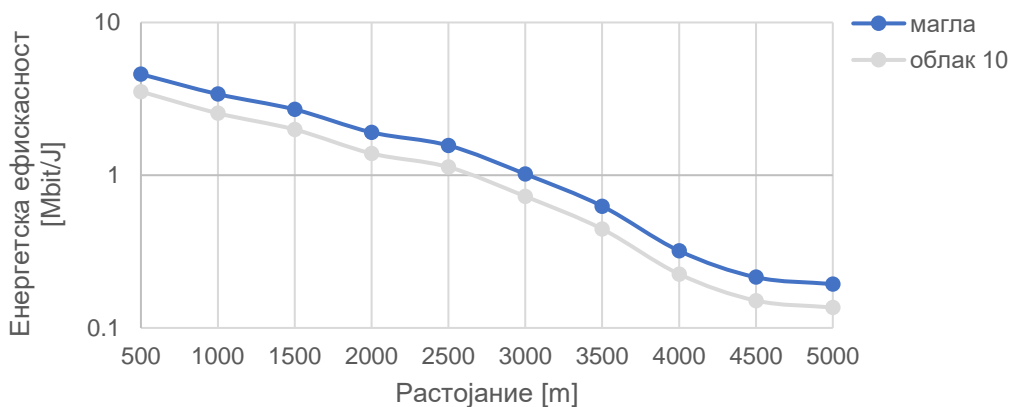




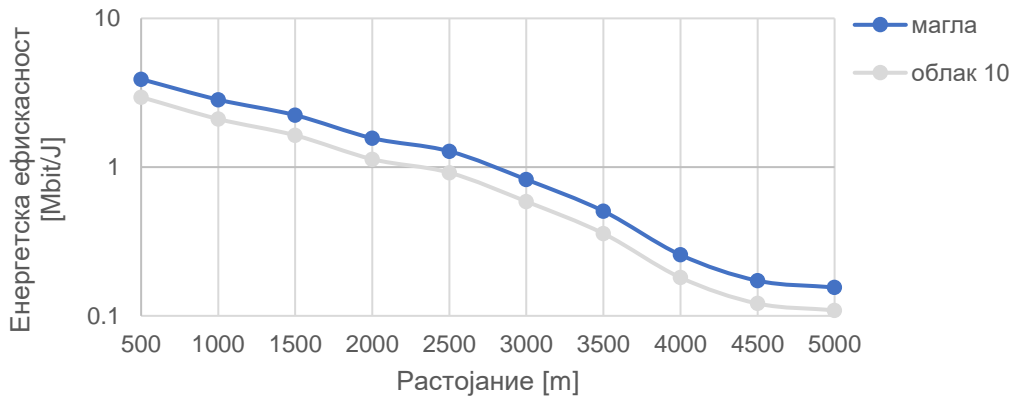
Слика 8.149 Споредба на енергетската ефикасност кај 5G мобилни мрежи во околина на магла и облак во зависност од растојанието меѓу корисничкиот уред и базната станица за 200 кориснички уреди во uplink насока



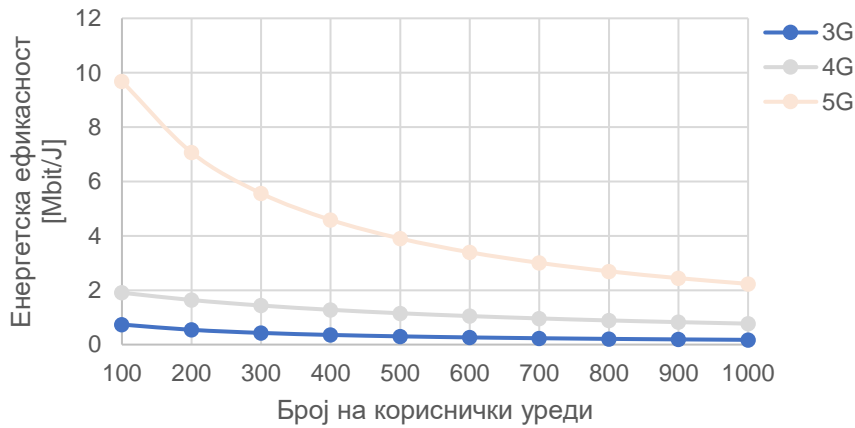
Слика 8.150 Споредба на енергетската ефикасност кај 5G мобилни мрежи во околина на магла и облак во зависност од растојанието меѓу корисничкиот уред и базната станица за 300 кориснички уреди во uplink насока



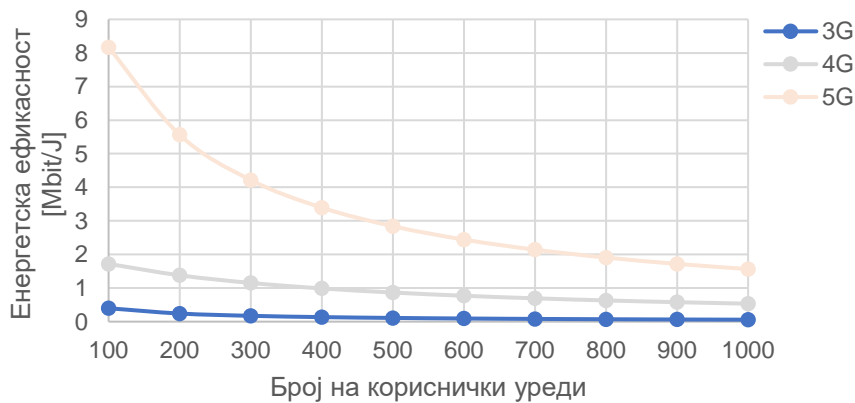
Слика 8.151 Споредба на енергетската ефикасност кај 5G мобилни мрежи во околина на магла и облак во зависност од растојанието меѓу корисничкиот уред и базната станица за 500 кориснички уреди во uplink насока



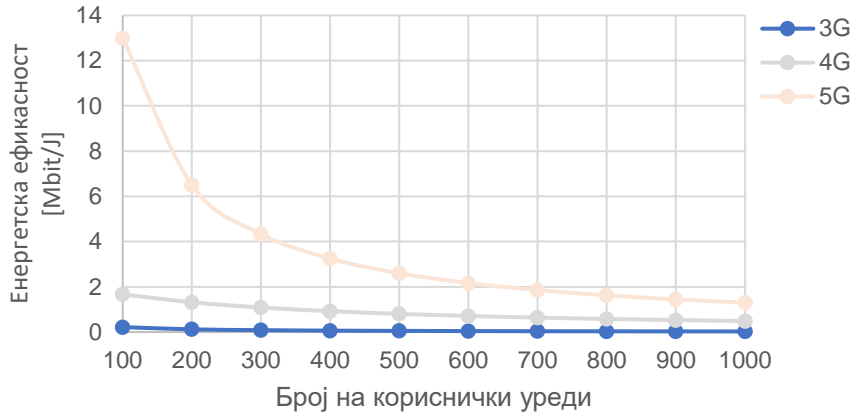
Слика 8.152 Споредба на енергетската ефикасност кај 5G мобилни мрежи во околина на магла и облак во зависност од растојанието меѓу корисничкиот уред и базната станица за 500 кориснички уреди во uplink насока



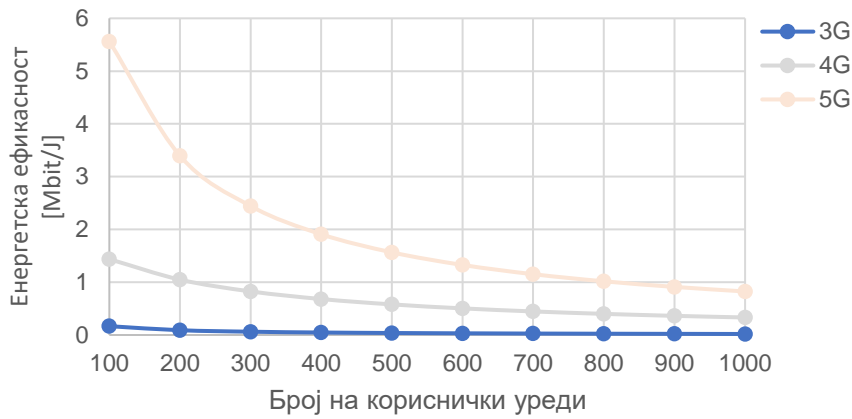
Слика 8.153 Споредба на енергетската ефикасност кај 3G, 4G и 5G мобилни мрежи во околина на магла во зависност од бројот на кориснички уреди при растојание од 0 до 500 метри во uplink насока



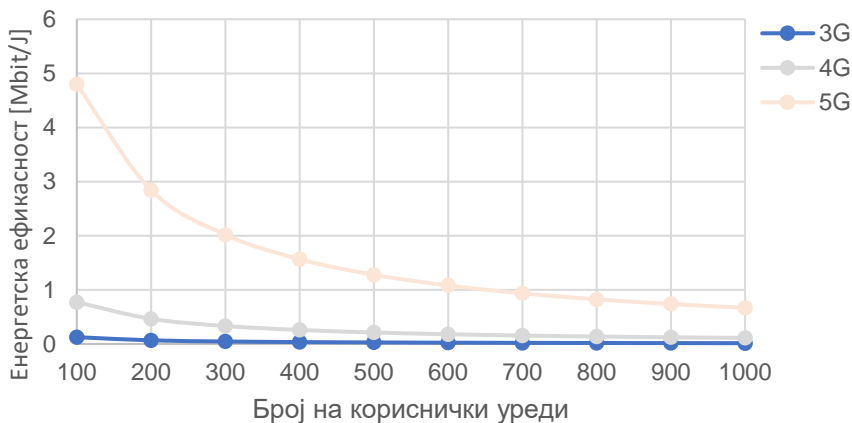
Слика 8.154 Споредба на енергетската ефикасност кај 3G, 4G и 5G мобилни мрежи во околина на магла во зависност од бројот на кориснички уреди при растојание од 500 до 1000 метри во uplink насока



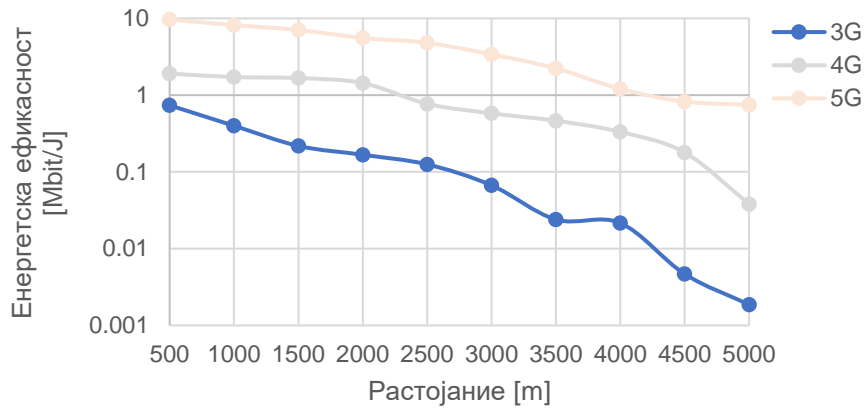
Слика 8.155 Споредба на енергетската ефикасност кај 3G, 4G и 5G мобилни мрежи во околина на магла во зависност од бројот на кориснички уреди при растојание од 1000 до 1500 метри во uplink насока



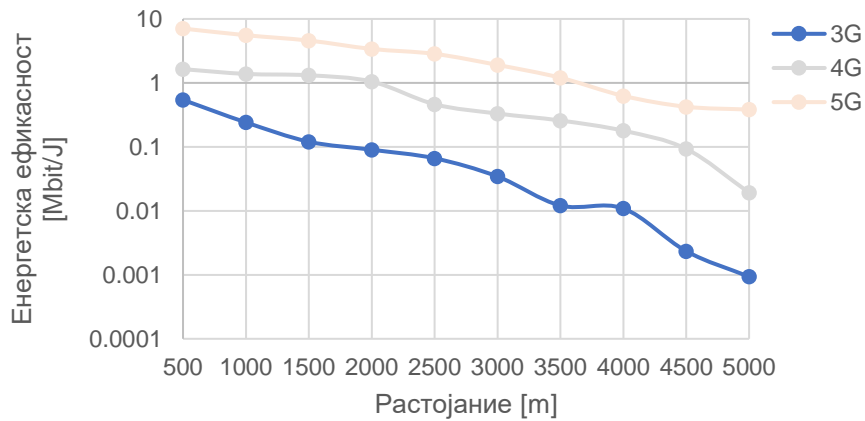
Слика 8.156 Споредба на енергетската ефикасност кај 3G, 4G и 5G мобилни мрежи во околина на магла во зависност од бројот на кориснички уреди при растојание од 1500 до 2000 метри во downlink насока



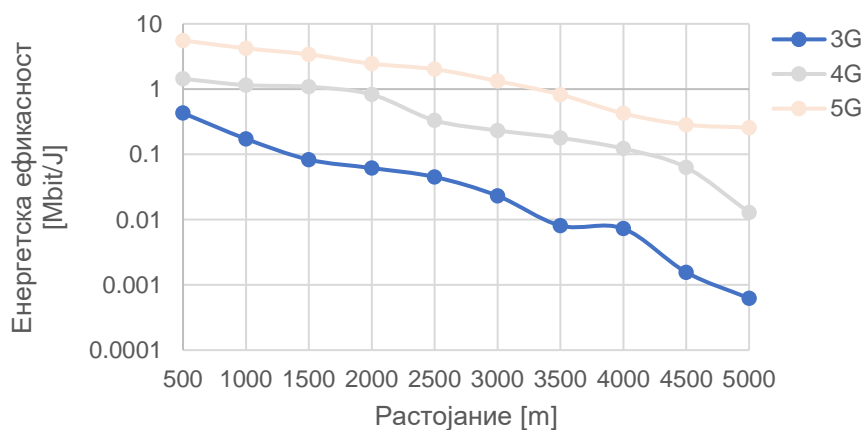
Слика 8.157 Споредба на енергетската ефикасност кај 3G, 4G и 5G мобилни мрежи во околина на магла во зависност од бројот на кориснички уреди при растојание од 2000 до 2500 метри во uplink насока



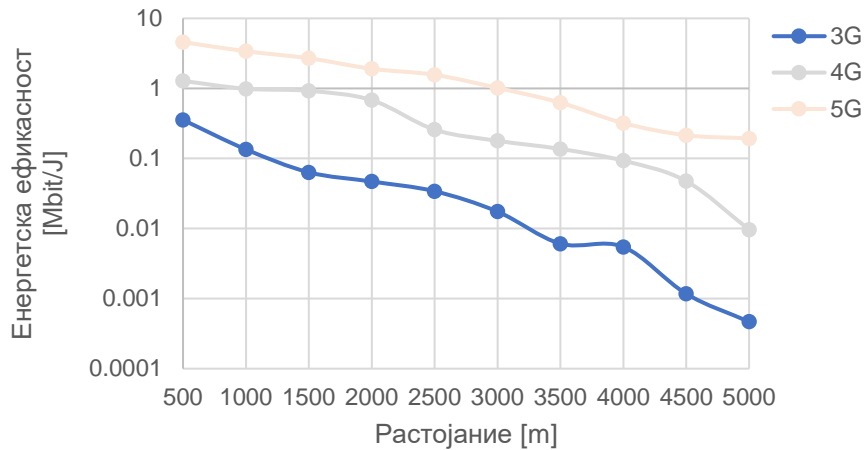
Слика 8.158 Споредба на енергетската ефикасност кај 3G, 4G и 5G мобилни мрежи во околина на магла во зависност од растојанието меѓу корисничкиот уред и базната станица за 100 кориснички уреди во uplink насока



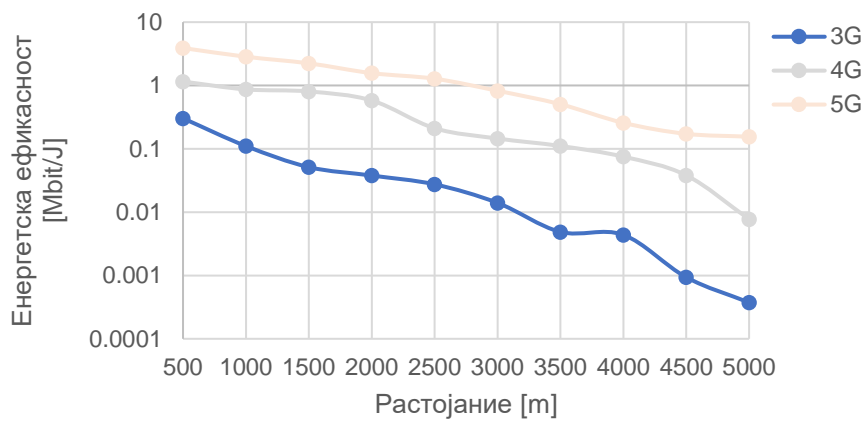
Слика 8.159 Споредба на енергетската ефикасност кај 3G, 4G и 5G мобилни мрежи во околина на магла во зависност од растојанието меѓу корисничкиот уред и базната станица за 200 кориснички уреди во uplink насока



Слика 8.160 Споредба на енергетската ефикасност кај 3G, 4G и 5G мобилни мрежи во околина на магла во зависност од растојанието меѓу корисничкиот уред и базната станица за 300 кориснички уреди во uplink насока



Слика 8.161 Споредба на енергетската ефикасност кај 3G, 4G и 5G мобилни мрежи во околина на магла во зависност од растојанието меѓу корисничкиот уред и базната станица за 400 кориснички уреди во uplink насока



Слика 8.162 Споредба на енергетската ефикасност кај 3G, 4G и 5G мобилни мрежи во околина на магла во зависност од растојанието меѓу корисничкиот уред и базната станица за 500 кориснички уреди во uplink насока

## 8.5 Дискусија на резултатите

Во рамките на оваа глава беа презентирани резултати со кои се испитуваше квалитетот на оркестрираните сервиси во околина на облак и магла кај 5G мобилните мрежи. За евалуација се користеа следниве параметри: латентност (E2E доцнење), битски проток по корисник во downlink и uplink насока и енергетска ефикасност во downlink и uplink насока. Овие параметри најпрво беа споредувани во околина на облак и магла одделно кај 3G, 4G и 5G мобилните мрежи, а потоа се направи меѓусебна споредба на сите три мрежни технологии, во зависност од бројот на кориснички уреди и растојанието меѓу корисничкиот уред и базната станица.

Притоа е заклучено дека доколку маглата се имплементира независно во било која мобилна мрежа дава подобри резултати од облакот. Исто така 5G мрежата има далеку подобри перформанси отколку 3G и 4G мрежите.

Овие резултати јасно ги демонстрираат придобивките од имплементација на оркестрирачките механизми за обработката на податоци во околина на облак кај 5G мобилните мрежи, а истовремено даваат потврда за главната хипотеза и двете специјални тези дадени во воведот на оваа докторска дисертација. Изборот на оптимална мрежа која ќе даде најдобро задоволство кај корисниците зависи пред сè од сервисните побарувања на секој корисник, на пример голем битски проток, ниска латентност, подобра енергетска ефикасност и друго.

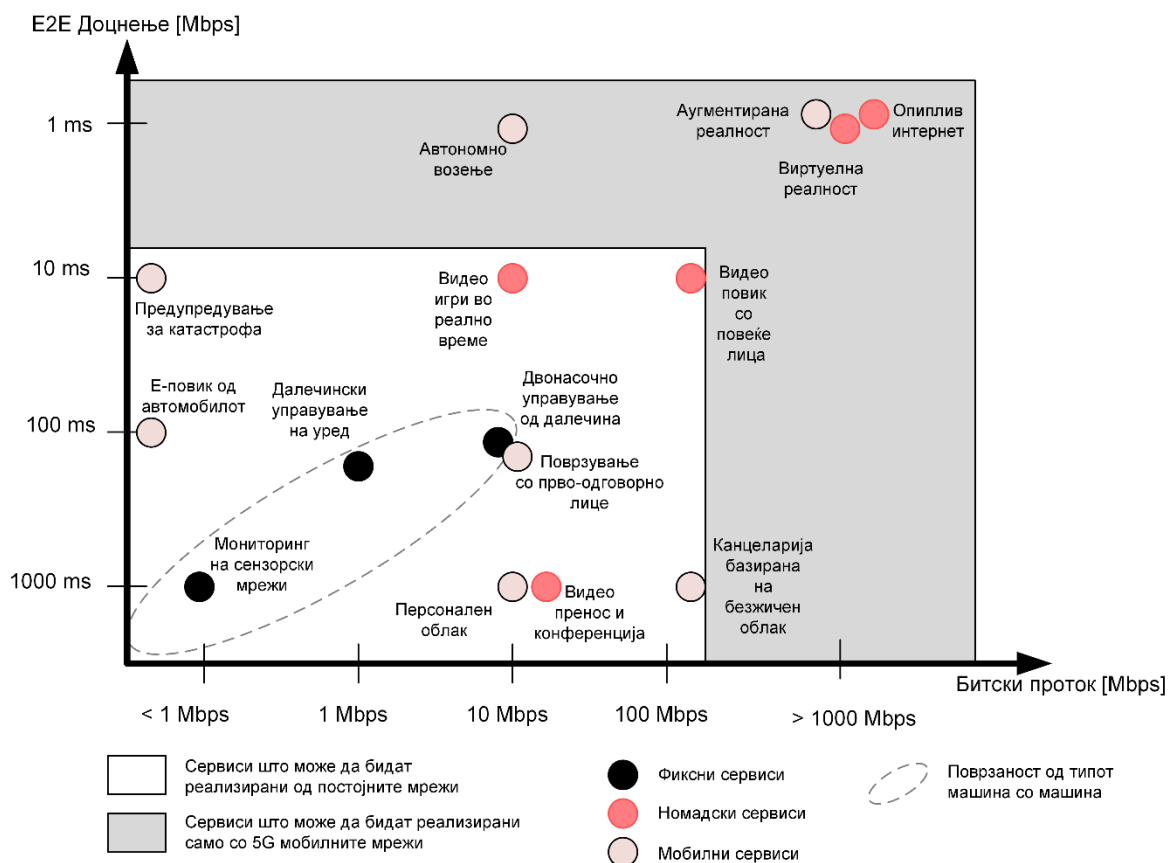
Покрај тоа аналитиката на големо количество на податоци бара процесирање во реално време и со цел да се исполнат честите строги барања за краткото достапно време, ваквото процесирање може исклучиво да се изврши само во околина на магла. Ова е особено многу важно за критичната употреба на IoT уредите и опипливиот интернет каде е потребна латентност од 1 ms со цел да се овозможи интерфејс за виртуелна реалност меѓу луѓето и машините (интеракција човек со машина и интеракција машина со машина) [109].

## 9 Алгоритам за оптимална селекција на 5G базна станица

Во рамките на 5G мрежата секој кориснички уред ќе користи податочни и облачни сервиси преку различни радио пристапни мрежни технологии и преку различни облаци. Затоа е неопходен алгоритам за селекција на најсоодветната радио пристапна мрежа. Изборот на таквата радио пристапна мрежа пред сè зависи од сервисните побарувања на податоци кои се пренесуваат како што се битската брзина неопходна за пренос на податоците (во downlink и uplink насока), латентноста (доцнењето од крај до крај), енергетската ефикасност на радио пристапната мрежа, и др. [110], [117].

### 9.1 Сервисни побарувања за различни типови на сервиси

На Слика 9.1 се прикажани сервисните побарувања на различни типови на сервиси во поглед на латентноста, односно доцнењето од крај до крај (E2E доцнење) и битскиот проток. Како што се гледа некои сервиси може да бидат реализирани само со 5G мрежата, а останатите сервиси со постојните мрежни технологии.



Слика 9.1 Сервисни побарувања за латентноста и битскиот проток за различни типови на сервиси [113]

Притоа следниве сервиси исклучиво може да бидат реализирани со помош на 5G мобилните мрежи како што се виртуелна релност, аугментирана реалност, опипливиот интернет и автономно возење/поврзани автомобили. Иако канцеларијата базирана на безжичен облак и видео повик со повеќе лица веќе може да се реализира со постојните 4G мобилни мрежи, во иднина се очекува за овие сервиси да има побарување за поголеми битски брзини и помала латентност. Комуникацијата од типот машина со машина веќе е реализирана со постојните мрежни технологии, но во иднина бројот на уреди кои користат ваков тип на комуникација се очекува да порасне од 250 милиони во 2014 до скоро 2 милијарди во 2020 [113], со што ќе се зголемат побарувањата за поголем битски проток и помала латентност.

Покрај латентноста и битската брзина, битен параметар при оптималниот избор на радио пристапна мрежа е и енергетската ефикасност, која има главна улога во намалување на трошоците на мрежниот оператор и врз зголемувањето на животниот век на батеријата кај мобилните уреди.

## 9.2 Можни алгоритми за оптимална селекција на радио пристапна мрежа

Со оглед дека различни сервиси имаат различни побарувања за пропусниот опсег битскиот проток, латентноста, енергетската ефикасност и слично, во 5G мрежата неопходно е да се имплементира алгоритам за оптимална селекција на радио пристапна мрежа.

Во рамките на овој докторски труд предложени се неколку алгоритми. Притоа е направена споредба на тоа какви резултати се добиваат кога алгоритмот ќе се примени и кога алгоритмот нема да се примени.

Во продолжение се предложени пет алгоритми:

### 1. Алгоритам за избор на оптимална радио пристапна мрежа според минимална латентност $RTT$ – Алгоритам 1

*Да се најде минимална латентност (минимално доцнење)  $RTT$  при:*

- Даден број на кориснички уреди  $N$
- Дадено растојание  $d$  меѓу корисничкиот уред и 5G базната станица
- Битски проток  $R \geq R_{\min}$  (во *downlink* и *uplink* насока)
- Енергетска ефикасност  $EE \geq EE_{\min}$  (во *downlink* и *uplink* насока)



Забелешка:

А) Доколку не може да се најде  $R$  (downlink и uplink) и  $EE$  (downlink и uplink) што ги исполнува горенаведените услови, тогаш се бираат  $R$  (downlink и uplink) и  $EE$  (downlink и uplink) што се најблиску до  $R_{\min}$  (downlink и uplink) и  $EE_{\min}$  (downlink и uplink), соодветно.

Б) Доколку се најдат повеќе кандидати на 5G радио пристапни технологии што го исполнуваат овој услов, тогаш од нив се одбира кандидатот со најниска латентност.

## 2. Алгоритам за избор на оптимална радио пристапна мрежа според битскиот проток $R$ (downlink насока) – Алгоритам 2

Да се најде максимален битски проток  $R$  (во downlink насока) при:

- Даден број на кориснички уреди  $N$
- Дадено растојание  $d$  меѓу корисничкиот уред и 5G базната станица
- Латентност (доцнење)  $RTT \leq RTT_{\max}$
- Битски проток  $R \geq R_{\min}$  (во uplink насока)
- Енергетска ефикасност  $EE \geq EE_{\min}$  (во downlink и uplink насока)

Забелешка:

А) Доколку не може да се најде  $RTT$ ,  $R$  (uplink) и  $EE$  (downlink и uplink) што ги исполнува горенаведените услови, тогаш се бираат  $RTT$ ,  $R$  (uplink) и  $EE$  (downlink и uplink) што се најблиску до  $RTT_{\max}$ ,  $R_{\min}$  (uplink) и  $EE_{\min}$  (downlink и uplink), соодветно.

Б) Доколку се најдат повеќе кандидати на 5G радио пристапни технологии што го исполнуваат овој услов, тогаш се од нив се бира кандидатот со највисок битски проток (downlink насока).

## 3. Алгоритам за избор на оптимална радио пристапна мрежа според битскиот проток $R$ (uplink насока)

Да се најде максимален битски проток  $R$  (во uplink насока) при:

- Даден број на кориснички уреди  $N$
- Дадено растојание  $d$  меѓу корисничкиот уред и 5G базната станица
- Латентност (доцнење)  $RTT \leq RTT_{\max}$
- Битски проток  $R \geq R_{\min}$  (во downlink насока)
- Енергетска ефикасност  $EE \geq EE_{\min}$  (во downlink и uplink насока)

Забелешка:

А) Доколку не може да се најде  $RTT$ ,  $R$  (downlink) и  $EE$  (downlink и uplink) што ги исполнува горенаведените услови, тогаш се бираат  $RTT$ ,  $R$  (downlink) и  $EE$  (downlink и uplink) што се најблиску до  $RTT_{\max}$ ,  $R_{\min}$  (downlink) и  $EE_{\min}$  (downlink и uplink), соодветно.

Б) Доколку се најдат повеќе кандидати на 5G радио пристапни технологии што го исполнуваат овој услов, тогаш се од нив се бира кандидатот со највисок битски проток (uplink насока).

#### 4. Алгоритам за избор на оптимална радио пристапна мрежа според енергетска ефикасност $EE$ (downlink насока)

Да се најде максимална енергетска ефикасност  $EE$  (во downlink насока) при:

- Даден број на кориснички уреди  $N$
- Дадено растојание  $d$  меѓу корисничкиот уред и 5G базната станица
- Латентност (доцнење)  $RTT \leq RTT_{\max}$
- Битски проток  $R \geq R_{\min}$  (во downlink и uplink насока)
- Енергетска ефикасност  $EE \geq EE_{\min}$  (во uplink насока)

Забелешка:

А) Доколку не може да се најде  $RTT$ ,  $R$  (downlink и uplink) и  $EE$  (uplink) што ги исполнува горенаведените услови, тогаш се бираат  $RTT$ ,  $R$  (downlink и uplink) и  $EE$  (uplink) што се најблиску до  $RTT_{\max}$ ,  $R_{\min}$  (downlink и uplink) и  $EE_{\min}$  (uplink), соодветно.

Б) Доколку се најдат повеќе кандидати на 5G радио пристапни технологии што го исполнуваат овој услов, тогаш се од нив се бира кандидатот со највисока енергетска ефикасност (downlink насока).

#### 5. Алгоритам за избор на оптимална радио пристапна мрежа според енергетска ефикасност $EE$ (uplink насока)

Да се најде максимална енергетска ефикасност  $EE$  (во uplink насока) при:

- Даден број на кориснички уреди  $N$
- Дадено растојание  $d$  меѓу корисничкиот уред и 5G базната станица
- Латентност (доцнење)  $RTT \leq RTT_{\max}$
- Битски проток  $R \geq R_{\min}$  (во downlink и uplink насока)
- Енергетска ефикасност  $EE \geq EE_{\min}$  (во downlink насока)

Забелешка:

А) Доколку не може да се најде  $RTT$ ,  $R$  (downlink и uplink) и  $EE$  (downlink) што ги исполнува горенаведените услови, тогаш се бираат  $RTT$ ,  $R$  (downlink и uplink) и  $EE$  (downlink) што се најблиску до  $RTT_{\max}$ ,  $R_{\min}$  (downlink и uplink) и  $EE_{\min}$  (downlink), соодветно.

Б) Доколку се најдат повеќе кандидати на 5G радио пристапни технологии што го исполнуваат овој услов, тогаш се од нив се бира кандидатот со највисока енергетска ефикасност (uplink насока).

Во овие алгоритми е земено бројот на кориснички уреди  $N$  да варира од 100 до 1000, со чекор на зголемување 100, а растојанието  $d$  да варира од 500 до 5000 метри, со чекор на зголемување 500.

Параметрите  $RTT_{\max}$ ,  $R_{\min}$ ,  $EE_{\min}$  претставуваат прагови на одлучување при изборот на латентноста, битскиот проток (downlink и uplink насока) и енергетската ефикасност (downlink и uplink насока). За вредности на овие прагови на параметрите се земени земени пресметаните теоретски вредности за латентноста, битската брзина (downlink и uplink насока) и енергетската ефикасност (downlink и uplink насока), во зависност од бројот на кориснички уреди и растојанието меѓу корисничкиот уред и базната станица на мобилната мрежа, кои се добиени при анализата во глава 8.

### 9.3 Сценарио за евалуација на алгоритмите

Со цел да се евалуираат алгоритмите во претходното поглавје се користи следново сценарио. Тоа се состои од единечен регион кој е покриен од страна на повеќе 5G радио пристапни мрежи (RANs), при што опслужуваат повеќе кориснички уреди. Се одбира еден кориснички уред за разгледување, кој се наоѓа на различно растојание во однос на базните станици од различните 5G радио пристапни мрежи, кои пак се поврзани кои одредени облаци.

Нека корисничкиот уред сака да користи одреден облачен сервис што може да го понудат сите 5G радио пристапни мрежи. Тој во неговата база добива мерни извештаи за латентноста (доцнењето), битскиот проток во downlink и uplink насока и енергетската ефикасност од секоја 5G радио пристапна мрежа одделно.

Во зависност од растојанието меѓу корисничкиот уред и базната станица на 5G мрежата, односно применетата модулациска шема и радио условите, секоја 5G база

станица на корисничкиот уред ќе му понуди соодветна латентност, битска брзина (downlink и uplink) и енергетска ефикасност (downlink и uplink). За потребите евалуацијата на предложените алгоритми може да се генерираат случајни вредности за латентноста и битските протоци (downlink и uplink), а потоа врз основа на битските проток случајно да се генерира потрошената моќност, односно енергетската ефикасност (downlink и uplink).

Во зависност од сервисот што 5G мобилниот уред сака да го користи, уредот избира некој од претходно наведените алгоритми врз основа на кој се врши оптимална селекција на 5G радио пристапна мрежа.

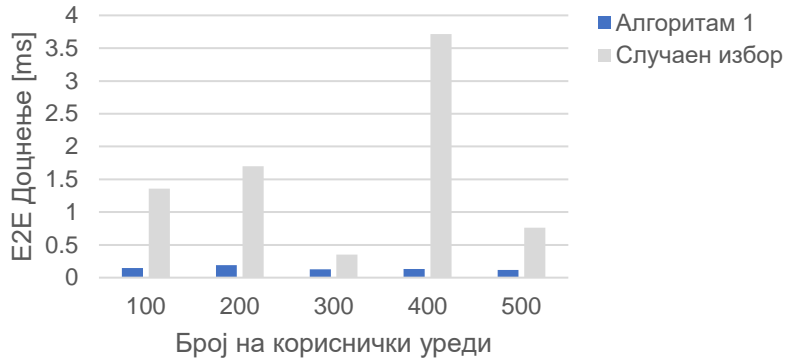
Ова симулациско сценарио лесно може да се конструира во МАТЛАБ. Добиените резултати во следните секции претставуваат просечна вредност од 10 симулации.

#### **9.4 Евалуација на добиените резултатите според Алгоритам 1**

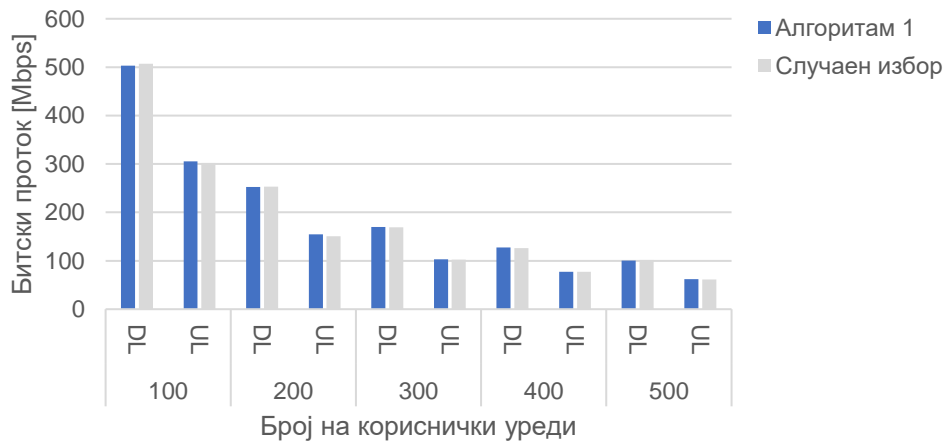
Добиените резултати според алгоритмот 1 се прикажани во продолжение и тоа:

- Споредба на добиените резултати за латентноста, битскиот проток и енергетската ефикасност кај 5G мобилни мрежи во околина на магла и облак во зависност од бројот на кориснички уреди при дадено растојание на Слика 9.2 – Слика 9.4;
- Споредба на добиените резултати за латентноста, битскиот проток и енергетската ефикасност кај 5G мобилни мрежи во околина на магла и облак во зависност растојанието при даден број на кориснички уреди на Слика 9.5 – Слика 9.7.

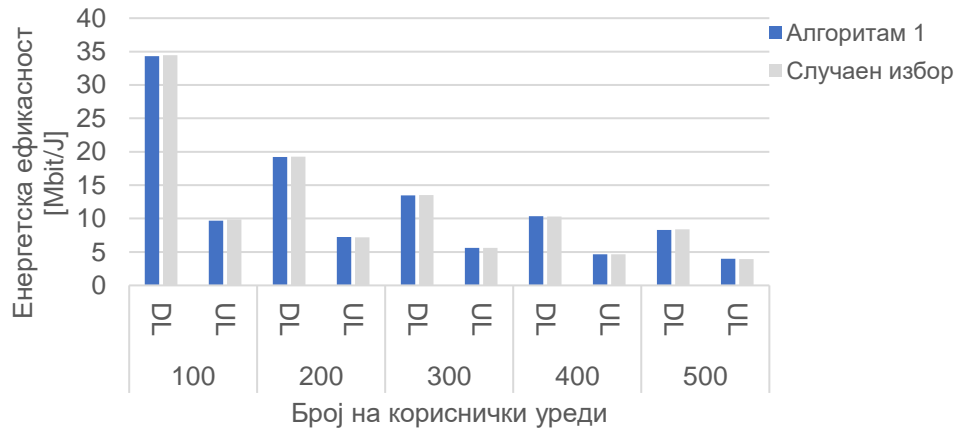
Од прикажаните резултати се гледа дека се добива пониска латентност со примена на алгоритмот 1, отколку без негова примена. Покрај тоа во некои случаи се добиваат подобри вредности или слични за битскиот проток (downlink и uplink насока) и енергетската ефикасност (downlink и uplink насока).



а) латентност

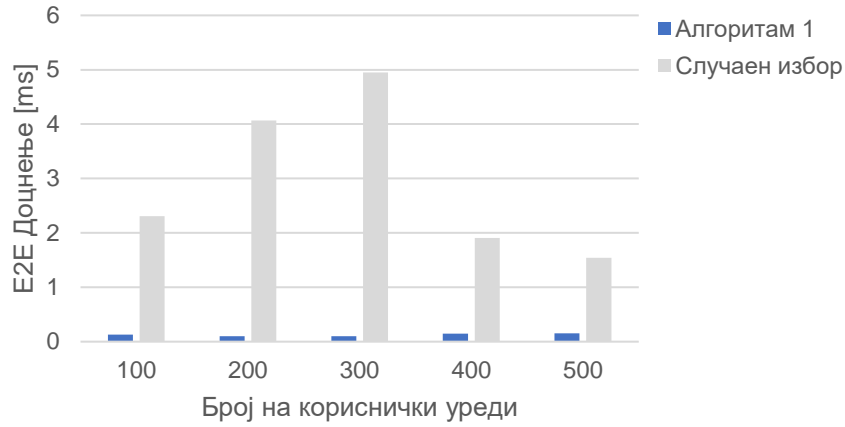


б) битски проток

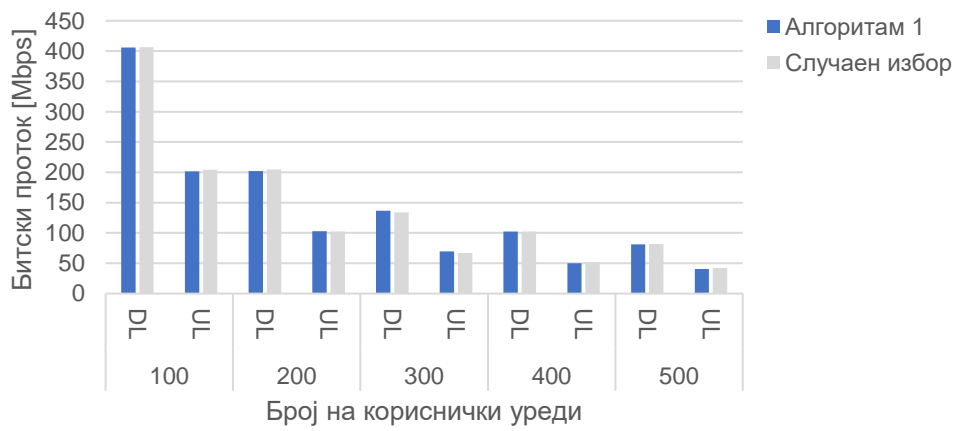


в) енергетска ефикасност

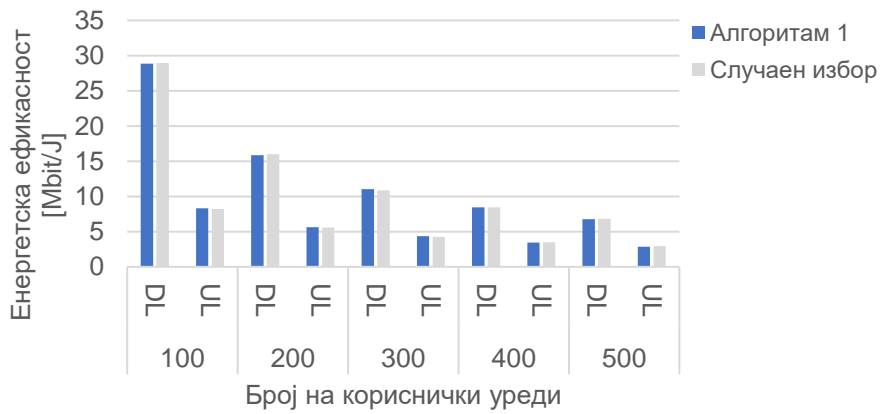
Слика 9.2 Споредба на латентноста, битскиот проток и енергетската ефикасност кај 5G мобилни мрежи во околина на магла и облак во зависност од бројот на кориснички уреди при растојание од 0 до 500 метри со и без примена на Алгоритам 1



а) латентност

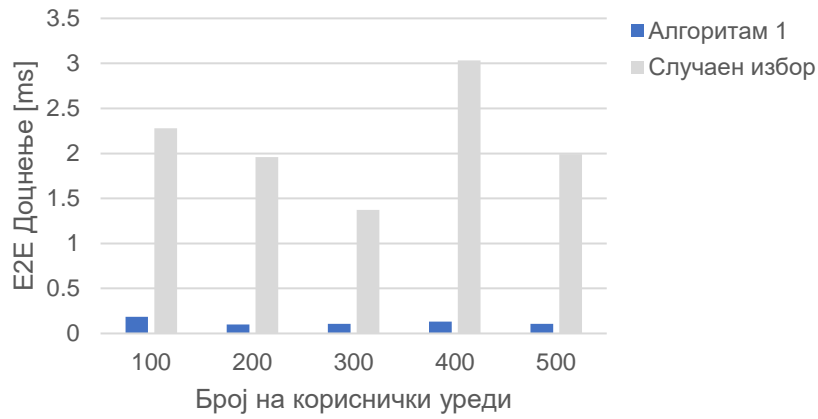


б) битски проток

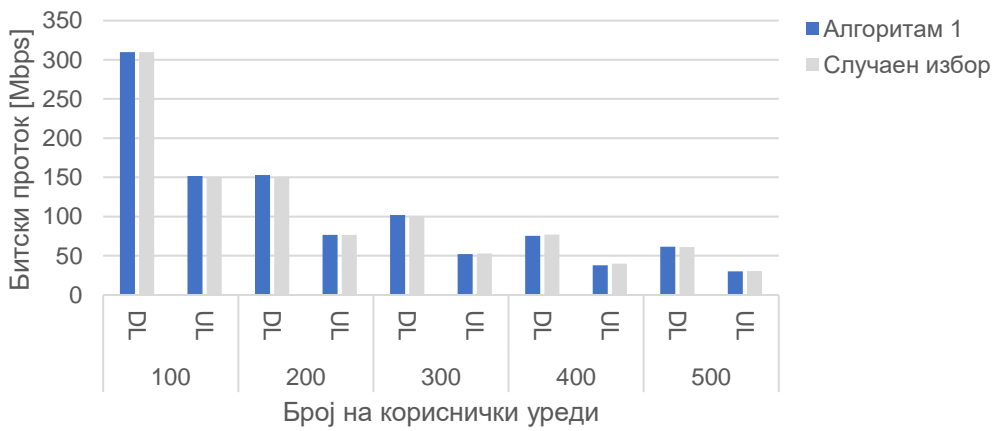


в) енергетска ефикасност

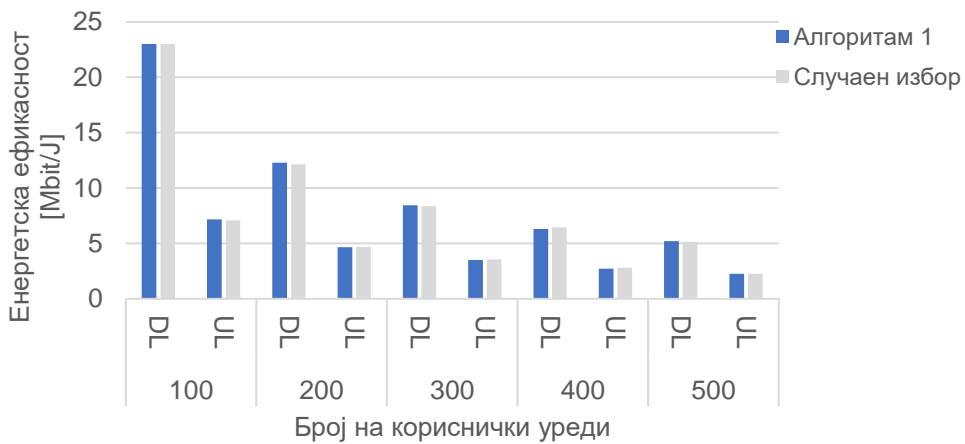
Слика 9.3 Споредба на латентноста, битскиот проток и енергетската ефикасност кај 5G мобилни мрежи во околина на магла и облак во зависност од бројот на кориснички уреди при растојание од 500 до 1000 метри со и без примена на Алгоритам 1



а) латентност

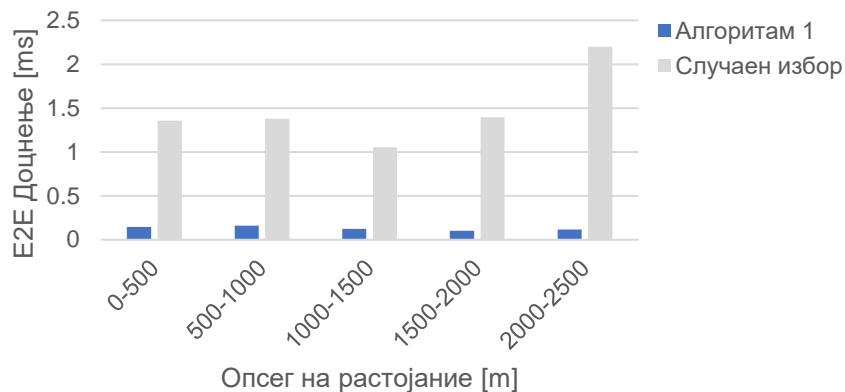


б) битски проток

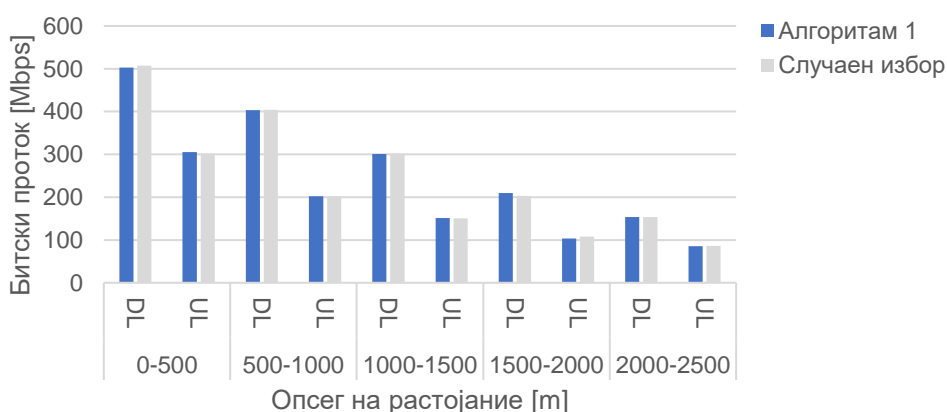


в) енергетска ефикасност

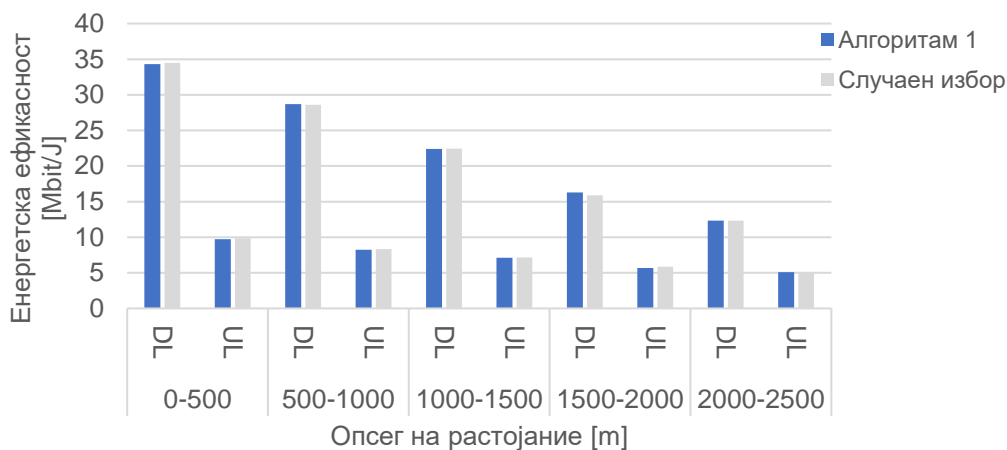
Слика 9.4 Споредба на латентноста, битскиот проток и енергетската ефикасност кај 5G мобилни мрежи во околина на магла и облак во зависност од бројот на кориснички уреди при растојание од 1000 до 1500 метри со и без примена на Алгоритам 1



а) латентност



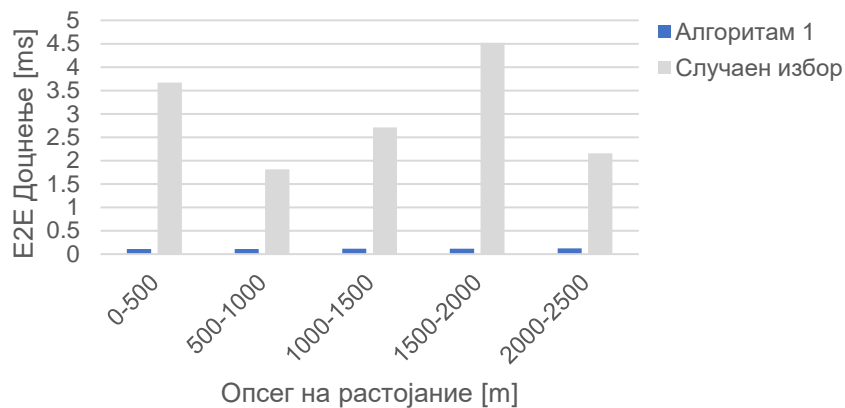
б) битски проток



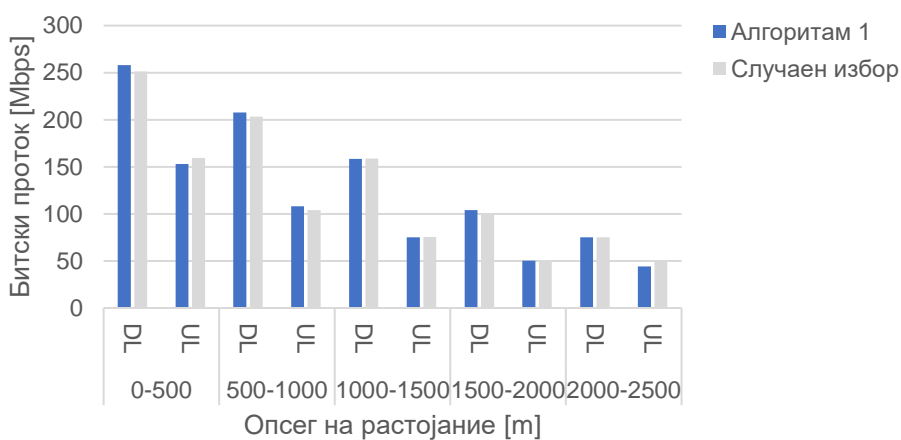
в) енергетска ефикасност

Слика 9.5 Споредба на латентноста, битскиот проток и енергетската ефикасност кај 5G мобилни мрежи во околина на магла и облак во зависност од растојанието меѓу корисничкиот уред и базната станица за 100 кориснички уреди со и без примена на Алгоритам 1

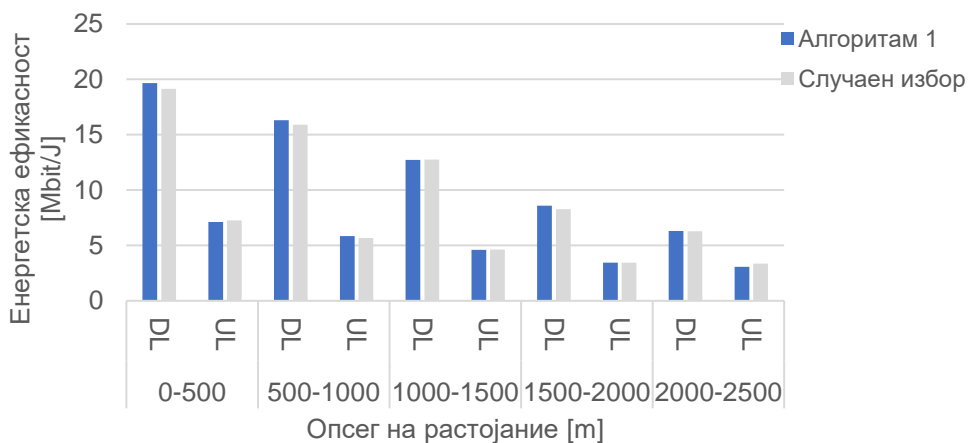




а) латентност

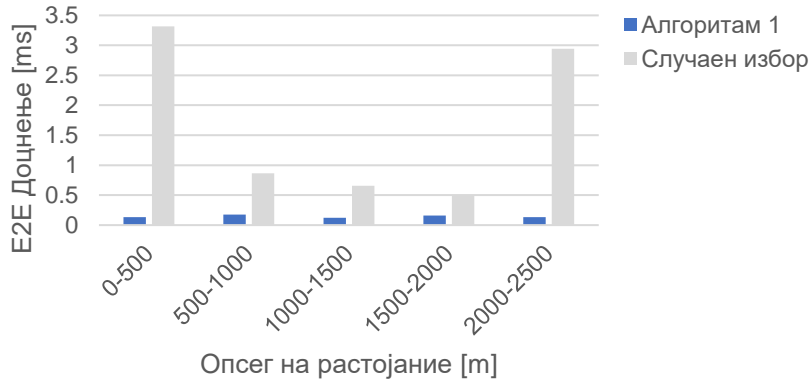


б) битски проток

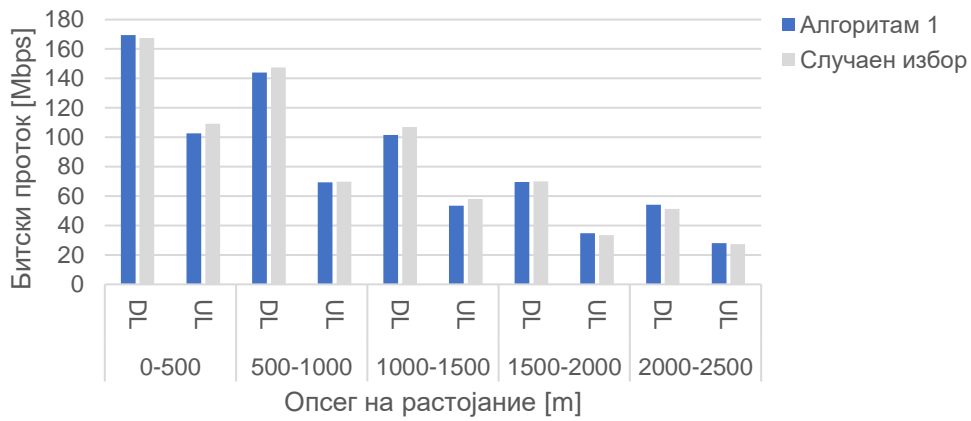


в) енергетска ефикасност

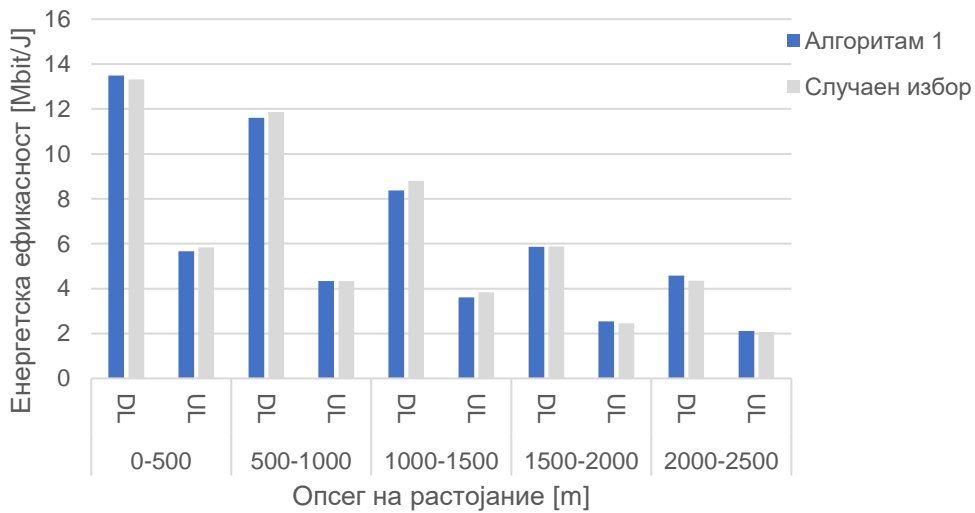
Слика 9.6 Споредба на латентноста, битскиот проток и енергетската ефикасност кај 5G мобилни мрежи во околина на магла и облак во зависност од растојанието меѓу корисничкиот уред и базната станица за 200 кориснички уреди со и без примена на Алгоритам 1



а) латентност



б) битски проток



в) енергетска ефикасност

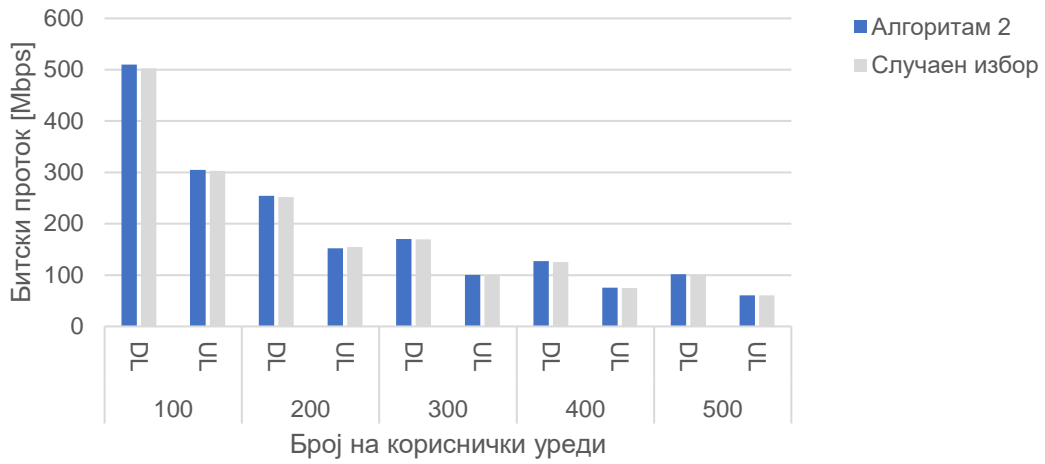
Слика 9.7 Споредба на латентноста, битскиот проток и енергетската ефикасност кај 5G мобилни мрежи во околина на магла и облак во зависност од растојанието меѓу корисничкиот уред и базната станица за 300 кориснички уреди со и без примена на Алгоритам 1

## 9.5 Евалуација на добиените резултатите според Алгоритам 2

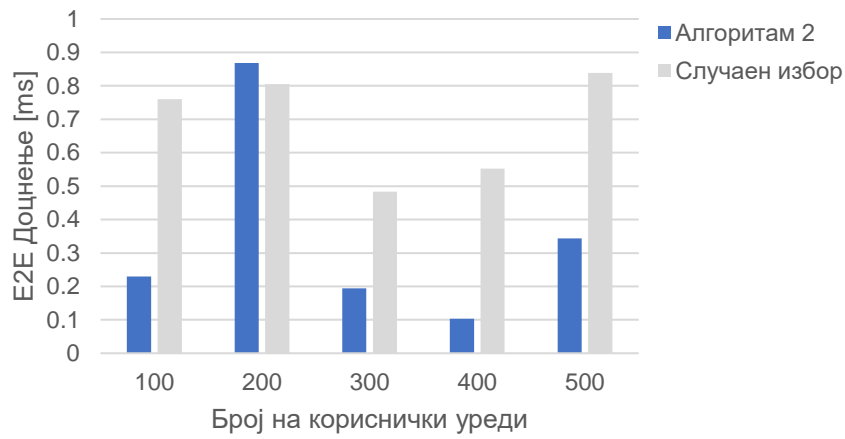
Добиените резултати според алгоритамот 2 се прикажани во продолжение и тоа:

- Споредба на добиените резултати за латентноста, битскиот проток и енергетската ефикасност кај 5G мобилни мрежи во околина на магла и облак во зависност од бројот на кориснички уреди при дадено растојание на Слика 9.8 – Слика 9.10;
- Споредба на добиените резултати за латентноста, битскиот проток и енергетската ефикасност кај 5G мобилни мрежи во околина на магла и облак во зависност растојанието при даден број на кориснички уреди на Слика 9.11 – Слика 9.13.

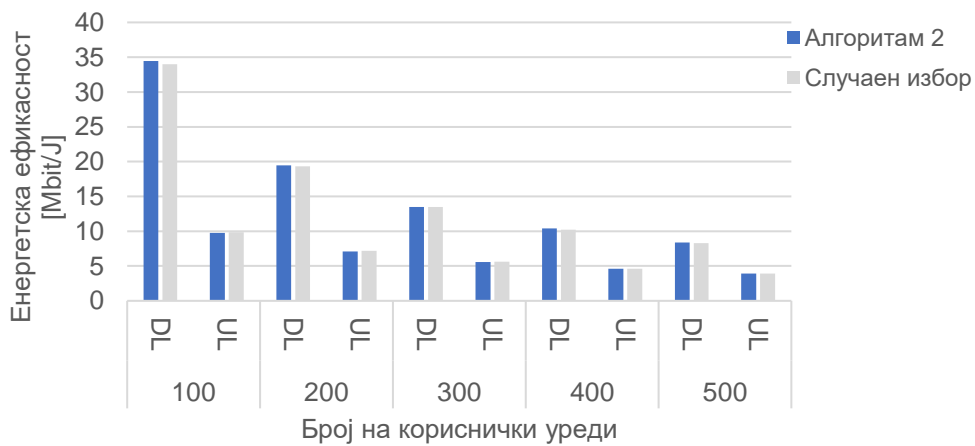
Од прикажаните резултати се гледа дека се добива поголем битски проток во downlink насока со примена на алгоритамот 2, отколку без негова примена. Покрај тоа во некои случаи се добиваат подобри вредности или слични за латентноста, битскиот проток во uplink насока и енергетската ефикасност (downlink и uplink насока).



а) битски проток

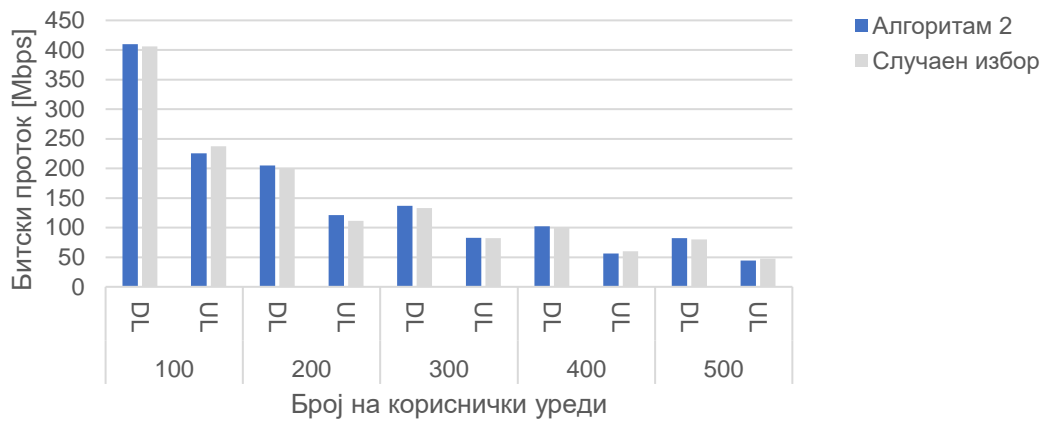


б) латентност

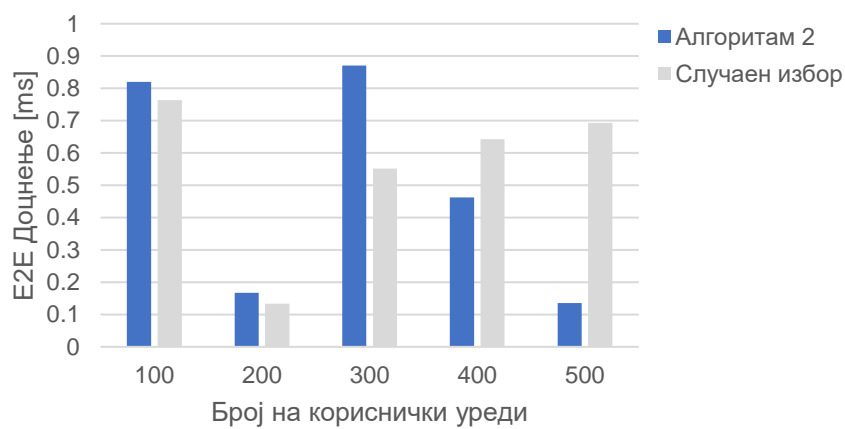


в) енергетска ефикасност

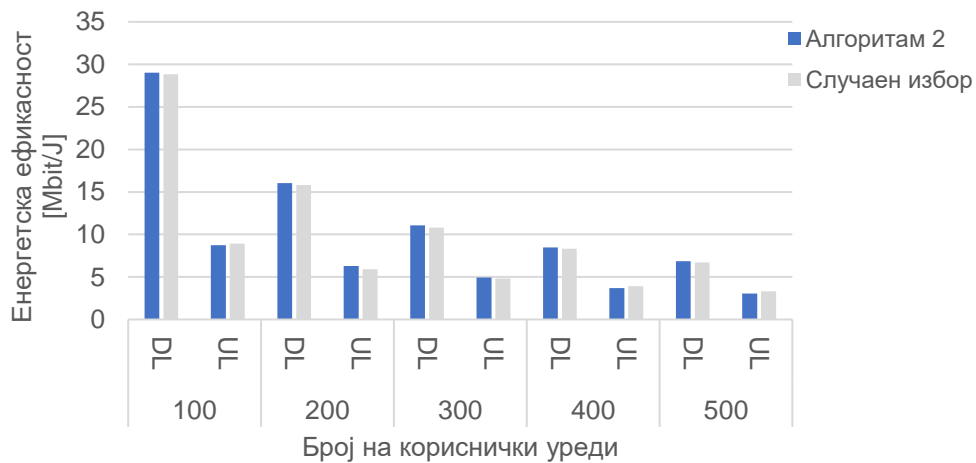
Слика 9.8 Споредба на латентноста, битскиот проток и енергетската ефикасност кај 5G мобилни мрежи во околина на магла и облак во зависност од бројот на кориснички уреди при растојание од 0 до 500 метри со и без примена на Алгоритам 2



а) битски проток

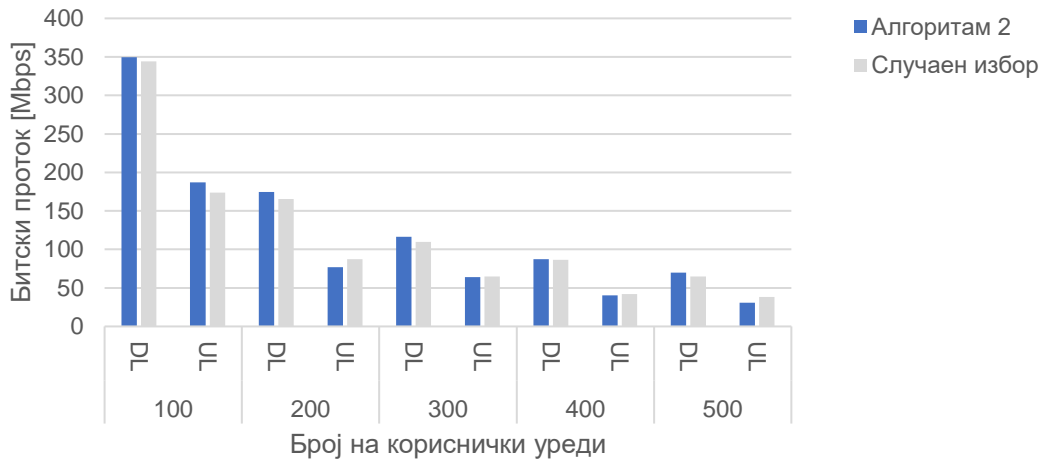


б) латентност

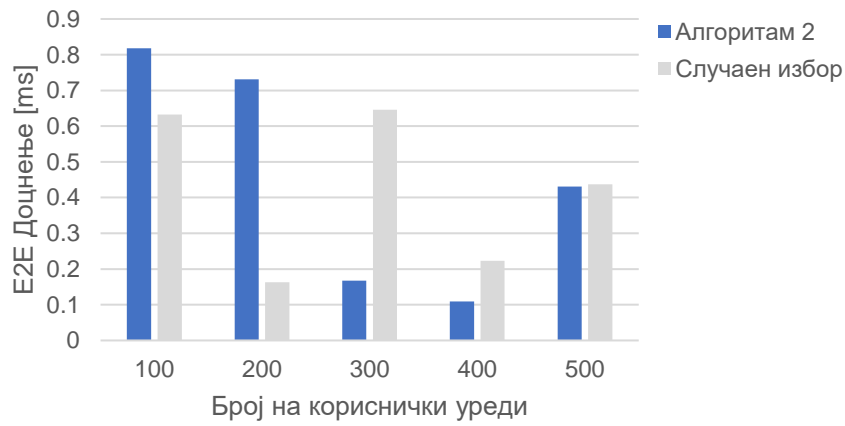


в) енергетска ефикасност

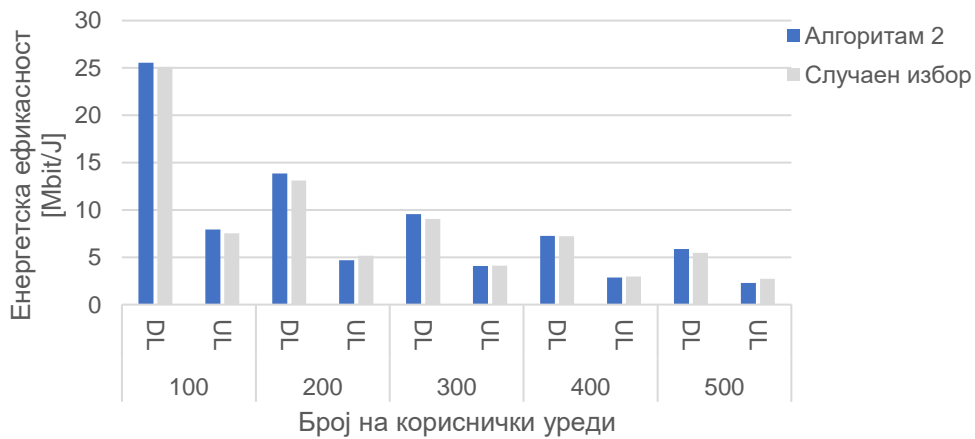
Слика 9.9 Споредба на латентноста, битскиот проток и енергетската ефикасност кај 5G мобилни мрежи во околина на магла и облак во зависност од бројот на кориснички уреди при растојание од 500 до 1000 метри со и без примена на Алгоритам 2



а) битски проток

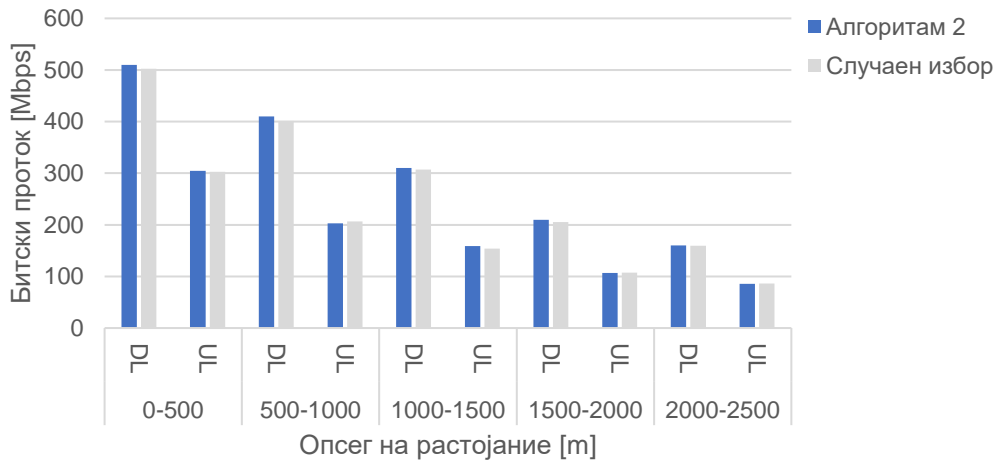


б) латентност

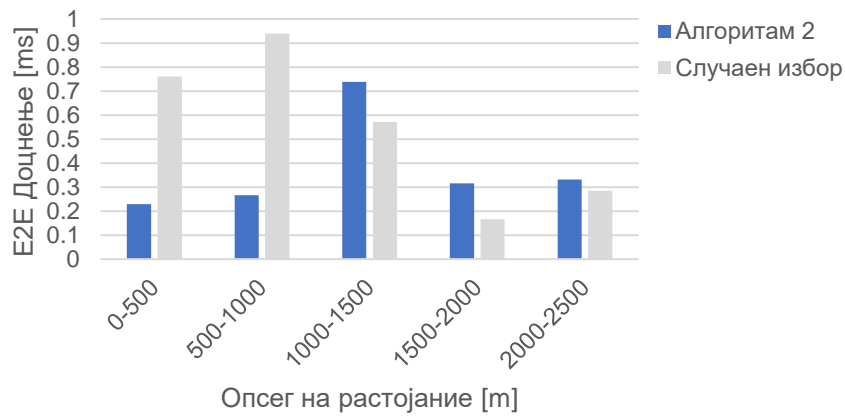


в) енергетска ефикасност

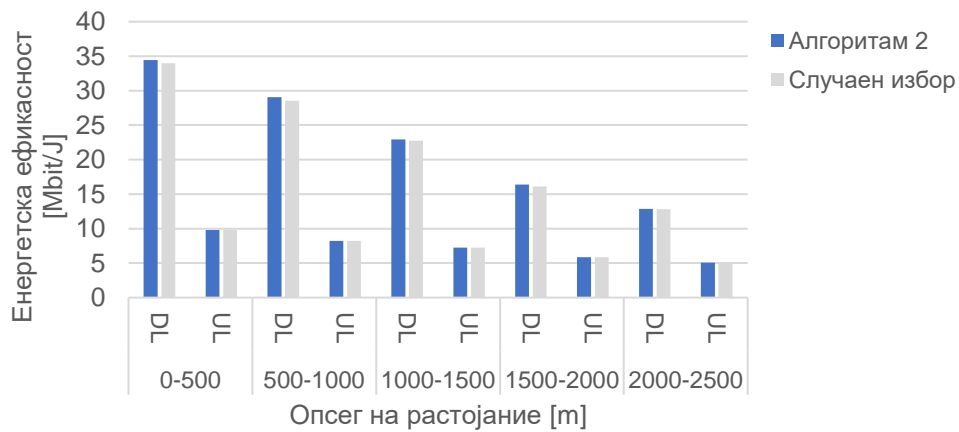
Слика 9.10 Споредба на латентноста, битскиот проток и енергетската ефикасност кај 5G мобилни мрежи во околина на магла и облак во зависност од бројот на кориснички уреди при растојание од 1000 до 1500 метри со и без примена на Алгоритам 2



а) битски проток

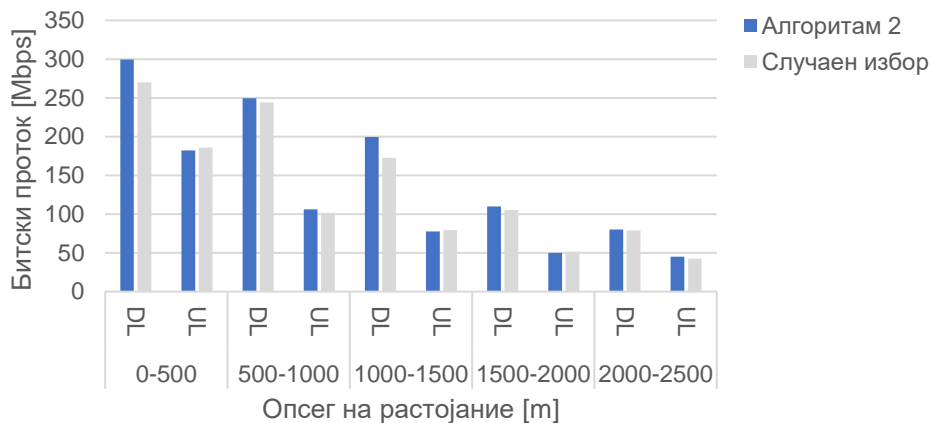


б) латентност

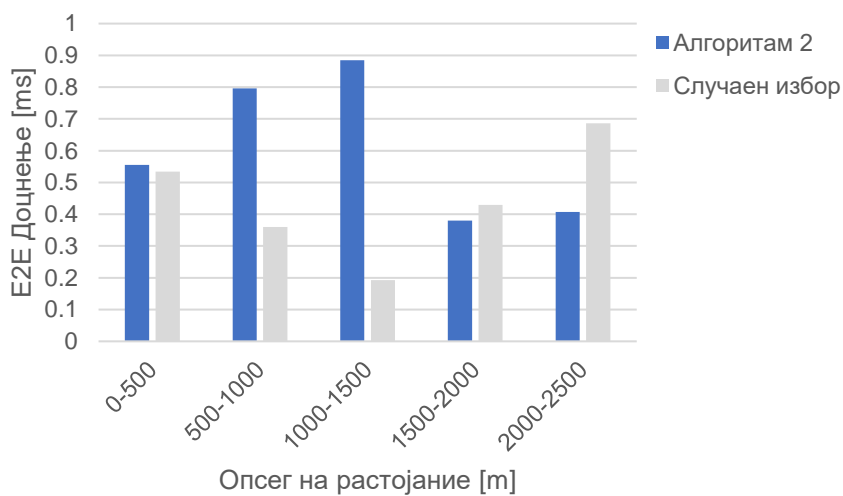


в) енергетска ефикасност

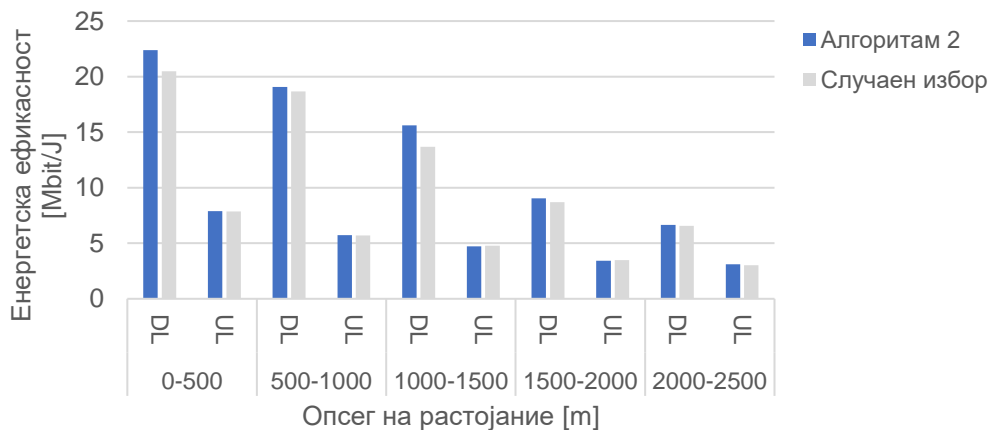
Слика 9.11 Споредба на латентноста, битскиот проток и енергетската ефикасност кај 5G мобилни мрежи во околина на магла и облак во зависност од растојанието меѓу корисничкиот уред и базната станица за 100 кориснички уреди со и без примена на Алгоритам 2



а) битски проток



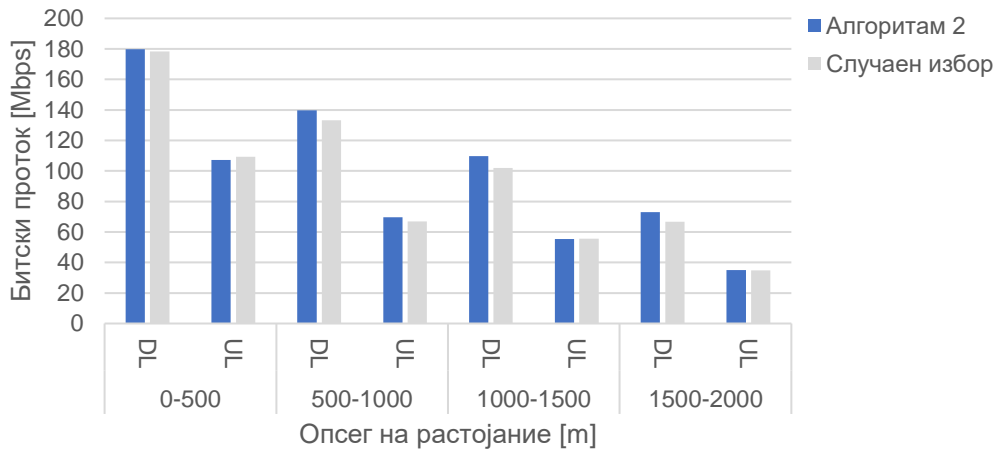
б) латентност



в) енергетска ефикасност

Слика 9.12 Споредба на латентноста, битскиот проток и енергетската ефикасност кај 5G мобилни мрежи во околина на магла и облак во зависност од растојанието меѓу корисничкиот уред и базната станица за 200 кориснички уреди со и без примена на Алгоритам 2

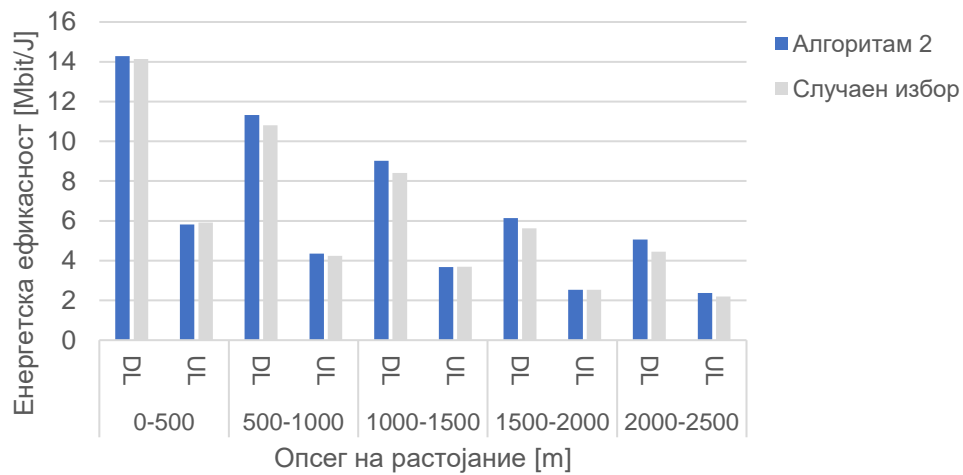




а) битски проток



б) латентност



в) енергетска ефикасност

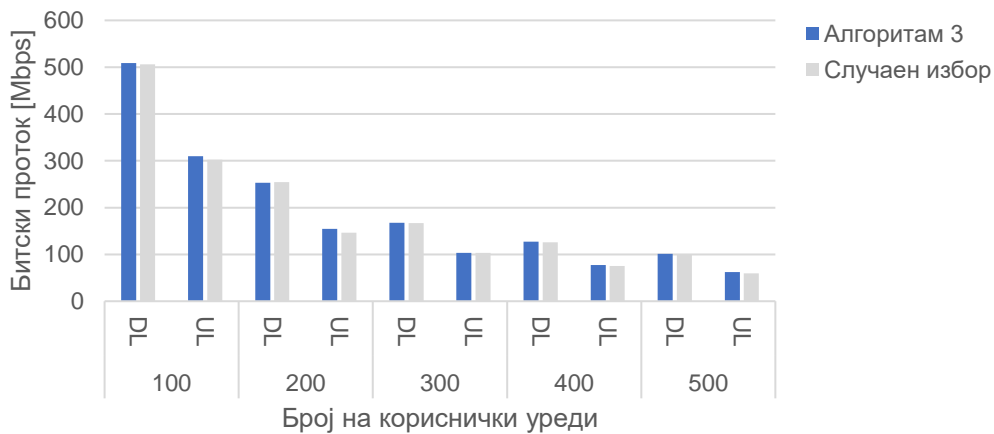
Слика 9.13 Споредба на латентноста, битскиот проток и енергетската ефикасност кај 5G мобилни мрежи во околина на магла и облак во зависност од растојанието меѓу корисничкиот уред и базната станица за 300 кориснички уреди со и без примена на Алгоритам 2

## 9.6 Евалуација на добиените резултатите според Алгоритам 3

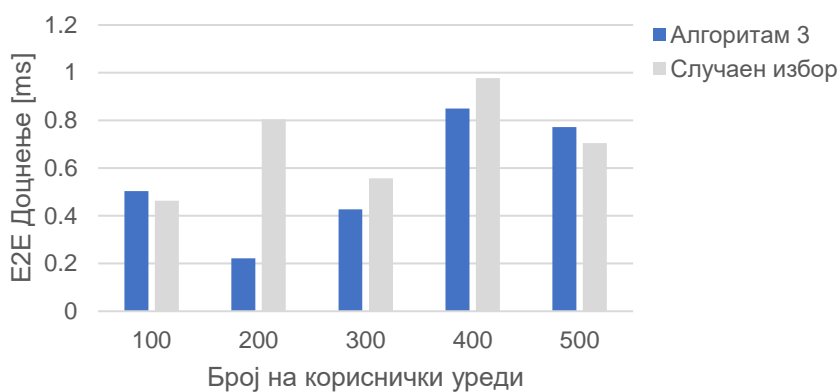
Добиените резултати според алгоритамот 3 се прикажани во продолжение и тоа:

- Споредба на добиените резултати за латентноста, битскиот проток и енергетската ефикасност кај 5G мобилни мрежи во околина на магла и облак во зависност од бројот на кориснички уреди при дадено растојание на Слика 9.14 – Слика 9.16;
- Споредба на добиените резултати за латентноста, битскиот проток и енергетската ефикасност кај 5G мобилни мрежи во околина на магла и облак во зависност растојанието при даден број на кориснички уреди на Слика 9.17 – Слика 9.19.

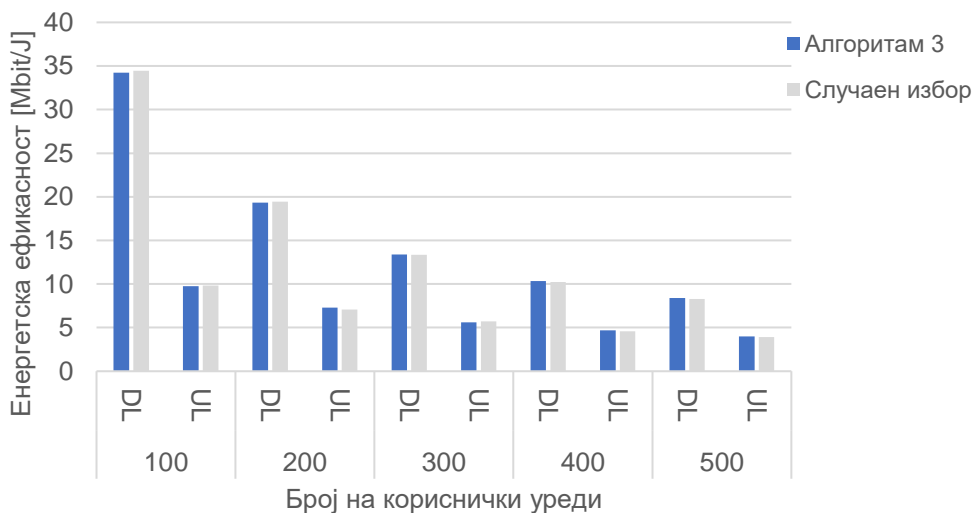
Од прикажаните резултати се гледа дека се добива поголем битски проток во uplink насока со примена на алгоритамот 3, отколку без негова примена. Покрај тоа во некои случаи се добиваат подобри вредности или слични за латентноста, битскиот проток во downlink насока и енергетската ефикасност (downlink и uplink насока).



а) битски проток

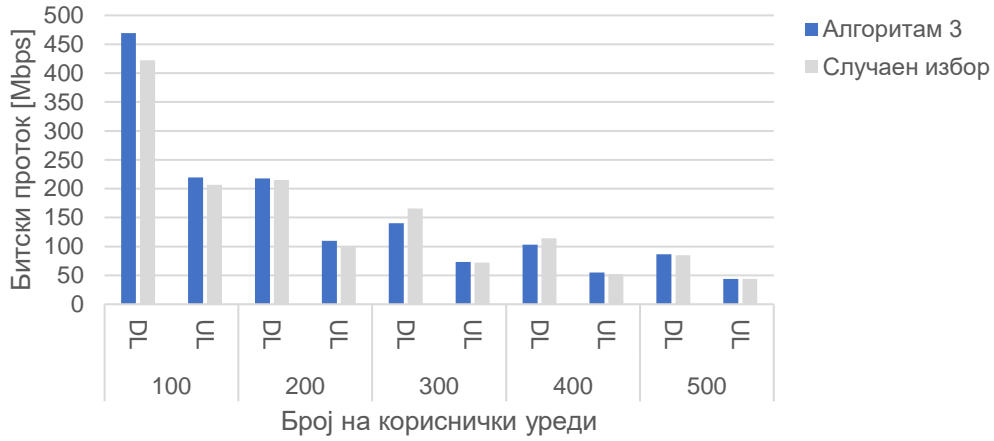


б) латентност

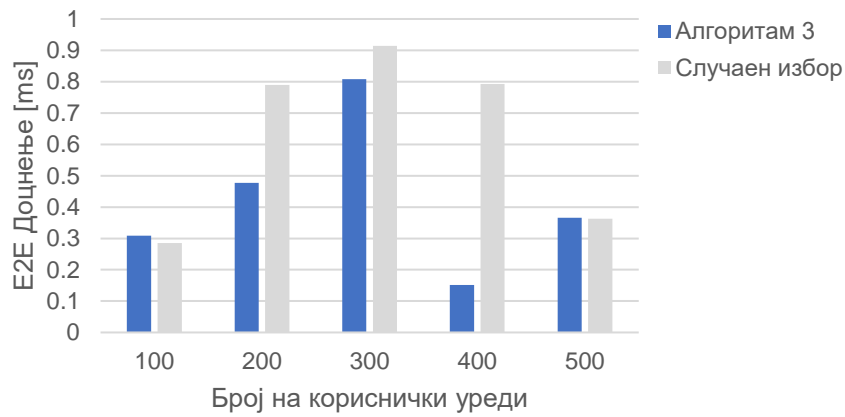


в) енергетска ефикасност

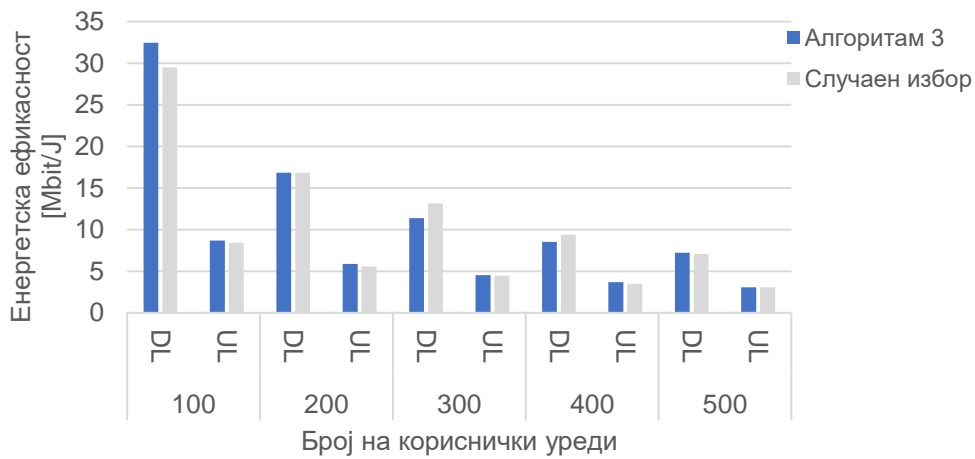
Слика 9.14 Споредба на латентноста, битскиот проток и енергетската ефикасност кај 5G мобилни мрежи во околина на магла и облак во зависност од бројот на кориснички уреди при растојание од 0 до 500 метри со и без примена на Алгоритам 3



а) битски проток

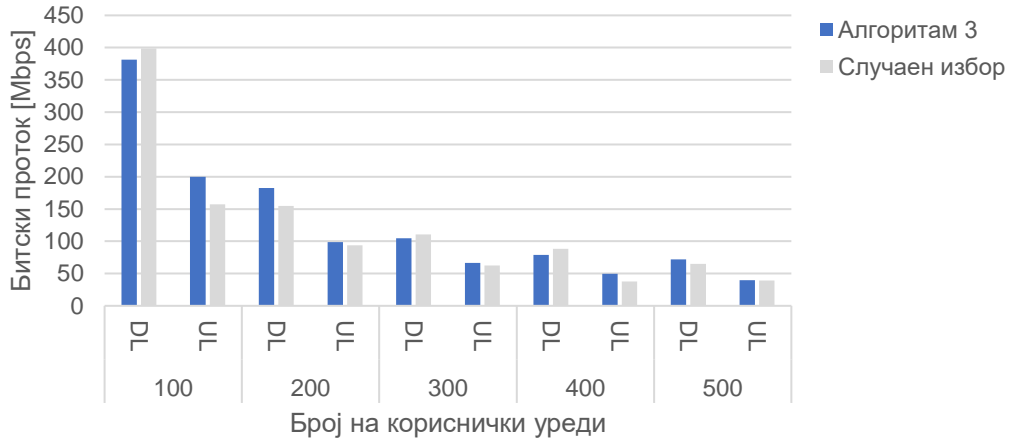


б) латентност

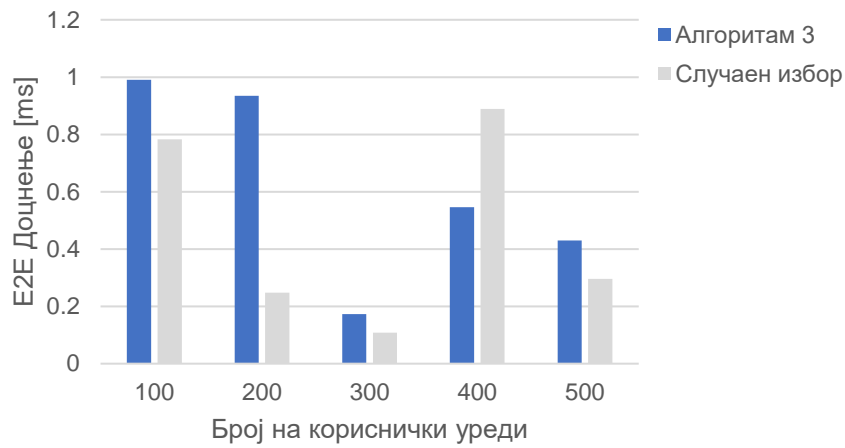


в) енергетска ефикасност

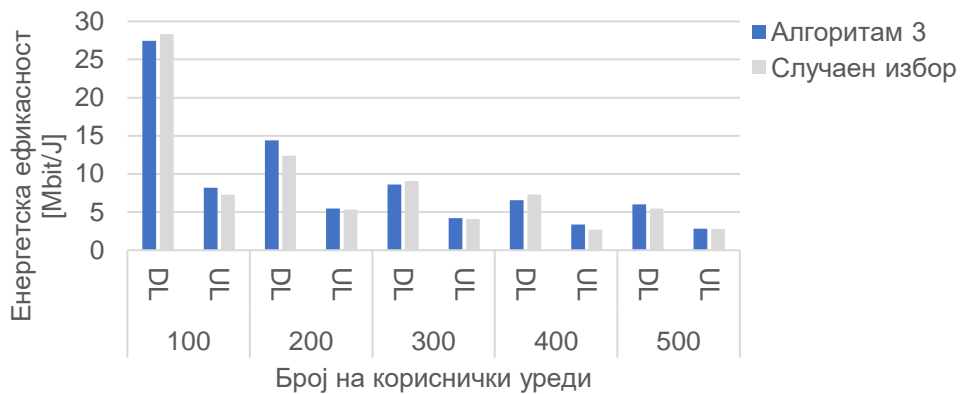
Слика 9.15 Споредба на латентноста, битскиот проток и енергетската ефикасност кај 5G мобилни мрежи во околина на магла и облак во зависност од бројот на кориснички уреди при растојание од 500 до 1000 метри со и без примена на Алгоритам 3



а) битски проток

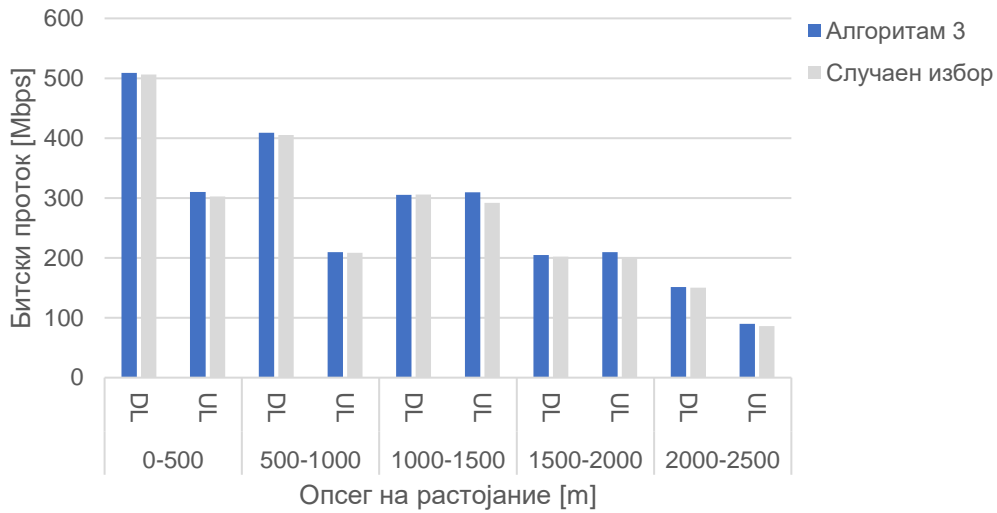


б) латентност

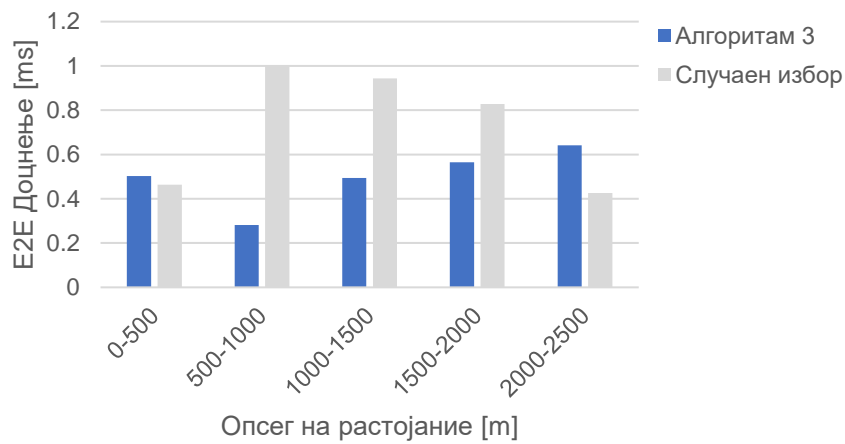


в) енергетска ефикасност

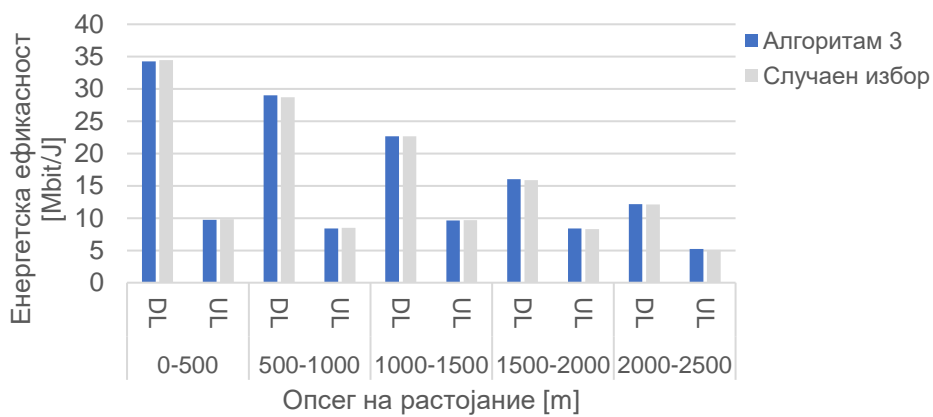
Слика 9.16 Споредба на латентноста, битскиот проток и енергетската ефикасност кај 5G мобилни мрежи во околина на магла и облак во зависност од бројот на кориснички уреди при растојание од 1000 до 1500 метри со и без примена на Алгоритам 3



а) битски проток

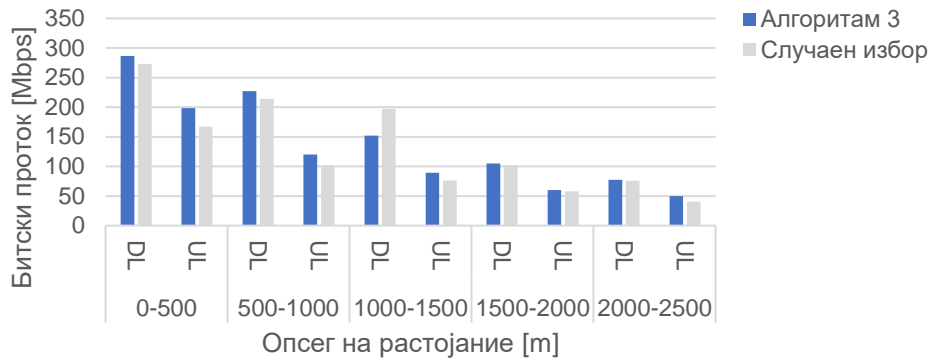


б) латентност

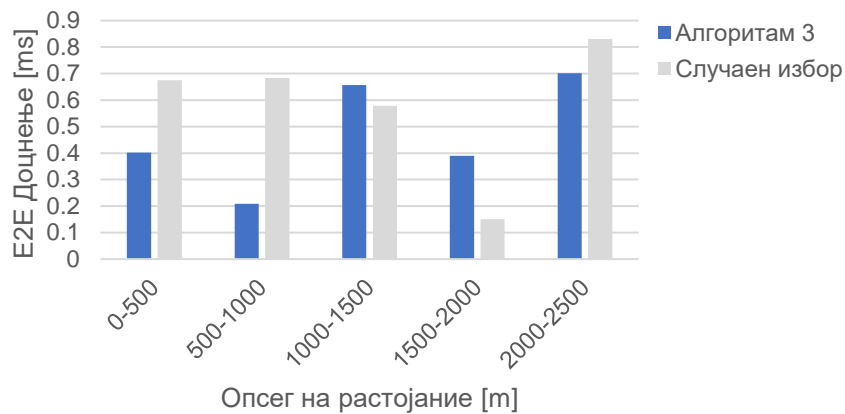


в) енергетска ефикасност

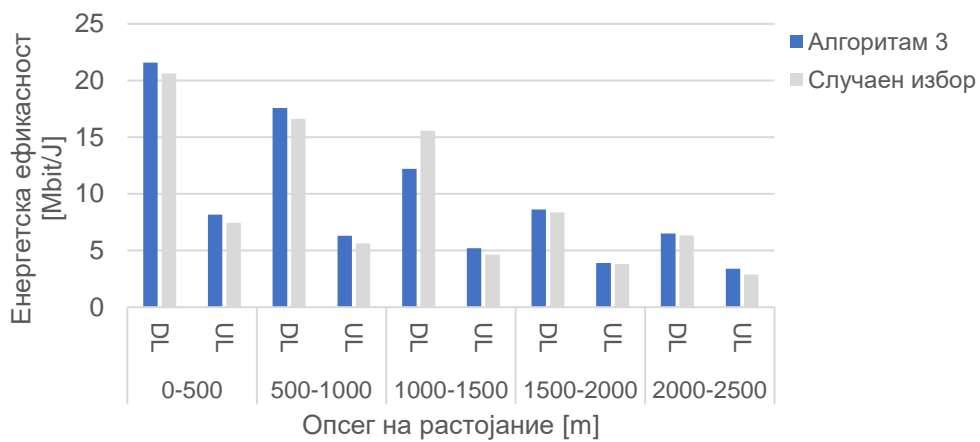
Слика 9.17 Споредба на латентноста, битскиот проток и енергетската ефикасност кај 5G мобилни мрежи во околина на магла и облак во зависност од растојанието меѓу корисничкиот уред и базната станица за 100 кориснички уреди со и без примена на Алгоритам 3



а) битски проток

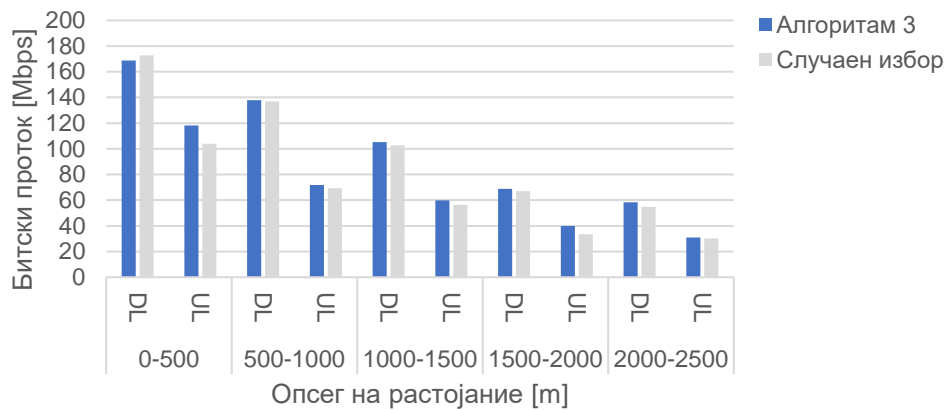


б) латентност

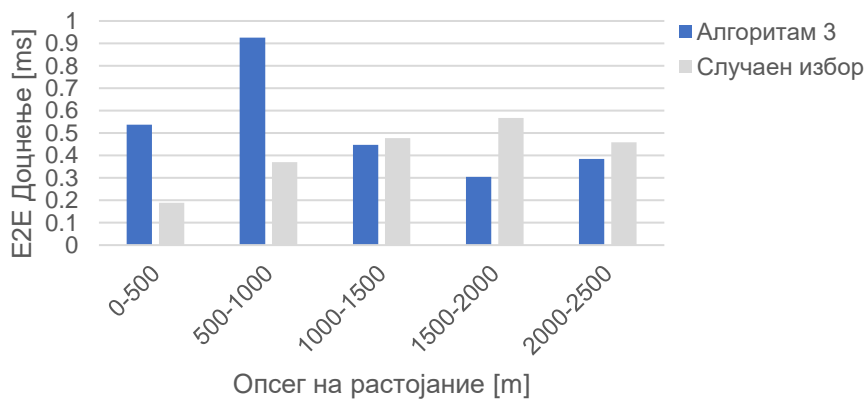


в) енергетска ефикасност

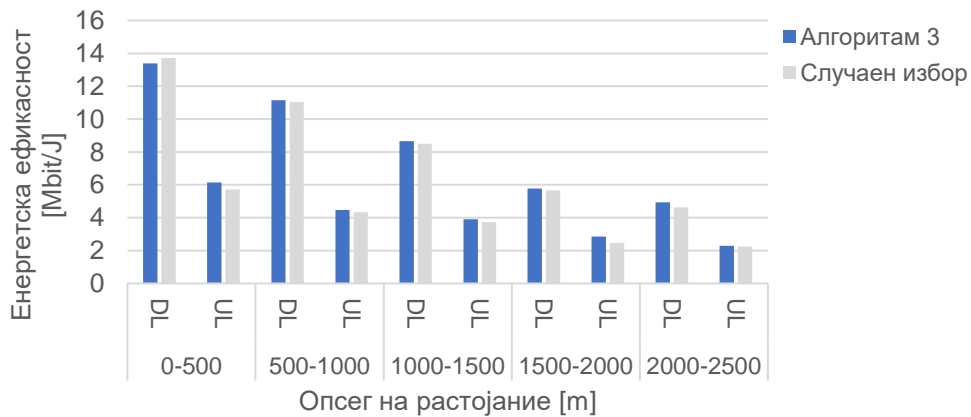
Слика 9.18 Споредба на латентноста, битскиот проток и енергетската ефикасност кај 5G мобилни мрежи во околина на магла и облак во зависност од растојанието меѓу корисничкиот уред и базната станица за 200 кориснички уреди со и без примена на Алгоритам 3



а) битски проток



б) латентност



в) енергетска ефикасност

Слика 9.19 Споредба на латентноста, битскиот проток и енергетската ефикасност кај 5G мобилни мрежи во околина на магла и облак во зависност од растојанието меѓу корисничкиот уред и базната станица за 300 кориснички уреди со и без примена на Алгоритам 3

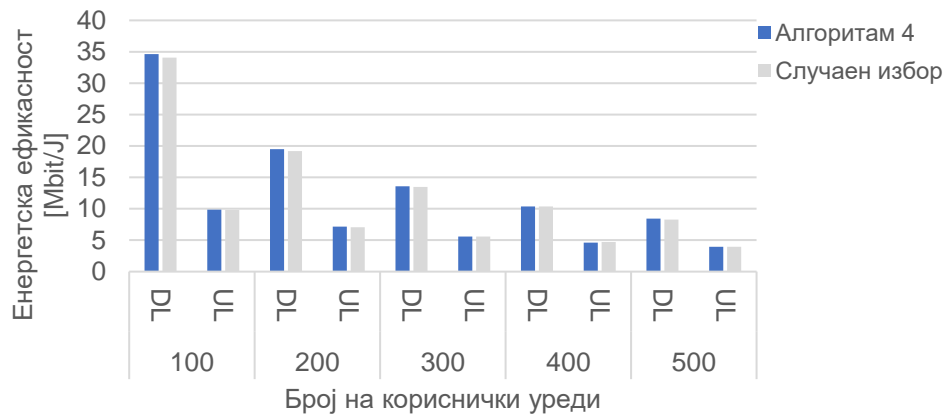


## 9.7 Евалуација на добиените резултатите според Алгоритам 4

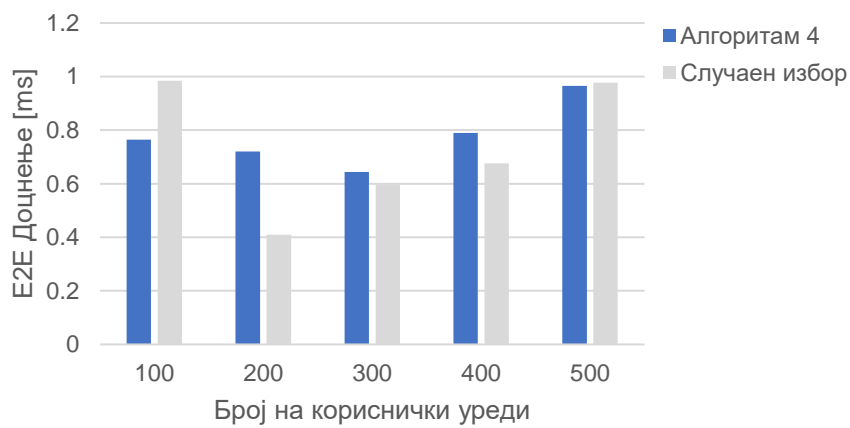
Добиените резултати според алгоритамот 4 се прикажани во продолжение и тоа:

- Споредба на добиените резултати за латентноста, битскиот проток и енергетската ефикасност кај 5G мобилни мрежи во околина на магла и облак во зависност од бројот на кориснички уреди при дадено растојание на Слика 9.20 – Слика 9.22;
- Споредба на добиените резултати за латентноста, битскиот проток и енергетската ефикасност кај 5G мобилни мрежи во околина на магла и облак во зависност растојанието при даден број на кориснички уреди на Слика 9.23 – Слика 9.25.

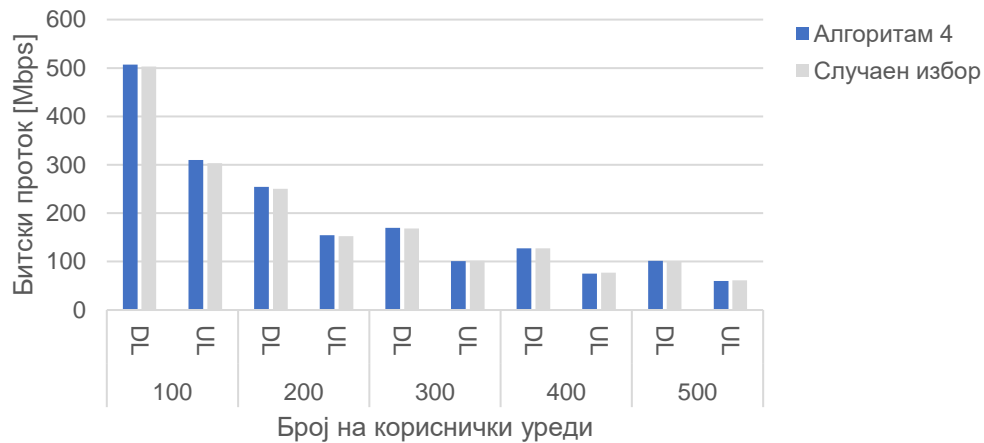
Од прикажаните резултати се гледа дека се добива подобра енергетска ефикасност во downlink насока со примена на алгоритамот 4, отколку без негова примена. Покрај тоа во некои случаи се добиваат подобри вредности или слични за латентноста, битскиот проток во (downlink и uplink насока) и енергетската ефикасност во downlink насока.



а) енергетска ефикасност



б) латентност

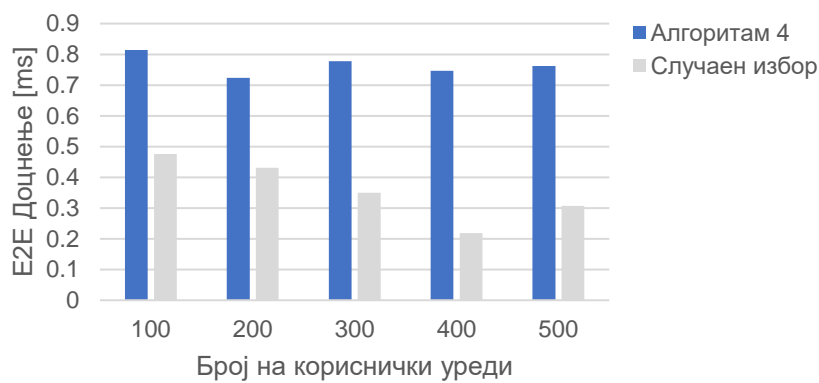


в) битски проток

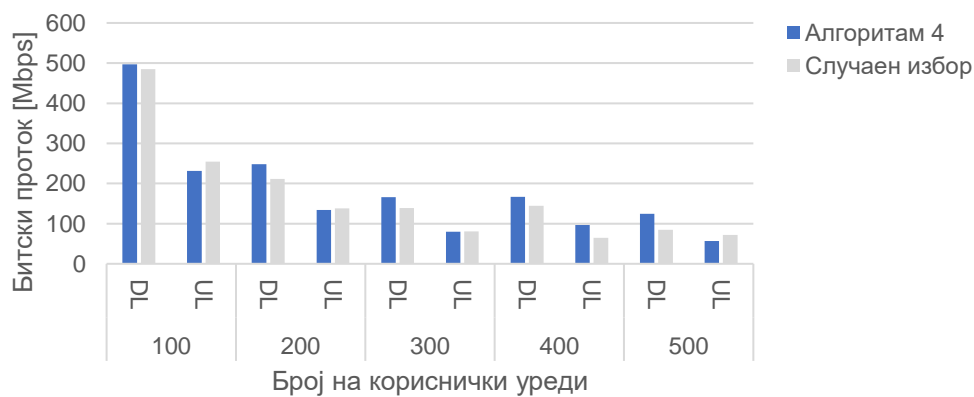
Слика 9.20 Споредба на латентноста, битскиот проток и енергетската ефикасност кај 5G мобилни мрежи во околина на магла и облак во зависност од бројот на кориснички уреди при растојание од 0 до 500 метри со и без примена на Алгоритам 4



а) енергетска ефикасност

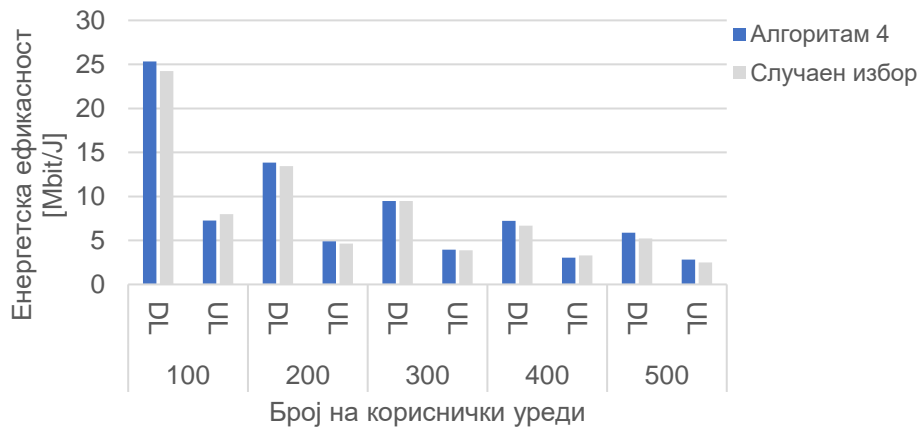


б) латентност

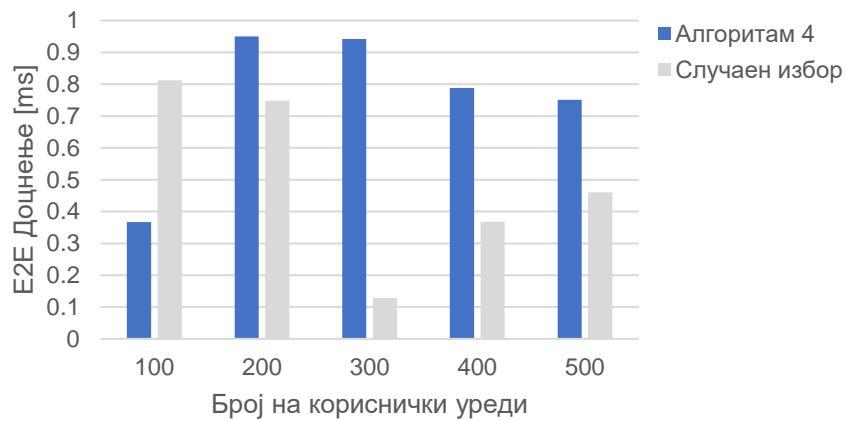


в) битски проток

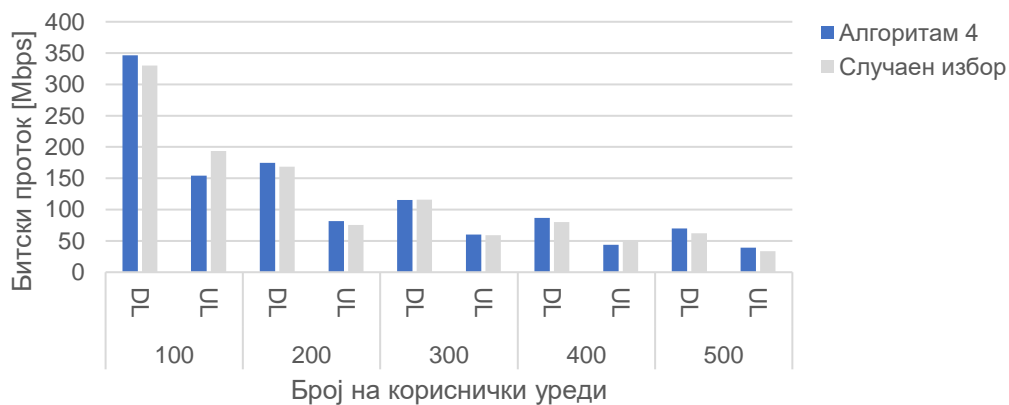
Слика 9.21 Споредба на латентноста, битскиот проток и енергетската ефикасност кај 5G мобилни мрежи во околина на магла и облак во зависност од бројот на кориснички уреди при растојание од 500 до 1000 метри со и без примена на Алгоритам 4



а) енергетска ефикасност

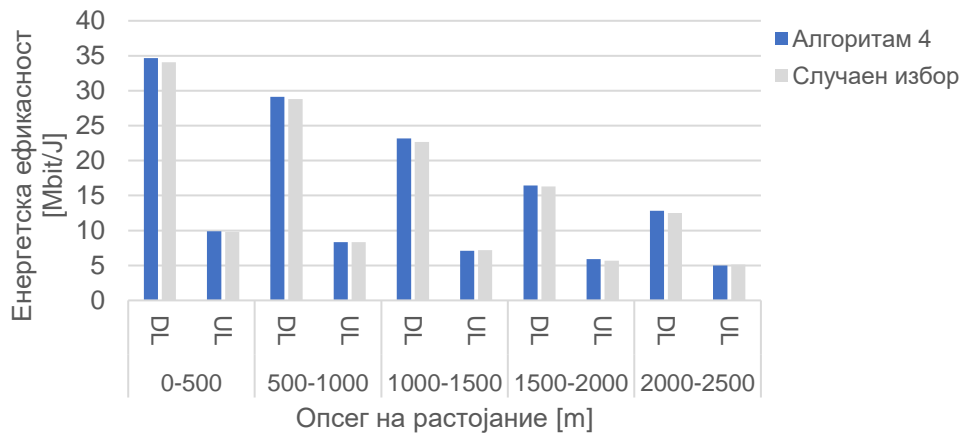


б) латентност

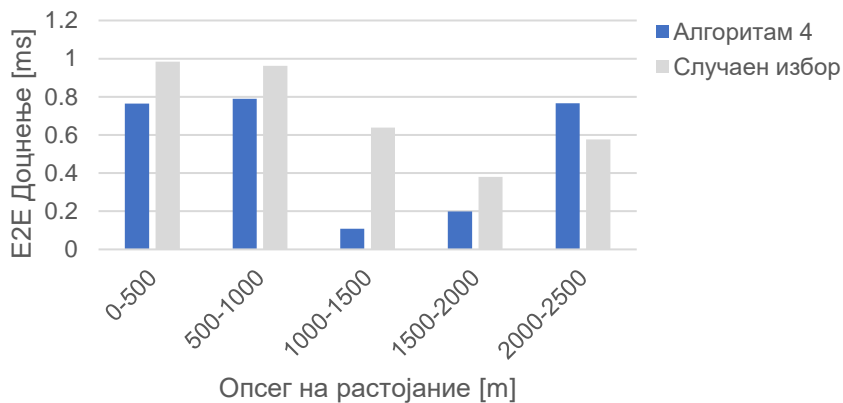


в) битски проток

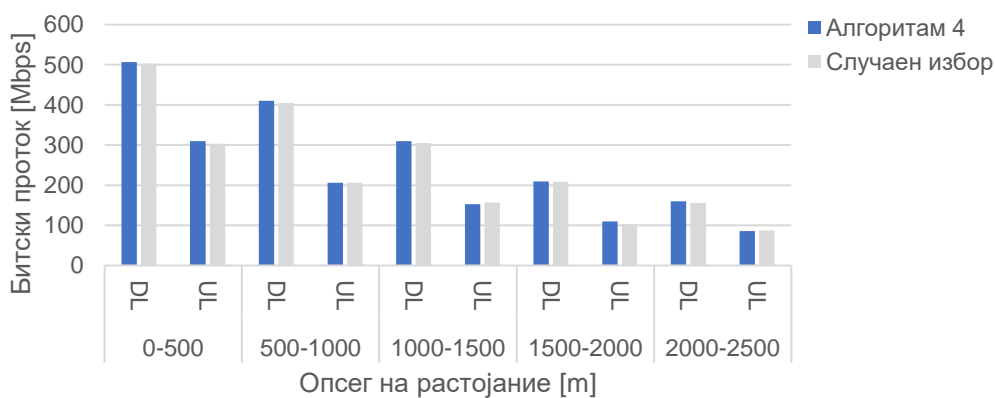
Слика 9.22 Споредба на латентноста, битскиот проток и енергетската ефикасност кај 5G мобилни мрежи во околина на магла и облак во зависност од бројот на кориснички уреди при растојание од 1000 до 1500 метри со и без примена на Алгоритам 4



а) енергетска ефикасност



б) латентност

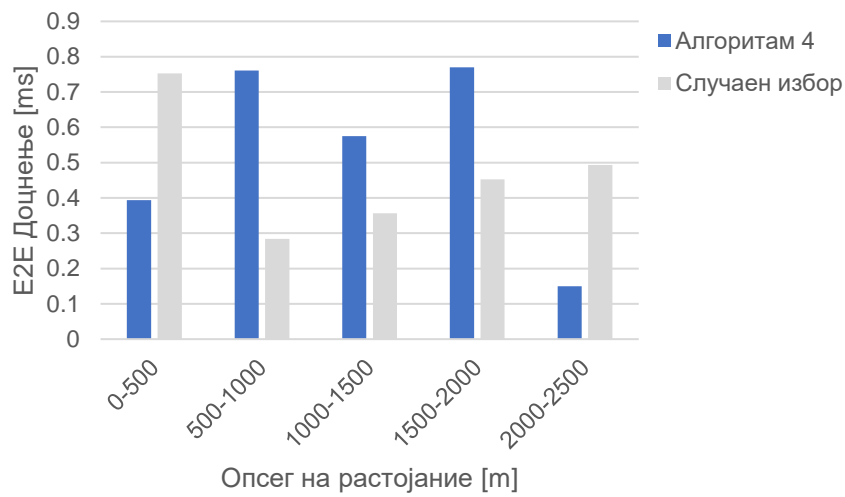


в) битски проток

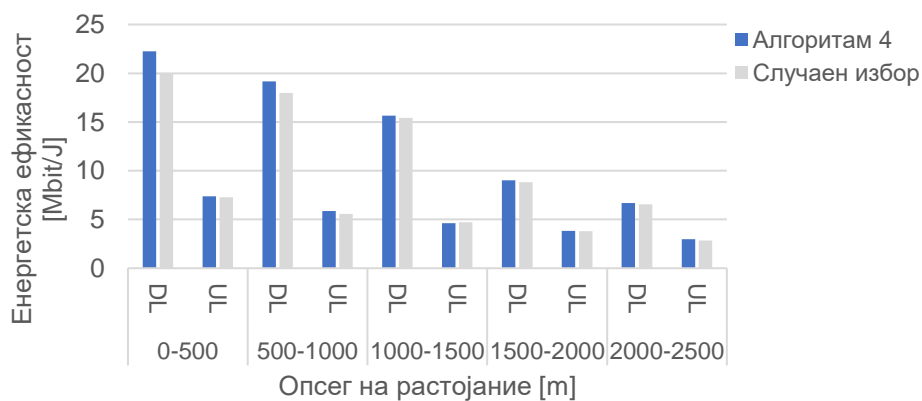
Слика 9.23 Споредба на латентноста, битскиот проток и енергетската ефикасност кај 5G мобилни мрежи во околина на магла и облак во зависност од растојанието меѓу корисничкиот уред и базната станица за 100 кориснички уреди со и без примена на Алгоритам 4



а) енергетска ефикасност

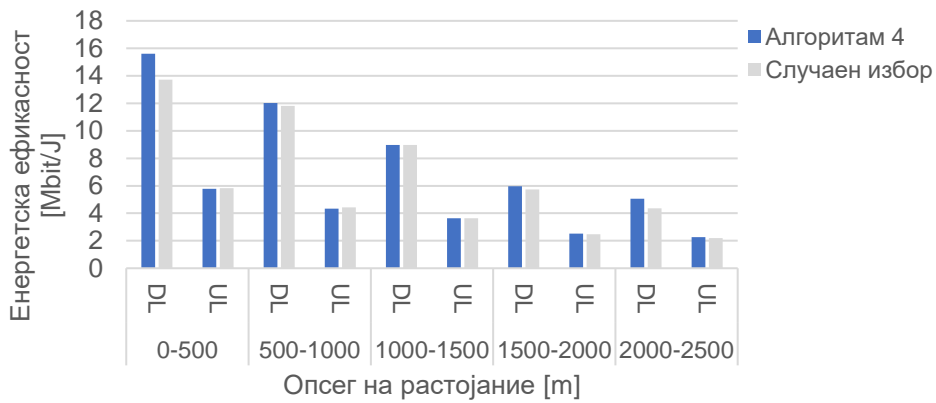


б) латентност

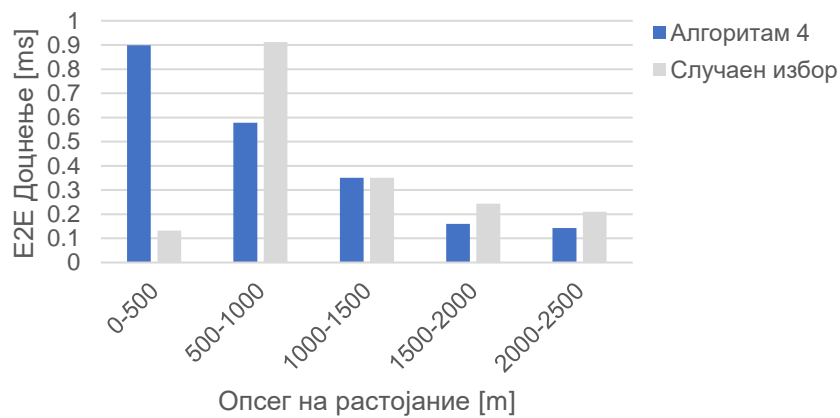


в) битски проток

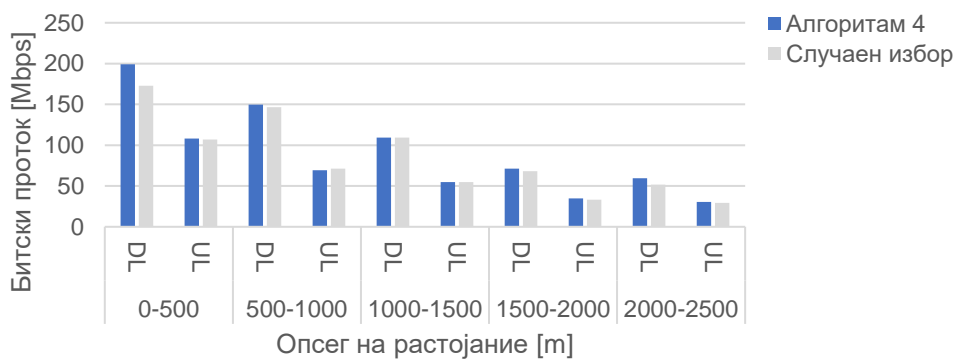
Слика 9.24 Споредба на латентноста, битскиот проток и енергетската ефикасност кај 5G мобилни мрежи во околина на магла и облак во зависност од растојанието меѓу корисничкиот уред и базната станица за 200 кориснички уреди со и без примена на Алгоритам 4



а) енергетска ефикасност



б) латентност



в) битски проток

Слика 9.25 Споредба на латентноста, битскиот проток и енергетската ефикасност кај 5G мобилни мрежи во околина на магла и облак во зависност од растојанието меѓу корисничкиот уред и базната станица за 300 кориснички уреди со и без примена на Алгоритам 4

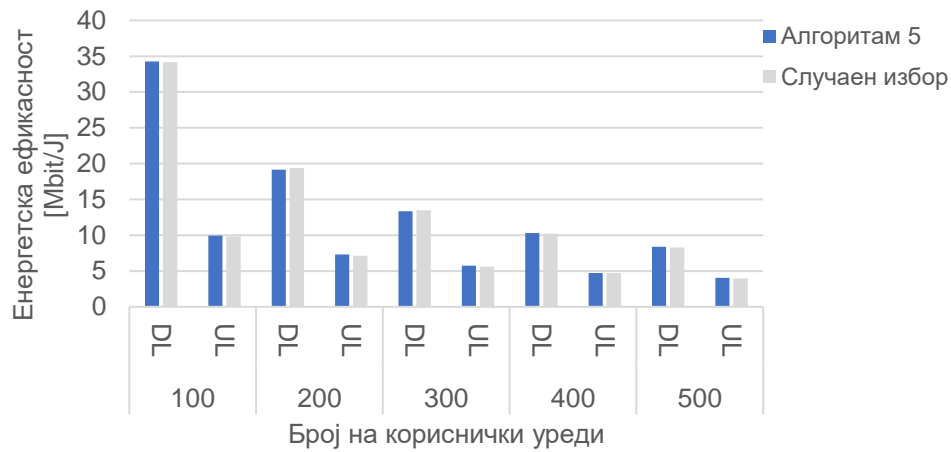
## 9.8 Евалуација на добиените резултатите според Алгоритам 5

Добиените резултати според алгоритамот 5 се прикажани во продолжение и тоа:

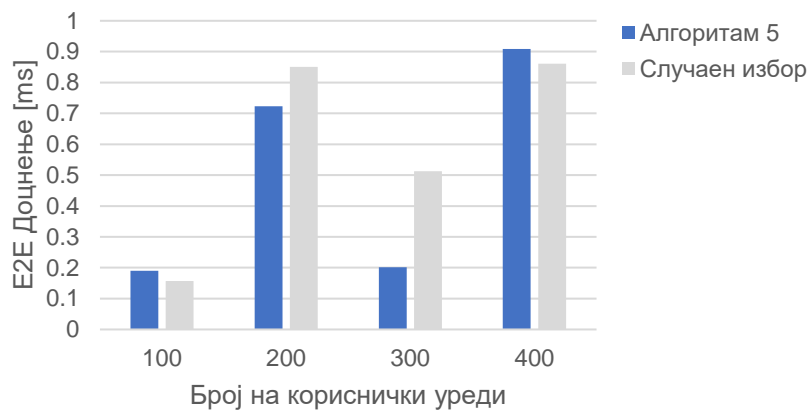
- Споредба на добиените резултати за латентноста, битскиот проток и енергетската ефикасност кај 5G мобилни мрежи во околина на магла и облак во зависност од бројот на кориснички уреди при дадено растојание на Слика 9.26 – Слика 9.28;
- Споредба на добиените резултати за латентноста, битскиот проток и енергетската ефикасност кај 5G мобилни мрежи во околина на магла и облак во зависност растојанието при даден број на кориснички уреди на Слика 9.29 – Слика 9.31.

Од прикажаните резултати се гледа дека се добива подобра енергетска ефикасност во uplink насока со примена на алгоритамот 5, отколку без негова примена. Покрај тоа во некои случаи се добиваат подобри вредности или слични за латентноста, битскиот проток во (downlink и uplink насока) и енергетската ефикасност во downlink насока.

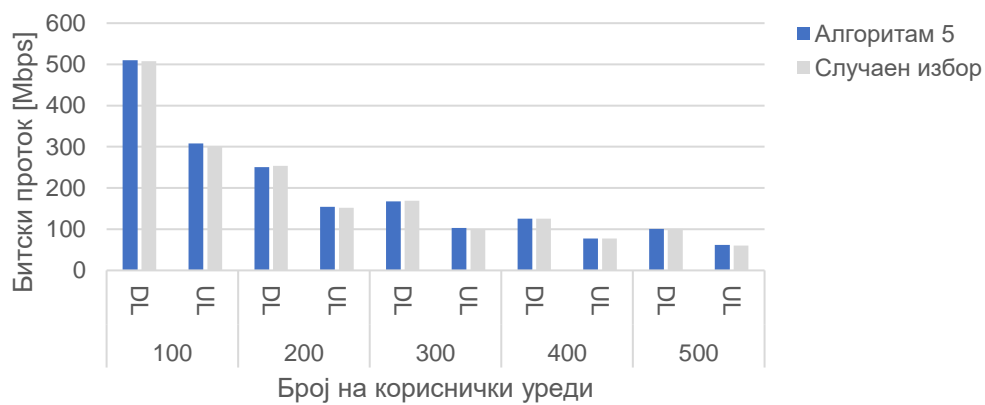




а) енергетска ефикасност

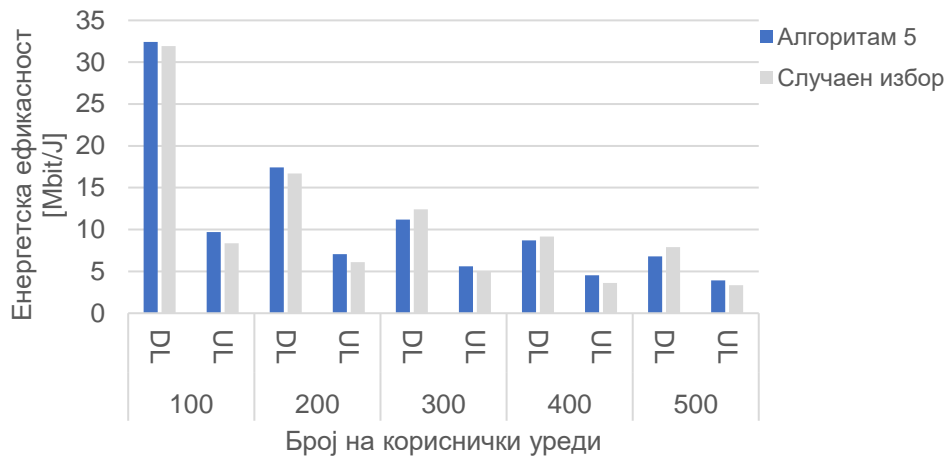


б) латентност

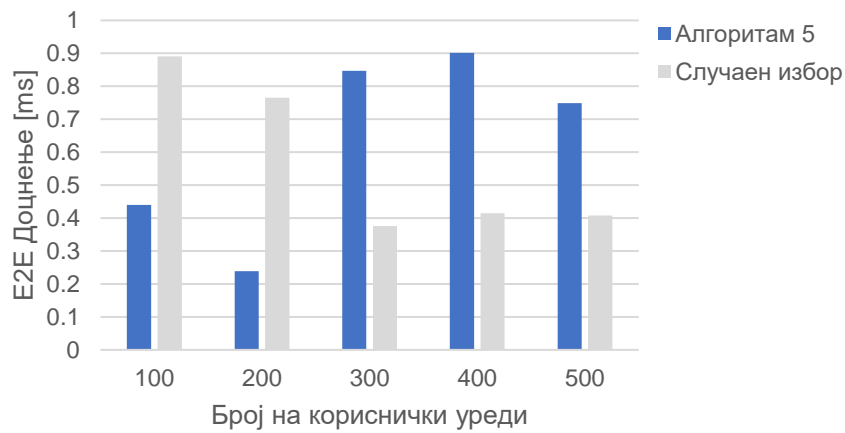


в) битски проток

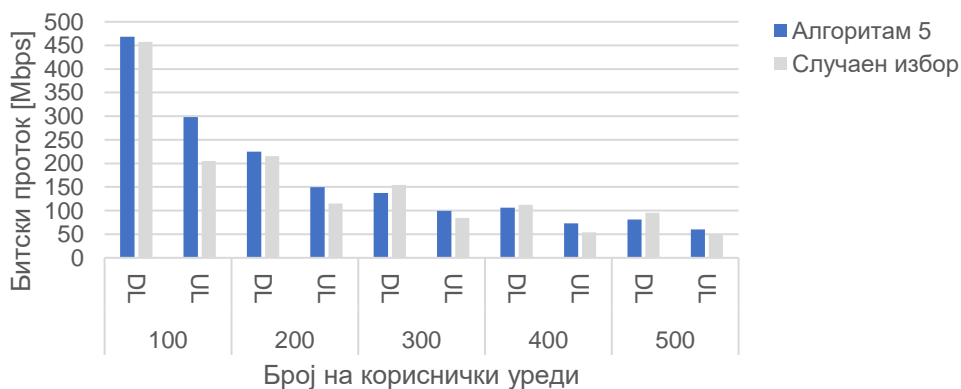
Слика 9.26 Споредба на латентноста, битскиот проток и енергетската ефикасност кај 5G мобилни мрежи во околина на магла и облак во зависност од бројот на кориснички уреди при растојание од 0 до 500 метри со и без примена на Алгоритам 5



а) енергетска ефикасност

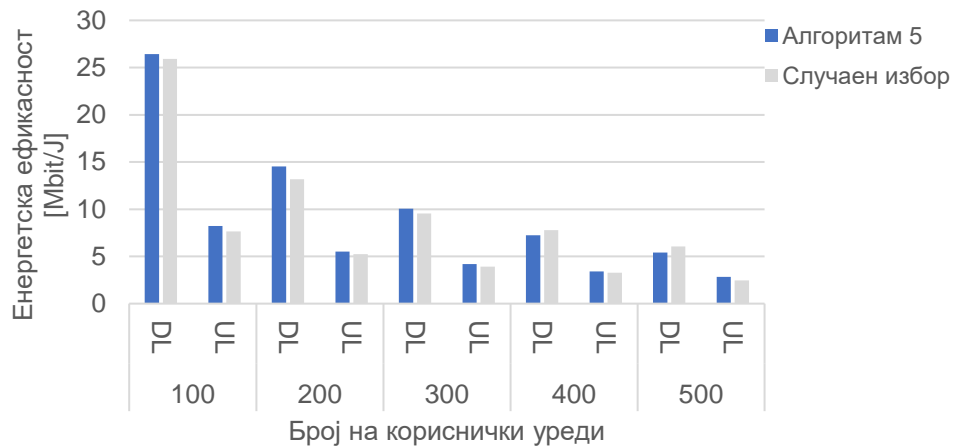


б) латентност

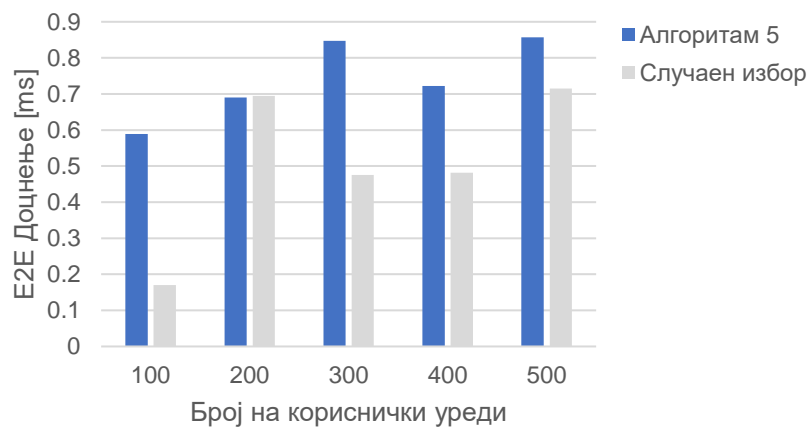


в) битски проток

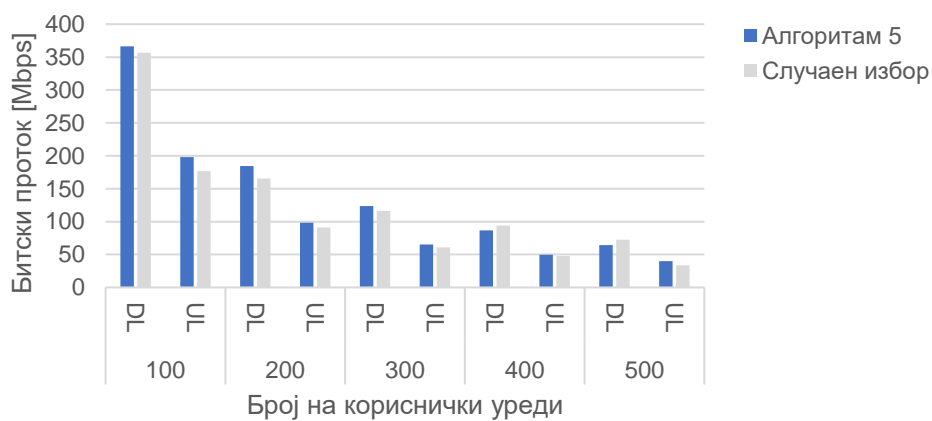
Слика 9.27 Споредба на латентноста, битскиот проток и енергетската ефикасност кај 5G мобилни мрежи во околина на магла и облак во зависност од бројот на кориснички уреди при растојание од 500 до 1000 метри со и без примена на Алгоритам 5



а) енергетска ефикасност

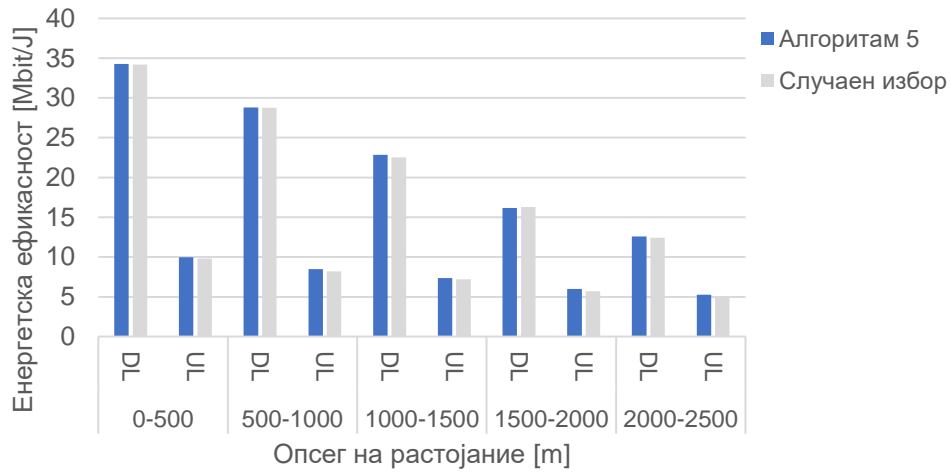


б) латентност



в) битски проток

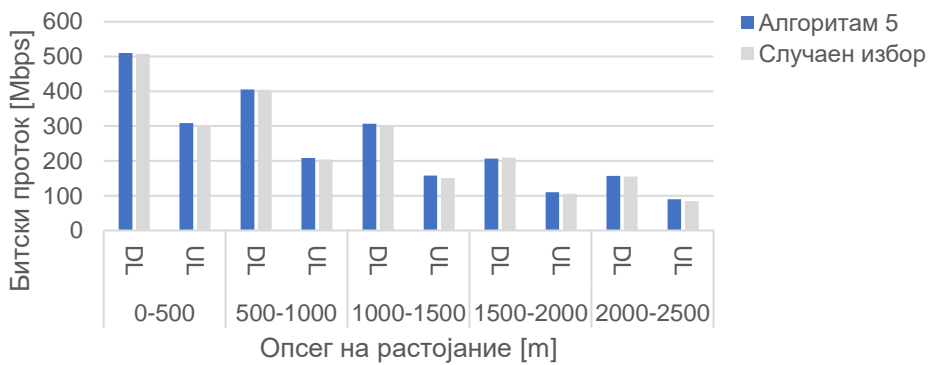
Слика 9.28 Споредба на латентноста, битскиот проток и енергетската ефикасност кај 5G мобилни мрежи во околина на магла и облак во зависност од бројот на кориснички уреди при растојание од 1000 до 1500 метри со и без примена на Алгоритам 5



а) енергетска ефикасност

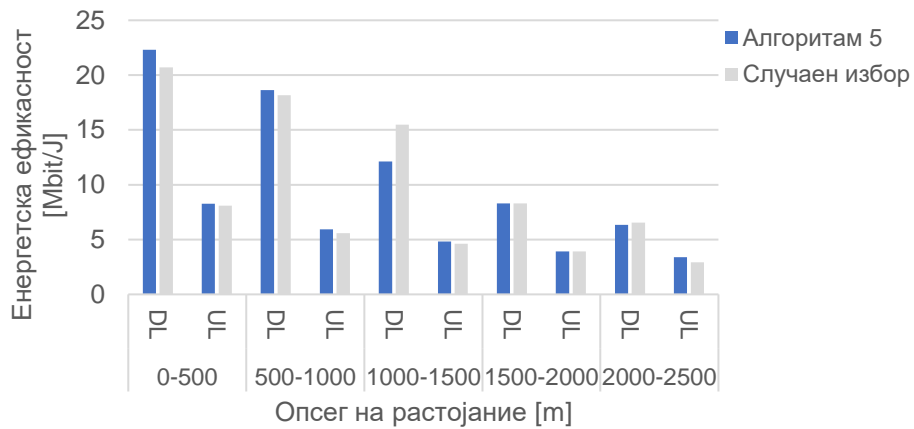


б) латентност

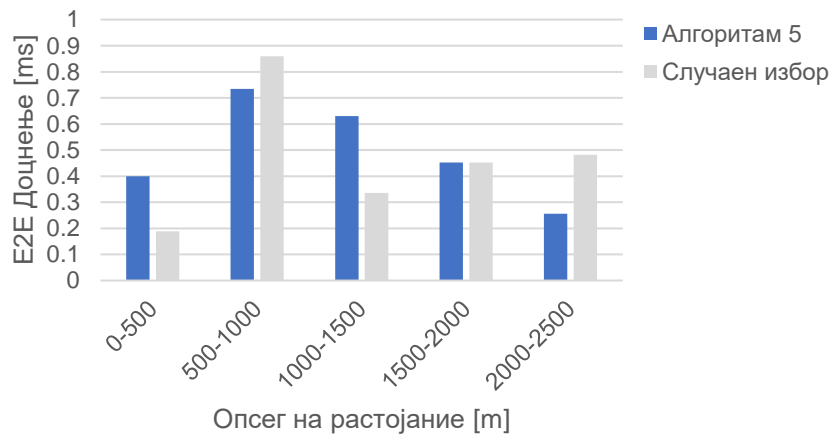


в) битски проток

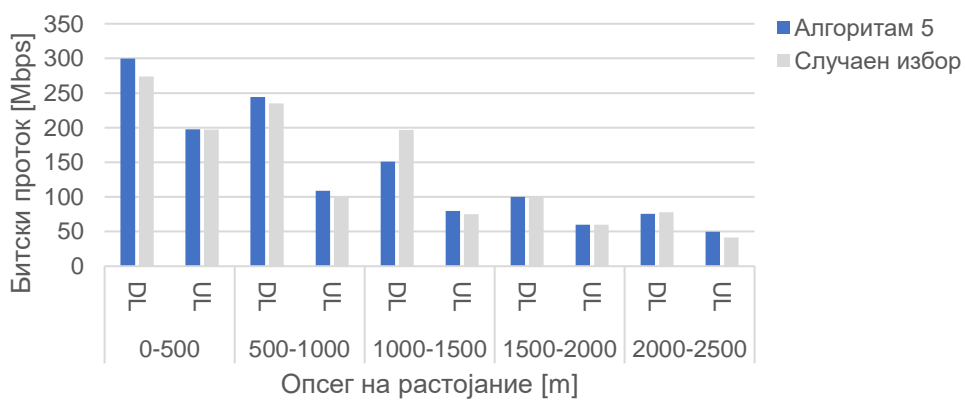
Слика 9.29 Споредба на латентноста, битскиот проток и енергетската ефикасност кај 5G мобилни мрежи во околина на магла и облак во зависност од растојанието меѓу корисничкиот уред и базната станица за 100 кориснички уреди со и без примена на Алгоритам 5



а) енергетска ефикасност

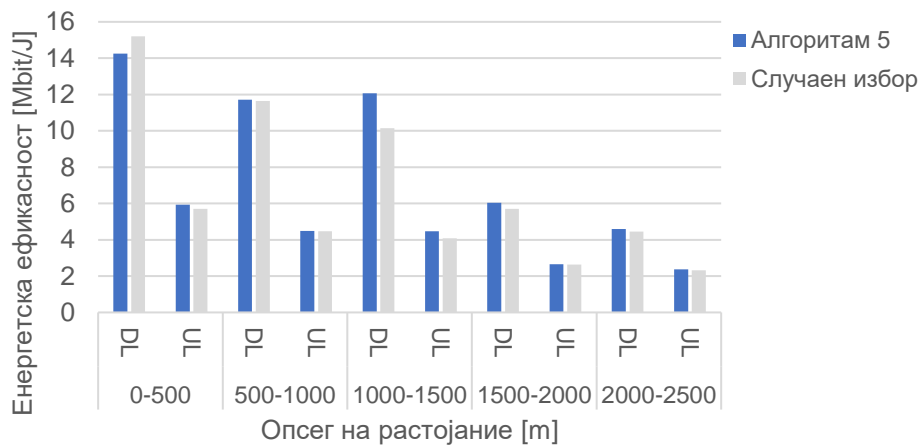


б) латентност

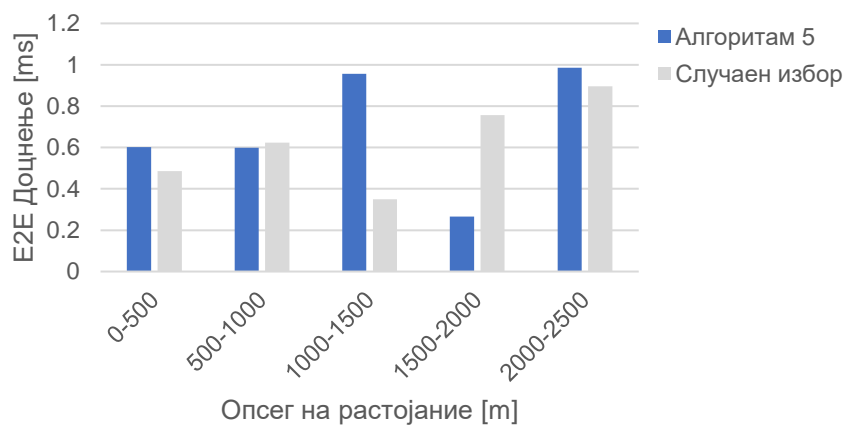


в) битски проток

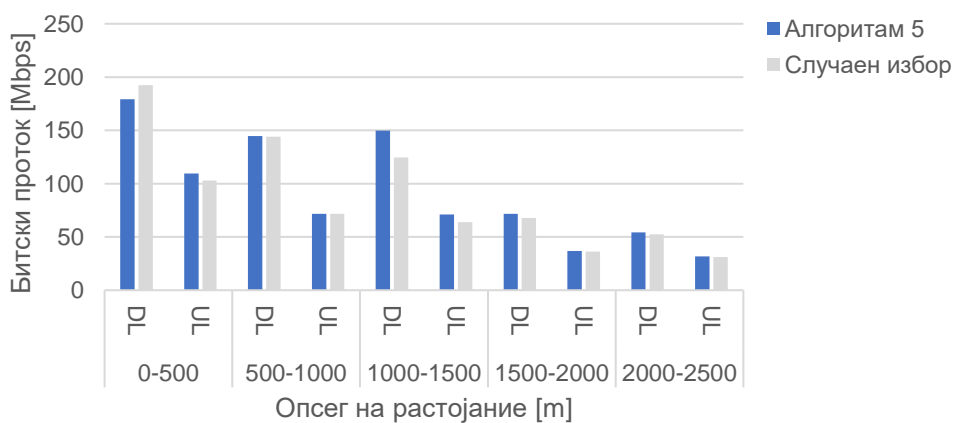
Слика 9.30 Споредба на латентноста, битскиот проток и енергетската ефикасност кај 5G мобилни мрежи во околина на магла и облак во зависност од растојанието меѓу корисничкиот уред и базната станица за 200 кориснички уреди со и без примена на Алгоритам 5



**а) енергетска ефикасност**



**б) латентност**



**в) битски проток**

**Слика 9.31** Споредба на латентноста, битскиот проток и енергетската ефикасност кај 5G мобилни мрежи во околина на магла и облак во зависност од растојанието меѓу корисничкиот уред и базната станица за 300 кориснички уреди со и без примена на Алгоритам 5

## 9.9 Дискусија на резултатите

Изборот на радио пристапна мрежа пред сè зависи од сервисните побарувања на податоците кои се пренесуваат како што се битската брзина неопходна за пренос на податоците (во downlink и uplink насока), латентноста (доцнењето од крај до крај), енергетската ефикасност на радио пристапната мрежа, и др.

Во рамките на оваа глава беа презентирани 5 алгоритми за оптимална селекција на 5G базна станица. Притоа е направена споредба на тоа какви резултати се добиваат кога секој алгоритам ќе се примени и кога секој алгоритам нема да се примени и се заклучи дека се постигнуваат подобри резултати во случајот кога секој алгоритам е применет. Притоа:

- со алгоритам 1 се постигнува пониска латентност;
- со алгоритам 2 се постигнува поголем битски проток во downlink насока;
- со алгоритам 3 се постигнува поголем битски проток во uplink насока;
- со алгоритам 4 се постигнува подобра енергетска ефикасност во downlink насока; и
- со алгоритам 5 се постигнува подобра енергетска ефикасност во uplink насока.

Кој алгоритам ќе се примени, зависи пред сè, од преференците и потребите на корисникот, а воедно и од договорот за нивото на сервис - Service Level Agreement (SLA), што постои меѓу корисникот на сервисите и телекомуникацискиот оператор.

## Трет дел

### 10 Заклучок

5G мобилните мрежи од перспектива на барањата на корисниците за мобилни податочни услуги, релативно во однос на денешната ситуација, треба да поддржат [52 - 53], [123]:

- 1000 пати повеќе волумен на мобилни податочни услуги по област;
- 10 до 100 пати повеќе поврзани уреди; и
- 10 до 100 пати повеќе повисоки типични податочни брзини по корисник.

Во 2017 година веќе се објавени спецификациите за 5G [124]:

- Врвна битска брзина од 20 Gbps во download насока;
- Врвна битска брзина од 10 Gbps во uplink насока;
- Латентност во просек од 1ms (дури и пониска), а максималната латентност не смее да надмине 4 ms
- Поддршка на 1 милион уреди по квадратен километар
- Секој фреквенциски носител треба да има барем од 100 MHz слободен пропусен опсег, со можност овој опсег да се прошири кон 1GHz каде е возможно.
- 5G базните станици треба да дадат поддршка на корисниците кои ќе се движат со брзина од 0 km/h до 500 km/h.
- Врвна спектрална ефикасност од 30 бити по секунда по херц во downlink насока;
- Врвна спектрална ефикасност од 15 бити по секунда по херц во uplink насока;
- Битска брзина по корисник од 100 Mbps во downlink насока
- Битска брзина по корисник од 50 Mbps во uplink насока

Во оваа глава, се изнесени сумарните заклучоци и придонеси (контрибуции) од докторската дисертација кои се однесуваат на клучните идентификувани проблеми согласно утврдените истражувачки прашања кои ги адресира дисертацијата.

#### 10.1 Заклучни забелешки

Главната цел на оваа докторска дисертација беше да се направи евалуација на квалитетот на оркестрираните сервиси во околина на облак и магла кај 5G мобилните мрежи, а воедно и да се предложи алгоритам за оптимална селекција 5G базна станица



со цел да се задоволат барањата на корисниците на 5G паметни мобилни уреди, кои имаат се поголеми побарувања, со што рапидно се зголемува податочниот сообраќај.

Така со помош на оваа докторска дисертација, е докажано и анализирано дека е возможно да се постигне задоволително обезбедување на QoS во сегашните и идните 5G мобилни и безжичните мрежи и сервиси.

Имено, овде најпрво беше разгледувана обработката на податоците во околина на облак и магла кај 5G мобилните мрежи бидејќи најголеми резултати може да се постигнат доколку се тргне со анализа на предностите и недостатоците на знаењата што веќе постојат, а кои мора да се продлабочат и усовршат, или во крајна мера да се исцрпат одредени инспиративни идеи од истите и да се открие нешто ново и подобро.

Основната цел на истражувањата во рамките на оваа докторска дисертација беа да се провери квалитетот на оркестрираните сервиси во околина на облак и магла кај 5G мобилните мрежи, во насока на подобрување на QoS параметрите, како што се латентност, битски проток и енергетска ефикасност. Затоа најпрво е предложен модел и архитектура за хибридно оркестрирање на сервисите во околина на магла кај 5G мобилните мрежи, а потоа е направена евалуација на истиот со QoS параметрите. Исто така беа предложени 5 алгоритми за оптимална селекција на 5G базна станица врз основа сервисните побарувања на овие QoS параметри од страна на корисникот.

Освен тоа, основна задача на истражувањето беше да одговори на низа прашања меѓу кои:

1. Како да се изведе самото протоколно ниво и напредна интелигенција на оркестрирање на механизмите во околина на магла кај идните мобилни и безжични мрежи?

*Одговор:* Со користење на **оркестраторот (диригент) на сервисите во хибридна околина**, кој се состои од неколку нивоа и тоа: регионални, доменски и федерациски оркестратори на сервисите, кои овозможуваат дистрибуција на облакот во секој дел од 5G мрежата (од јадрото, кон радио пристапниот дел, па се до ниво на 5G паметниот мобилен уред).

2. Како до подобар квалитет на сервис кај идните 5G мобилни и безжични мрежи (за било кој сервис)?

*Одговор:* Со заедничка имплементација маглата и облакот во 5G мобилните мрежи. Со самата евалуација на QoS и QoE параметрите се потврди дека со имплементација на маглата се постигнуваат подобри резултати во поглед на латентноста, битската брзина и енергетската ефикасност.

3. Како да се изградат новите мобилни и безжични IP мрежи при што обработката на податоци би се извршувала во околина на магла?

*Одговор:* Одговорот е повторно со користење на **оркестраторот (диригент) на сервисите во хибридна околина**, а воедно и имплементација на петте предложени алгоритми за оптимална селекција на 5G базна станица со што се постигнува пониска латентност, поголем битски проток и подобра енергетска ефикасност.

4. Каде во архитектурата на 5G мрежите да се постават механизмите за оркестрирање за обработка на податоците во околина на магла, а воедно да имаме подобар квалитет на оркестрираните сервиси?

*Одговор:* Со самата имплементација на **оркестраторот (диригент) на сервисите во хибридна околина**, практично механизмите за оркестрирање на сервисите во околина на облак се дистрибуирани низ целата архитектура на 5G мрежата почнувајќи од јадрото, потоа кон радио пристапниот дел на мрежата и сè до ниво на мобилен уред.

Понатаму во воведниот дел беше дадена следнава **главна (општа) хипотеза:**

**Воведувањето на механизми и модули за оркестрирање на сервисите во околина на магла (Fog Computing Service Orchestration Mechanisms) допринесува кон високо задоволително ниво на сите QoS параметри и добивање врвни оценки за QoS параметрите за било кои мултимедиски сервиси.**

И следниве две посебна тези:

- 1) *Воведувањето на механизми и модули за оркестрирање на сервисите во околина на магла (Fog Computing Service Orchestration Mechanisms) во 4G хомогени мобилните и безжични IP мрежи допринесува кон високо задоволително ниво на сите QoS параметри за даден мултимедиски сервис.*
- 2) *Воведувањето на механизми и модули за оркестрирање на сервисите во околина на магла (Fog Computing Service Orchestration Mechanisms) во 5G хетерогени мобилните и безжични IP мрежи допринесува кон високо задоволително ниво на сите QoS параметри за било кои дадени мултимедиски сервиси.*

Оваа главна хипотеза, како и посебните тези беа потврдени со евалуација на QoS параметрите (латентност, битски проток, енергетска ефикасност) во глава 8, со што се потврди дека маглата има подобри параметри во однос на облакот независно од генерацијата на мобилна мрежа.

Со помош на направената евалуација на QoS параметрите во глава 8 е заклучено дека доколку маглата се имплементира независно во било која мобилна мрежа дава подобри резултати од облакот во поглед на латентноста, битската брзина и енергетската ефикасност. Исто така со имплементација на маглата 5G мрежата има далеку подобри перформанси отколку 3G и 4G мрежите. Анализата покажа дека маглата за разлика од облакот кај 5G мрежите обезбедува високо ниво на задоволни корисници за било кој мултимедиски сервис, највисоко ниво на мултимедиска сервисна пристапност (рата), широкопојасни битски брзини, оптимално користење на сите ресурси од достапните радио пристапни мрежи, минимална цена на чинење по сервис и интелегентно балансирање со сообраќајниот товар преку различните радио пристапни технологии.

Понатаму, во главата 10 беа прикажани 5 можни алгоритми за оптимална селекција на 5G базна станица. Изборот на таквата радио пристапна мрежа пред сè зависи од сервисните побарувања на податоците кои се пренесуваат како што се битската брзина неопходна за пренос на податоците (во uplink и downlink насока), латентноста (доцнењето од крај до крај), енергетската ефикасност на радио пристапната мрежа, и др. Кој алгоритам ќе се примени, зависи пред сè, од преференците и потребите на корисникот, а воедно и од договорот за нивото на сервис - Service Level Agreement (SLA), што постои меѓу корисникот на сервисите и телекомуникацискиот оператор.

Како заклучок облакот кај 5G мрежата ќе е дифузно распространет помеѓу уредите на клиентот и тоа со честа мобилност, односно облакот ќе постане магла [56]. Сè повеќе ќе се извршува виртуелна мрежна функционалност во околина на магла, што ќе обезбеди *сè мобилно присутен (mubiquitous)* сервис за корисниците. Ова ќе овозможи појава на нови сервисни парадигми како на пример било што како сервис - Anything as a Service (AaaS) каде уредите, терминалите, машините, паметните нешта и роботите ќе станат иновативни алатки кои ќе продуцираат и користат апликации, сервиси и податоци.

## 10.2 Придонеси на докторската дисертација

Оваа докторка дисертација ги дава следните придонеси (контрибуции) на дисертацијата:

1. Предложена е нова 5G мобилна мрежна архитектура со напредни целуларни RAT кои се надополнети со напредни безжични локални пристапни мрежи (Wireless Local Area Networks – WLAN или WiFi) и активни оддалечени јазли на бекхаул поврзувањето од радио мрежата па се до основната мрежа;

2. Понуден е еден интелигентен напреден механизам за квалитетот на оркестрираните сервиси во околина на магла кај постојните и идните (5G) хетерогените мобилни и безжични мрежи, со кој се постигнува најдобра цена-перформанси, се одбира/ат најдобра/и мрежа/и (или комбинација од радио пристапни мрежи) за даден мултимедиски сервис да има максимално добар квалитет на услуга. На тој начин се резултира со повисок степен на QoS/QoE кај сите корисници, односно поголемо задоволство на сите корисници за сервисите и услугите што ги користат.
3. Уште повеќе, придонесот е во обезбедувањето на корисничко-ориентирана мрежа каде корисникот нема потреба да знае преку која мрежна технологија се врши оркестрирање и опслужување на сервисите со неговиот конектиран мобилен уред. Овие механизми за оркестрирање на сервисите во околина на магла се отворени и независни кон сите можни постоечки и идни мобилни и безжични мрежни технологии. Затоа еден ваков механизам за оркестрирање на сервисите во околина на магла доколку се имплементира во 5G мрежите ќе има можност да користи било која радио пристапна технологија, бидејќи е дефиниран независно од технологиите, на мрежно IP ниво. Уште повеќе тој механизам е скалабилен и флексибилен, бидејќи лесно може да се имплементира кај било кој нов радио интерфејс и нова радио пристапна технологија.
4. Исто така, со помош на овие механизми за оркестрирање, еден паметен 5G мобилен уред што ќе комбинира и користи агрегиран сообраќај од сите погодни радио пристапни мрежи за сите користени мултимедиски сервиси, лесно може да ги достигне планираните 5G агрегирани битски брзини кои сега се заговараат (од редот на 50 Gbps за мала мобилност, 10 Gbps за висока мобилност и 1Gbps насекаде вклучувајќи го работ на клетката). На тој начин оваа дисертација дава придонес за високиот степен на QoS/QoE поддршка на сите сервиси, високи битски брзини, подобрена мобилност и сè присутност во идните мобилни 5G мрежи, донесувајќи ја комуникацијата на планетарно ниво, на едно навистина повисоко и поквалитетно рамниште.
5. Се постигнува подобра енергетска ефикасност, кое пак резултира до поголем животен век на батериите кај мобилните кориснички уреди, кое пак од своја страна ќе допринесе до поголемо задоволство на корисниците на мобилни уреди. Исто така подобрата енергетска ефикасност значително влијае врз намалувањето оперативните трошоци за водењето на една мрежа, кај мрежните оператори.

Добиените резултати и можности на квалитетот на оркестрираните сервисите во околина на магла, имаат широка научна примена, и влијаат токму во тоа, овие оркестрирачки механизми во околина на облак да влезат во рамките на финалните стандарди за 5G мрежите, или во најмала мера да учествуваат во креирањето на логиката, парадигмата и архитектурата на 5G мобилните мрежи.

## Работна библиографија

- [1] F. Boccardi; et al., “Five Disruptive Technology Directions for 5G,” *IEEE Communications Magazine*, vol. 52, no. 2, pp. 74-80, 2014.
- [2] N. Bhushan; et al., “Network Densification: The Dominant Theme for Wireless Evolution into 5G,” *IEEE Communications Magazine*, vol. 52, no. 2, pp. 82-89, 2014.
- [3] B. Bangerter, S. Talwar, R. Arefi and K. Stewart, “Networks and Devices for the 5G Era,” *IEEE Communications Magazine*, vol. 52, no. 2, pp. 90-96, 2014.
- [4] C. Wang; et al., “Cellular Architecture and Key Technologies for 5G Wireless Communication Networks,” *IEEE Communications Magazine*, vol. 52, no. 2, pp. 122-130, 2014.
- [5] T. Janevski, “5G Mobile Phone Concept,” in *6th IEEE Consumer Communications and Networking Conference (CCNC)*, Las Vegas, USA, 2009.
- [6] W. W. Lu, “An Open Baseband Processing Architecture for Future Mobile Terminals Design,” *IEEE Wireless Communications*, vol. 15, no. 2, pp. 110-119, 2008.
- [7] A. Tudzarov and T. Janevski, “Design for 5G Mobile Network Architecture,” *International Journal of Communication Networks and Information Security (IJCNIS)*, vol. 3, no. 2, pp. 112-123, 2011.
- [8] M. Josef Noll and M. Chowdhury, “5G – Service Continuity in Heterogeneous Environments,” *Wireless Personal Communications*, vol. 57, no. 3, pp. 413-429, 2011.
- [9] T. Janevski, *NGN Architectures, Protocols, and Services*, John Wiley and Sons, 2014.
- [10] T. Janevski, *Internet Technologies for Fixed and Mobile Networks*, Artech House, 2015.
- [11] A. Tudzarov and T. Janevski, “Functional Architecture for 5G Mobile Networks,” *International Journal of Advanced Science and Technology (IJAST)*, vol. 32, pp. 65-78, 2011.
- [12] V. Tikhvinskiy and G. Bochechka, “Prospects and QoS Requirements in 5G Networks,” *Journal of Telecommunications and Information Technologies*, vol. 1, no. 1, pp. 23-26, 2015.
- [13] S. Zhang, S. Zhang, X. Chen and X. Huo, “Cloud Computing, Research and Development Trend,” in *Proceedings of the 2nd IEEE International Conference on Future Networks*, Sanya, Hainan, 2010.
- [14] ITU-T, “Cloud Computing Framework and High Level Requirements,” in *ITU-T Recommendation Y.3501*, 2013.
- [15] ITU-T, “Cloud Computing Infrastructure Requirements,” ITU-T Recommendation Y.3510, 2013.
- [16] NIST, “NIST Cloud Computing Standards Roadmap,” NIST Special Publication 500-291, Version 2, 2013.
- [17] T. H. Dihn, C. Lee, D. Niyato and P. Wang, “A Survey of Mobile Cloud Computing: Architecture, Applications, and Approaches,” *Wireless Communications and Mobile Computing*, Wiley, vol. 13, no. 18, p. 1587–1611, 2011.
- [18] S. S. Qureshi, T. Ahmad and K. R. Shuja-ul-islam, “Mobile Cloud Computing as Future for Mobile Applications – Implementation Methods and Challenging Issues,” in *Proceedings of IEEE Conference on Cloud Computing and Intelligence Systems (CCIS)*, Beijing, China, 2011.
- [19] D. Huang; et al., “Mobile cloud computing,” *IEEE COMSOC Multimedia Communications Technical Committee (MMTC) E-Letter*, vol. 6, no. 10, p. 27–31, 2011.

- [20] S. Kitanov and T. Janevski, "State of the Art: Mobile Cloud Computing," in *Proceedings of the Sixth IEEE International Conference on Computational Intelligence, Communication Systems and Networks 2014 (CICSYN 2014)*, Tetovo, Macedonia, 2014.
- [21] M. Armbrust; et al, "A view of cloud computing," *Communications of the ACM*, vol. 53, no. 4, p. 50–58, 2010.
- [22] N. Liu, X. Li and Q. Wang, "A resource & capability virtualization method for cloud manufacturing systems," in *IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics*, Anchorage, USA, 2011.
- [23] B. Sotomayor, R. S. Montero, I. M. Llorente and I. Foster, "Virtual infrastructure management in private and hybrid clouds," *IEEE Internet Computing*, vol. 13, no. 5, p. 14–22, 2009.
- [24] F. Bonomi, R. Milito, J. Zhu and S. Addepalli, "Fog Computing and its Role in the Internet of Things," in *Proceedings of the First Edition of the ACM SIGCOMM Workshop on Mobile Cloud Computing (MCC 2012)*, Helsinki, Finland, 2012.
- [25] L. M. Vaquero and L. Roderó-Merino, "Finding your Way in the Fog: Towards a Comprehensive Definition of Fog Computing," *ACM SIGCOMM Computer Communication Review Newsletter*, vol. 44, no. 5, pp. 27-32, 2014.
- [26] H. T. Luan, L. Gao, Z. Li and L. X. Y. Sun, "Fog Computing: Focusing on Mobile Users at the Edge," *arXiv preprint arXiv:1502.01815[cs.NI]*, 2015.
- [27] I. Stojmenovic and S. Wen, "The Fog Computing Paradigm: Scenarios and Security Issues," in *Proceedings of the Federated Conference on Computer Science and Information Systems (FedCSIS), ACSIS*, Warsaw, Poland, 2014.
- [28] B. Brech, J. Jamison, L. Shao and G. Wightwick, "The Interconnecting of Everything," IBM Corp., 2013.
- [29] V. L. Kalyani and D. Sharma, "IoT: Machine to Machine (M2M), Device to Device (D2D) Internet of Everything (IoE) and Human to Human (H2H): Future of Communication," *Journal of Management Engineering and Information Technology (JMEIT)*, vol. 2, no. 6, pp. 17-23, 2015.
- [30] M. Chiang, "Fog Networking: An Overview on Research Opportunities," White Paper, 2015.
- [31] M. Yannuzzi; R. Milito; R. Serral-Gracia; et al., "Key ingredients in an IoT recipe: Fog Computing, Cloud computing, and more Fog Computing," in *IEEE 19th International Workshop on Computer Aided Modeling and Design of Communication Links and Networks (CAMAD)*, Athens, Greece, 2014.
- [32] Cisco, "Visual Networking Index: Global Mobile Data Traffic Forecast Update 2014 - 2019," Cisco White Paper, 2015.
- [33] Cisco, "Visual Networking Index: Global Mobile Data Traffic Forecast Update, 2016–2021," Cisco White Paper, 2017.
- [34] E. Hedin, "Social Networks and Mobile Devices, " Stockholm, Sweden: Master of Science Thesis at KTH Information and Communication Technology, 2008.
- [35] Ericsson, "Ericsson Mobility Report on the Pulse of the Networked Society," Ericsson, Stockholm, Sweden, 2016.
- [36] M. M. ud in Mir and S. Kumar, "Evolution of Mobile Wireless Technology from 0G to 5G," *International Journal of Computer Science and Information Technologies (IJCSIT)*, vol. 6, no. 3, pp. 2545-2551, 2015.

- [37] Т. Шуминоски, „Механизми за квалитет на сервисот и вертикален Multi-Homing за 5G мобилни и безжични мрежи“, докторска дисертација, Универзитет „Св. Кирил и Методиј“, Факултет за електротехника и информациски технологии, Скопје, 2016.
- [38] M. Rahnema, “Overview of the GSM System and Protocol Architecture,” *IEEE Communications Magazine*, vol. 31, no. 4, pp. 92-100, 1993.
- [39] J. Cai and D. J. Goodman, “General Radio Packet Service in GSM,” *IEEE Communications Magazine*, vol. 35, no. 10, pp. 122-131, 1997.
- [40] K. Zangi, A. Furuskar and M. Hook, “EDGE: Enhanced Data Rates for Global Evolution of GSM and IS-136,” in *Multi Dimensional Mobile Communications (MDMC 1998)*, 1998.
- [41] H. Axelsson, P. Björkén, P. d. Bruin, S. Eriksson and H. Persson, “GSM/EDGE continued evolution,” *Ericsson Review* No. 1, 2006.
- [42] K. Richardson, “UMTS overview,” *Electronics & Communication Engineering Journal*, vol. 12, no. 3, pp. 93-100, 2000.
- [43] H. Kaaranen, et al. eds., *UMTS Networks: Architecture, Mobility and Services*. 2nd ed., England: John Wiley & Sons Ltd., 2005.
- [44] Risavy Research Report, “EDGE, HSPA, and LTE: Broadband Evolution,” 3G Americas, 2008.
- [45] S. Kitanov and T. Janevski, “Modeling and Analyzing LTE Networks with EstiNet Network Simulator and Emulator,” in *XVIII International Scientific Conference on Information, Communication and Energy Systems and Technologies (ICEST)*, Ohrid, Republic of Macedonia, 2013.
- [46] S. Kitanov and T. Janevski, “Performance Evaluation of Scheduling Strategies for LTE Networks in Downlink Direction,” in *XI International Conference of Society for Electronics, Telecommunications, Automation and Informatics ETAI 2013*, Ohrid, Republic of Macedonia, 2013.
- [47] S. Sesia, I. Toufik and M. Baker, *LTE – The UMTS Long Term Evolution From Theory to Practice 2nd Edition including Release 10 for LTE Advanced*, 2nd ed., John Wiley & Sons Ltd., 2011.
- [48] S. G. Glisic, *Advanced Wireless Networks 4G Technologies*, 1st ed., University of Oulu, Finland: John Wiley & Sons Ltd., 2006.
- [49] M. Cudak, “IEEE 802.16m System Requirements,” IEEE 802.16 Broadband Wireless Access Working Group, 2008.
- [50] Nokia, “LTE-Advanced Pro Pushing LTE capabilities towards 5G,” Nokia Networks white paper, 2015.
- [51] Nokia, “LTE-M – Optimizing LTE for the Internet of Things,” Nokia White Paper, 2015.
- [52] Datang Telecom Technology and Industry Group, “Evolution, Convergence and Innovation,” Datang Mobile Wireless Innovation Center 5G White Paper, 2013.
- [53] SK Telecom, “SK Telecom’s View on 5G Vision, Architecture, Technology and Service and Spectrum,” SK Telecom Network Technology Research and Development Center 5G White Paper, 2014.
- [54] S. Kitanov and T. Janevski, “Fog Computing Mechanisms in 5G Mobile Networks,” in *Networks of the Future: Architectures, Technologies and Implementations*, Florida, USA, CRC Press Taylor and Francis Group, 2017.



- [55] GSA - Global mobile Suppliers Association, "The Road to 5G: Drivers, Applications, Requirements and Technical Development," A GSA (Global mobile Suppliers Association) Executive Report from Ericsson, Huawei and Qualcomm, 2015.
- [56] S. Kitanov, E. Monteiro and T. Janevski, "5G and the Fog – Survey of Related Technologies and Research Directions," Proceedings of the 18th Mediterranean IEEE Electrotechnical Conference MELECON 2016, Limassol, Cyprus, 2016.
- [57] A. Туцаров, „Нови Методи за контрола и подобрување на квалитетот на IP базираните сервиси во мобилни и безжични мрежи“, докторска дисертација, Универзитет „Св. Кирил и Методиј“, Факултет за електротехника и информациски технологии, Скопје, 2011.
- [58] S. Barbarossa, S. Sardelliti and P. D. Lorenzo, "Communicating While Computing – Distributed Mobile Cloud Computing Over 5G Heterogeneous Networks," *IEEE Signal Processing Magazine International Journal of Advanced Science and Technology (IJAST)*, vol. 1, no. 6, pp. 45 - 55, 2014.
- [59] D. Guinard, V. Trifa, F. Mattern and E. Wilde, "From the Internet of Things to the Web of Things: Resource-oriented Architecture and Best Practices," in *Architecting the Internet of Things*, Berlin Heidelberg, Springer Verlag, 2011, pp. 97 - 129.
- [60] ABI, Internet of Things vs. Internet of Everything What's the Difference, ABI Research White Paper, 2014.
- [61] S. Mitchell, N. Villa, M. Stewart-Weeks and A. Lange, "The Internet of Everything for Cities Connecting People, Process, Data, and Things to Improve the 'Livability' of Cities and Communities," CISCO, white paper., 2013.
- [62] D. Evans, "The Internet of Things: How the Next Evolution of the Internet Is Changing Everything," Cisco White Paper, 2011.
- [63] T. Harris, "Cloud Computing - An Overview".
- [64] Dialogic Corporation, "Introduction to Cloud Computing," Dialogic Corporation White Paper, 2010.
- [65] A. R. Khan, M.Othman, S. A. Madani and S. U. Khan, "Survey of Mobile Cloud Computing Application Models," *IEEE*, vol. 16, no. 1, pp. 393-413, 2014.
- [66] S. Fowler, "Survey on Mobile Cloud Computing Challenges Ahead," *IEEE CommSoft E-Letters*, vol. 2, no. 1, pp. 13-17, 2013.
- [67] S. Goyal, "Public vs Private vs Hybrid vs Community – Cloud Computing: A Critical Review," *International Journal of Computer Network and Information Security(IJCNIS)*, vol. 6, no. 3, pp. 20-29, 2014.
- [68] ITU Centres of Excellence for Europe, "Module 4: Cloud Computing," in *NGN, FUTURE NETWORKS AND CLOUD COMPUTING*, A Course provided by ITU Centres of Excellence for Europe, 2014.
- [69] H. M. Sqalli, M. Al-saeedi, F. Binbeshr and M. Siddiqui, "UCloud: Simulated Hybrid Cloud for a University Environment," in *IEEE 1st International Conf. on Cloud Networking (CLOUDNET)*, Paris, 2012.
- [70] O. Consortium, "OpenFog Reference Architecture for Fog Computing," OpenFog Consortium Architecture Working Group, 2017.
- [71] L. Gao, T. H. Luan, W. Z. B. Liu and S. Yu, "Fog Computing and Its Applications in 5G," in *5G Mobile Communications*, Springer International Publishing Switzerland, 2017, pp. 571-593.

- [72] S. Kitanov and T. Janevski, "Fog Networking for 5G and IoT," in *5G Mobile: From Research and Innovations to Deployment Aspects, Architectures, Technologies and Implementations*, Nova Publishers, 2017.
- [73] Z. Zhang, J. Zhang and L. Ying, "Multimedia streaming in cooperative mobile social networks," Preprint..
- [74] F. M. F. Wong, S. Ha, C. Joe-Wong, Z. Liu and M. Chiang, "Mind Your Own Bandwidth: Adaptive Traffic Management on Network Edge," in *Proceedings of IEEE IWQoS*, 2015.
- [75] Y. Du, E. Aryafar, J. Camp and M. Chiang, "iBeam: Intelligent client-side multi-user beamforming in wireless networks," in *IEEE INFOCOM*, 2014.
- [76] E. Aryafar, A. Keshavarz-Haddard, M. Wang and M. Chiang, "RAT selection games in HetNets," in *Proceedings of IEEE INFOCOM*, 2013.
- [77] J. Chong, C. Joe-Wong, S. Ha and M. Chiang, "CYRUS: Toward client-defined Cloud storage," in *Proceedings of EuroSys.*, 2015.
- [78] A. Chakraborty, V. Navda, V. N. Padmanabhan and R. Ramjee, "Coordinating cellular background transfers using LoadSense," in *ACM Mobicom*, 2013.
- [79] L. Canzian and M. v. d. Schaar, "Real time stream mining: Online knowledge extraction using classifier networks," *IEEE Networks Special Issue on Networking for Big Data*, 2014.
- [80] S. J. Stolfo, M. B. Salem and A. D. Keromytis, "Fog Computing: Mitigating Insider Data Theft Attacks in the Cloud," in *Proceeding of IEEE Symposium on Security and Privacy Workshops (SPW)*, San Francisco, California, USA, 2012.
- [81] G. Brown, "Converging Telecom and IT in the LTE RAN," white paper at Heavy Reading on behalf of Samsung, 2013.
- [82] S. Kitanov and T. Janevski, "Mobile Cloud Computing in 5G Networks," in *the XI International Conference of Society for Electronics, Telecommunications, Automation and Informatics ETAI 2015*, Ohrid, Macedonia, 2015.
- [83] M. Peng, S. Yan, K. Zhang and C. Wang, "Fog Computing based Radio Access Networks: Issues and Challenges," *IEEE Network*, p. arXiv:1506.04233v1 [cs.IT], 2015.
- [84] M. Peng, Y. Li, Z. Zhao and C. Wang, "System architecture and key technologies for 5G heterogeneous cloud radio access networks," *IEEE Network*, vol. 29, no. 2, pp. 6-14, 2015.
- [85] M. Peng, Y. Li, J. Jiang, J. Li and C. Wang, "Heterogeneous cloud radio access networks: A new perspective for enhancing spectral and energy efficiencies," *IEEE Wireless Communications*, vol. 21, no. 6, pp. 126-135, 2014.
- [86] J. Marinho and E. Monteiro, "Cognitive radio: Survey on Communication Protocols, Spectrum Decision Issues, and Future Research Directions," *Springer Wireless Networks*, vol. 18, no. 2, p. 147-164., 2012.
- [87] P. Bahl, R. Y. Han, L. E. Li and M. Satyanarayanan, "Advancing the State of Mobile Cloud Computing," in *Third ACM Workshop on Mobile Cloud Computing and Services*, 2012.
- [88] E. Ahmed, A. Gani, M. Sookhak, S. H. A. Hamid and F. Xia, "Application Optimization in Mobile Cloud Computing: Motivation, Taxonomies, and Open Challenges," *Journal of Network and Computer Applications*, vol. 2, pp. 52-68, 2015.

- [89] D. B. Hoang and L. Chen, "Mobile cloud for assistive healthcare (mocash)," in *Services Computing Conference (APSCC)*, Asia-Pacific, 2010.
- [90] S. Adibi, "Biomedical Sensing Analyzer (BSA) for Mobile-Health (m-Health) – LTE," *IEEE Journal of Biomedical and Health Informatics*, vol. 18, no. 1, pp. 345-351, 2014.
- [91] G. Sun and J. Shen, "Facilitating Social Collaboration in Mobile Cloud-based learning: a Teamwork as a Service (TaaS) Approach," *IEEE Transactions on Learning Technologies*, vol. 7, no. 3, p. 207–220, 2014.
- [92] J. Wu, C. Yuen, N.-M. Cheung, J. Chen and C. Chen, "Enabling Adaptive High-frame-rate Video Streaming in Mobile Cloud Gaming Applications," *IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology*, vol. PP, no. 99, pp. 1-1, 2015.
- [93] K. Sabarish and R. Shaji, "A Scalable Cloud Enabled Mobile Governance Framework," in *Global Humanitarian Technology Conference - South Asia Satellite (GHTC-SAS)*, 2014.
- [94] E. Ahmed, A. Gani, M. K. Khan, R. Buyya and S. U. Khan, "Seamless Application Execution in Mobile Cloud Computing: Motivation, Taxonomy and Open Challenges," *Journal of Network and Computer Applications*, vol. 52, p. 54–172, 2015.
- [95] Ericsson, "Ericsson Mobility Report, 2013; <http://www.ericsson.com/res/docs/2013/ericsson-mobility-report-june-2013.pdf>," Ericsson, 2013.
- [96] L. Atzori, A. Iera and G. Morabito, "The internet of things: A survey," *Computer networks*, vol. 54, no. 15, p. 2787–2805, 2010.
- [97] M. Satyanarayanan, P. Bahl, R. Caceres and N. Davies, "The Case for VM-based Cloudlets in Mobile Computing," *IEEE Pervasive Computing*, vol. 8, no. 4, pp. 14-23, 2009.
- [98] A. Ahmed and E. Ahmed, "A Survey on Mobile Edge Computing," in *IEEE International Conference on Intelligent System and Control (ISCO 2016)*, 2016.
- [99] M. Beck, M. Werner, S. Feld and S. Schimper, "Mobile edge computing: A taxonomy," in *Sixth International Conference on Advances in Future Internet*, 2014.
- [100] Y. Yu, "Mobile Edge Computing Towards 5G: Vision, Recent Progress, and Open Challenges," *China Communications*, vol. Supplement No. 2, pp. 89-99, 2016.
- [101] R. Buyya; J. Broberg; A. Goscinski A; et al., "Cloud Computing Principles and Paradigms," in *Cloud Computing 2011*.
- [102] B. Pfaff; J. Pettit; T. Koponen; et al., "The design and implementation of open vSwitch," *Networked Systems Design and Implementation*, 2015.
- [103] G. Liu, X. Hou and J. Jin, "3-D-MIMO With Massive Antennas Paves the Way to 5G Enhanced Mobile Broadband: From System Design to Field Trials," *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol. 35, no. 6, pp. 1222-1233, 2017.
- [104] I. Jovović and M. P. I. Forenbacher, "Massive Machine-Type Communications: An Overview and Perspectives Towards 5G," in *The 3rd International Virtual Research Conference In Technical Disciplines*, 2015.
- [105] O. N. C. Yilmaz, Y.-P. E. Wang and N. A. Johansson, "Analysis of ultra-reliable and low-latency 5G communication for a factory automation use case," in *IEEE International Conference on Communication Workshop (ICCW)*, London, UK, 2015.
- [106] Nebbiolo Technologies, "Fog vs Edge Computing v1.1," Nebbiolo Technologies Inc. Report, Milpitas, California, USA, 2015.

- [107] S. Singh, Y. Chiu and Y. T. J. Yang, "Mobile Edge Fog Computing in 5G Era: Architecture and Implementation," in *2016 International Computer Symposium*, Chiayi, Taiwan, 2016.
- [108] S. Kitanov and T. Janevski, "Hybrid Environment Service Orchestration for Fog Computing," in *51st International Scientific Conference on Information, Communication and Energy Systems and Technologies (ICEST 2016)*, Ohrid, Macedonia, 2016.
- [109] ITU, "The Tactile Internet," ITU Technology Watch Report, 2014.
- [110] S. Kitanov and T. Janevski, "Fog Computing Service Orchestration Mechanisms for 5G Networks.," *Journal of Internet Technology (JIT)*, no. ISSN 1607-9264, Taiwan, 2018. (2016 IMPACT FACTOR: 1.930), 2018.
- [111] S. Kitanov and T. Janevski, "Quality Evaluation of Cloud and Fog Orchestrated Services in 5G Network," *European Journal of Information Science and Technology (EJIST)*, vol. 1, no. 1, pp. 62-72, 2016.
- [112] S. Kitanov and T. Janevski, "Fog Computing as a Support for 5G Network," *Journal of Emerging Research and Solutions in ICT (ERSICT) published by Faculty of Information and Communication Technologies in Bitola, Macedonia*, vol. 1, no. 2, pp. 47-60, 2016.
- [113] D. Warren and C. Dewar, "Understanding 5G: Perspective on Future Technological Advancements in Mobile," GSMA Intelligence Analysis Report, 2014.
- [114] S. Kitanov and T. Janevski, "State of the Art : Fog Computing for 5G Networks," in *XXIV International Telecommunication Forum TELFOR 2016*, Belgrade, Serbia, 2016.
- [115] S. Kitanov and T. Janevski, "Fog Computing for 5G Networks," *Accepted paper as a poster presentation on 8th ICT -Innovations International Conference*, Ohrid, Macedonia, 2016.
- [116] A. Roessler, M. M. J. Schlien and M. Kottkamp, "LTE-Advanced (3GPP Rel.12) Technology Introduction," Rhode and Scwarz White Paper, 1MA252\_2E, 2014.
- [117] S. Kitanov and T. Janevski, "5G Networks in the Fog Computing Environment," in *XII International Conference of Society for Electronics, Telecommunications, Automation and Informatics ETAI 2016*, Struga, Macedonia, 2016.
- [118] S. Kitanov and T. Janevski, "Energy Efficiency of Fog Computing and Networking Services in 5G Networks," in *XVII IEEE International Conference on Smart Technologies EUROCON 2017*, Ohrid, Macedonia, 2017.
- [119] W. V. Heddeghem, S. Lambert, B. Lannoo, D. Colle, M. Pickavet and P. Demeester, "Trends in worldwide ICT electricity consumption from 2007 to 2012," *Journal of Computer Communications*, vol. 50, pp. 64-76, 2014.
- [120] S. Kitanov and T. Janevski, "Energy Efficiency of 5G Mobile Networks in Hybrid Fog and Cloud Computing Environment," in *II International Conference Recent Trends and Applications in Computer Science and Information Technology RTA-CSIT*, Tirana, Albania, 2016.
- [121] J. Huang, F. Qian, A. Gerber, Z. M. Mao, S. S and O. Spatscheck, "A Close Examination of Performance and Power Characteristics of 4G LTE Networks," in *Mobile Systems, Applications and Services (MobiSys 2012) Conference*, Low Wood Bay, Lake District, UK, 2012.
- [122] C. Ragona, F. Granelli and C. Fiandrino, "Energy-Efficient Computation Offloading for Wearable Devices and Smartphones in Mobile Cloud Computing," in *IEEE Global Communications Conference (GLOBECOM)*, 2015.

- [123] В. Николик, „Динамичка QoS и оперативно ефикасна поддршка во услови на растечки сообраќај на LTE и идни хетерогени мобилни мрежи“, докторска дисертација, Универзитет „Св. Кирил и Методиј“ - Скопје, Факултет за електротехника и информациски технологии, Скопје, 2015.
- [124] ITU, “DRAFT NEW REPORT ITU-R M.[IMT-2020.TECH PERF REQ] - Minimum requirements related to technical performance for IMT-2020 radio interface(s),” ITU-R SG05 Contribution 40, 2017.