



УНИВЕРЗИТЕТ У НОВОМ САДУ  
ФАКУЛТЕТ ТЕХНИЧКИХ НАУКА У  
НОВОМ САДУ



Раденко Бановић

**Алгоритам за динамичку  
адаптацију код преноса тока  
мултимедијалних података**

ДОКТОРСКА ДИСЕРТАЦИЈА

Нови Сад, 2024.



КЉУЧНА ДОКУМЕНТАЦИЈСКА ИНФОРМАЦИЈА<sup>1</sup>

Врста рада:	Докторска дисертација
Име и презиме аутора:	Раденко Бановић
Ментор (титула, име, презиме, звање, институција)	Др Илија Башичевић, редовни професор, Факултет техничких наука, Универзитет у Новом Саду
Наслов рада:	Алгоритам за динамичку адаптацију код преноса тока мултимедијалних података
Језик публикације (писмо):	Српски (ћирилица)
Физички опис рада:	Унети број: Страница _____ 104 Поглавља _____ 7 Референци _____ 67 Табела _____ 4 Слика _____ 30 Графикона _____ 0 Прилога _____ 0
Научна област:	Електротехничко и рачунарско инжењерство
Ужа научна област (научна дисциплина):	Рачунарска техника и рачунарске комуникације
Кључне речи / предметна одредница:	адаптивни алгоритам, квалитет корисничког доживљаја, неуронске мреже, динамичка адаптација, пренос тока мултимедијалних података
Резиме на језику рада:	У овом раду је предложен DASH адаптивни алгоритам који користи следеће улазне вредности: тренутни ниво попуњености меморије за привремено чување података, пропусност рачунарске мреже приликом преузимања последњег DASH сегмента и излаз Такаги-Сугено-Канг модела који представља предикцију пропусности рачунарске мреже у наредној итерацији преузимања DASH сегмента. Урађена је аблативна студија којом је утврђено који ТСК модел има најбољу предикцију пропусности рачунарске мреже. Прегледом стања у области дефинисани су и кључни индикатори квалитета корисничког доживљаја, а то су: просјечна битска брзина преузетих сегмената, број промјена битских брзина између sukcesивних сегмената, просјечна вриједност промјена битских брзина и трајање празне меморије за привремено чување података (вријеме у ком је репродукције мултимедијалног садржаја заустављена).
Датум прихватања теме од стране надлежног већа:	26.10.2023.

<sup>1</sup> Аутор докторске дисертације потписао је и приложио следеће Обрасце:

5б – Изјава о ауторству;

5в – Изјава о истовјетности штампане и електронске верзије и о личним подацима;

5г – Изјава о коришћењу.

Ове Изјаве се чувају на факултету у штампаном и електронском облику и не корице се са тезом.

---

Датум одбране: (Попуњава одговарајућа служба)	
Чланови комисије: (титула, име, презиме, звање, институција)	Председник: др Никола Теслић, редовни професор, Факултет техничких наука, Универзитет у Новом Саду Члан: др Мирослав Поповић, редовни професор, Факултет техничких наука, Универзитет у Новом Саду Члан: др Мило Томашевић, редовни професор, Електротехнички факултет, Универзитет у Београду Члан: др Иштван Пап, редовни професор, Факултет техничких наука, Универзитет у Новом Саду Ментор: др Илија Башичевић, редовни професор, Факултет техничких наука, Универзитет у Новом Саду
Напомена:	

**UNIVERSITY OF NOVI SAD**  
**FACULTY OF TECHNICAL SCIENCES**

**KEY WORD DOCUMENTATION<sup>2</sup>**

Document type:	Doctoral dissertation
Author:	Banovic Radenko
Supervisor (title, first name, last name, position, institution)	PhD Ilija Bašičević, full professor, Faculty of Technical Sciences, University of Novi Sad
Thesis title:	Dynamic adaptation algorithm for multimedia streaming
Language of text (script):	Serbian language (cyrilic)
Physical description:	Number of: Pages_____104 Chapters_____7 References_____64 Tables_____4 Illustrations_____30 Graphs_____0 Appendices_____0
Scientific field:	Electrical and computer engineering
Scientific subfield (scientific discipline):	Computer engineering and communications
Subject, Key words:	adaptation algorithm, quality of experience, neural networks, dynamic adaptation, multimedia streaming
Abstract in English language:	In this paper, a DASH adaptive algorithm is proposed that uses the following input values: the current buffer occupancy, the throughput when downloading the last DASH segment, and the output of the Takagi-Sugeno-Kang model, which represents the prediction of the network throughput in the next download iteration. An ablative study was conducted to determine which TSK model has the best prediction of computer network throughput. There are four key indicators of QoE that should be measured in experimental evaluation: average bitrate, number of transitions between different bit rate levels, value of bit rate changes and duration of empty buffer (time during which playback of multimedia content is stopped).
Accepted on Scientific Board on:	26.10.2023.
Defended: (Filled by the faculty service)	
Thesis Defend Board: (title, first name, last name, position,	President: PhD Nikola Teslić, full professor, Faculty of Technical Sciences, University of Novi Sad Member: PhD Miroslav Popović, full professor, Faculty of Technical

<sup>2</sup>The author of doctoral dissertation has signed the following Statements:

56 – Statement on the authority,

5B – Statement that the printed and e-version of doctoral dissertation are identical and about personal data,

5r – Statement on copyright licenses.

The paper and e-versions of Statements are held at the faculty and are not included into the printed thesis.

---

institution)	Sciences, University of Novi Sad Member: PhD Milo Tomašević, full professor, School of Electrical Engineering, University of Belgrade Member: PhD Ištvan Pap, full professor, Faculty of Technical Sciences, University of Novi Sad Supervisor: PhD Ilija Bašičević, full professor, Faculty of Technical Sciences, University of Novi Sad
Note:	



---

## Захвалница

Захваљујем се ментору проф. др. Илији Башичевићу и проф. др. Драгану Кукољу чији су савјети и рецензије довели до ове дисертације. Такође, велику захвалност дугујем Институту РТ-РК и колегама на подршци приликом израде овог рада и свеукупном професионалном развоју.

Подршка породице је нешто без чега не бих истрајао на овом путу. Захваљујем се супрузи Ани, родитељима Зорану и Мирјани, те брату Милану који су имали разумијевања за моје обавезе.

Ову дисертацију посвећујем сину Богдану.





---

## Сажетак

Пренос мултимедијалног садржаја путем интернета заузима доминантан проценат укупно пренесеног садржаја путем интернета данас, а MPEG DASH (dynamic adaptive streaming over HTTP) постао је доминантан међу осталим стандардима и протоколима за пренос мултимедијалног садржаја путем интернета. Према DASH стандарду мултимедијални садржај је енкодован у различите нивое квалитета са различитим битским брзинама. Мултимедијални садржаје је ускладиштен на HTTP послужиоцу, а клијентска апликација шаље послужиоцу захтијев за достављање сегмента са жељеном битском брзином. Корисничка апликација за репродукцију мултимедијалног садржаја одређује жељену битску брзину у јединици која се зове адаптациона логика битске брзине (АБР логика).

Многи АБР алгоритми су предложени за побољшање квалитета корисничког доживљаја (ККД) приликом конзумације мултимедијалног садржаја пренесеног путем интернета. Прегледом стања у области препознате су три врсте АБР алгоритама: 1. традиционални алгоритми који користе једну улазну вриједност за одређивање битске брзине наредног сегмента, 2. традиционални хибридни алгоритми који користе више улазних вриједности, и 3. алгоритми базирани на неуронским мрежама. Оно што није пронађено у литератури је хибридни приступ који користи и традиционални приступ и приступ базиран на неуронским мрежама ради одређивања битске брзине наредног сегмента који би превазишао недостатке и једног и другог приступа.

У овом раду је предложен DASH адаптивни алгоритам који користи следеће улазне вредности: тренутни ниво попуњености меморије за привремено чување података, пропусност рачунарске мреже приликом преузимања посљедњег DASH сегмента и излаз Такаги-Сугено-Канг модела који представља предикцију пропусности рачунарске мреже у наредној итерацији преузимања DASH сегмента. Урађена је аблативна студија којом је утврђено који ТСК модел има најбољу предикцију пропусности рачунарске мреже. Прегледом стања у области дефинисани су и кључни индикатори ККД, а то су: просјечна битска брзина преузетих сегмената, број промјена битских брзина између сукцесивних сегмената, просјечна вриједност промјена битских брзина и трајање празне меморије за привремено чување података (вријеме у ком је репродукције мултимедијалног садржаја заустављена).

---

Креирано је окружење за експерименталну евалуацију у коме је извршена симулација рада предложеног алгоритма и осталих репрезентативних алгоритама. У експерименталној евалуацији АБР алгоритама кориштене су двије групе података које одређују симулирану вриједност пропусности рачунарске мреже: 1. прва група обухвата пропусности предложене од стране DASH Industry Forum, 2. друга група обухвата реалне измјерене пропусности ћелијске 3Г мреже при кретању мобилног пријемног уређаја по различитим рутама коришћењем различитих превозних средстава. Резултати експерименталне евалуације показују да предложени алгоритам има једнако добре резултате у симулацијама обе групе вриједности пропусности рачунарских мрежа, што није случај са осталим алгоритмима. Резултати експерименталне евалуације су приказани на упоредним дијаграмима за сваки од кључних параметара ККД гдје се јасно може уочити да је предложени алгоритам надмашио остале по свим параметрима ККД.

---

## Abstract

Video streaming takes the largest share of internet traffic today, and MPEG dynamic adaptive streaming over HTTP (DASH) has become dominant among other video streaming standards and protocols. According to the DASH standard, multimedia content is encoded in different quality levels with different bitrates located on the HTTP server, and user application sends a request to the server to deliver the segment with the desired bitrate. The user side determines the desired bitrate in the unit called adaptation bitrate (ABR) logic.

Many ABR algorithms have been proposed to improve the quality of experience (QoE). A review of the state of the art in the field identified three types of ABR algorithms: 1) traditional algorithms that use one input value to determine the bitrate of the next segment, 2) traditional hybrid algorithms that use multiple input values to determine the bitrate of the next segment, and 3) algorithms based on the neural networks. What is not found in the literature is a hybrid approach that uses both traditional and neural network based approaches to determine the bitrate of next segment that would overcome shortcomings of the both approaches.

In this paper, a DASH adaptive algorithm is proposed that uses the following input values: the current buffer occupancy, the throughput when downloading the last DASH segment, and the output of the Takagi-Sugeno-Kang model, which represents the prediction of the network throughput in the next download iteration. An ablative study was conducted to determine which TSK model has the best prediction of computer network throughput. There are four key indicators of QoE that should be measured in experimental evaluation: average bitrate, number of transitions between different bit rate levels, value of bit rate changes and duration of empty buffer (time during which playback of multimedia content is stopped).

---

An environment for experimental evaluation was created. In the experimental evaluation of ABR algorithms two groups of data were used that determine the simulated value of the computer network throughput: 1) the first group includes the throughputs proposed by the DASH Industry Forum, and 2) the second group includes the real measured throughputs of the cellular 3G network while moving the mobile receiving device along the different routes using different types of the transport. The results of the experimental evaluation show that the proposed algorithm has equally good results in the simulations of both groups of simulations, which is not the case with the other algorithms. The results of the experimental evaluation are shown in comparative diagrams for each of the key parameters of QoE, where it can be clearly seen that the proposed algorithm outperformed others in all parameters of QoE.

---

# Садржај

<b>1. УВОД</b> .....	<b>22</b>
<b>2. ТЕОРИЈСКЕ ОСНОВЕ</b> .....	<b>28</b>
2.1 ТЕЛЕВИЗИЈА .....	28
2.2 ДИГИТАЛНА ТЕЛЕВИЗИЈА .....	30
2.3 ЕМИСИОНИ ПРЕНОСНИ МЕДИЈУМИ.....	32
2.4 РАЧУНАРСКЕ МРЕЖЕ .....	34
2.5 БИТСКА БРЗИНА (ENG. ВITRATE) .....	37
2.6 СТАНДАРДИ И ПРОТОКОЛИ ЗА ПРЕНОС МУЛТИМЕДИЈАЛНИХ ПОДАТАКА ПУТЕМ ИНТЕРНЕТА .....	38
2.6.1 RTP стандард .....	40
2.6.2 RTSP протокол.....	40
2.6.3 HLS.....	41
2.7 ДИНАМИЧКИ АДАПТИВНИ ПРЕНОС ПОДАТАКА (MPEG-DASH) .....	41
2.8 КВАЛИТЕТ КОРИСНИЧКОГ ДОЖИВЉАЈА.....	45
<b>3. СТАЊЕ У ОБЛАСТИ</b> .....	<b>48</b>
<b>4. ХИБРИДНИ АДАПТИВНИ АЛГОРИТАМ</b> .....	<b>53</b>
4.1 ТЕОРИЈСКИ ОПИС ТАКАГИ-СУГЕНО-КАНГ ФАЗИ МОДЕЛА.....	54
4.2 ГЕНЕРИСАЊЕ ТСК НЕУРО-ФАЗИ МОДЕЛА.....	56
4.3 АБЛАТИВНА СТУДИЈА .....	61
4.3.1 Параметар припадности 2, фактор заборављања 1.....	64
4.3.2 Фактор одсјецања 2, фактор заборављања 0.99.....	66
4.3.3 Фактор одсјецања 2, фактор заборављања 0.95.....	68
4.3.4 Параметар припадности 5, фактор заборављања 0.85.....	70
4.3.5 Параметар припадности 2, фактор заборављања 0.97.....	72
4.4 ОСНОВНА АРХИТЕКТУРА ХИБРИДНОГ АДАПТИВНОГ АЛГОРИТАМА .....	75
4.5 ФАЗА БРЗОГ ПОКРЕТАЊА.....	76
4.6 ХИБРИДНА ФАЗА .....	77
<b>5. ЕКСПЕРИМЕНТАЛНА ЕВАЛУАЦИЈА</b> .....	<b>80</b>
5.1 МРЕЖНИ ПРОФИЛИ ПРЕДЛОЖЕНИ ОД DASH INDUSTRY FORUM.....	84
5.1.1 Резултати .....	84
5.2 ИЗМЈЕРЕНЕ ВРИЈЕДНОСТИ ПРОПУСНОСТИ ЋЕЛИЈСКЕ ЗГ МРЕЖЕ.....	89
5.2.1 Резултати .....	89
5.3 ДИСКУСИЈА .....	94

---

<b>6. ЗАКЉУЧАК.....</b>	<b>95</b>
<b>7. ЛИТЕРАТУРА .....</b>	<b>98</b>

---

## Списак скраћеница

АБР	енг. Adaptive Bitrate Algorithm
ККД	Квалитет корисничког доживљаја
КИК	Квалитет искуства корисника
DASH	енг. Dynamic Adaptive Streaming over HTTP
JPEG	енг. Joint Photographic Experts Group
MPEG	енг. Moving Picture Experts Group
VHF	енг. Very High Frequency
QPSK	енг. Quadrature Phase-Shift Keying
QAM	енг. Quadrature Amplitude Modulation
BPSK	енг. Binary Phase-Shift Keying
ASK	енг. Amplitude Shift Keying
FSK	енг. Frequency Shift Keying
HTTP	енг. HyperText Transfer Protocol
TCP	енг. Transmission Control Protocol
IP	енг. Internet Protocol
ISO	енг. International Organization for Standardization
OSI	енг. Open Systems Interconnection
RTP	енг. Real-Time Transport Protocol
RTSP	енг. Real-Time Streaming Protocol
HLS	енг. HTTP Live Streaming
TCK	Такаги-Сугено-Канг
PAL	енг. Phase Alternating Line
NTSC	енг. National Television System Committee
SECAM	фр. Séquentiel de couleur à mémoire
UDP	енг. User Datagram Protocol
MPD	енг. Media Presentation Description
URL	енг. Uniform Resource Locator
QoS	енг. Quality of Service
QoE	енг. Quality of Experience
PLCC	енг. Pearson Linear Correlation Coefficient
SRCC	енг. Spearman's Rank-order Correlation Coefficient



---

HEVC	енг. High Efficiency Video Coding
RONN	енг. Re-Organizing Neural Network
СКГ	Средња квадратна грешка
WRLS	енг. Weighted Recursive Least Squares
МАГ	Максимална апсолутна грешка
Wi-Fi	енг. Wireless-Fidelity
МБПС	Мегабита по секунди
КБПС	Килобита по секунди

---

## Списак слика

Слика 1. Констелација сигнала за BPSK модулацију .....	30
Слика 2. Констелација сигнала за QPSK и 4-QAM модулацију .....	31
Слика 3. Илустрација емисионих преносних медијума у телевизији .....	33
Слика 4. Комутациона рачунарска мрежа.....	35
Слика 5. Примјер варијације пропусности у рачунарској мрежи.....	36
Слика 6. ИСО ОСИ и TCP/IP протокол стек .....	39
Слика 7. Комуникација између клијента и послужиоца по MPEG-DASH стандарду .....	44
Слика 8. Квалитет корисничког доживљаја.....	46
Слика 9. Уопштен систем са N улаза и једним излазом .....	55
Слика 10. Дијаграм резултата аблативне студије 1.....	65
Слика 11. Дијаграм пропусности и апроксимиране пропусности 1 .....	66
Слика 12. Дијаграм резултата аблативне студије 2.....	67
Слика 13. Дијаграм пропусности и апроксимиране пропусности 2.....	68
Слика 14. Дијаграм резултата аблативне студије 3.....	69
Слика 15. Дијаграм пропусности и апроксимиране пропусности 3.....	70
Слика 16. Резултати аблативне студије 4.....	71
Слика 17. Дијаграм пропусности и апроксимиране пропусности 4.....	72
Слика 18. Дијаграм резултата аблативне студије 5.....	73
Слика 19. Дијаграм пропусности и апроксимиране пропусности 5.....	74
Слика 20. Основна архитектура хибридног адаптивног алгорита .....	76
Слика 21. Попуњеност меморије за привремено чување података (секунде) .....	77
Слика 22. Архитектура мреже.....	81
Слика 23. Просјечна битска брзина алгоритама за мрежне профиле 1-12 .....	86
Слика 24. Однос времена празне меморије за привремено чување података и укупног трајања симулације за профиле 1-12.....	86
Слика 25. Просјечна вриједност промјене битске брзине за профиле 1-12.....	87
Слика 26. Број промјена битских брзина на стотину секунди за профиле 1-12.....	88
Слика 27. Однос времена празне меморије за привремено чување података и укупног трајања симулације за ћелијску 3G мрежу.....	91
Слика 28. Просјечна битска брзина за ћелијске 3G мреже .....	91

---

Слика 29. Просјечна вриједност промјене битске брзине за ћелијске 3Г мреже ...	92
Слика 30. Број промјена битских брзина на стотину секунди за ћелијске 3Г мреже .....	93

---

## Списак табела

Табела 1. Резултати аблативне студије .....	63
Табела 2. Битске брзине и резолуције сегмената кориштених у симулацијама.....	82
Табела 3. Резултати симулације за мрежне профиле 1-12.....	85
Табела 4. Резултати симулације за пропусности ћелијске 3Г мреже .....	90



---

## 1. **Увод**

Појам мултимедија је многим конфузан, јер се може дефинисати у ужем и ширем смислу, те може представљати комбинацију различитих основних медија. Мултимедија у најширем смислу представља комбинацију два или више различитих основних медија: текста, слике, звука, видеа (покретне слике), анимације и интерактивног садржаја. По овој дефиницији књига која садржи слике и текст се сматра мултимедијом као и комбинација покретне слике и звука.

Основна подјела мултимедијалних садржаја је на статичке и временски промјенљиве. Како се слика и текст не мијењају у току времена, они спадају у статичке мултимедијалне садржаје, док аудио, видео и анимација спадају у временски промјенљиве. Друга подјела мултимедијалних садржаја је на линеарне и нелинеарне, односно на оне код којих се у зависности од корисничке интеракције мијења садржај или редослијед приказивања садржаја.

Тако по овој подјели књига или часопис припадају нелинеарним мултимедијалним садржајима, јер редослијед приказивања страница зависи од интеракције читаоца. Са друге стране телевизија уживо припада линеарним мултимедијалним садржајима, јер редослијед приказивања не зависи од корисничке интеракције.

---

Мултимедијални садржај је настао и напредовао заједно са напретком технологије. Прва масовна мултимедија биле су књиге и часописи који су садржали слику и текст, па је напредак технологије омогућио записивање, пренос и приказивање најприје звука, затим и слике, што је довело до развоја телевизије (аудио и видео). Поред увођења нових медија, технолошки развој је довео до унапрјеђења постојећих. Телевизија је у почетку била потпуно аналогна (користила је аналогне сигнале за пренос видео и аудио садржаја) а преносила је и приказивала црно-бијелу слику.

Велики искорак у аналогној телевизији се десио омогућавањем преноса и приказивања видео садржаја у боји. Даљи развој аналогне телевизије је био лимитиран капацитетима преносних медијума и немогућношћу смањења (компресије) информација потребних за описивање слике и звука. Телевизија је данас углавном дигитализована (сигнали за пренос видеа и аудио су дигитални). Дигитализација је омогућила компресију садржаја чиме је омогућен пренос покретне слике и звука вишег квалитета мањом битском брзином него раније.

Свака нова фаза развоја технологије, преносних медијума као и уређаја за приказивање мултимедијалног садржаја доводила је до нових изазова и проблема које је било потребно рјешавати. Већина проблема који су се рјешавали су тежили бољем корисничком доживљају приликом конзумирања жељеног садржаја. До појаве интернета у зависности од медијума за пренос покретне слике и звука постојале су:

- Земаљско емитовање (Земаљска телевизија)
- Емитовање путем кабловске мреже (Кабловска телевизија)
- Емитовање путем сателита (Сателитска телевизија)

Појава и популаризација интернета довела је до револуције у области телевизије због тога што је све до појаве интернета телевизија представља једносмјерну комуникацију (од емитера ка кориснику), док је развој интернета омогућио двосмјерну комуникацију (од корисника ка емитеру и обратно) која је довела до развоја великог броја нових сервиса од којих су најпознатији: достављање мултимедијалног садржаја клијенту на захтјев (енг. On-Demand) као и могућност гледања пропуштеног садржаја (садржај који је уживо био емитован у прошлости).

---

У почетку инфраструктура рачунарских мрежа није имала капацитете неопходне за пренос покретне слике и звука високог квалитета, али је она кориштена као помоћ већ постојећим традиционалним медијумима (кабловској телевизији) у развоју нових сервиса на начин да је телевизија уживо била емитована путем традиционалних медијума, док су се нови сервиси емитовали путем интернета. Многи телевизијски оператери и данас не напуштају традиционалне медијуме због развијене инфраструктуре, али већина оператора поред постојеће инфраструктуре нуде и сервисе базиране на двосмијерној комуникацији.

Количина података која може бити пренесена преко рачунарске мреже у јединици времена (eng. Bandwidth) се повећава из године у годину, а то је омогућено развојем инфраструктуре рачунарских мрежа. Један од кључних сегмената развоја рачунарске мрежне инфраструктуре је замјена бакарних каблова оптичким кабловима. Оптички каблови подржавају велике брзине преноса података и стабилнији су од бакарних каблова. Када су оптички каблови постали јефтинији и доступнији ушли су у ширу комерцијалну употребу. Такође, и активни мрежни уређаји (ЛАН комутатор, усмјеривач, ..) су унапријеђени како би подржали веће брзине преноса података. Ћелијске мреже (мреже мобилне технологије) се такође развијају, и свака нова генерација (од 1Г до 5Г) омогућава бржи пренос података што доводи до развоја нових сервиса.

Врсте медија које се преносе путем интернета зависе од брзине преноса података, па се популарност апликација сукцесивно мијењала у зависности од медија за размјену информација који је био у фокусу апликације. У почетку је комуникација вршена углавном размјеном текста, затим аудио садржаја, потом фотографија, да би се дошло до преноса видео садржаја у реалном времену. Данас се преноси видео садржај високог квалитета, те је популарност сервиса који приказују видео садржај изузетно велик. Већина пренесених података преко Интернета данас се односи на пренос видео садржаја, а очекивања су таква да ће се проценат преноса видео садржаја у односу на остале медије додатно повећати у будућности [1]. Како је пренос телевизијског садржаја (аудио и видео) данас доминантан у односу на друге медије, појам мултимедија ће се у овом раду односити управо на пренос телевизијског садржаја.



---

Иако развој рачунарске мрежне инфраструктуре доводи до већих пропусности рачунарских мрежа, а методе компресије су све ефикасније, потребе корисника су увијек један корак испред тренутног технолошког развоја. Пропусност рачунарских мрежа варира у времену услед разних околности (тренутна оптерећеност мреже, откази у мрежи, .. ) што код преноса мултимедијалног садржаја може довести до лошијег квалитета корисничког доживљаја.

Нежељени ефекти флукуације пропусности рачунарских мрежа су: заустављање репродукције мултимедијалног садржаја, нагле промјене резолуције, низак просјечан квалитет слике, итд. Хипотеза ове дисертације је да се примјеном хибридног адаптивног алгоритма предложеног у овом раду, који се налази на клијентској страни, и који се прилагођава флукуацији пропусности рачунарских мрежа, може постићи већи квалитет доживљаја корисника у односу на постојеће адаптивне алгоритме.

Истраживање је проведено у сљедећим фазама:

- 1) анализа до сада предложених алгоритама битске брзине и релевантне литературе,
- 2) анализа индикатора ККД и релевантне литературе,
- 3) аблативна студија Такаги-Сугено-Канг фази модела,
- 4) развој и имплементација хибридног АБР алгоритма,
- 5) постављање окружења за експерименталну евалуацију АБР алгоритама и вршење експеримената,
- 6) евалуација остварених резултата, поређење са релевантним алгоритмима и дискусија о потенцијалним унапрјеђењима.

Дакле, у раду ће бити описан процес анализе адаптивних алгоритама које за крајњи циљ имају достизање што бољег корисничког доживљаја који је изражен кроз неколико индикатора квалитета корисничког доживљаја. Биће анализирани индикатори квалитета корисничког доживљаја, те ће се у односу на њих поредити постојећи и предложени АБР алгоритми. Биће урађена аблативна студија на основу које ће се изабрати ТСК модел са најбољом предикцијом пропусности рачунарске мреже.

У раду је приказано и окружење за експерименталну евалуацију предложеног рјешења у ком се на основу индикатора квалитета корисничког доживљаја пореде алгоритми. На самом крају представљени су даљи планови и потенцијална унапрјеђења окружења за експерименталну евалуацију и предложеног рјешења.

---

Уколико резултати експерименталне евалуације предложеног хибридног адаптивног алгоритма и осталих релевантних АБР алгоритама покажу да је предложени алгоритам бољи у погледу: 1) превенције пражњења меморије за привремено чување података, 2) просјечне постигнуте битске брзине, 3) броја промјена битских брзина и 4) вриједности промјена битских брзина, може се сматрати да је предложени алгоритам довео до бољег корисничког доживљаја при конзумирању мултимедијалног садржаја у односу на остале релевантне АБР алгоритме.

Методe кориштене при изради докторске дисертације:

- (1) квантитативна анализа до сада предложених и објављених традиционалних алгоритама битске брзине у погледу: просјечне битске брзине, броја промјена битских брзина, вриједности промјена битских брзина између сукцесивних сегмената и дужине трајања времена у ком је меморије за привремено чување података празна,
- (2) квантитативна анализа до сада предложених и објављених алгоритама битске брзине базираних на неуронским мрежама у погледу: просјечне битске брзине, броја промјена битских брзина, вриједности промјена битских брзина између сукцесивних сегмената и дужине трајања времена у ком је меморије за привремено чување података празна,
- (3) аблативна студија на основу које је формиран Такаги-Сугено-Канг модел који ће бити кориштен у предложеном АБР алгоритму,
- (4) пројектовање хибридног адаптивног алгоритма који комбинује традиционални приступ и приступ базиран на неуронским мрежама,
- (5) експериментална евалуација и поређење предложеног алгоритма и осталих релевантних АБР алгоритама по кључним параметрима ККД,
- (6) статистичка обрада резултата експерименталне евалуације тражењем средње вриједности и синтезом хистограма.

У другом поглављу је представљен пренос тока мултимедијалних података, протоколи и стандарди којима је пренос тока мултимедијалних података дефинисан. Ближе је описан стандард за динамички адаптивни пренос података (MPEG-DASH), који је најзаступљенији стандард за пренос мултимедијалних података преко интернета у индустрији и литератури.

---

Адаптивни алгоритам битске брзине (АБР) је кључни модул стандарда за динамички адаптивни пренос алгоритама, те је представљена његова улога у преносу мултимедијалних података. У другом поглављу су представљене врсте адаптивних алгоритама као и индикатори квалитета доживљаја корисника на основу којих је могуће упоредити предложено рјешење са осталим, већ постојећим рјешењима.

Треће поглавље даје увид у стање у области кроз преглед радова који се баве одређивањем параметара квалитета доживљаја корисника као и предложеним АБР алгоритмима. На основу анализираних радова биће одређени параметри квалитета доживљаја корисника који ће се користити за евалуацију и поређење предложеног алгоритма и постојећих алгоритама. У овом поглављу ће бити уочене предности и недостаци постојећих АБР алгоритама.

У четвртном поглављу је образложен проблем истраживања. Приказане су основне идеје и концепти који ће бити примјењени у истраживању. У овом поглављу је приказана је аблативна студија којом је одређен ТСК модел кориштен у експерименталној евалуацији, као и остали параметри кориштени у алгоритму. Такође, представљен је и псеудо код алгоритма. У петом поглављу је описано окружење за експерименталну евалуацију АБР алгоритама, скупови података који одређују симулирану вриједност пропусности рачунарске мреже, као и резултати алгоритама по кључним параметрима ККД.

Основна сврха рјешавања овог проблема је побољшање корисничког доживљаја при конзумирању мултимедијалног садржаја. Циљ овог истраживања је креирање АБР алгоритма који у условима варијабилне пропусности рачунарских мрежа достиже вишу просјечну битску брзину, мањи број промјена битских брзина, мању просјечну вриједност промјена битских брзина и мањи однос празне меморије за привремено чување података и дужине трајања репродукције, у односу на постојеће АБР алгоритме.

---

## 2. Теоријске основе

У овом поглављу дате су теоријске основе неопходне за разумијевање проблема побољшања корисничког доживљаја при конзумирању мултимедијалног садржаја услед флукуације пропусности рачунарске мреже, којим се бави ова дисертација. Приказане су теоријске основе из области значајних за ову дисертацију, и то: рачунарских мрежа, дигиталне телевизије, преноса података у дигиталној телевизији, динамичког адаптивног преноса података, и адаптационе логике.

### 2.1 Телевизија

Под телевизијом се подразумева пренос мултимедијалног садржаја (у основи пренос покретне слике и звука) од произвођача мултимедијалног садржаја до крајњег корисника (гледаоца). Поред преноса покретне слике и звука телевизијски сигнал преноси и друге информације као што су метаподаци за разврставање слике и звука, називи програма, називи емисија, преводи, телетекст итд. У преносу мултимедијалног садржаја постоје три фазе: предајна, преносна и пријемна фаза. Свака од наведених фаза је зависна од остале двије, и било каква грешка настала у било којој од фаза се директно одражава на квалитет доживљаја корисника.

---

У предајној фази се врши припрема садржаја у облик погодан за пренос, док се у пријемној фази обавља процес инверзан процесу у предајној фази. Преносна фаза је одређена медијумом који се користи за пренос телевизијског сигнала до пријемног уређаја. Подјела телевизије се најчешће врши по два основа: по типу преносног медијума и врсти сигнала којим се преноси покретна слика и звук.

Према врсти сигнала којом се преноси покретна слика и звук, телевизију дијелимо на:

1. аналогну телевизију, и
2. дигиталну телевизију.

Телевизија је све до 1994. године била у потпуности аналогна. У аналогној телевизији слика се на предајној страни конвертује у електрични сигнал тако што се интензитет боје једне тачке на слици директно мапира на вриједност амплитуде сигнала. Такав сигнал се преноси преко једног од три преносна медијума која се користе у аналогној телевизији: земаљски, кабловски и сателитски. На пријемној страни се врши инверзан процес у ком се вриједност амплитуде сигнала директно мапира на интензитет освјетљења и приказује се на екрану. Пријемни уређаји у аналогној телевизији користе катодне цијеве за исцртавање 525 или 625 хоризонталних линија које се на екрану исцртавају линију по линију. у свијету постоје три доминантна стандарда аналогне телевизије, и то: PAL, SECAM и NTSC.

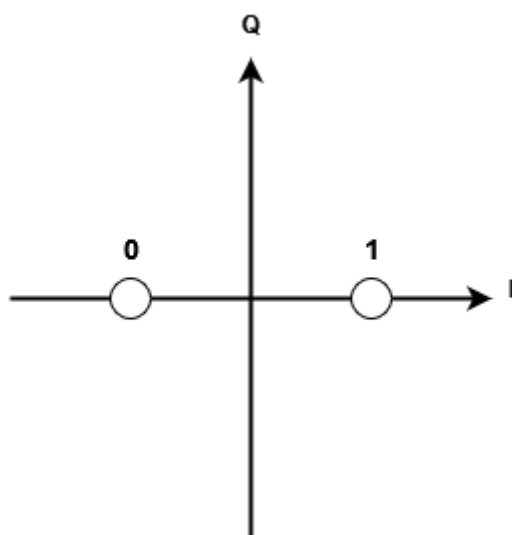
Развој аналогне телевизије је био ограничен услед два велика недостатка која није било могуће превазићи: веома мала отпорност на шумове у преносу телевизијског сигнала и велики пропусни опсег потребан за пренос једног телевизијског сервиса. Аналогни телевизијски сигнал освјетљеност, боју и звук представља амплитудом, фазом и фреквенцијом. Из тог разлога било какав шум који настане на путу до пријемног уређаја је постајао видљив кориснику (врло честа појава "снијега" на телевизору). Друга мана се односи на велики пропусни опсег неопходан за пренос аналогних телевизијских сигнала. Наиме, у VHF спектру један канал чија ширина износи 7 MHz се користио за емитовање само једног ТВ програма (по сва три доминантна стандарда).

---

## 2.2 Дигитална телевизија

Дигитални телевизијски сигнал јесте низ бинарних вриједности (нула и јединица) који одговарајућом модулационом техником модулишу синусоидни носећи сигнал. Постоје различите дигиталне модулационе технике, али су све базиране на модулацији амплитуде ASK (енг. Amplitude Shift Keying), фреквенције FSK (енг. Frequency Shift Keying) или фазног помјераја BPSK (енг. Binary Phase Shift Keying) носећег сигнала, као и на комбинацији наведених основних модулација [2]. Фазна и фреквентна модулација су веома сличне, и није могуће мијењати фазу без промјене фреквенције, и обрнуто, те се оне заједно зову угаона модулација.

Симбол "нула" у амплитудској модулацији представљен минималном амплитудом, док је симбол "један" представљен високом амплитудом. У фреквенцијској модулацији симбол "нула" је представљен ниском фреквенцијом, док је симбол "један" представљен високом фреквенцијом. У фазној модулацији симболи "нула" и "један" су представљени помјерајем фазе за 180 степени. Констелација сигнала (распоред могућих вриједности у комплексној I/Q равни) за сигнал који је модулисан BPSK модулационом техником је приказана на слици 5.



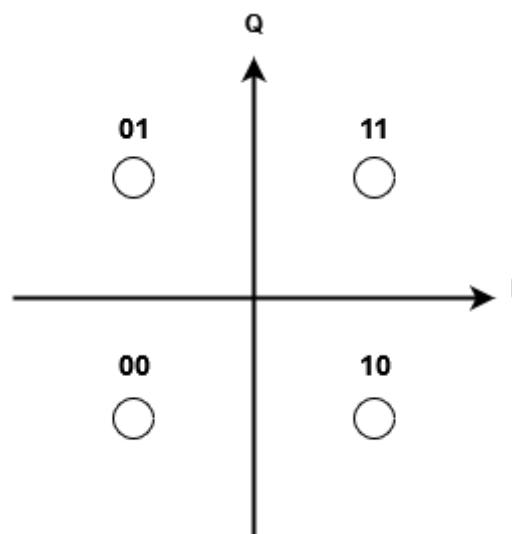
Слика 1. Констелација сигнала за BPSK модулацију

---

Самим преласком са аналогног на дигитални телевизијски сигнал ријешен је један велики проблем аналогне телевизије: веома мала отпорност на шум. Робуснији пренос информација је омогућен великом разликом у модулацији (амплитудској, фреквенцијској или фазној), па је утицај шума на препознавање сигнала доста мањи у односу на аналогни сигнал. Такође, дигитални сигнал омогућује заштитно кодовање којим је могуће детектовати и исправити евентуалне грешке у преносу.

Мана основних модулационих техника јесте у слабој искориштености преносног опсега, а то је превазиђено на начин да један сигнални елемент представља више од једног бита. Код QPSK (енгл. Quadrature Phase Shift Keying) и 4-QAM (енгл. Quadrature Amplitude Modulation) сваки сигнални елемент представља два бита. Постоје и следеће модулације: 16-QAM (један симбол представља четири бита), 64-QAM (један симбол представља 6 бита), 128-QAM (један симбол представља 7 бита), и 256-QAM (један симбол представља 8 бита). Сразмјерно повећању искориштености преносног опсега губи се на робусности (сигнал је мање отпоран на шум), али је за пренос покретне слике већег квалитета неопходно повећати брзину преноса за шта се користе модулације у којима симболи представљају више од 6 бита (64-QAM, 128-QAM, 256-QAM).

Констелација сигнала за сигнал који је модулисан QPSK и 4-QAM модулационим техникама је приказана на слици 6.



Слика 2. Констелација сигнала за QPSK и 4-QAM модулацију

---

За пренос телевизијског сервиса (програма) аналогним сигналом је довољан један VHF (енг. Very High Frequency) канал, док је за пренос истог телевизијског сервиса дигиталним сигналом уз напредне методе модулације (нпр. 64-QAM) потребна је битска брзина од 108 до 270 Mb/s, за шта је потребно од 5 до 13 VHF канала. Из овог поређења је јасно видљиво да дигитализација не само да није ријешила проблем великог пропусног опсега за пренос телевизијског садржаја, већ је на овај начин потребан још већи пропусни опсег.

Рјешење овог проблема се почело назирати почетком 1990-их година када је дошло до развоја ефикасних алгоритама компресије слика (JPEG стандард) и покретних слика (MPEG стандард) [3]. Примјеном основних метода компресије потребна битска брзина се смањује за преко педесет пута, што омогућава пренос осам телевизијских сервиса (програма) једним VHF каналом. Након рјешења и другог великог проблема аналогне телевизије, постало је јасно да је за даљи развој телевизије неопходно прећи са аналогног на дигитални телевизијски сигнал.

Усљед потребе за различитим модулационим техникама, али и других разлога као што су различита отпорност на шум, дигиталну телевизију према врсти преносног медијума дијелимо на:

1. земаљску,
2. кабловску,
3. сателитску, и
4. интернет телевизију.

### **2.3 Емисиони преносни медијуми**

Прве три врсте преносног медијума (земаљску, кабловску и сателитску) можемо груписати као емисионе медијуме који су једносмјерни, односно не омогућавају корисничку интеракцију. Земаљска телевизија је у прошлости имала највећи значај због своје широке распрострањености и доступности широј друштвеној популацији усљед ниских трошкова неопходних за набавку уређаја и опреме.



Други разлог је тај што фреквенције на којима се емитује земаљска телевизија јесу јавно добро (под контролом су државе), телевизијски садржај се емитује без заштитног кодовања, те било ко са пријемним уређајем у зони покривености сигнала може репродуковати телевизијски садржај без потребе да се претходно претплати на жељени садржај.

Земаљски сигнал се емитује преко мреже предајника на одређеном географском подручју (најчешће на територији једног града, регије или државе) на фреквенцијама од неколико стотина МНz, те веома добро продире и кроз препреке. Предајници се постављају на високе тачке попут врхова планина или високих грађевина како би сигнал са што мање шума доспио до што шире групе корисника.



Слика 3. Илустрација емисионих преносних медијума у телевизији

Кабловска телевизија врши испоруку телевизијског садржаја путем мреже коаксијалних каблова. Изградња кабловске мрежне инфраструктуре је веома захтјевна и веома скупа у односу на остале преносне медијуме, али је квалитет преноса (отпорност на шум) изузетно висок усљед изолованости преносног медијума од окружења. Кабловска телевизија је раширена у великим градским језгрима због мањих трошкова развоја мрежне инфраструктуре у односу на руралне предјеле гдје кабловска телевизија врло често не постоји.

---

Сателитска телевизија врши испоруку телевизијског садржаја путем сателита. Телевизијски сигнал се са земље емитује до сателита, да би се затим емитовао од сателита до корисника. Због тога што се сателити налазе на великим висинама, не постоји проблем физичких препрека између сателита и корисника (пријемног уређаја), те се сигнал може емитовати на високим фреквенцијама. Како се сигнал емитује на веома високим фреквенцијама, доступан је велики број емисионих канала те је могуће пренијети велики број телевизијских сервиса (програма).

Да би све компоненте неопходне за пренос покретне слике и звука од произвођача до гледаоца биле компатибилне мора постојати договор о формату и начину преноса података, а такав договор се назива дигитални телевизијски стандард. ДТВ стандард обједињује већ постојеће стандарде који дефинишу формат за пренос, кодовање покретне слике, кодовање звука, модулационе технике, итд. Данас у свијету постоји неколико група стандарда дигиталне телевизије који су у употреби:

Пренос тока мултимедијалних података подразумијева постојање предајника, преносног медијума, као и пријемника. Улога предајне стране је припрема, пребацивање у одговарајући преносни облик, те слање података. На основу коришћеног медијума разликујемо сателитски, кабловски, земаљски и пренос мултимедијалних података путем интернета. Пријемник по пријему података најприје мора да их трансформише из преносног облика у облик погодан за даљу обраду и коришћење. Практично, потребно је извршити супротне обраде података од оних које су извршене на страни предајника.

## 2.4 Рачунарске мреже

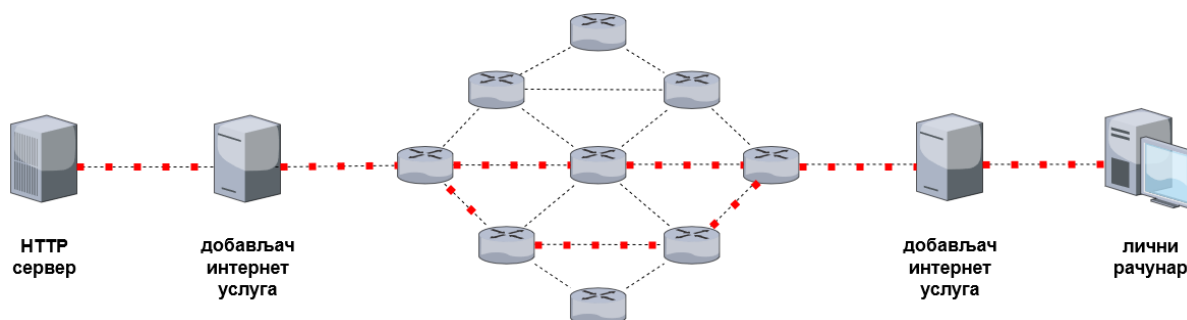
Развој рачунарске мрежне инфраструктуре је ишао раме уз раме са развојем рачунара. У првој фази су рачунари били самостални и неумрежени. Шездесетих година прошлог вијека се почело радити на умрежавању рачунара, и од тад до данас рачунарска мрежна инфраструктура се континуирано развија.

По техници преноса рачунарске мреже дијелимо на: дифузне мреже, и комутационе мреже. Дифузне мреже имају један комуникациони канал који користе сви рачунари у мрежи. Сви уређаји (рачунари) у дифузној мрежи дијеле приступ преносном медијуму а понашају се и као пријемници и предајници. Код дифузних система постоје два начина слања пакета у мрежи: свим рачунарима у мрежи (дифузно упућивање) и одређеним рачунарима у мрежи (вишезначно упућивање).

Комутационе рачунарске мреже подразумевају повезивање жељеног улаза са жељеним излазом преко комутационих чворова и преносног медијума. У оваквим мрежама пакет послат од једног до другог рачунара у мрежи може да прође кроз више чворова различитим путањама. Комутациони чворови одређују путању по којој ће се пакет кретати кроз мрежу. Постоји неколико различитих типова комутационих рачунарских мрежа:

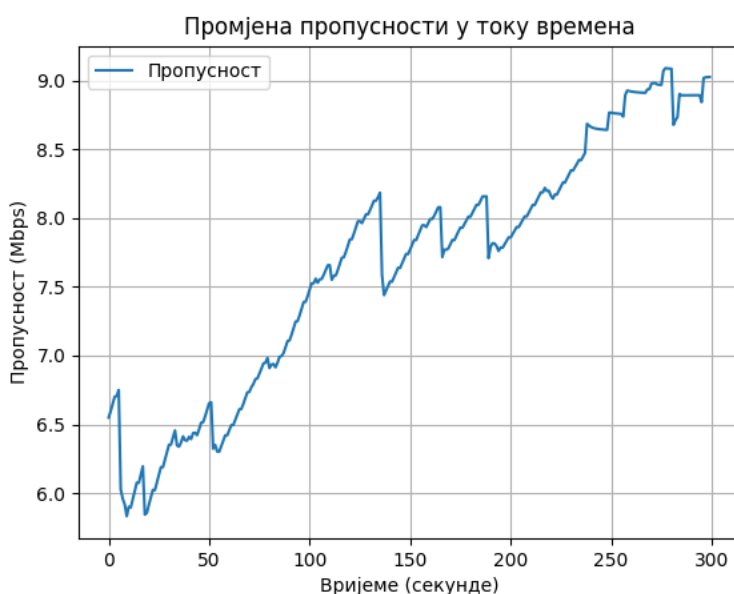
- (1) комутација канала,
- (2) комутација порука, и
- (3) комутација пакета.

У преносу информација рачунарским мрежама постоји неколико врста кашњења: кашњење пропагације, вријеме предаје и кашњење комутационог чвора. Вријеме предаје је данас занемариво, будући да је просјечно вријеме предаје данас једну милисекунду. Кашњење пропагације се односи на вријеме потребно да се сигнал пренесе од једног до другог чвора (преносним медијумом), и оно је веће што је раздаљина између уређаја већа. У кашњењу комутационих чворова кашњење обраде података је мало и занемариво, те се посматра кашњење у редовима чекања.



Слика 4. Комутациона рачунарска мрежа

Максималан капацитет рачуарске мреже (eng. Bandwidth) представља теоретску највећу пропусност мреже узимајући у обзир све мрежне уређаје и преносни медијум. Пропусност рачуарске мреже је количина података пренесена кроз рачуарску мрежу у јединици времена, и мјери се у битима по секунди (БПС). У пракси максималан капацитет никада није могуће достићи, а пропусност рачуарске мреже варира у току времена. Варијација пропусности рачуарске мреже настаје усљед преоптерећења мреже, што доводи до повећања кашњења пакета кроз мрежу. Кашњење може бити узроковано локалним преоптерећењем, или преоптерећењем у цијелој мрежи.



Слика 5. Примјер варијације пропусности у рачуарској мрежи

Пропусност рачуарске мреже локално може да варира усљед следећих околности: преносног медијума и захтјева за пренос података који су већи од капацитета мреже. Постоји неколико преносних медијума у рачуарским мрежама: коаксијални кабл, парице, оптички кабл, радио таласи (eng. Wireless), итд. Кабловски медијуми су доста стабилнији у погледу варијације пропусности, али имају своја ограничења у погледу статичне позиције на којој је могуће примити сигнал. Развој мобилних телефона и осталих мобилних уређаја довели су до тога да су бежични медијуми веома популарни иако у погледу перформанси заостају за жичаним медијумима.

---

## 2.5 Битска брзина (eng. Bitrate)

Битска брзина је један од најзначајнијих појмова који се користи при опису и преносу мултимедијалних података. Значење овог израза зависи од његове примјене, па битска брзина код описа мултимедијалних садржаја представља количину података која се користи за описивање мултимедијалног садржаја у јединици времена.

Битска брзина се мјери у битовима по секунди (БПС), или у већим јединицама мјере као што су: килобити по секунди (КБПС), мегабити по секунди (МБПС), гигабита по секунди (ГБПС), итд. Један КБПС јесте исто што и 1000 БПС, док је један МБПС исто што и 1000 КБПС, или 1000000 БПС. Један исти мултимедијални садржај (видео и/или аудио) је могуће представити различитим репрезентацијама, односно, могуће га је описати мањом или већом количином података по јединици времена.

Енкодер је софтверски или хардверски алат уз помоћ којег се дигитални сирови видео и аудио материјал компресује, односно, којим се смањује количина података којом се описује видео и аудио. Типично енкодери омогућавају компресију на различитим нивоима битских брзина, а већа компресија подразумијева и лошији квалитет мултимедијалног садржаја. Енкодери се ослањају на несавршеност људског ока, као и на неке друге особине слике које се могу искористити за компресију као што је статичност једног дијела слике у току времена, што доводи до варијабилности битске брзине у једном видеу услед компресије. Дио видеа који је статичан (у ком нема много покрета) је могуће описати мањом количином података у односу на дио видеа који је динамичан (промјена сцене или много покрета у сцени). Дакле, битска брзина у највећој мјери зависи и од самог мултимедијалног садржаја, па је типично да спортски догађаји имају већу битску брзину од емисије у којој доминира једна статична сцена.

---

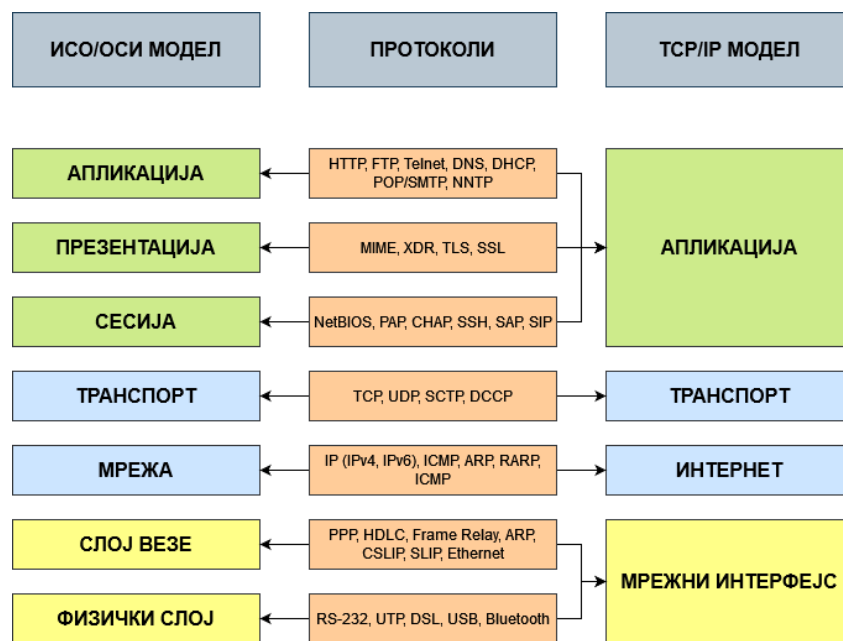
Резолуција представља број пиксела који се користе за приказ слике, те је за већу резолуцију потребно више података за описивање слике (већа битска брзина). Сliku у свакој од резолуција је могуће представити у већем или мањем квалитету, па ниска вриједност битске брзине може довести до губитка детаља код видеа са високом резолуцијом, док је са друге стране већа битска брзина од оне којом се достиже највиши могући квалитет за одређену резолуцију непотребна, и само смањује ефикасност преноса мултимедијалног садржаја. Модерни кодеци (заједнички назив за енкодер и декодер) енкодују видео и аудио садржај на жељени ниво битске брзине и жељену резолуцију, те је за сирови видео и аудио садржај могуће направити велики број репрезентација (нивоа квалитета).

Битска брзина и пропусност рачунарске мреже су два кључна фактора код преноса мултимедијалног садржаја у реалном времену путем интернета. Како пропусност рачунарске мреже представља количину података која је пренесена у јединици времена, а битска брзина представља количину података која описује мултимедијални садржај у јединици времена, може се доћи до закључка да ће до несметаног преноса мултимедијалног садржаја у реалном времену доћи уколико је битска брзина мања од пропусности рачунарске мреже. Такође, максималан квалитет мултимедијалног садржаја ће бити пренесен и приказан ако је пренесен мултимедијални садржај највеће доступне битске брзине ниже од пропусности рачунарске мреже.

## **2.6 Стандарди и протоколи за пренос мултимедијалних података путем интернета**

Развој рачунарске мрежне инфраструктуре доводи до веће пропусности (количина података у јединици времена) рачунарских мрежа, што омогућава пренос мултимедијалног садржаја већег квалитета путем интернета. Преко половине пренесених података путем интернета данас се односи на мултимедијалне податке, највише аудио и видео, а трендови су такви да ће се тај проценат само повећавати [1].

Постоје два слојевита модела у општој употреби код рачунарских мрежа: ИСО ОСИ модел и Интернет протокол стек. ИСО ОСИ модел је концептуални модел развијен од стране ИСО организације, и то је свеобухватан референтни оквир за опште мрежне системе. Са друге стране, савремени Интернет не прати стриктно ОСИ модел. Савремени интернет ближе прати једноставнији пакет интернет протокола који је опште познат као TCP/IP, јер су основни протоколи у пакету TCP (Протокол за контролу преноса) и IP (Интернет протокол). Слика 8. илуструје како су OSI и TCP/IP модели међусобно повезани.



Слика 6. ИСО ОСИ и TCP/IP протокол стек

Постоји неколико интернационалних стандарда (и протокола) који се користе за пренос мултимедијалних података путем интернета, а неки од најважнијих међу њима су: RTP (eng. Real Time Transport Protocol), RTSP (eng. Real Time Streaming Protocol), HLS (eng. HTTP Live Streaming) и MPEG-DASH [4].

---

## 2.6.1 RTP стандард

RTP стандард је сачињен од два узajамно повезана протокола: Real-Time Transport Protocol (RTP) [5-6] и Real-Time Transport Control Protocol (RTCP) [5]. RTP је мрежни протокол за достављање аудио/видео садржаја коришћењем рачунарских мрежа у реалном времену, док је RTCP протокол који служи за размјену информација између клијента и послужоца (обезбеђује повратне информације о квалитету испоруке података и информације о учесницима сесије). RTP/RTCP припада сесионом и презентационом слоју ISO OSI модела, док налијеже на транспортни слој ISO OSI модела. RTP протокол најчешће налијеже на UDP протокол транспортног слоја.

## 2.6.2 RTSP протокол

Real-Time Streaming Protocol (RTSP) [7] је протокол који припада апликативном слоју ISO OSI модела, и служи за управљање преносним током мултимедијалних података. Клијент управља преносним током на начин да шаље команде Play, Pause, Record, итд. RTSP протокол најчешће користи RTP/RTCP стандард на који налијеже, али постоји могућност кориштења и других стандарда.

Примјер команде:

```
C->S: PLAY rtsp://example.com/media.mp4 RTSP/1.0
      CSeq: 4
      Range: npt=5-20
      Session: 12345678

S->C: RTSP/1.0 200 OK
      CSeq: 4
      Session: 12345678
      RTP-Info:
url=rtsp://example.com/media.mp4/streamid=0;seq=9810092;rtptime=3450012
```



---

### 2.6.3 HLS

HTTP Live Streaming (HLS) [8] је протокол за пренос мултимедијалног тока података са адаптивном битском брзином који је развио Apple INC. и објављен је 2009. године. Као што се може закључити из самог назива, базиран је на HTTP протоколу. Протокол је широко подржан у разним плејерима, веб претраживачима, мобилним уређајима и послужиоцима. HLS дефинише подржане кодеке за декодовање мултимедијалног садржаја (за видео су подржани H264 и H265).

HLS функционише тако што дијели цјелокупни преносни ток на одређени (у случају бесконачног преносног тока неограничен) број малих датотека базираних на HTTP протоколу. Клијент захтева и преузима једну по једну доступну датотеку коју декодује и као континуалан ток приказује кориснику. Листа доступних токова, кодираних различитим битским брзинама, шаље се клијенту помоћу проширене листе за репродукцију.

Широка распрострањеност HTTP стандарда омогућава HLS стандарду пролаз кроз разне заштитне зидове којима је циљ да елиминишу пренос садржаја који својим капацитетима оптерећује мрежу (велике битске брзине), за разлику од протокола заснованих на UDP стандарду као што је RTP. HLS је веома сличан MPEG-DASH стандарду о ком ће више ријечи бити у наставку.

## 2.7 Динамички адаптивни пренос података (MPEG-DASH)

MPEG-DASH је стандард за пренос мултимедијаног садржаја путем интернета развијен од стране ISO (eng. International Organization for Standardization) и IEC (eng. International Electrotechnical Commission) у оквиру заједничке радне групе MPEG (eng. Moving Pictures Experts Group). Први пут је објављен 2011. године, а проглашен је стандардом 2012. године (ISO/IEC 23009-1:2012). MPEG-DASH је најприје ревидиран 2014. године (ISO/IEC 23009-1:2014), а затим и 2019. године (ISO/IEC 23009-1:2019). Четврта верзија стандарда је објављена 2020. године (ISO/IEC 23009-1:2020).

---

Последња ревизија, која је и даље важећа, и у тренутку писања овог рада се признаје као стандард је извршена 2022. године (ISO/IEC 23009-1:2022). Оно што можемо примјетити је да је стандард прошао кроз неколико ревизија од свог првобитног издања. Свака ревизија је доносила нове функционалности и унапрјеђења, а у плану су и нове ревизије уз које стандард тежи да остане актуелан и у самом врху технологија за пренос мултимедијалног садржаја.

Из назива (eng. Dynamic Adaptive Streaming over HTTP) је очевидно да је MPEG-DASH базиран на HTTP протоколу, и то је једна од најважнијих карактеристика овог стандарда. Коришћење HTTP протокола омогућава да се користе стандардни HTTP послужоци, из чега произилази низ бенефита.

HTTP је широко прихваћен и омогућава комуникацију путем стандардних портова (80 и 443) што олакшава пролазак кроз заштитне зидове (eng. Firewall). Велики број заштитних зидова омогућује несметану комуникацију на наведеним портовима, док коришћење специфичних протокола и портова за пренос видео садржаја често може довести до потешкоћа и ограничења пропусности на наведеним портовима. DASH користи TCP као транспортни протокол.

MPEG-DASH стандард дозвољава употребу било ког стандарда за кодовање/дековање мултимедијалних података, те на тај начин остаје компатибилан и са најновијим стандардима за кодовање. Овај стандард дефинише два ентитета која међусобно комуницирају – клијент и послужоц (eng. Server).

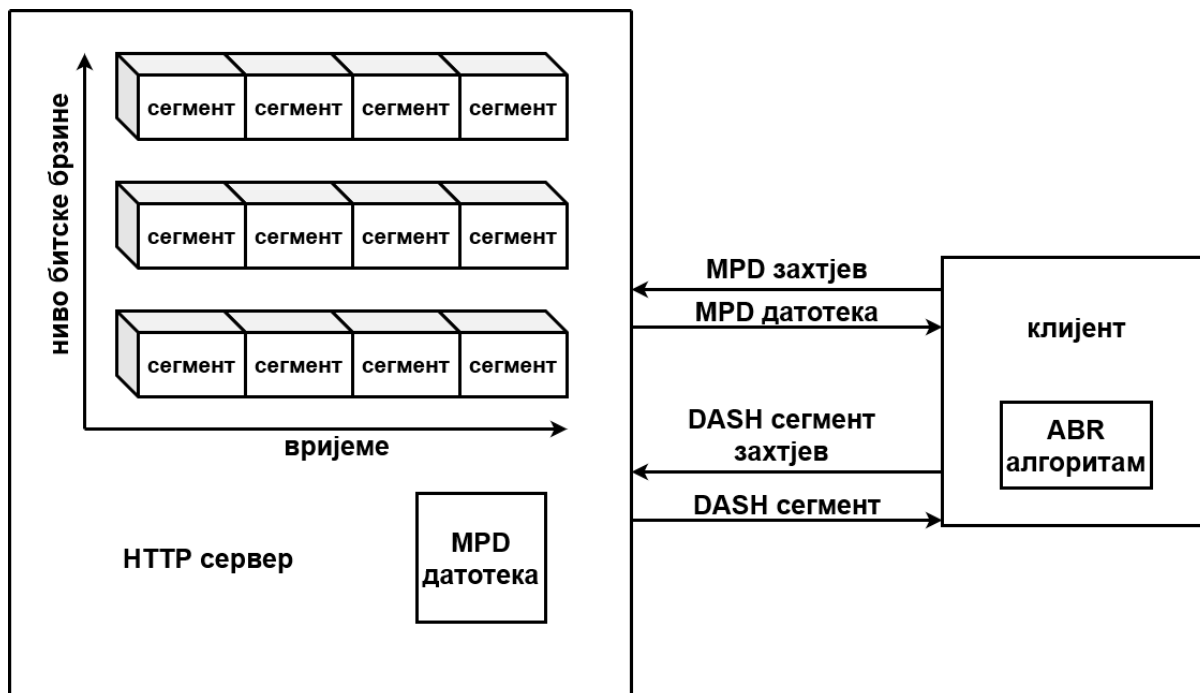
Адаптивни алгоритам битске брзине (АБР) одређује (прилагођава) квалитет мултимедијалног садржаја који се приказује кориснику, и налази се на клијентској страни. То што се АБР налази на клијентској страни омогућава да се квалитет мултимедијалног садржаја приказаног кориснику прилагођава тренутној пропусности рачунарске мреже и перформанса пријемног (корисничког) уређаја.

---

Према MPEG-DASH стандарду, видео садржај је подијељен на један или више сегмената. Дужина репродукције сегмента је промјенљива, али обично варира између једне и десет секунди, а видео сегменти се чувају под различитим нивоима битских брзина (погледајте дијаграм на лијевој страни слике 7). То подразумијева да је најприје неопходно енкодovati улазни мултимедијални садржај у више различитих репрезентација (квалитета).

Опис медијске презентације (MPD) је текстуална датотека ускладиштена на послужиоцу која садржи све неопходне информације о видео сегментима (вријеме, доступне нивое битских брзина, URL (eng. Uniform Resource Locator), итд.) које су потребне клијенту да затражи и пусти тражени сегмент. И видео сегменти и MPD датотеке се чувају на HTTP послужиоцу јер DASH користи HTTP протокол за комуникацију са клијентима.

Пошто на послужиоцу постоје сегменти различитих нивоа битских брзина, промјена битске брзине током времена зависи од пропусности мреже. Логика која одређује битску брзину захтјеваног сегмента налази се на страни корисника, а на основу информација из MPD датотеке корисник може да захтјева сваки сегмент свих доступних битских брзина. Комуникација клијент-послужоц је илустрована на слици 1. Како DASH стандард не дефинише АБР алгоритам, ова област је отворена за истраживаче, а објављени су многи радови који представљају приједлоге АБР алгоритама [9-10].



Слика 7. Комуникација између клијента и послужеоца по MPEG-DASH стандарду

Адаптациона логика је према MPEG-DASH интегрисана у клијенту и она није одређена MPEG-DASH протоколом, а иако важна, није једина која утиче на квалитет корисничког доживљаја. Излаз АБР алгоритма представља битску брзину следећег захтјеваног сегмента која се послужеоцу шаље од стране клијента кроз HTTP захтјев.

Сваки адаптивни алгоритам тежи да добава сегменте са највећом доступном битском брзином а чија је максимална вриједност средња вриједност пропусности рачунарске мреже за вријеме преноса сегмената од послужеоца ка клијенту. Битска брзина следећег сегмента се може одредити на основу неколико улазних вриједности, те се на основу улазних вриједности развило неколико врста АБР алгоритама:

1. базираних на измјереним вриједностима пропусности,
2. базираних на попуњености меморије за привремено чување података,
3. базираних на моделима машинског учења,
4. хибрид измјерених вриједности пропусности и попуњености меморије за привремено чување података (традиционални хибрид).

---

Свака од наведених врста АБР алгоритама има своје предности и недостатке, а како у литератури и индустрији није постигнут консензус о томе који је алгоритам најбољи, предлажу се нови алгоритми који теже да достигну што бољи квалитет корисничког доживљаја.

## 2.8 Квалитет корисничког доживљаја

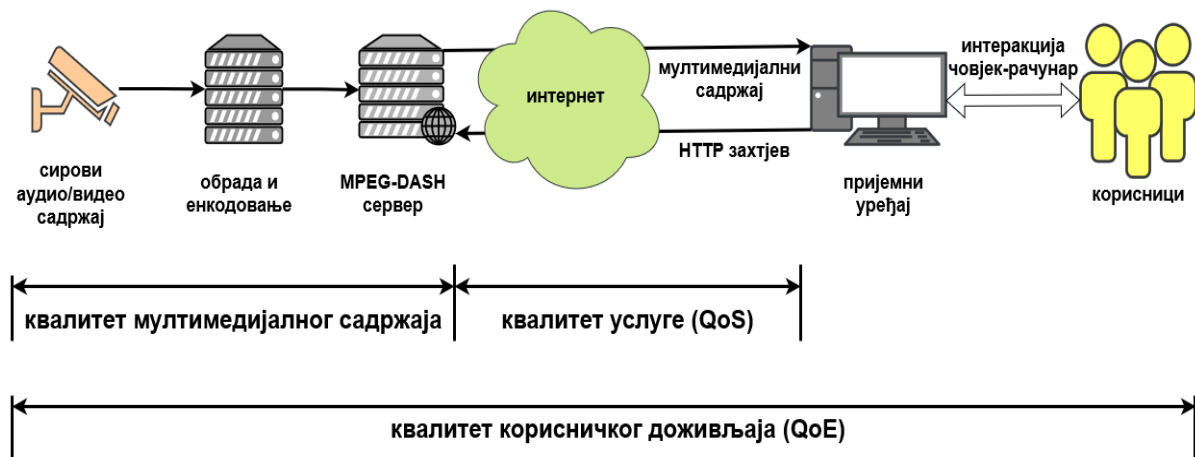
Идентичан квалитет мултимедијалног садржаја је различито перципиран од стране различитих крајњих корисника, па можемо рећи да је квалитет корисничког доживљаја субјективан. Крајњи корисник није у обавези да познаје процесе и технологију неопходну за производњу, пренос и приказивање мултимедијалног садржаја, ипак, од квалитета корисничког доживљаја директно зависи дужина конзумације мултимедијалног садржаја од стране корисника, стога је важно дефинисати параметре који у највећој мјери утичу на квалитет корисничког доживљаја.

Постоји велики број фактора који утичу на квалитет корисничког доживљаја, а који се односе на снимање сировог видео материјала, обраду, енковање, припрему за пренос, пренос, пријем мултимедијалног садржаја, декомпресију и репродукцију. Изазов који стоји пред истраживачима јесте креирање метрике која јасно дефинише који фактор и у коликој мјери утиче на квалитет корисничког доживљаја приликом конзумације мултимедијалног садржаја.

Квалитет корисничког доживљаја се односи на свеукупан кориснички доживљај добијене услуге, а постоје два сегмента који утичу на ККД и који могу да се представе као посебне цјелине: квалитет мултимедијалног садржаја и квалитет услуге (QoS - eng. Quality of Service), што је приказано на слици 8. Квалитет мултимедијалног садржаја зависи од сировог мултимедијалног садржаја добијеног од стране уређаја за снимање или креирање мултимедијалног садржаја. Од сировог мултимедијалног садржаја енковањем се може добити мултимедијални садржај истог или нижег квалитета. Висок квалитет мултимедијалног садржаја је претпоставка доброг квалитета корисничког доживљаја.

Квалитет услуге је дефинисан од стране ИТУ (eng. International Telecommunication Union) у [11], и односи се на мјерење перформанси система (рачунарске мреже, интернет сервиса и сл.) и њихову оцјену. Перформансе система код преноса мултимедијалних података се најчешће оцјењују на основу: губљења пакета, пропусности рачунарске мреже, битске брзине, итд. [12] Квалитет корисничког доживљаја је надскуп који садржи квалитет мултимедијалног садржаја и квалитет услуге, и он одређује који параметри у коликој мјери утичу на укупан квалитет доживљаја корисника.

Како је квалитет корисничког доживљаја субјективан, најбољи начин за испитивање ККД јесте анкетирање великог броја корисника. Анкетирање великог броја корисника је комплексан и скуп процес који захтијева прецизно и квалитетно припремљену анкету, вријеме (и новац) корисника који су вољни учествовати у анкети, синтезу резултата, анализу резултата и доношење финалних закључака. Такву итерацију је потребно поновити за све евентуалне измјене и потенцијална рјешења. Како је овај процес скуп и захтијева много времена (није примјењив у пракси), овакве анкете се користе за одређивање параметара на основу којих је могуће креирати алгоритме који се сматрају објективним приликом одређивања квалитета корисничког доживљаја.



Слика 8. Квалитет корисничког доживљаја

---

У овом раду је предложен АБР алгоритам, те је потребно дефинисати параметре ККД који се односе искључиво на АБР алгоритам, не на комплетан ККД. Подразумијева се да ће сви АБР алгоритми бити поређени на основу идентичног мултимедијалног садржаја у погледу сировог аудио/видео материјала и енковања/дековања. Такође, мрежни услови приликом евалуације су симулирани на исти начин, што алгоритме доводи у равноправан положај по питању преноса мултимедијалног садржаја. Истакла су се четири индикатора која се односе на АБР алгоритме, а која су широко кориштена у литератури ради поређења адаптивних алгоритама:

- 1) просјечна битска брзина,
- 2) број промјена битских брзина,
- 3) вриједност промјена битских брзина,
- 4) пражњење меморије за привремено чување података (доводи до заустављања репродукције мултимедијалног садржаја).

Постоји општи консензус о томе да је превенција пражњења меморије за привремено чување података параметар који највише утиче на квалитет искуства корисника.

---

### 3. Стање у области

Постоје два истраживачка домена у вези са MPEG-DASH стандардом: 1) одређивање параметара квалитета корисничког доживљаја и 2) адаптивни алгоритми битске брзине (АБР) који теже постизању што вишег корисничког доживљаја.

Предуслов за мјерење квалитета АБР алгоритма је одређивање адекватних параметара на основу којих је могуће поредити алгоритме те потврдити квалитет алгоритма. Да би се открили објективни параметри који значајно утичу на квалитет корисничког доживљаја приликом конзумације мултимедијалног садржаја потребно је анализирати очекивања корисника, направити анкету у којој корисници оцјењују субјективни квалитет доживљаја, те на основу тога направити статистику и одредити објективне параметре ККД. У радовима [13-14] је направљен преглед предложених модела квалитета корисничког доживљаја.

Одређивање објективних параметара ККД је неопходно због сложености организовања студије субјективног квалитета у погледу ангажовања људи, времена потребног за извођење студије, сумирања резултата, финансија неопходних за извођење студије, итд. Из тог разлога овакве студије су у прошлости рађене искључиво ради утврђивања објективних параметара који се могу користити у аутоматским тестовима и за које нису неопходни велики ресурси приликом експлоатације.



---

Урађено је неколико студија које се баве анализом субјективног осјећаја квалитета искуства корисника приликом гледања видео садржаја, а можемо их подијелити у двије групе: 1) који се баве појединачним факторима [15-17], и 2) оне чији је циљ одређивање свих фактора који утичу на објективни квалитет искуства корисника [18-22]. Рад [23] је најопсежнији и базиран је на осталим значајним радовима који се баве истом темом.

У раду [16] је приказана разлика између иницијалне паузе и паузе у току репродукције видео садржаја. Иницијална пауза (пауза приликом започињања репродукције видео садржаја) је очекивана од стране корисника, и не представља значајан нежељени параметар од стране корисника, док пауза у току репродукције за корисника долази изненада, и представља најнепожељнији параметар ККД. Радови [15,17] анализирају посљедице заустављања репродукције и ефекат који то изазива код корисника. Из наведених радова је очито да спорадичне кратке паузе једва примјетне за човјека не представљају значајан нежељени фактор, док честе паузе примјетне људском оку представљају нежељен фактор. Корисницима је прихватљивија појава малог броја заустављања репродукције који дуже трају, него ли честих краткотрајних заустављања репродукције.

Препоруке ITU-R BT-500 [24] и ITU-T P.910 [25] се најчешће користе приликом студија субјективног квалитета корисничког доживљаја, и њима се дефинишу методе тестирања, окружење неопходно за тестирање, захтјеви у погледу мултимедијалног садржаја коришћеног у тестирању, начин евалуације одговора корисника, итд. Корисници најчешће оцјењују поједине доживљаје оцјенама од 1 до 5, при чему се оцјена 5 односи на најбољи доживљај корисника, а оцјена 1 на најлошији доживљај корисника[13].

Према [23] најважнији параметри који одређују ККД су:

- 1) трајање пауза у емитовању због празног бафера,
- 2) број пауза у емитовању због празног бафера,
- 3) просјечна битска брзина,
- 4) број промјена битске брзине,
- 5) магнитуда промјена битске брзине.

---

У раду [13] је испитиван утицај појединачних горенаведених параметара на укупан квалитет доживљаја корисника. LIVE NFLX II [26] је јавна база података која садржи оцјене појединачних параметара ККД од стране 65 различитих корисника над 420 видеа који су достављани кориснику симулирајући различите проточности рачунарске мреже. Аутори су у [13] израчунали PLCC и SRCC над LIVE NFLX II, а резултати су такви да је просјечна битска брзина најважнији параметар за кориснике, након тога слиједи трајање пауза у емитовању због празног бафера и број промјена битске брзине. Интересантно је да магнитуда промјена битске брзине и број пауза и емитовању по овом истраживању имају много мањи утицај на корисника.

На основу истраживања поменутих у овом поглављу три параметра (просјечна битска брзина, трајање пауза у емитовању због празног бафера и број промјена битске брзине) се могу сматрати објективним параметрима ККД који се односе на АБР алгоритам, те су они општеприхваћени параметри ККД кориштени у највећем броју радова ради евалуације предложених алгоритама [27-29]. У литературу је постигнут консензус да је трајање празне меморије за привремено чување података најважнији параметар квалитета корисничког доживљаја (добри алгоритми теже минималном трајању празне меморије за привремено чување података).

Висока просјечна вриједност битске брзине сегмената јесте важна, али само у случају када је број промјена битских брзина и вриједност промјена битских брзина сукцесивних сегмената минималан. Зато је исправно рећи да је циљ сваког АБР алгоритма постизање оптималне битске брзине, а у овом случају то подразумијева постизање што је могуће више просјечне битске брзине, са мањом фреквенцијом промјена битских брзина, мањом просјечном вриједности промјена битских брзина сегмената и превенцијом пражњења меморије за привремено чување података.

Како MPEG-DASH подржава све кодеке, други начин побољшања квалитета корисничког доживљаја је побољшање компресије (добија се видео и аудио већег квалитета са мањом битском брзином)[30]. Аутори у [31] предлажу оквир између HEVC (eng. High Efficiency Video Coding) кодека и MPEG-DASH стандарда за проналажење нових паралелних тачака кодовања које убрзавају процес кодовања за DASH-HEVC садржај.

---

Истраживање у области адаптивних алгоритама битске брзине је увијек актуелно, а данас постоји велики број предложених и објављених MPEG-DASH адаптивних алгоритама битске брзине. Истраживањем стања у овој области уочене су сличности између различитих алгоритама, што је довело до тога да се алгоритми подијеле на неколико врста. Основна подјела DASH АБР алгоритама је на оне са: традиционалним приступом, засноване на неуронским мрежама и приступом базираним на ивичним рачунарима. Већина радова је везана за алгоритме са традиционалним приступом, а овој групи припадају и највише пута цитирани радови који предложе АБР алгоритме [32-36].

Како је традиционални приступ најзаступљенији, може се подијелити на три додатна подприступа: алгоритми засновани на измјереној пропусности, алгоритми засновани на попуњености меморије за привремено чување података и хибрид који представља комбинацију алгоритама заснованих на измјереној пропусности и попуњености меморије за привремено чување података. Алгоритми засновани на пропусности представљени су у [32-33], одликују се високом просјечном битском брзином, али су показали недостатке у погледу броја промјена битских брзина и превенције пражњења меморије за привремено чување података.

Алгоритми засновани на измјереној пропусности користе измјерену вриједност пропусности посљедњег испорученог сегмента и на основу само ове информације постављају битску брзину сљедећег сегмента. Ови алгоритми имају добру просјечну битску брзину, али врло често доводе до пражњења меморије за привремено чување података. Добро реагују на повећање пропусности, али имају проблем са реаговањем на опадање пропусности (битска брзина сегмента који захтијевају је константно већа од тренутне пропусности, што доводи до пражњења меморије за привремено чување података).

Алгоритми засновани на меморији за привремено чување података [34-36] користе информације о заузетости меморије за привремено чување података за избор сљедећег нивоа битске брзине. Они најчешће дијеле меморију за привремено чување података на неколико зона и одређују битску брзину сљедећег захтјеваног сегмента у односу на тренутну заузетост меморије за привремено чување података који припада одређеној зони меморије за привремено чување података.

---

У случају када је заузетост меморије за привремено чување података мала алгоритми захтијевају сегменте мање битске брзине, како би повећали заузетост меморије за привремено чување података, те су њихове перформансе у погледу превенције пражњења меморије изузетно добре. Са друге стране, ови алгоритми имају велики број промјена битских брзина и ниску просјечну битску брзину јер споро реагују на повећање пропусности.

Најлошији одзив ова врста алгоритама има приликом константне пропусности, док је заузетост меморије близу границе између зона меморије. Други приступ заснован на нивоу заузетости меморије за привремено чување података је приступ ребаферовања (eng. Rebuffer) који је базиран на израчунавању вјероватноће да ће меморија постати празна [37]. Ти алгоритми се сматрају конзервативним и њихова ефикасност је веома лоша.

Најбољи међу алгоритмима традиционалног приступа су алгоритми који представљају комбинацију алгоритама заснованих на измјереној пропусности и попуњености меморије за привремено чување података [38-42]. Ови алгоритми користе измјерену вриједност пропусности и заузетост меморије као улазне вриједности. Поред тога, ови алгоритми су брзи са малим бројем рачунања и имају боље резултате у поређењу са другим традиционалним алгоритмима.

Нови приступ представљају алгоритми засновани на ивичним рачунарима [43-46] који се користе само у случају мобилних мрежа. Имплементација таквог алгоритма захтјева резервисање огромне количине физичких ресурса. Како смо тражили решење које би се могло имплементирати у све пријемне уређаје, овај приступ се сматрао неприкладним.

Алгоритми који имају велики потенцијал су алгоритми засновани на неуронским мрежама [10][46-49]. Разлог изостанка ових алгоритама из комерцијалне употребе лежи у неколико чињеница: потребно је вријеме за обуку неуронске мреже, рачунање захтјеваног сегмента мора бити веома брзо (а модул се налази на пријемном уређају), и предвиђање мора бити тачно (једно велико одступање може довести до пражњења меморије за привремено чување података), што је и закључено у [10].

---

#### 4. **Хибридни адаптивни алгоритам**

Како су постојећи АБР алгоритми показали недостатке који су приказани у другом и трећем поглављу овог рада, појавила се потреба за новим приступом и креирањем новог правца развоја АБР алгоритама. Алгоритми базирани на традиционалном приступу (измјерена пропусност и тренутна заузетост меморије) су се показали као поуздани у погледу превенције потпуног пражњења меморије, али приликом повећања пропусности не достижу пун потенцијал повећања пропусности, те имају ниску средњу вриједност битске брзине и велики број промјена битских брзина. Са друге стране, алгоритми базирани на неуронским мрежама се нису показали поузданим у погледу пражњења меморије за привремено чување података, и врло често услед смањења пропусности рачунарске мреже доводе до потпуног пражњења меморије за привремено чување података, а то је индикатор који највише утиче на лош квалитет корисничког доживљаја.

Као одговор на недостатке уочене код других приступа развоја АБР алгоритама развијен је АБР алгоритам који комбинује предности два горенаведена приступа. Сегмент са неуронским мрежама се користи у пуном потенцијалу када се повећава пропусност рачунарске мреже, односно када је попуњеност меморије таква да нема ризика од потпуног пражњења меморије.

---

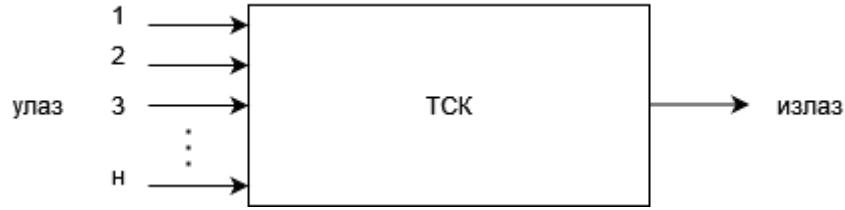
Такаги-Сугено-Канг фази модел је изабран као модел базиран на неуронским мрежама на основу неколико компаративних предности у односу на остале моделе[50-52]:

1. ТСК модел има успјешну примјену у сличним реалним проблемима,
2. брзина извршавања и мали број параметара потребних за описивање модела,
3. ТСК модел је могуће дообучавати за вријеме експлоатације модела, те се он прилагођава промјенама пропусности и различитим типовима мрежа.

Међу традиционалним АБР алгоритмима најбоље резултате има традиционални хибридни приступ који комбинује мјерену пропусност мреже и стање попуњености меморије за привремено чување података на клијентској страни. Ова врста алгоритама је најпогоднија и у овом случају јер на основу стања попуњености пријемне меморије алгоритам води рачуна о томе да ли се налази у ризику од потпуног пражњења меморије, односно да ли ће се фаворизовати вриједност добијена као излаз ТСК модела или пропусност измјерена приликом преузимања претходних сегмената.

#### **4.1 Теоријски опис Такаги-Сугено-Канг фази модела**

Такаги-Сугено-Канг (ТСК) модел [53-55] има три основне карактеристике које захтјева DASH АБР алгоритам: високу прецизност, брз процес учења са малим бројем рачунања и могућност дообучавања мреже у реалном времену. ТСК фази модел се користи за апроксимацију и моделирање различитих система, а понајвише сложених и нелинеарних система са  $N$  улаза и једним излазом. Тачније, ТСК је предложен да опише сложен систем чија структура није унапријед позната, а креира се на основу измјерених података посматраног система. Како је систем рачунарских мрежа комплексан и тешко је дефинисати његов унутрашњи механизам који доводи до варијације пропусности у току времена, ТСК модел је погодан за његово описивање.



Слика 9. Уопштен систем са  $N$  улаза и једним излазом

ТСК модел описује сваки систем као комбинацију међусобно повезаних подмодела који се могу описати једноставнијим функционалним зависностима. Ако се зависност сматра линеарном, и ако једно правило одговара једном подмоделу, комплетан систем се описује као (4.1),

$$R_i : \text{If } x_1 \text{ is } A_{i1} \text{ and } x_2 \text{ is } A_{i2} \dots \text{ and } x_n \text{ is } A_{in} \\ \text{then } y_i = a_i x + b_i, i = 1, 2, \dots, K, \quad (4.1)$$

гдје је  $R_i$   $i$ -то правило,  $K$  је број правила,  $x_1, x_2, \dots, x_n$  су улазне варијабле,  $A_{i1}, A_{i2}, \dots, A_{in}$  су фази скупови додијелени одговарајућим улазним промјенљивим. Промјенљива  $y_i$  представља вриједности излаза  $i$ -тог правила, док су  $a_i$  и  $b_i$  параметри посљедичне функције. Коначан излаз ТСК фази модела ( $\hat{y}_k$ ) за произвољни улаз  $x_k$  се рачуна помоћу израза (4.2),

$$(\hat{y}_k) = \frac{\sum_{i=1}^K [\beta_i(x_k) y_i(x_k)]}{\sum_{i=1}^K \beta_i(x_k)}, k = 1, 2, 3, \dots, N, \quad (4.2)$$

гдје је  $\beta_i$  ниво активације  $i$ -тог правила. Опис система се може приказати и преко локалних модела као у изразу (4.3),

$$(\hat{y}_k) = \sum_{i=1}^K [w_i(x_k) y_i(x_k)], k = 1, 2, \dots, N, \quad (4.3)$$

гдје  $w_i(x_k)$  представља ниво активације  $i$ -тог правила  $k$ -тог улазног узорка, а  $N$  је укупан број узорака. Једначина (4.4) имплицира једнакост израза (4.2) и (4.3) за коначан излаз ТСК модела [56].

$$w_i(x_k) = \frac{\beta_i(x_k)}{\sum_{j=1}^K \beta_j(x_k)}, \quad k = 1, 2, \dots, N, \quad (4.4)$$

## 4.2 Генерисање ТСК нейро-фази модела

Алгоритам учења ТСК фази модела се састоји од три фазе: структурне идентификације, идентификације параметара посљедичног дијела базе правила и прилагођавања параметара посљедичног дијела правила. Да би се извршило партиционисање улазно-излазног простора или улазних варијабли система у кластере (подсистеме), могу се користити различити приступи. За те потребе се најчешће користе самоорганизујуће неуронске мреже и фази методе, а у овом случају је то реорганизујућа неуронска мрежа RONN (eng. Re-Organizing Neural Network) која је једна врста само-организујуће неуронске мреже са једним слојем неурона.

Прије започињања обуке RONN потребно је дефинисати број кластера (чворова, неурона) у које ће се распоредити узорци за обуку мреже. Број кластера се одређује експериментално и то је улазна вриједност алгоритма. У зависности од изабраног броја кластера зависи и прецизност излаза ТСК модела која може значајно да варира. Број кластера зависи од примјене модела. На излазу RONN алгоритма креирају се двије матрице. Једна представља центре кластера, а друга степен припадности сваког узорка кластеру у који су распоређени. Поступак обуке RONN мреже се састоји од 6 корака:

1. иницијализација – одређују се почетне координате чворова неуронске мреже. Координате чворова добијају насумичне вриједности унутар опсега улазних података. Иницијалне вриједности тежина синапси чворова се одређује према изразу (4.5):

$$w_{ij} = \left| \min_j x + \left( \max_j x - \min_j x \right) * \rho \right|, \quad i = 1, \dots, N; j = 1, \dots, n \quad (4.5)$$

гдје је  $\rho$  равномерно распоређени случајни број који припада интервалу [0,1],



---

$N$  - број улазних узорака,  $n$  - димензија улазног вектора,  $\{x_1, x_2, x_3, \dots, x_N\}$  - скуп узорака.

2. Еуклидово растојање - коришћењем Еуклидовог растојања одређује се којем чвору неуронске мреже је најближи тренутни улазни узорак. За сваки чвор се дефинише група најближих узорака.

3. Средња квадратна грешка (СКГ) - рачуна одступање свих узорака од центара кластера којима су додијељени по следећој формули:

$$SKG = \frac{1}{n * N_i} \sum_j^{N_i} \sum_k^n (w_{kj} - X_{kj})^2, i = 1, \dots, C \quad (4.6)$$

4. Адаптирање тежина синапси - У четвртном кораку се проналази аритметичка средина координата свих узорака додијељених једном кластеру, те се на основу тога центру кластера одређују нове координате. Одређивање координата за чвор  $w_i$  се врши по следећој формули:

$$w_i = \frac{\sum_j^{N_i} x_j}{N_i}, i = 1, \dots, C \quad (4.7)$$

гдје је  $C$  - број кластера,  $N_i$  - текући број узорака у  $i$ -том кластеру.

5. Услов адаптације - Ако услов није успуњен потребно је вратити се на други корак, ако је услов испуњен, наставља се даље. Услов адаптације се рачуна по формули:

$$\sum_{i=1}^C |w_i - w'_i| \leq \varepsilon \quad (4.8)$$

гдје је  $\varepsilon = SKG/10$ ,  $w'_i$  - вектор синапси  $i$ -тог чвора у претходној итерацији.

6. Идентификација мртвих чворова – Мртвим чвором се сматра центар кластера који нема асоциран нити један узорак, и у овом кораку се таквом чвору одређују нове координате такве да се он приближи чвору који је центар кластера са високом вриједности СКГ. Дефинише се проценат кластера између којих ће се насумично одабрати онај коме ће се мртав чвор приближити. Нове координате мртвог чвора се одређују по формули:

$$w_i^{novi} = w^K + \delta, i = 1, \dots, C \quad (4.9)$$

гдје је  $w_i^{novi}$  - нова локација мртвог чвора,  $w^K$ - локација насумично одабраног чвора између К чворова са високим вриједностима СКГ,  $\delta = [\delta_1, \delta_2, \dots, \delta_n]$  - мали случајни бројеви. Овај корак се понавља све док се не одреде нове координате свих мртвих чворова (кластера без узорка), ако их има, или се постигне максималан број итерација.

Матрица припадности улазних узорака кластерима садржи вриједности  $\mu_{ik}$  које представљају припадност к-тог узорка i-том кластеру. Гдје  $\mu_{ik} \in [0,1]$ ,  $k = 1, 2, \dots, N$ ,  $i = 1, 2, \dots, C$ , а  $m$  коефицијент параметра припадности.  $\mu_{ik}$  се израчунава на основу следеће формуле:

$$\mu_{ik}^l = \frac{1}{\sum_{j=1}^C \left( \frac{d_{ik}^2}{d_{jk}^2} \right)^{\frac{1}{m-1}}} \quad (4.10)$$

за  $d_{ik} > 0$ ,  $\mu_{ik}^l = 0$  за  $d_{ik} = 0$ , при чему мора да важи:

$$\sum_{i=1}^C \mu_{ik} = 1 \quad (4.11)$$

Идентификација параметра посљедичног дијела базе правила обухвата процедуру за израчунавање параметара ТСК фази модела који дјелују у посљедичном дијелу правила. Одређивање нормализованог нивоа активације правила је проблем који се

рјешава у овој фази, односно, одређивање доприноса сваког правила коначном излазу модела.

Узимајући у обзир да ТСК фази модел са линеарном консеквенцом преузима кластере као фази скупове, поменути модел ће преузети и степене припадности података постојећим кластерима као степене припадности тих података постојећим фази скуповима. Дакле, може се посматрати следећа важећа једнакост:

$$\mu_{A_{ij}}(x_{kj}) = \mu_{ik} \quad (4.12)$$

гдје је  $\mu_{ik}$  степен припадности  $k$ -тог узорка  $i$ -том кластеру, а  $\mu_{A_{ij}}(x_{kj})$  степен припадности  $j$ -те улазне вриједности  $k$ -тог узорка  $A_{ij}$  фази скупу. Пошто су све функције  $\mu_{A_{ij}}(x_{kj})$  функције припадности, за њих важи услов:  $\mu_{A_{ij}}(x_{kj}): R \rightarrow [0,1]$ .

Вриједност степена активације  $i$ -тог правила за сваки  $k$ -ти улазни узорак се рачуна на следећи начин:

$$\beta_{ik} = \beta_i(x_k) = \prod_{j=1}^n \mu_{A_{ij}}(x_{kj}), \quad k = 1, 2, 3, \dots, N \quad (4.13)$$

Са вриједностима добијеног степена активације добијеног на основу израза (4.5), формира се  $k$ -ти елемент на главној дијагонали дијагоналне матрице  $W_i$  ( $i=1, \dots, K$ )  $N \times N$  димензије. Након тога се формира матрична композиција  $X'$  димензије  $N \times K(n+1)$ :

$$X' = [(W_1 X_e), (W_2 X_e), \dots, (W_C X_e)], \quad (4.14)$$

гдје је матрица  $X_e = [X, 1]$  са врстама  $[x_k^T, 1]$ . Параметри  $a_i$  и  $b_i$  из израза (4.1) и (4.3) се могу смјестити у вектор  $\theta'$  димензије  $K(n+1)$ . У оквиру вектора  $\theta'$  параметри су смјештени у низ на следећи начин:

$$\theta' = [\theta_1^T, \theta_2^T, \dots, \theta_k^T]^T \quad (4.15)$$

гдје су  $\theta_i^T = [a_i^T; b_i]$ , за  $i = 1, 2, \dots, C$ . Сада се проблем дат са (4.3) може представити као регресиони проблем  $Y' = X'\theta' + \varepsilon$ , гдје је  $\varepsilon$  грешка апроксимације. Вектор непознатих параметара  $\theta'$  се може наћи методом најмањих квадрата и обрасцем  $\theta' = [(X')^T X']^{-1} (X')^T Y$ . У пракси се често јављају случајеви правила са врло slabим нивоом активације.

Матрица партиција тада има нула колона или линеарно зависне колоне, што за финалну последицу има појаву сингуларних или блиско сингуларних вриједности матрице  $X'$ . У таквим случајевима је најбоље користити методу декомпозиције сингуларних вриједности (енг. Singular Value Decomposition). Адаптација параметара посљедичног дијела правила је трећа фаза ТСК алгоритма која се понавља за сваки нови узорак, за разлику од прве двије фазе које се извршавају само једном, током обуке модела. Ова фаза се састоји од три корака:

- (1) рачунање Еуклидске удаљености новог узорка од чворова (центра свих кластера),
- (2) одређивање нормализованог нивоа активације правила повезаних са кластерима за нови узорак, након чега се одређује релативно учешће локалног модела у укупном излазу модела примјеном израза (4.3).
- (3) Последњи корак је примјена WRLS (енг. Weighted Recursive Least Squares) методе за израчунавање параметара посљедичног дијела правила.

WRLS метода множи стандардну методу најмањих квадрата фактором  $\frac{1}{\gamma}$ , гдје је  $0 < \gamma \leq 1$ . Параметар  $\gamma$  се назива фактор заборављања, и одређује значај (тежину) нових узорака (добитени у процесу експлоатације алгоритма) у односу на узорке из периода обуке модела. За вриједност  $\gamma = 1$  нови узорак има исту тежину као и узорак из периода обуке модела. За мале вриједности  $\gamma$  (нпр. 0.01) нови узорак има значајно већи утицај од узорка из периода обуке модела, док за високе вриједности  $\gamma$  (нпр. 0.99) нови узорак има минимално већи утицај од узорка из периода обуке модела. Ова вриједност се одређује експериментално и зависи од примјене модела.

---

### 4.3 Аблативна студија

Појам аблација потиче из латинског језика (лат. Ablatio) што у директном преводу значи одстрањивање, а у рачунарске науке је уведен из биологије. У биологији аблација је одстрањивање биолошке структуре (ткива) или функционалности. Примјера ради, аблација нерава је уништавање (одстрањивање) нерава који преносе бол, и то је метода која се активно користи у медицини. Овај термин постоји и у другим наукама, па се у геологији односи на одстрањивање дијелова стијена.

У рачунарству се аблација користи приликом прављења модела базираних на неуронским мрежама, а односи се на мијењање броја параметара модела као и на мијењање вриједности параметара модела како би се постигла што прецизнија апроксимација излаза моделираног система. Аблативна студија у случају овог истраживања се односи на одређивање: броја улаза ТСК фази модела, броја кластера, фактора одсјецања и фактора заборављања. У току аблативне студије ћемо посматрати однос МАГ и СКГ са разликом између процијењене вриједности пропусности и измјерене вриједности пропусности у сљедећој итерацији, на основу чега ће бити одређен модел који ће бити кориштен у оквиру АБР алгоритма.

Оно што је интересантно, а биће утврђено овом аблативном студијом јесте да ли, и у којој мјери, он-лајн адаптација модела утиче на прецизност апроксимације модела пропусности рачунарских мрежа. Број улазних параметара се односи на измјерене пропусности сегмената преузетих прије тренутка у ком се захтјева сљедећи сегмент, те је важно утврдити оптималан број измјерених пропусности на основу којих се апроксимира пропусност приликом преузимања наредног сегмента. Такође, биће интересантно открити који број кластера је компатибилан са различитим бројем улазних параметара, односно који број кластера и улазних параметара даје најбоље резултате. За очекивати је да ће модел са укљученом он-лајн адаптацијом модела дати боље резултате. Потребно је утврдити у којој мјери нови узорак утиче на модел који даје најбоље резултате. За потребе аблативне студије формиран су модели који на улазу имају сљедеће параметре:

1. број улазних параметара: 3, 5, 7, 9, 11,
2. број кластера: 2, 3, 4, 5, 7,
3. фактор одсјецања: 2, 3, 5,

4. фактор заборављања: 0.85, 0.90, 0.95, 0.97, 0.99, 1.

Прије покретања експеримента издвојено је 10 репрезентативних скупова података који су дио веће базе скупова података измјерених вриједности пропусности у ћелијској и бежичној мрежи (Wi-Fi) [36], а у литератури су често кориштени у експериментима [37][38]. Првих 100 узорака из скупа од 400 узорака је кориштено за обуку модела, док је наредних 300 узорака кориштено за експлоатацију модела.

Експерименти су вршени тако што су за фиксне вриједности параметра припадности и фактора заборављања покренути експерименти над свим горенаведеним бројевима улазних параметара и кластера. У случају када је фактор заборављања постављен на вриједност 1, искључена је он-лајн адаптација модела, те се нови узорци не користе за дообучавање модела. Уколико је фактор заборављања постављен на вриједност 0,99 то значи да ће посљедњи узорак кориштен за дообучавање мреже у малој мјери утицати излаз ТСК модела, а како вриједност иде ка 0, посљедњи узорак више утиче на модел у односу на узорке из периода обуке мреже.

Резултат експеримента је сума разлика измјерене вриједности пропусности и апроксимиране вриједности пропусности за свих 10 репрезентативних скупова података. Модел чији резултат буде најближи нули најбоље описује систем који апроксимира вриједност пропусности рачунарске мреже у сљедећој итерацији.

Параметара припадности	Фактор заборављања	Број улаза	Број кластера	Укупна разлика	Разлика по узорку
2	0.85	3	2	78.02	0.026
3	0.85	3	2	76.15	0.025
<b>5</b>	<b>0.85</b>	<b>3</b>	<b>2</b>	<b>71.62</b>	<b>0.023</b>
2	0.90	3	2	55.19	0.018
3	0.90	5	2	49.79	0.016
5	0.90	7	2	49.48	0.016
<b>2</b>	<b>0.95</b>	<b>3</b>	<b>2</b>	<b>46.41</b>	<b>0.015</b>

3	0.95	3	2	47.40	0.015
5	0.95	3	3	48.81	0.016
<b>2</b>	<b>0.97</b>	<b>3</b>	<b>2</b>	<b>45.87</b>	<b>0.015</b>
3	0.97	3	2	46.35	0.015
5	0.97	5	2	46.82	0.015
<b>2</b>	<b>0.99</b>	<b>5</b>	<b>2</b>	<b>47.11</b>	<b>0.015</b>
3	0.99	3	2	47.23	0.015
5	0.99	5	2	47.83	0.016
<b>2</b>	<b>1</b>	<b>5</b>	<b>2</b>	<b>144.14</b>	<b>0.048</b>
3	1	5	2	147.94	0.049
5	1	5	2	148.14	0.049

Табела 1. Резултати аблативне студије

У наставку ће ближе бити описани поједини модели који се на неки начин истичу и чија детаљнија анализа може довести до важних закључака. Како се ради о великом броју резултата и тестних случајева, резултати ће бити груписани по параметру припадности и фактору заборављања, те приказани у тродимензионалном дијаграму у коме једна оса представља број кластера, друга број улаза, а трећа резултат (разлика предикције и измјерене вриједности пропусности рачунарске мреже).

Модели који ће бити анализирани су:

- (1) параметар припадности 2, фактор заборављања 1 – модели са овим параметрима су интересантни јер је искључена адаптација за вријеме експлоатације модела, а модели чији параметри припадности имају вриједност 3 и 5 имају лошије резултате.
- (2) Параметар припадности 2, фактор заборављања 0.99 – су модели у којима је адаптација укључена, а нови узорак у најмањој могућој мјери утиче на крајњи излаз ТСК модела. Модели који имају параметар припадности 3 и 5

---

са фактором заборављања 0.99 имају лошије резултате, па нису интересантни за детаљнију анализу.

- (3) Параметар припадности 2, фактор заборављања 0.95 – модели са овим параметрима се појављују у неколико радова [50-52] у којима није извођена аблативна студија. Иако се ради о моделима који моделују различите системе у односу на пропусност рачунарске мреже, биће интересно анализирати резултате модела са овим параметрима.
- (4) Параметар припадности 5, фактор заборављања 0.85 – су модели код којих је фактор заборављања постављен на вриједности 0.85, односно гдје нови узорак у значајној мјери утиче модел. Како су модели са параметрима припадности 2 и 3 показали лошије резултате, неће бити предмет детаљније анализе.
- (5) Параметар припадности 2, фактор заборављана 0.97 – један од модела са овим параметрима је приказао најбољи резултат у аблативној студији, те је анализа модела са овим параметрима неизбјежна.

#### **4.3.1 Параметар припадности 2, фактор заборављања 1**

Како је фактор заборављања постављен на вриједност 1, искључена је адаптација модела у реалном времену, те се резултат генерише искључиво на основу модела креираног у периоду обуке модела (првих 100 узорака скупова података). Тродимензионални дијаграм приказан на слици 10. је креиран на начин да не приказује вриједности резултата веће од 200 због боље прегледности, а циљ дијаграма јесте да се на једном дијаграму прикажу резултати свих модела са наведеним параметрима.

Из тродимензионалног дијаграма приказаног на слици 10. се види да свега четири модела имају резултат мањи од 200. Најбољи резултат (најмања разлика између апроксимиране и измјерене вриједности има модел са бројем улаза 5 и бројем кластера 2. Овај модел има резултат од 144.14 МБПС.

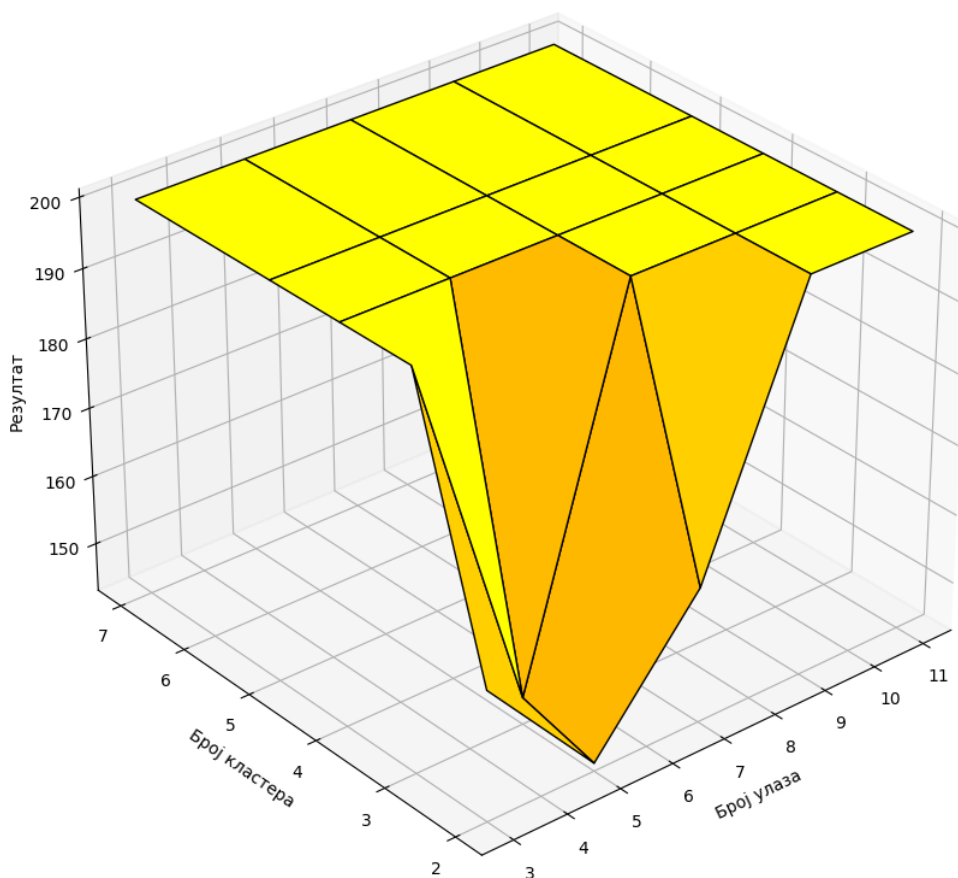
Три модела која имају најбољи резултат :

1. број улаза: 5, број кластера: 2 – 144.14 МБПС,
2. број улаза: 5, број кластера: 3 – 146.86 МБПС,



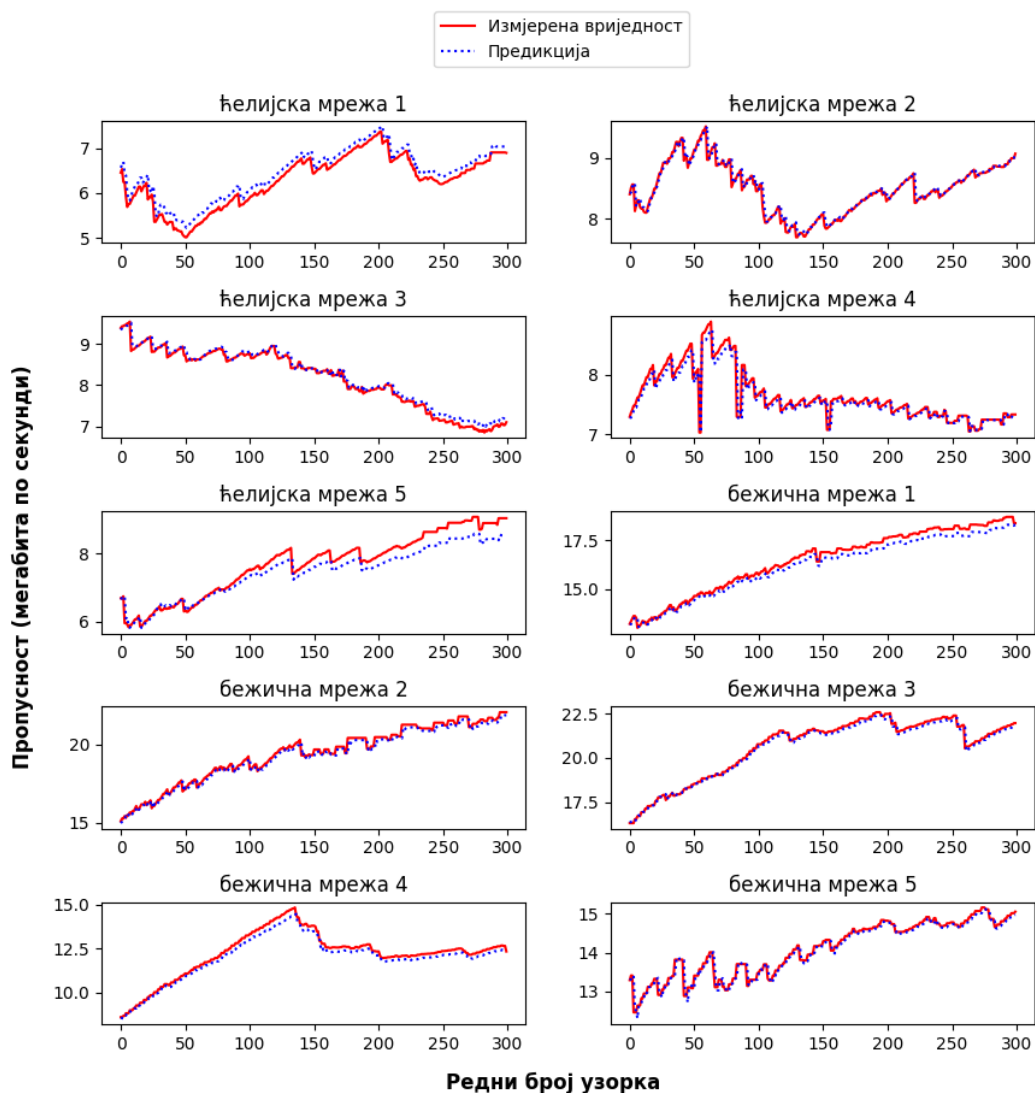
---

3. број улаза: 3, број кластера: 2 – 161.77 МБПС.



Слика 10. Дијаграм резултата аблативне студије 1

На слици 11. приказан је дводимензионални дијаграм измјерених и апроксимираних вриједности по свим скуповима података за број улаза 5 и број кластера 2 (модел са најбољим резултатом). Оно што се на може примјетити је да предикција над појединим скуповима података временом дивергира од измјерене вриједности пропусности, што значајно утиче на укупан резултат. Такав резултат је и очекиван, јер је овај модел неадаптивни модел који се не прилагођава новим условима система. Ипак, показало се да модел за неке скупове података показује добру прецизност.



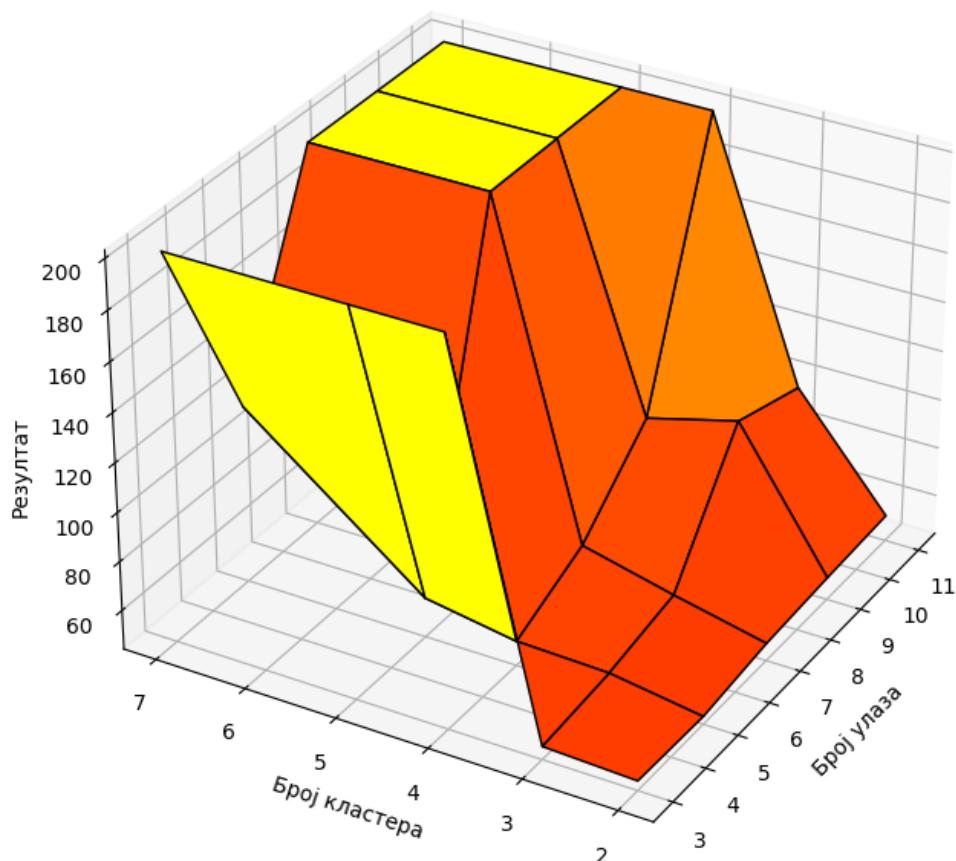
Слика 11. Дијаграм пропусности и апроксимиране пропусности 1

#### 4.3.2 Фактор одсјецања 2, фактор заборављања 0.99

Фактор заборављања је постављен на вриједност 0.99 што значи да је укључена адаптација модела у реалном времену. Узорци из фазе експлоатације модела користе се и за дообуку модела, али у малој мјери. Из тродименционалног дијаграма приказаног на слици 12. се може примјетити да свега неколико модела има резултат већи од 200, односно већина модела има боље резултате од свих модела код којих је искључена адаптација модела у реалном времену. Ипак, најбољи модел је онај са 5 улаза и 2 кластера чији резултат је 47.11 МБПС.

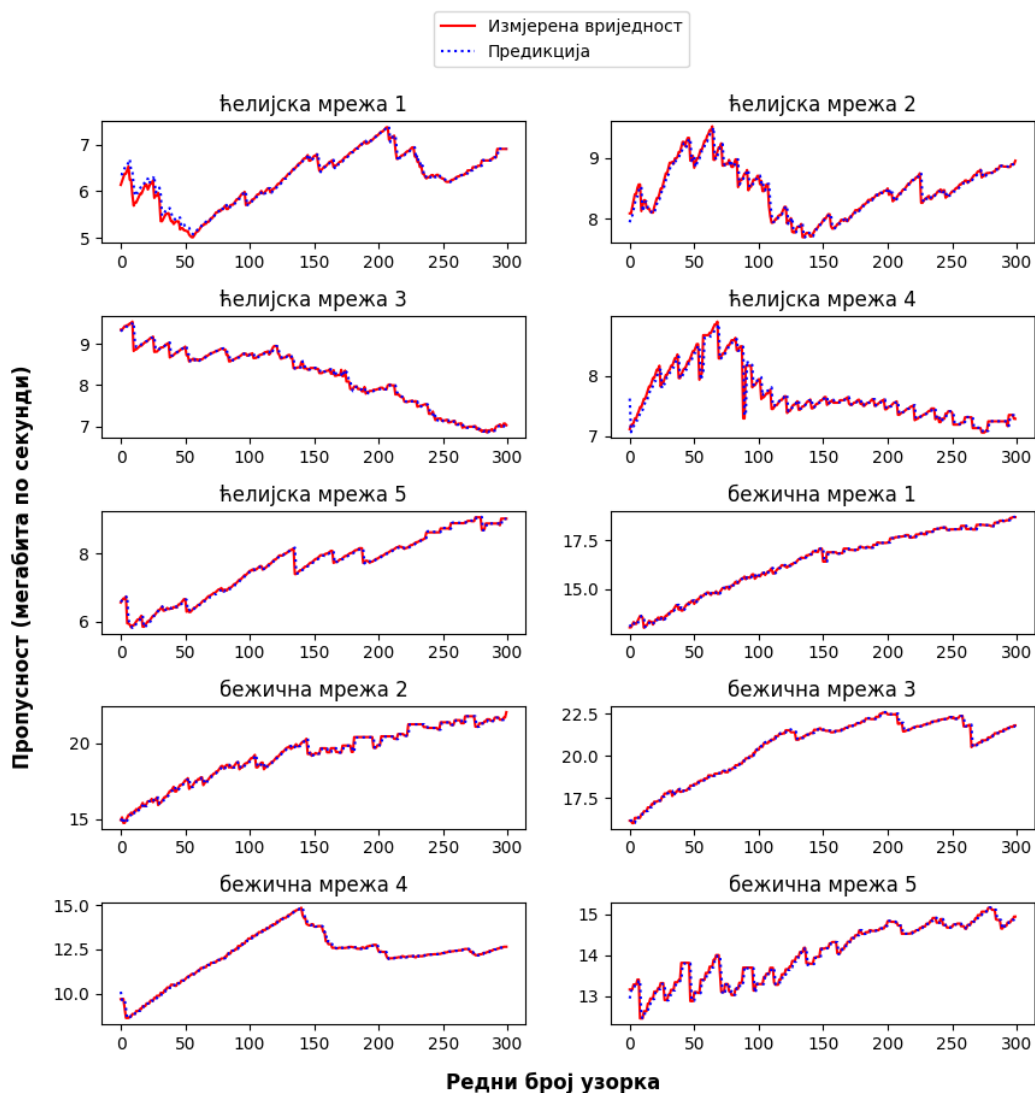
Три модела која имају најбољи резултат :

1. број улаза: 5, број кластера: 2 - 47.11 МБПС,
2. број улаза: 3, број кластера: 2 - 47.82 МБПС,
3. број улаза: 3, број кластера: 3 – 49.30 МБПС.



Слика 12. Дијаграм резултата аблативне студије 2

Двoдимензионалним дијаграмом на ком су приказани измјерена пропусност и предикција пропусности се може видјети да се модел са бројем улаза 5 и бројем кластера 2 веома брзо прилагођава промјенама и предикција пропусности временом не дивергира од измјерених вриједности, што је случај код модела код којих није укључена адаптација модела у реалном времену. Дијаграм је приказан на слици 13.



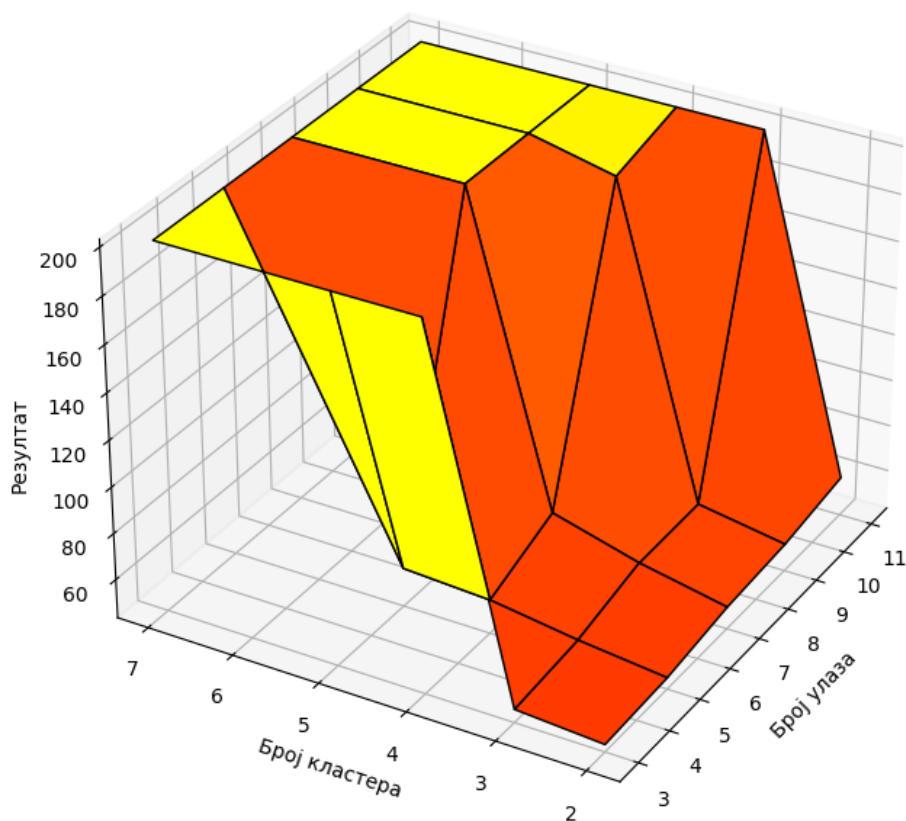
Слика 13. Дијаграм пропусности и апроксимиране пропусности 2

### 4.3.3 Фактор одсјецања 2, фактор заборављања 0.95

Фактор заборављања је постављен на вриједност 0.95, узорци из фазе експлоатације модела користе се и за дообуку модела у већој мјери у односу на моделе код којих је та вриједност 0.99. Из тродименционалног дијаграма приказаног на слици 14. се може примјетити да су резултати слични као код модела код ког је фактор заборављања 0.99 и сви модели укључени у авлативну стидију код којих је број кластера постављен на вриједност 2 имају резултат мањи од 200 МБПС.

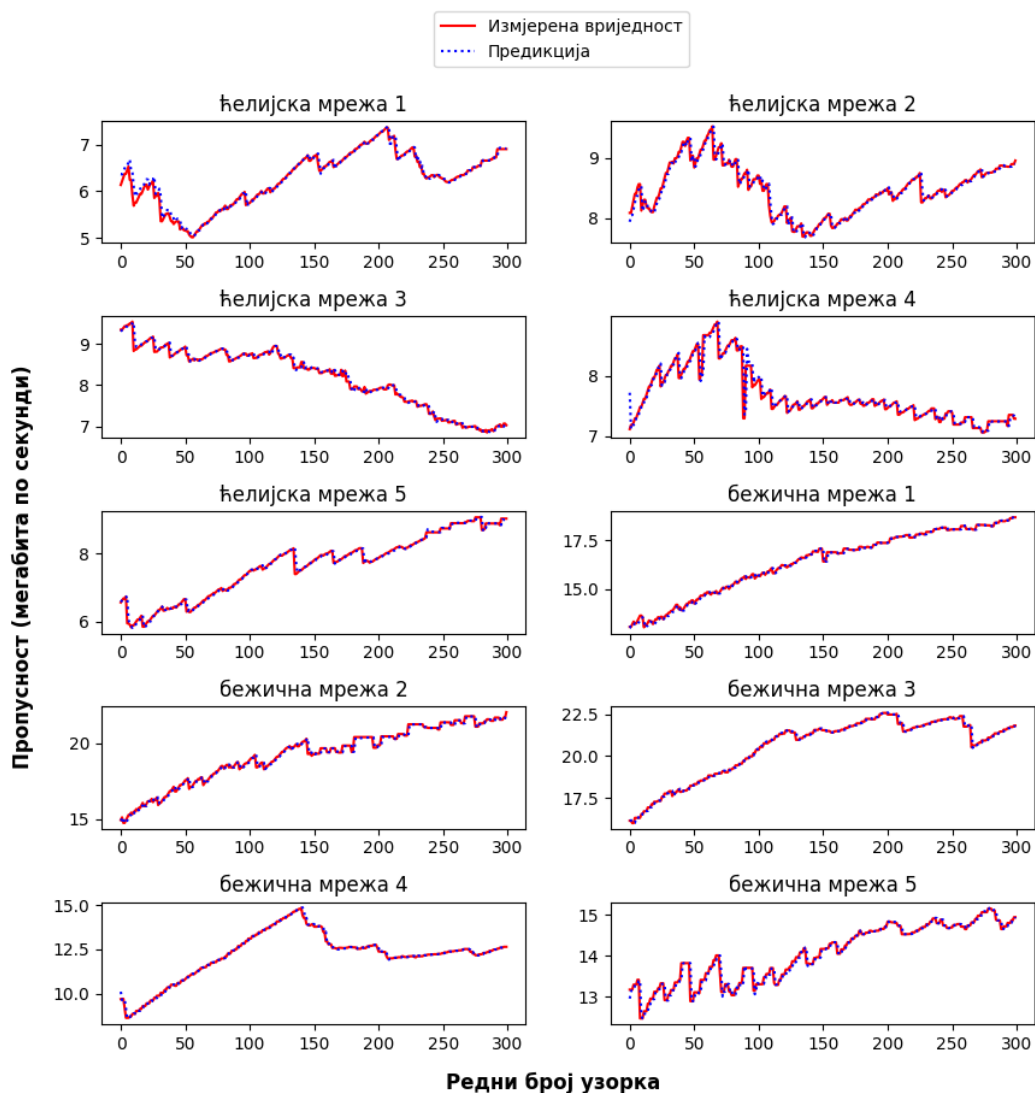
Три модела која имају најбољи резултат :

1. број улаза: 3, број кластера: 2 - 46.41 МБПС,
2. број улаза: 5, број кластера: 2 - 48.13 МБПС,
3. број улаза: 3, број кластера: 3 - 48.95 МБПС.



Слика 14. Дијаграм резултата аблативне студије 3

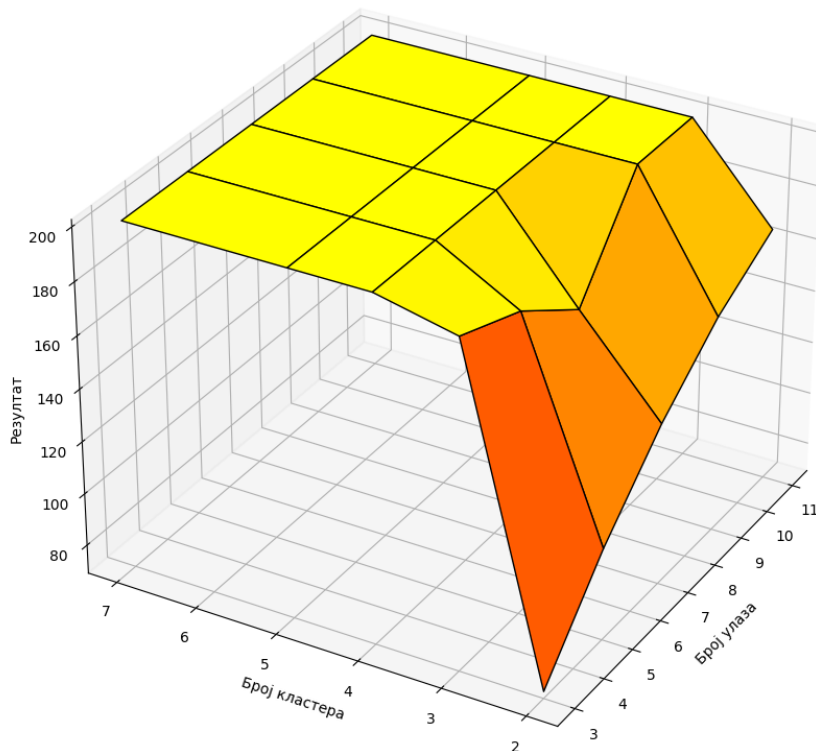
Из дводимензионалног дијаграма приказаног на слици 15. се може видјети да модел са бројем улаза 3 и бројем кластера 2 има највећа одступања над скупом података ћелијска мрежа 4 и ћелијска мрежа 1, док над осталим скуповима података нема већих одступања. Како је ово модел код којег је укључена адаптација модела у реалном времену, предикција временом не дивергира као код модела код којих је адаптација модела у реалном времену искључена.



Слика 15. Дијаграм пропусности и апроксимиране пропусности 3

#### 4.3.4 Параметар припадности 5, фактор заборављања 0.85

Фактор заборављања је постављен на вриједност 0.85, док је параметар припадности постављен на вриједност 5. Узорци из фазе експлоатације модела користе се и за дообуку модела у већој мјери у односу на моделе код којих је та вриједност 0.99 и 0.95. Из тродимензионалног дијаграма са слике 16. се може видјети да свега неколико модела има резултат мањи од 200 МБПС, а најбољи модел има резултат од 71.62 МБПС.

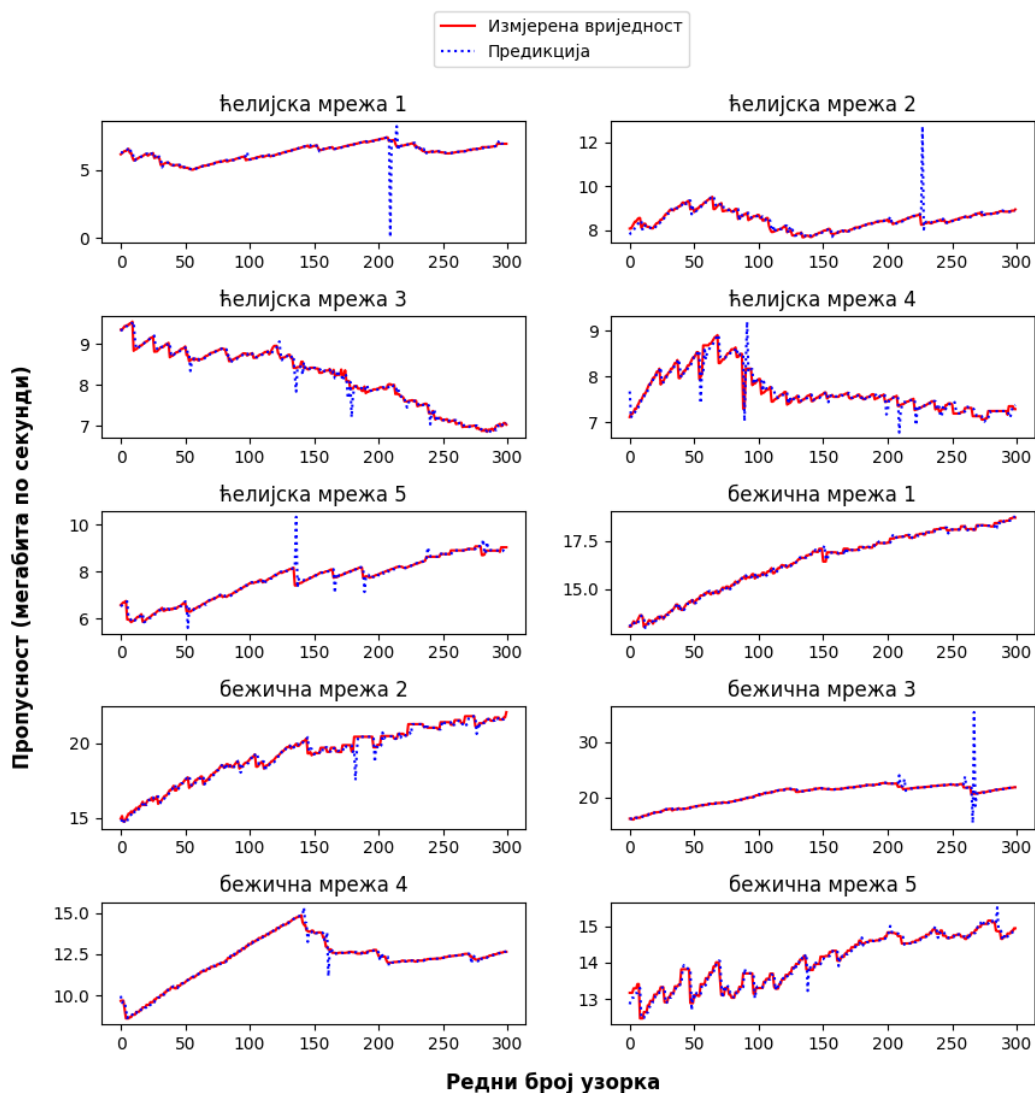


Слика 16. Резултати аблативне студије 4

Три модела која имају најбољи резултат :

1. број улаза: 3, број кластера: 2 - 71.62 МБПС,
2. број улаза: 5, број кластера: 2 - 104.09 МБПС,
3. број улаза: 7, број кластера: 2 – 130.66 МБПС.

Дводимензионалним дијаграмом на ком су приказане измјерена пропусност и апроксимирана пропусност модела са параметром припадности 5, фактором заборвања 0.85, бројем улаза 3 и бројем кластера 2 се може видјети да је модел веома нестабилан и у појединим тренуцима се дешавају велика одступања. Усљед великог утицаја нових узорака на модел, модел постаје изузетно непрецизан у појединим тренуцима што га чини неприкладним за потребе предикције пропусности рачунарских мрежа. Дијаграм је приказан на слици 17.

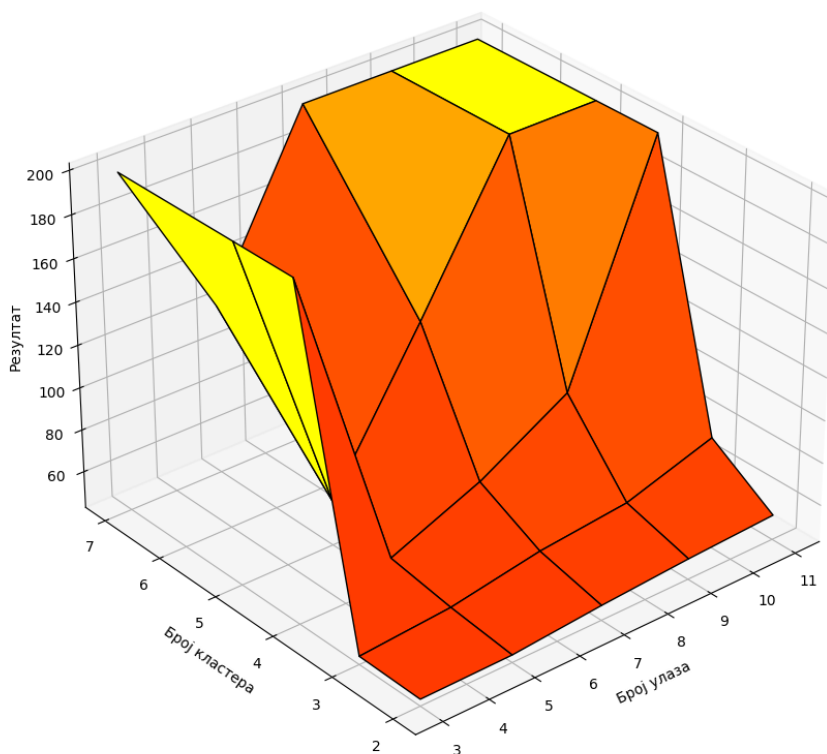


Слика 17. Дијаграм пропусности и апроксимирани пропусности 4

#### 4.3.5 Параметар припадности 2, фактор заборављања 0.97

Фактор заборављања је постављен на вриједност 0.97, узорци из фазе експлоатације модела користе се и за дообуку модела у већој мјери у односу на моделе код којих је та вриједност 0.99 а у мањој мјери у односу на моделе чији фактор заборављања је 0.95 и 0.85. Из тродименционалног дијаграма приказаног на слици 18. се може примјетити да су резултати слични као код модела код ког је фактор заборављања 0.99 и 0.95, и свега неколико модела са великим бројем улаза и/или великим бројем кластера даје резултате веће од 200 МБПС, а резултати су добри за све моделе са бројем кластера 2.



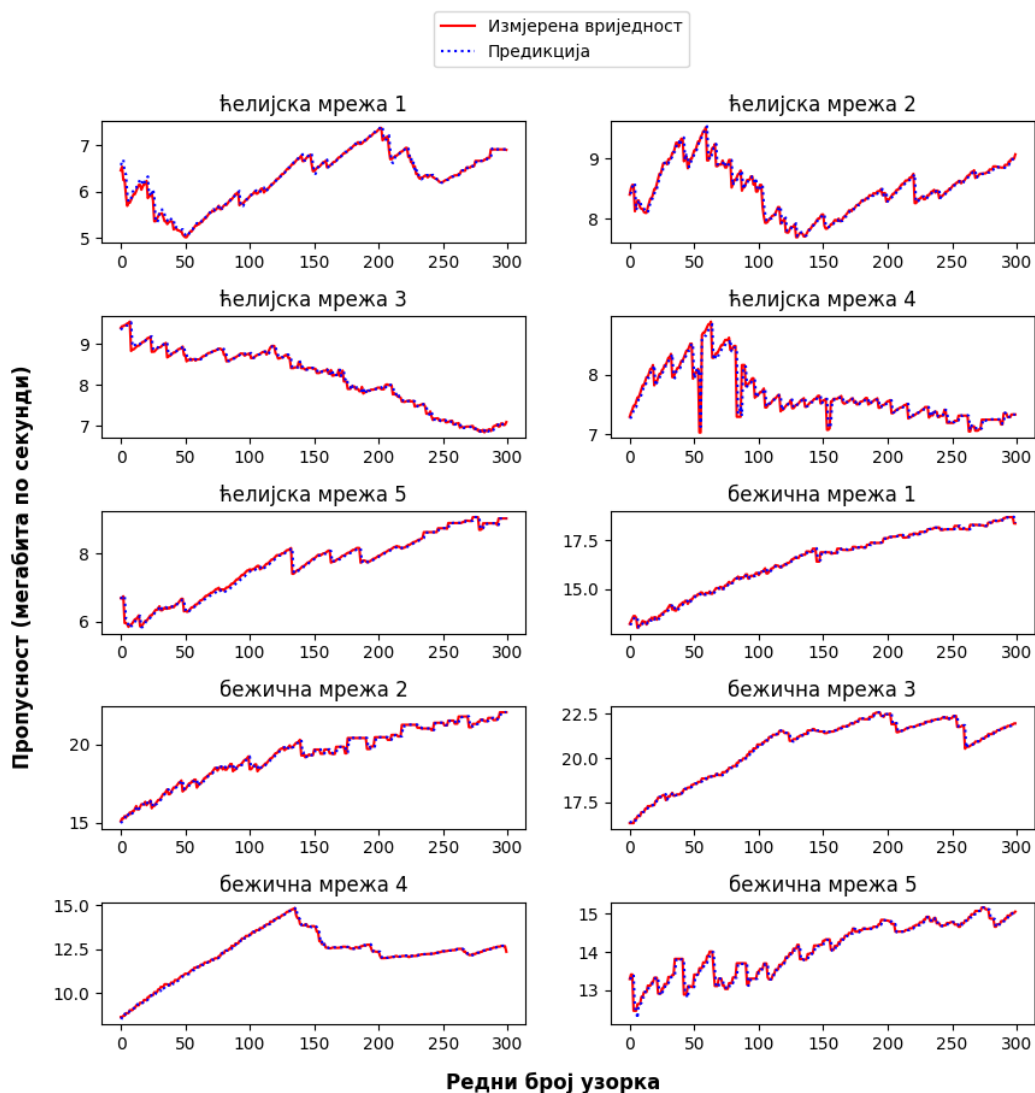


Слика 18. Дијаграм резултата аблативне студије 5

Три модела која имају најбољи резултат :

1. број улаза: 3, број кластера: 2 - 45.87 МБПС,
2. број улаза: 5, број кластера: 2 – 46.47 МБПС,
3. број улаза: 3, број кластера: 3 – 47.66 МБПС.

Из дијаграма на слици 19. се може видјети да модел са бројем улаза 3 и бројем кластера 2 има веома високу прецизност предикције, да је веома стабилан и да се успјешно прилагођава промјенама пропусности над свим скуповима података. Из овог дијаграма се може примјетити да нема ни периодичних одступања предикције од измјерене вриједности пропусности, већ су вриједности предикције констатно веома блиски измјереним вриједностима пропусности.



Слика 19. Дијаграм пропусности и апроксимираних пропусности 5

Интересантно је упоредити вриједности МАГ и СКГ између различитих модела и утврдити корелацију вриједности МАГ и СКГ са вриједностима предикције. Резултати показују да вриједности МАГ и СКГ нису у директној корелацији са минималном разликом предикције и измјерене вриједности. Модел са најбољим вриједностима МАГ и СКГ има лошију предикцију од модела са лошијим вриједностима МАГ и СКГ.

---

Из резултата аблативне студије се може закључити да модели са укљученом адаптацијом модела у реалном времену код којих нови сегмент у малој мјери утиче на модел (фактор заборављања 0.99, 0.97, 0.95) дају добре вриједности предикције пропусности рачунарске мреже, и између њих су разлике минималне. Модел са погрешно постављеним параметрима даје изузетно непрецизне предикције, што показује важност извођења аблативне студије приликом постављања модела. Најбољи резултат аблативне студије има модел чији параметар припадности има вриједност 2, фактор заборављања вриједност 0.97, број улаза 3, а број кластера 2.

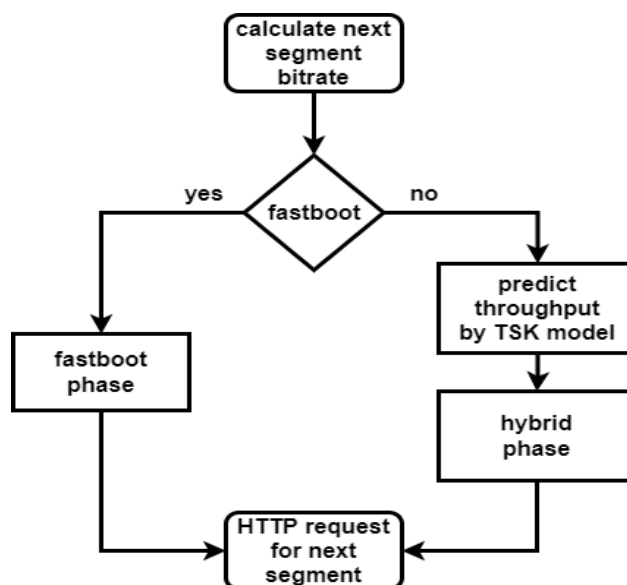
#### 4.4 Основна архитектура хибридног адаптивног алгоритма

Како се АБР алгоритми класификују по улазним вриједностима на којима су базирани, важно је истаћи да је поред предикције пропусности у наредној итерацији која је излаз ТСК модела, хибридни адаптивни алгоритам предложен у овом раду базиран на још два улазна параметра. Пропусност израчуната приликом преузимања сегмента у посљедњој итерацији се односи пропусност непосредно прије преузимања сљедећег сегмента, док ниво попуњености меморије за привремено чување података служи понајвише да би се извршила превенција пражњења меморије за привремено чување података, односно да би се избјегао најлошији индикатор квалитета искуства корисника, а то је заустављање репродукције мултимедијалног садржаја.

Хибридни адаптивни алгоритам комбинује двије врсте улазних параметара, и базиран је на следећа три параметра:

1. предвиђена пропусност (излаз ТСК модела),
2. ниво попуњености меморије за привремено чување података и
3. пропусност израчуната при преузимању посљедњег сегмента.

Већина алгоритама приликом покретања има посебну фазу која је уведена ради скраћења времена потребног за почетно приказивања слике и звука кориснику. Тако и предложени алгоритам има двије фазе: фазу брзог покретања и хибридну фазу. Основна архитектура хибридног адаптивног алгоритма је приказана на слици 20.



Слика 20. Основна архитектура хибридног адаптивног алгоритма

#### 4.5 Фаза брзог покретања

Фаза брзог покретања се извршава искључиво приликом иницијалног покретања репродукције, јер је истраживањима у области ККД показано да смањење времена потребног за почетно приказивање слике и звука значајно утиче на позитиван квалитет искуства корисника. Ова фаза је у принципу конзервативна у погледу битске брзине мултимедијалног садржаја приказаног кориснику, већ је фокусиран на брзо пуњење меморије за привремено чување података. Фаза брзог покретања предложеног АБР алгоритма је представљена у Алгоритму 1.

Фаза брзог покретања је базирана на подацима о нивоу заузетости меморије за привремено чување података и измјереној пропусности посљедњег добављеног сегмента, тако да ова фаза предложеног алгоритма припада породици класичних традиционалних хибридних алгоритама. Важан сегмент наредне фазе јесте обука неуронске мреже, а она је извршена у паралели са извршавањем фазе брзог покретања. Такође, вриједности измјерене пропусности измјерени у периоду фазе брзог покретања се користе за обуку неуронске мреже.

---

**Алгоритам 1** : Псеудо код фазе брзог покретања

---

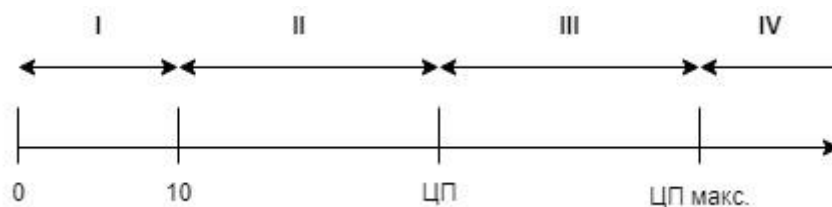
*fast\_boot* брзо покретање  
*buffer\_occupancy* попуњеност меморије  
*target\_time* циљно вријеме  
*bitrate\_rates* нивои битских брзина  
*lt\_index* измјерена пропусност

```
if fastboot = true  
  if buffer_occupancy  $\geq$  target_time/2  
    fast_boot  $\leftarrow$  false  
  end if  
  if lt_index  $\leq$  1  
    next_rate  $\leftarrow$  bitrate_rates[0]  
  else  
    next_rate  $\leftarrow$  bitrate_rates[lt_index-2]  
  end if  
return next_rate  
end if
```

---

#### 4.6 Хибридна фаза

Сви традиционални хибридни алгоритми и алгоритми базирани на попуњености меморије за привремено чување података захтијевају да се одреди циљна вриједности попуњености меморије за привремено чување података, што представља идеалну попуњеност меморије. Предложени алгоритам је могуће интегрисати на различите уређаје чији меморијски капацитети и перформансе нису једнаки, те се вриједност циљне попуњености меморије за привремено чување података одређује као улазни параметар приликом покретања алгоритма. Такође, скоро сви алгоритми из литературе немају фиксну вриједност циљне попуњености меморије, већ се та вриједност одређује приликом покретања алгоритма.



Слика 21. Попуњеност меморије за привремено чување података (секунде)

---

Алгоритми засновани на меморији за привремено чување података дијеле меморију на неколико зона, а ниво битске брзине слједећег захтјеваног сегмента је одређен тренутном попуњеношћу меморије. У предложеном алгоритму меморија је подијељена у четири зоне: I) критична (од 0 до 10 секунди), II) испод циљне (од 10 до ЦП (циљна попуњеност)), III) изнад циљне (од ЦП до ЦП макс. (максимална циљна попуњеност)), IV) висока (од ЦП макс. до попуњености меморије), што се може видјети на слици 21.

Када је попуњеност меморије за привремено чување података у зони I или IV, промјена битске брзине се врши на основу израчунате пропусности у претходној итерацији (ИПП). Са друге стране, када је попуњеност меморије у зони II или III промјена битске брзине се врши на основу предикције пропусности у наредној итерацији (ПП), која је излаз ТСК модела. ИПП се израчунава као (4.15), гдје је битска брзина посљеднег преузетог сегмента подијељена са временом потребних за преузимање истог MPEG-DASH сегмента.

$$ИПП = \text{битска брзина сегмента} / \text{вријеме преузимања сегмента} \quad (4.15)$$

ПП је излаз ТСК фази модела за улазне узорке који се састоје од пропусности израчунатих на последња три преузета DASH сегмената. Кораци ТСК фази модела су објашњени у поглављу 3. Број кластера и фактор заборављања (ТСК фази модел параметри) се додјељују моделу прије експлоатације и одређују се експериментално. У аблативној студији (поглавље 4.3) је приказано да је најбољи модел за предикцију пропусности рачунарске мреже онај чији параметар припадности има вриједност 2, фактор заборављања вриједност 0.97, број улаза 3, а број кластера 2. Те вриједности смо узели као параметре модела.

Додјељивање параметара је праћено периодом учења који се преклапа са фазом брзог покретања када се излаз ТСК фази модела не користи. Такође, ТСК је адаптивни модел који се дообучава у реалном времену.

---

**Алгоритам 2 : Псеудо код хибридне фазе**

---

<i>buffer_occupancy</i>	тренутна попуњеност меморије
<i>target_time</i>	циљна попуњеност меморије
<i>bitrate_rates</i>	доступни нивои битске брзине
<i>target_min</i>	минимална циљна попуњеност (10 секунди)
<i>target_max</i>	$= 2 * target\_time - target\_min$
<i>last_thr</i>	последња измјерена пропусност
<i>predicted_thr</i>	предикција пропусности
<i>cbi</i>	тренутна битска брзина сегмента (индекс)
<i>next_bitrate</i>	битска брзина у наредној итерацији
<i>last_thr_index</i>	одговарајући <i>bitrate_rates</i> последње пропусности
<i>predicted_thr_index</i>	одговарајући <i>bitrate_rates</i> индекс предикције

```
if buffer_occupancy > target_min and buffer_occupancy < target_time
  if predicted_thr < bitrate_rates[cbi] - (bitrate_rates[cbi] -
    bitrate_rates[cbi-2]) * (buffer_occupancy - target_min) / (target_time
    - target_min)
    next_bitrate = bitrate_rates[predicted_thr_index]
  end if
else if buffer_occupancy < target_max and buffer_occupancy > target_time
  if predicted_thr > bitrate_rates[cbi] + (bitrate_rates[cbi+3] -
    bitrate_rates[cbi]) * (buffer_occupancy - target_time) /
    (target_max - target_time)
    next_bitrate = bitrate_rates[predicted_thr_index]
else if buffer_occupancy > target_max
  if last_thr > bitrate_rates[cbi]
    next_bitrate = bitrate_rates[last_thr_index+1]
  end if
else if buffer_occupancy < target_min
  if last_thr < bitrate_rates[cbi] and predicted_thr < bitrate_rates[cbi]
    next_bitrate = bitrate_rates[cbi-2]
  else if last_thr < bitrate_rates[cbi] and predicted_thr > bitrate_rates[cbi]
    next_bitrate = bitrate_rates[cbi-1]
  else
    next_bitrate = bitrate_rates[cbi]
  end if
end if
return next_bitrate
```

---

---

## 5. Експериментална евалуација

Постоји велики број предложених АБР алгоритама, како у индустрији, тако и у литератури, из чега се може закључити да је ово актуелна област за истраживаче у области преноса мултимедијалних података. Циљ овог истраживања је потврда хипотезе да је предложеним хибридном адаптивним алгоритмом могуће постићи бољи квалитет искуства корисника у односу на друге, до сада предложене, АБР алгоритме. Циљ експерименталне евалуације јесте да се АБР алгоритми упореде у једнаким условима, на истим улазним вриједностима, на начин да се упореде измјерене вриједности кључних параметара квалитета искуства корисника различитих алгоритама. Параметри квалитета искуства корисника мјерени у овој експерименталној евалуацији су:

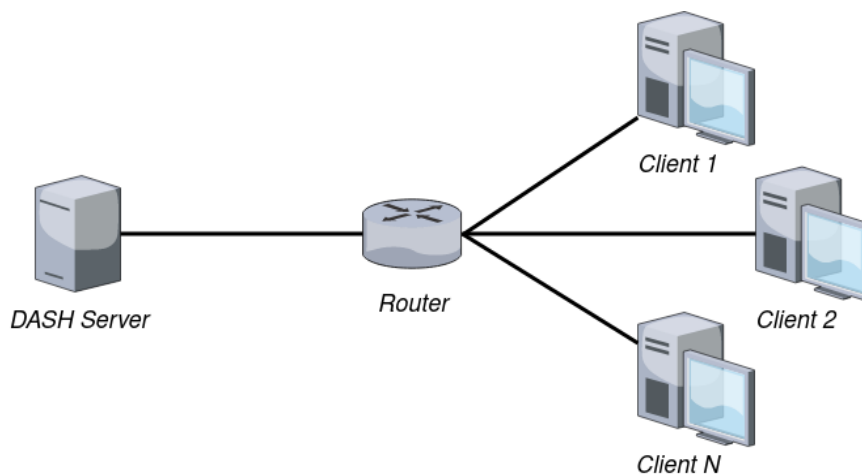
1. просјечна битска брзина преузетог мултимедијалног садржаја,
2. број промјена битских брзина,
3. просјечна вриједност промјена битских брзина,
4. трајање празне меморије (укупно трајање заустављене репродукције).

Како би се упоредио предложени алгоритам са другим алгоритмима на истим улазним вриједностима потребно је креирати окружење за експерименталну евалуацију које то омогућује. У ту сврху модификован је изворни код доступан на [57] и предложен у [42], који је имплементиран коришћењем софтвера за симулацију NS-3 (<http://www.nsnam.org>). NS-3 је софтвер отвореног кода, мрежни симулатор, који се често користи у истраживањима.



Окружење за симулацију је пројектовано тако да има један чвор који дјелује као DASH послужилац и један или више чворова који дјелују као DASH клијенти. Архитектура мреже је дата на слици 22. Приликом покретања симулације бира се АБР алгоритам DASH клијента који ће се користити у тој симулацији заједно са осталим параметрима неопходним за покретање симулације. Оно што представља велики изазов јесте одабир сетова података који одређују пропусност рачунарске мреже у јединици времена.

За потребе овог истраживања имплементиран је предложени хибридни АБР алгоритам који је могуће изабрати као АБР алгоритам DASH клијента. Предложени алгоритам је директно упоређен са сљедећим АБР алгоритмима: FDASH [42], AAASH [58], RAANS [33], SFTM [59] и SVAA[60]. У раду [36] извршена симулација над репрезентативним скуповима података пропусности рачунарске мреже и алгоритам VOLA предложен у том раду је упоређен са 4 алгоритма од којих је Pensieve [61] базиран на неуронским мрежама, и уједно је најцитиранији рад који предлаже алгоритам базиран на неуронским мрежама. Уколико се изврши симулација предложеног алгоритма над истим скуповима података као у раду [36] предложени алгоритам ће бити упоредив и са радовима [62-64].



Слика 22. Архитектура мреже

На DASH послужиоцу је похрањен цртани филм Big Buck Bunny који је доступан на [65] и који је енкодован на 20 нивоа битских брзина. Када говоримо о нивоима битских брзина, заправо је ријеч о просјечним битским брзинама сегмената, јер сваки сегмент има варијабилну битску брзину у зависности од сцена које се дешавају за вријеме трајања датог сегмента. За статичне сцене вриједност битске брзине сегмента ће бити мања, док ће за динамичне сцене вриједност битске брзине бити већа. Вриједности (просјечних) битских брзина енкодованог видеа кориштеног у симулацији су приказане у Табела 2. За потребе експерименталне евалуације користили смо видео који је подијељен на сегменте трајања двије секунде.

битска брзина (КБПС)	резолуција
45 000	320x240
89 000	320x240
131 000	320x240
178 000	480x360
221 000	480x360
263 000	480x360
334 000	480x360
396 000	480x360
522 000	854x480
595 000	854x480
791 000	1280x720
1033 000	1280x720
1245 000	1280x720
1547 000	1280x720
2134 000	1920x1080
2484 000	1920x1080
3079 000	1920x1080
3527 000	1920x1080
3840 000	1920x1080
4220 000	1920x1080

Табела 2. Битске брзине и резолуције сегмената кориштених у симулацијама

---

DASH Industry Forum у својим смјерницама предлаже 12 референтних мрежних профила (сценарија) [66] за тестирање и поређење АБР алгоритама, те је самим тим пожељно да се изврши симулација рада свих предложених АБР алгоритама над овим улазним вриједностима како би се остали истраживачи могли реферисати на резултате извршене експерименталне евалуације.

Први дио симулација је извршен коришћењем 12 референтних мрежних профила предложених од стране DASH IF. Ипак, поред предложених мрежних профила пожељно је извршити симулацију рада алгорита у реалним мрежним условима. Други дио симулација са једним клијентом је извршен коришћењем реалних измјерених вриједности пропусности ћелијске мреже у различитим условима. Симулација је извршена за предложени алгоритама, али и за следеће алгоритме: FDASH, AAASH, RAAHS, SFTM и SVAA. За ове алгоритме нису постојали резултати над предложеним референтним мрежним профилима и реалним измјереним пропусностима кориштеним у овом истраживању, док је изворни код ових алгоритама отворен и погодан за извршавање у симулатору NS-3.

У раду [36] аутора К. Спитери је извршена симулација над мрежним профилима предложеним од стране DASH Industry Forum и скупом података реалне ћелијске мрежне пропусности у различитим условима, али је извршена симулација и за следеће алгоритме: MPC[63], PANDA[64], ELASTIC[65] и PENSIEVE[61]. Дакле, могуће је упоредити предложени алгоритама и са свим алгоритмима за које су резултати приказани у [36]. Већина резултата у наведеном раду је приказана искључиво графички, па су вриједности кориштене у овом раду очитане са графичких приказа.

---

## 5.1 Мрежни профили предложени од DASH Industry Forum

12 мрежних емулационих профила је предложено од стране DASH Industry Forum како би се над референтним вриједностима пропусности измјериле перформансе клијената у различитим мрежним условима. Пропусност у профилима 1-6 има вриједност од 1,5, 2, 3, 4 и 5 МБПС, док у профилима 7-12 има вриједност: 1, 2, 4 и 9 МБПС која се мијења у току времена, а промјена пропусности се врши на сваких 30 секунди. Различити сценарији су покривени у сваком од профила (у неким је вриједност пропусности висока – ниска - висока, док је у другим ниска – висока - ниска, итд.). У току времена се мијења и вриједност кашњења пакета и проценат изгубљених пакета. Дужина трајања симулације по једном профилима је 600 секунди.

Како би извршили симулацију над предложеним мрежним профилима потребно је обучити неуронску мрежу кориштену у предложеном алгоритму. Јединствен скуп података за обуку мреже је креиран и не припада скуповима података мрежних профила 1-12. Обучавање неуронске мреже се извршава у паралели са фазом брзог покретања у којој вриједности предикције пропусности нису кориштени.

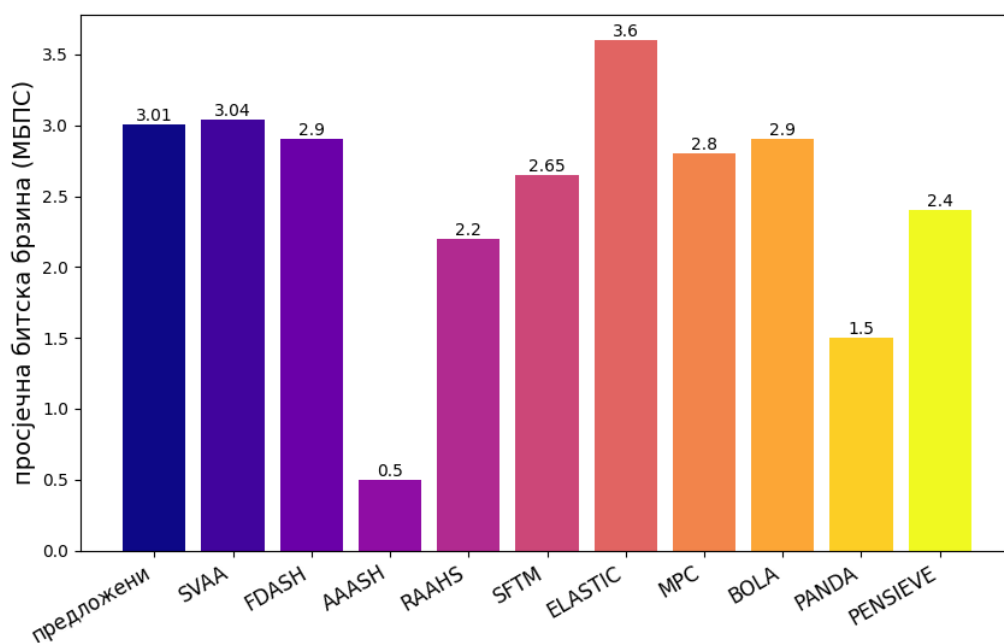
### 5.1.1 Резултати

Сумирани резултати по свим кључним параметрима ККД су приказани у Табела 3. У табели су црвеном бојом обојане ћелије резултата који су значајно лошији од осталих по датом параметру, док су зеленом бојом обојане ћелије најбољих резултата по датом параметру. Алгоритам који по било ком параметру има значајно лошији резултат од осталих неће бити узет у обзир приликом одређивања најбољих резултата по другим параметрима јер је одлика добрих алгоритама да имају уједначено добре резултате по свим параметрима. Са друге стране неки алгоритми на штету резултата по једном параметру остварају добре резултате по другим параметрима, што негативно утиче на квалитет корисничког доживљаја. Како је заустављање репродукције мултимедијалног садржаја најлошији параметар ККД, а већина алгоритама је успјела завршити експерименталну евалуацију без заустављања репродукције, било какво заустављање се може сматрати изразито лошим резултатом.

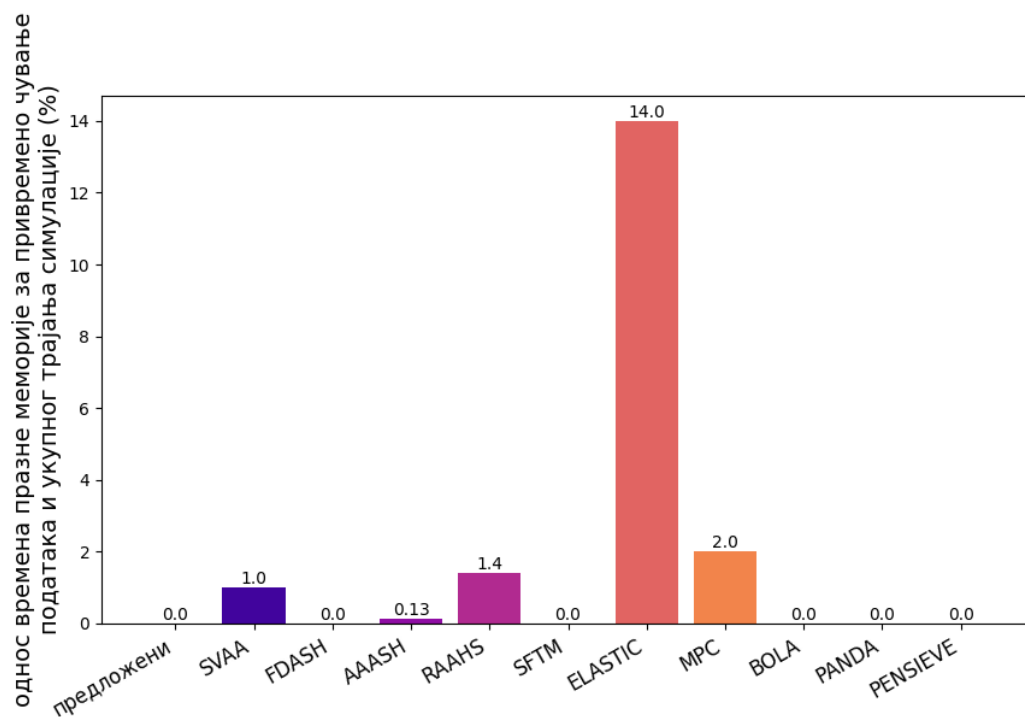
	Просјечна битска брзина	Однос празне меморије и укупног трајања симулације	Вриједност промјена битске брзине	Број промјена битске брзине
<b>предложени</b>	3.01	0	0.04	3.13
<b>SVAA</b>	3.04	1	0.02	2.86
<b>FDASH</b>	2.9	0	0.05	5.27
<b>AAASH</b>	0.5	0.13	0.06	19.77
<b>RAAHS</b>	2.2	1.4	0.06	9.45
<b>SFTM</b>	2.65	0	0.05	7.31
<b>ELASTIC</b>	3.6	14	0.7	-
<b>MPC</b>	2.8	2	0.16	-
<b>BOLA</b>	2.9	0	0.55	-
<b>PANDA</b>	1.5	0	0.06	-
<b>PENSIEVE</b>	2.4	0	0.14	-

Табела 3. Резултати симулације за мрежне профиле 1-12

Из Табела 3. се може закључити да свега 4 алгоритма нису имали изразито лоше резултате по било ком параметру: предложени алгоритам, FDASH, SFTM и PENSIEVE. FDASH је постигао 3,8% мању вриједност просјечне битске брзине у односу на предложени алгоритам, SFTM 13.5%, док је PENSIEVE (једини базиран на неуронским мрежама) постигао 25,4% мању просјечну вриједност битске брзине. Просјечна достигнута битска брзина је приказана на дијаграму Слика 23.

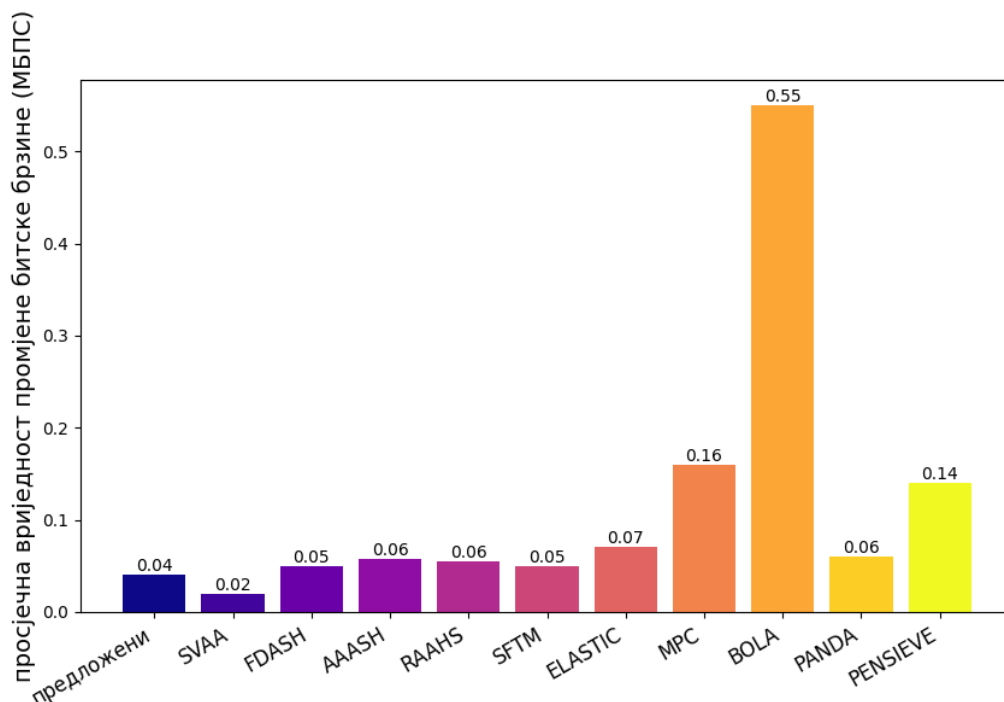


Слика 23. Просјечна битска брзина алгоритама за мрежне профиле 1-12



Слика 24. Однос времена празне меморије за привремено чување података и укупног трајања симулације за профиле 1-12

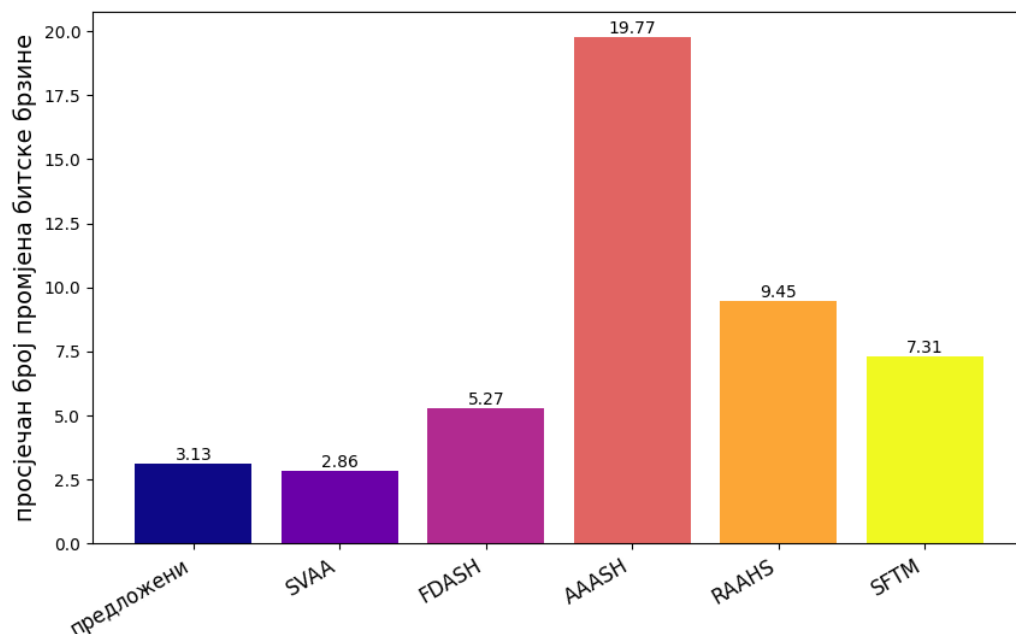
Из дијаграма Слика 23. се јасно може видјети да су SVAA и ELASTIC достигли већу просјечну битску брзину, али су такође довели до пражњења меморије за привремено чување података што је видљиво на дијаграму Слика 24. Како је заустављање репродукције најлошији параметар ККД, можемо занемарити резултате алгоритама који су довели до заустављања репродукције при поређењу достигнуте просјечне битске брзине.



Слика 25. Просјечна вриједност промјене битске брзине за профиле 1-12

У погледу просјечне вриједности промјене битске брзине, што је видљиво на Слика 25., SVAA алгоритам је постигао бољи резултат од предложеног алгоритма за 0.02 МБПС, али је то довело до заустављања репродукције, па ову вриједност можемо занемарити. Иако су сви остали алгоритми постигли већу вриједност промјене битске брзине од предложеног алгоритма можемо рећи да су сви алгоритми постигли добре резултате по овом параметру сем BOLA алгоритма чија просјечна вриједност промјене битске брзине указује на сукцесивне смјене сегмената високог и ниског квалитета што утиче на негативан ККД.

Број промјена битске брзине није обрађен за алгоритме евалуиране у раду [36], па те вриједности неће бити обухваћене ни у овом раду. Како је број промјена битске брзине значајан параметар ККД мјерили смо алгоритме и по овом параметру, а резултати су приказани на дијаграму Слика 26. Једино је алгоритам SVAA достигао мањи број промјена битске брзине, али то је водило до пражњења меморије за привремено чување података. Када упоредимо алгоритме који нису имали значајно лоше резултате по другим параметрима предложени алгоритам има боље резултате по овом параметру: FDASH има 40.8% већи број промјена битске брзине, док SFTM има чак 67.15% већи број промјена битске брзине.



Слика 26. Број промјена битских брзина на стотину секунди за профиле 1-12



---

## 5.2 Измјерене вриједности пропусности ћелијске 3G мреже

Скуп података са реалним измјереним вриједностима пропусности 3G ћелијске мреже [67] садржи измјерене вриједности пропусности при кретању мобилног пријемног уређаја на 11 различитих путања у Ослу, Норвешка. При кретању су кориштени различити облици превоза (аутомобил, брод, трамвај, воз). Како се ради о ниским вриједностима пропусности и мобилном пријемном уређају који се креће по различитим рутама и у различитим околностима, овај скуп података је идеалан за поређење алгоритама при нестабилној пропусности рачунарске мреже.

Једна рута са веома ниском вриједности пропусности није кориштена у симулацијама јер је просјечна вриједност пропусности мања од најмање битске брзине видеа кориштеног у симулацијама. У овом раду је вршена симулација на по једном скупу података на свакој од 10 рута на којима је измјерена пропусност ћелијске 3G мреже.

ТСК модел је обучен (трениран) са 100 вриједности пропусности из скупа података различитог од скупа података који се користи у експерименту. Важно је да су вриједности којима се врши обука ТСК модела измјерени на истом типу мреже како би излаз ТСК модела имао задовољавајућу предикцију пропусности у наредној итерацији. Иако је пракса да се при симулацијама за обуку неуронских мрежа користи одређени контингент података за обуку мреже, док се преостале вриједности користе за експлоатацију, ради поређења алгоритама над истим скуповима података неуронска мрежа је тренирана подацима који нису из датог скупа.

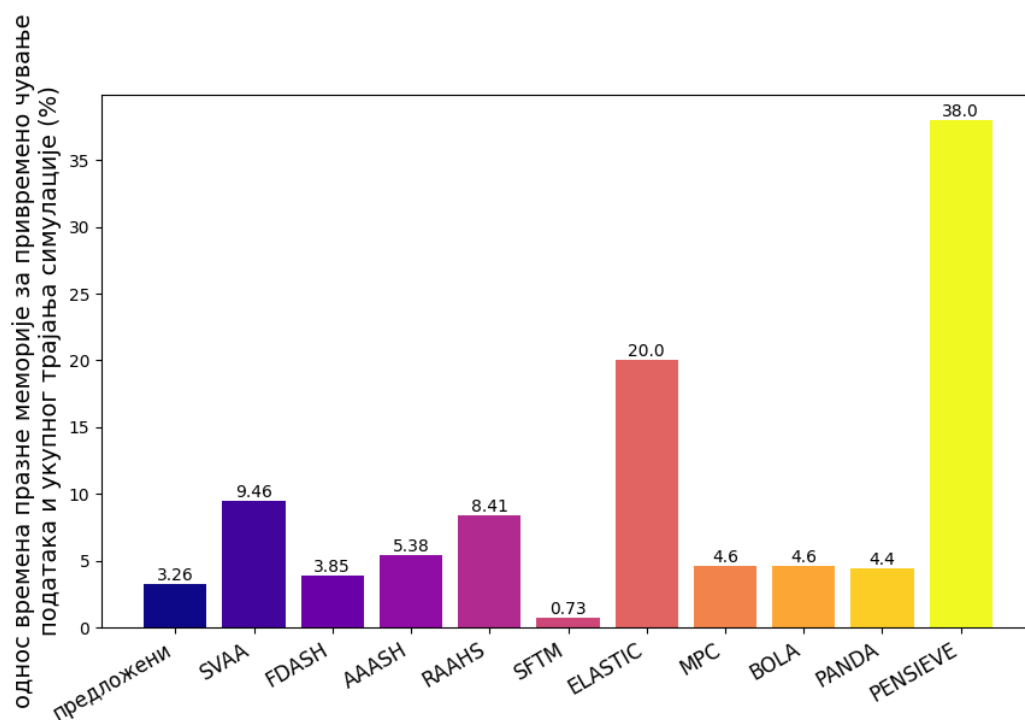
### 5.2.1 Резултати

Сумирани резултати по свим кључним параметрима ККД су приказани у Табела 4. Као и код Табела 3. црвеном бојом обојане су ћелије резултата који су значајно лошији од осталих по датом параметру, док су зеленом бојом обојане ћелије најбољих резултата по датом параметру. Предложени алгоритам је поново остварио најбоље резултате по свим параметрима ККД, ако се занемаре алгоритми који су по неким параметрима остварили далеко лошије резултате.

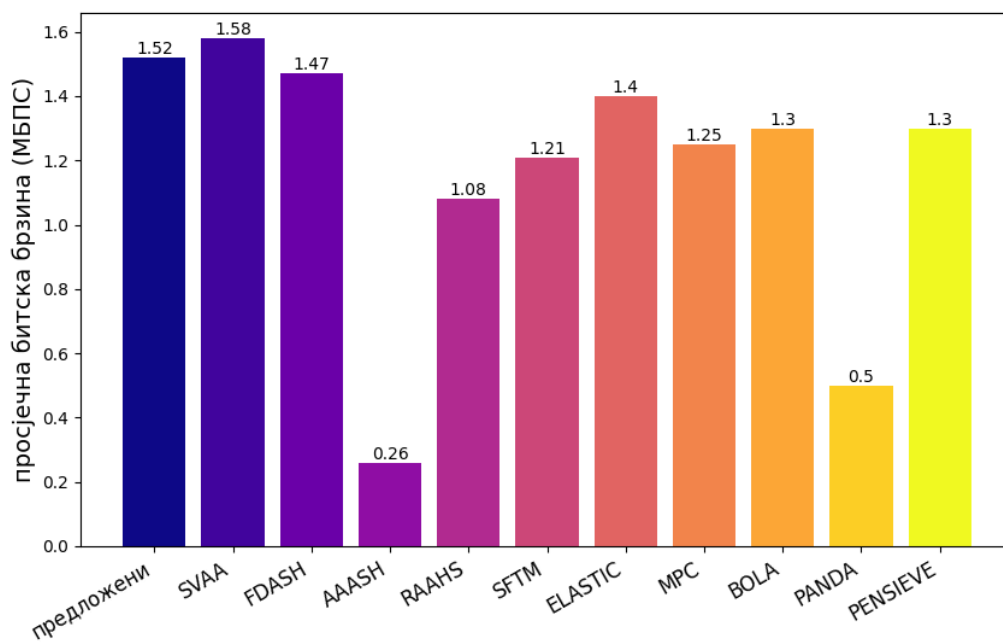
	Просјечна битска брзина	Однос празне меморије и укупног трајања симулације	Вриједност промјена битске брзине	Број промјена битске брзине
<b>предложени</b>	1,52	3.26	0.03	3.20
<b>SVAA</b>	1,58	9.46	0.03	3.42
<b>FDASH</b>	1,47	3.85	0.04	4.81
<b>AAASH</b>	0.26	5.38	0.05	14.5
<b>RAAHS</b>	1,08	8.41	0.16	8.32
<b>SFTM</b>	1,21	0.73	0.07	14.02
<b>ELASTIC</b>	1,4	20	0.12	-
<b>MPC</b>	1,25	4.6	0.15	-
<b>BOLA</b>	1,3	4.6	0.5	-
<b>PANDA</b>	0.5	4.4	0.03	-
<b>PENSIEVE</b>	1.3	38	0.19	-

Табела 4. Резултати симулације за пропусности ћелијске 3Г мреже

Код симулација са ћелијским 3Г мрежама предложени, FDASH и MPC алгоритми нису имали изразито лоше резултате ни по једном параметру. У симулацијама са ћелијским 3Г мрежама је примјетно повећање трајања празне меморије и повећање броја промјена битске брзине услед нестабилности и флукуације пропусности у ћелијским мрежама. PENSIEVE је у околностима ћелијске мреже показао изразиту нестабилност и достигао 38% трајања празне меморије за привремено чување података у односу на трајање симулације што је лако уочљиво на дијаграму Слика 27. Управо овај резултат у поређењу са 3.26% достигнутог трајања празне меморије у односу на трајање симулације предложеног алгоритма потврђује потребу за имплементацијом хибридног приступа како погрешна предикција не би у значајној мјери утицала на овај параметар.



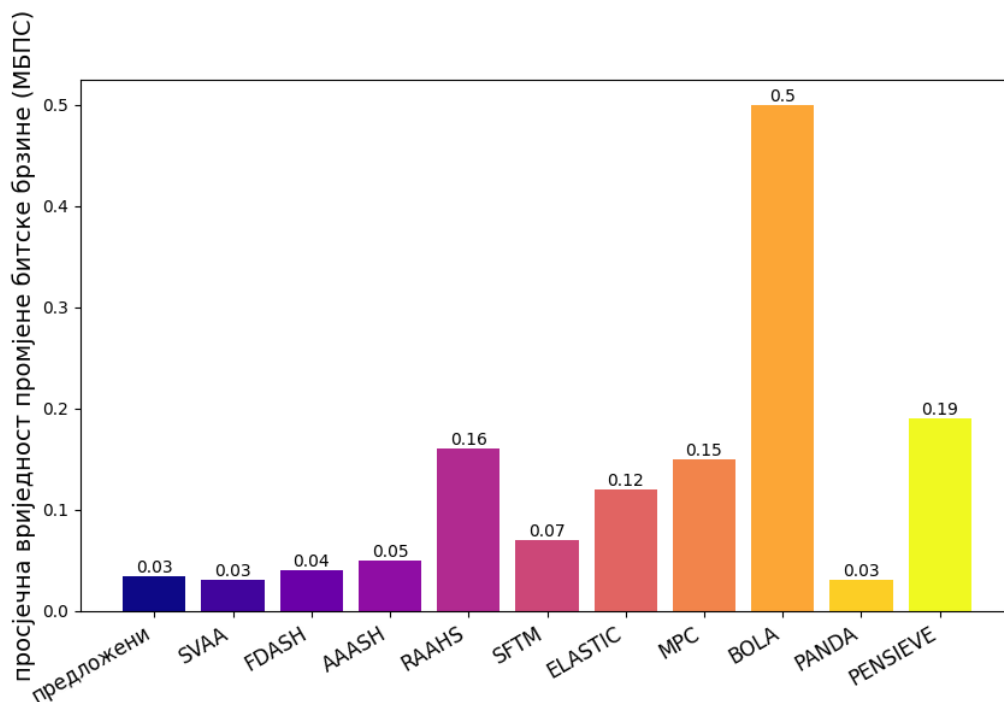
Слика 27. Однос времена празне меморије за привремено чување података и укупног трајања симулације за ћелијску 3Г мрежу



Слика 28. Просјечна битска брзина за ћелијске 3Г мреже

Други занимљив случај је везан за SFTM алгоритам. У погледу трајања празне меморије за привремено чување података алгоритам SFTM је остварио импресивне резултате од свега 0.73% (дијаграм Слика 27.) трајања празне меморије у односу на укупно трајање симулације. SFTM је остварио мању просјечну битску брзину за 25.6% (дијаграм Слика 28.) и 438% (дијаграм Слика 30.) већи број промјена битских брзина од предложеног алгоритма. Такође, овај алгоритам је остварио 233% већу вриједност промјене битске брзине у односу на предложени алгоритам.

Оно што се крије иза ових резултата је чињеница да је SFTM једини алгоритам од поређених у овој евалуацији који није ограничио меморију за привремено чување података, већ му је управо стратегија да уз велики број промјена битске брзине сегмента (дијаграм Слика 30.) пуни меморију за привремено чување података што је више могуће. Код предложеног алгоритма, као и код већине алгоритама циљна попуњеност меморије за привремено чување података је 35 секунди, а максимална између 80 и 100 секунди, док SFTM алгоритам неријетко има попуњеност меморије за привремено чување података већу од 250 секунди. Из тог разлога овај алгоритам није упоредив са осталим алгоритмима из ове ескперименталне евалуације по питању трајања празне меморије за привремено чување података.

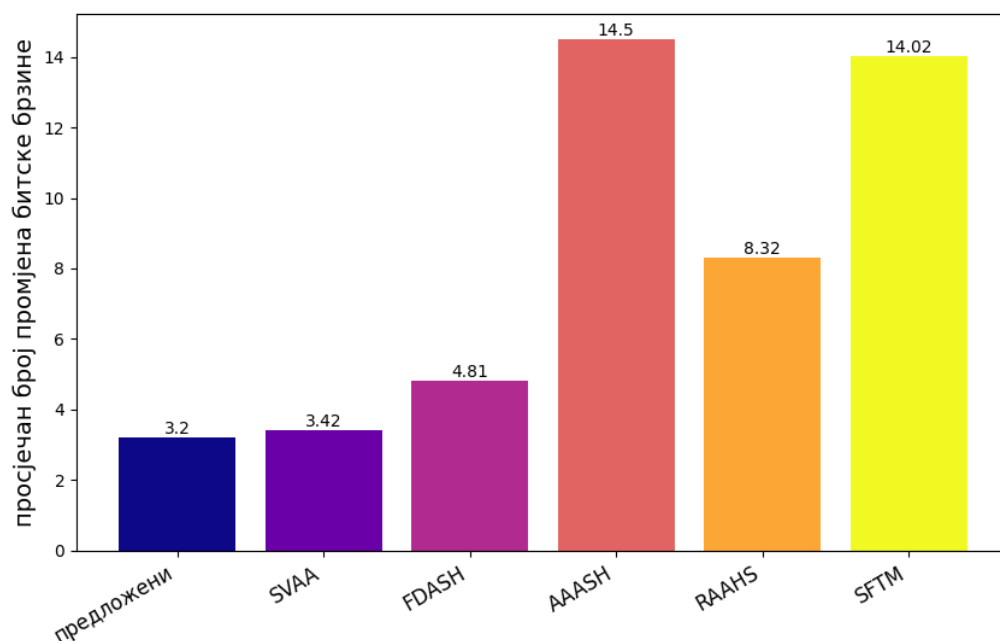


Слика 29. Просјечна вриједност промјене битске брзине за ћелијске 3Г мреже

Предложени алгоритам има релативно малу предност у односу на FDASH алгоритмом у погледу просјечне битске брзине гдје је разлика 0,05 МБПС у корист предложеног алгоритма (дијаграм Слика 28.), док је у погледу трајања празне меморије за привремено чување података предложени алгоритам бољи за 15,4% што је видљиво на дијаграму Слика 27.

BOLA има солидну вриједност просјечне битске брзине, али најлошију вриједност просјечне промјене битске брзине сегмента (дијаграм Слика 29.) која у великој мјери одступа од свих осталих алгоритама. Циљ алгоритама је у томе да постигну уједначено добре резултате по свим параметрима ККД, што код BOLA алгоритма није случај.

Једини алгоритам са већом просјечном битском брзином од предложеног алгоритма је SVAA и то за 5.4%, али тај алгоритам има највећу вриједност трајања празне меморије за привремено чување података у односу на све остале алгоритме, па се може занемарити приликом поређења просјечних битских брзина.



Слика 30. Број промјена битских брзина на стотину секунди за ћелијске 3Г мреже

---

### 5.3 Дискусија

Оно што је показано овом експерименталном евалуацијом је да предложени алгоритам има једнако добре резултате по свим параметрима и на оба скупа података који репрезентују вриједност симулиране пропусности рачунарске мреже. Предложени алгоритам је надмашио све остале алгоритме укључене у ову експерименталну евалуацију по свим параметрима. Једини алгоритам који је поред предложеног алгоритма показао добре резултате по свим параметрима на оба скупа података је FDASH, али га је предложени алгоритам надмашио по свим кључним параметрима ККД.

PENSIEVE алгоритам базиран на неуронским мрежама се показао изузетно лоше на скупу података који представља пропусност ћелијске 3Г мреже гдје је остварио трајање празне меморије за привремено чување података у односу на укупно трајање симулације од 38%, док је предложени алгоритам по истом параметру остварио 3.26%. На скупу података предложеном од стране DASH Industry Forum PENSIEVE је остварио солидне резултате, али га је предложени алгоритам надмашио по свим кључним параметрима ККД. SVAA и SFTM су алгоритми који на штету осталих кључних параметара покушавају остварити изузетне резултате по једном параметру. SVAA алгоритам остварује добре резултате у погледу просјечне битске брзине, али на штету трајања празне меморије за привремено чување података, док SFTM са друге стране на штету свих осталих параметара има добре резултате у погледу трајања празне меморије за привремено чување података.

PANDA и AAASH остварују изразито ниске вриједности пропусности рачунарске мреже у односу на све остале алгоритме, али имају добре резултате по осталим параметрима ККД, што је и очекивано. RAAHS и ELASTIC остварују лоше резултате у погледу трајања празне меморије за привремено чување података, а то је најзначајнији параметар квалитета корисничког доживљаја. BOLA је остварила лоше резултате по вриједности промјена битске брзине, док је MPC алгоритам који нема изразито лоше резултате ни по једном параметру али по свим параметрима има лошије резултате у поређењу са предложеним алгоритмом: просјечна битска брзина мања за 21.6%, трајање празне меморије за привремено чување података веће за 29.2%, и просјечна вриједност промјена битске брзине је већа за 400%.

---

## 6. **Закључак**

У овој дисертацији је представљен први хибридни адаптивни алгоритам битске брзине који комбинује традиционални хибридни приступ и приступ базиран на неуронским мрежама. Код алгоритама базираним на неуронским мрежама погрешна предикција води у пражњење меморије [10,36], док са друге стране, када је попуњеност меморије велика, традиционални алгоритми су превише конзервативни, те због тога постижу мању просјечну битску брзину са већим бројем промјена између битских брзина.

Хибридни алгоритам представљен у овом раду је превазишао недостатке које горенаведени приступи имају, и достигао је боље резултате по сва четири кључна параметра квалитета искуства корисника: просјечна битска брзина, број прелаза између битских брзина, вриједност промјена битских брзина и превенција пражњења меморије. Предложено рјешење користи три параметра на основу којих одређује захтјевану битску брзину у наредној итерацији: стање попуњености меморије, просјечну пропусност рачунарске мреже у претходној итерацији преузимања MPEG-DASH сегмента, и предикцију пропусности рачунарске мреже у наредној итерацији преузимања MPEG-DASH сегмента. Предикција пропусности је излаз Такаги-Сугено-Канг модела који се истиче својом ефикасношћу и прецизношћу, те малим бројем правила којим се дефинише.

---

ТСК модел је базиран на РОНН неуронским мрежама, а у зависности од вриједности улазних параметара модела даје различите предикције. Параметри који одређују ТСК модел су: број кластера, улазни одсјечци, параметар припадности и фактор заборављања. Како је одређивање параметара ТСК модела кључно за добијање што прецизнијих предикција, урађена је аблативна студија којом се експериментално утврђује које вриједности улазних параметара дају најпрецизније предикције (у овом случају предикција пропусности рачунарске мреже). За потребе аблативне студије кориштене су реалне измјерене пропусности рачунарских мрежа како за обуку, тако и за експлоатацију модела.

Аблативна студија је показала да модел са погрешно постављеним параметрима даје изразито непрецизне резултате, што доводи до закључка да је прије сваке употребе ТСК модела у различитим областима неопходно урадити аблативну студију. Најбољи резултат аблативне студије има модел чији параметар припадности има вриједност 2, фактор заборављања вриједност 0.97, број улаза 3, а број кластера 2. Разлика између реалне измјерене пропусности и предикције пропусности износи 0.015 МБПС по одбирку, што је задовољавајуће у овом случају узимајући у обзир да је разлика између прагова битских брзина неколико пута већа од тога.

Псеудо код алгоритма је дат у Алгоритам 1 (страница 75.) и Алгоритам 2 (страница 77.), док је рјешење написано у Ц++ програмском језику. Како би се предложени алгоритам упоредио са осталим репрезентативним алгоритмима креирано је тестно окружење у којем је могуће симулирати стварне пропусности рачунарских мрежа (ћелијске и WiFi). Оно што је веома важно је да сваки од алгоритама који се упоређују имају исту пропусност рачунарске мреже у истој симулацији (исте улазне вриједности). За потребе симулације пропусности кориштен је NS-3 симулатор, који је софтвер отвореног кода.

Како би утврдили објективан квалитет искуства корисника приликом експерименталне евалуације мјерена су три кључна параметра која одређују квалитет искуства корисника: просјечна битска брзина, број прелаза битских брзина, и временски интервал у ком је меморија за привремено чување података празна. Експерименталном евалуацијом је утврђено да је предложени алгоритам супериоран у



---

односу на све остале алгоритме укључене у евалуацију по свим параметрима квалитета искуства корисника.

Иако је евалуација у NS-3 симулатору довољна за мјерење параметара који одређују квалитет искуства корисника везаних за АБР алгоритам, у плану је да се предложени алгоритам интегрише у софтвер за репродукцију мултимедијалног садржаја (eng. Media Player). Оно што може представљати изазов приликом интеграције у софтвер за репродукцију садржаја је обука мреже. Предложени алгоритам јесте супериоран, али само у случају када је обучен над подацима измјереним над истим типом мреже над којом се врши и експлоатација (нпр. ћелијска 3G), у супротном даје погрешне предикције, што се негативно одражава на параметре ККД.

Потенцијално рјешење овог проблема и један од даљих праваца развоја рјешења јесте да се одмах приликом покретања софтвера за репродукцију мултимедијалног садржаја започне мјерење пропусности рачунарске мреже и обука мреже, да би приликом започињања репродукције мрежа унапријед била обучена. Иако се мрежа дообучава у току трајања репродукције, почетна обука је веома важна за добру предикцију. Такође, постоје и други начини. Препознавањем типа мреже је могуће користити већ припремљене податке за обуку мреже за одређени тип мреже, што се у овом истраживању показало могућим. Ако се у обзир узме вриједност пропусности мреже и просјечна промјена пропусности у току времена може се доћи до закључка о ком типу рачунарске мреже је ријеч, те да се неуронска мрежа обучи већ припремљеним подацима за дати тип рачунарске мреже.

---

## 7. Литература

[1] I. Cisco, "Cisco visual networking index: Forecast and methodology, 2017-2022," CISCO White paper, 2017.

[2] М. З. Бјелица, Н. Теслић и В. Михаћ, "Софтвер у дигиталној телевизији 1", ФТН Издаваштво, Нови Сад, 2017.

[3] Н. Фимић, „Прилог решењу брзе промене канала дигиталног ТВ пријемника“, докторска дисертација, Факултет техничких наука, Универзитет у Новом Саду, Нови Сад, 2023.

[4] T. Stockhammer, "Dynamic adaptive streaming over http--: standards and design principles," in Proc. Second annual ACM conference on Multimedia systems, 2011, pp. 133-144. doi:10.1145/1943552.1943572

[5] Audio-Video Transport Working Group, Schulzrinne, H., Casner, S., Frederick, R., and V. Jacobson, "RTP: A Transport Protocol for Real-Time Applications", doi 10.17487/RFC1889, January 1996.

[6] Schulzrinne, H., Casner, S., Frederick, R., and V. Jacobson, "RTP: A Transport Protocol for Real-Time Applications", doi: 10.17487/RFC3550, July 2003.

[7] Schulzrinne, H., Rao, A., and R. Lanphier, "Real Time Streaming Protocol (RTSP)", doi: 10.17487/RFC2326, April 1998.

[8] Pantos, R., Ed., and W. May, "HTTP Live Streaming", doi: 10.17487/RFC8216, August 2017.

[9] I. Ayad, Y. Im, E. Keller, S. Ha, "A practical evaluation of rate adaptation algorithms in HTTP-based adaptive streaming," Computer Networks, vol. 133, pp. 90-103, 2018. doi: 10.1016/j.comnet.2018.01.019

- 
- [10] V. Vasilev, J. Leguay, S. Paris, L. Maggi and M. Debbah, "Predicting QoE Factors with Machine Learning," in Proc. IEEE International Conference on Communications (ICC), 2018, pp. 1-6. doi: 10.1109/ICC.2018.8422609
- [11] Recommendation, "E. 800: Terms and definitions related to quality of service and network performance including dependability," ITU-T August, vol. 1994, 1994.
- [12] Mustafa Othman, "Objective video quality metric aware Adaptation mechanisms for video streaming based on DASH", Université Sorbonne Paris Nord, Paris, 2021.
- [13] M. Arsenovic, S. Rimac-drlje, "Quality of Experience Assessment for HTTP Based Adaptive Video Streaming," *Advances in Electrical and Computer Engineering*, vol.23, no.1, pp. 33-42, 2023, doi:10.4316/AECE.2023.01004
- [14] N. Barman and M. G. Martini, "QoE Modeling for HTTP Adaptive Video Streaming—A Survey and Open Challenges," in *IEEE Access*, vol. 7, pp. 30831-30859, 2019, doi: 10.1109/ACCESS.2019.2901778
- [15] Ricardo R. Pastrana-Vidal, Jean Charles Gicquel, Catherine Colomes, and Hocine Cherifi "Sporadic frame dropping impact on quality perception", Proc. SPIE 5292, Human Vision and Electronic Imaging IX, (7 June 2004); <https://doi.org/10.1117/12.525746>,
- [16] T. Hossfeld, S. Egger, R. Schatz, M. Fiedler, K. Masuch and C. Lorentzen, "Initial delay vs. interruptions: Between the devil and the deep blue sea," 2012 Fourth International Workshop on Quality of Multimedia Experience, Melbourne, VIC, Australia, 2012, pp. 1-6, doi: 10.1109/QoMEX.2012.6263849,
- [17] M. N. Garcia, D. Dytko and A. Raake, "Quality impact due to initial loading, stalling, and video bitrate in progressive download video services," 2014 Sixth International Workshop on Quality of Multimedia Experience (QoMEX), Singapore, 2014, pp. 129-134, doi: 10.1109/QoMEX.2014.6982308,
- [18] M. Seufert, S. Egger, M. Slanina, T. Zinner, T. Hoßfeld and P. Tran-Gia, "A Survey on Quality of Experience of HTTP Adaptive Streaming," in *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, vol. 17, no. 1, pp. 469-492, Firstquarter 2015, doi: 10.1109/COMST.2014.2360940
- [19] M.-N. Garcia et al., "Quality of experience and HTTP adaptive streaming: A review of subjective studies," 2014 Sixth International Workshop on Quality of Multimedia Experience (QoMEX), Singapore, 2014, pp. 141-146, doi: 10.1109/QoMEX.2014.6982310
- [20] A. K. Moorthy, L. K. Choi, A. C. Bovik and G. de Veciana, "Video Quality Assessment on Mobile Devices: Subjective, Behavioral and Objective Studies," in *IEEE Journal of Selected Topics in Signal Processing*, vol. 6, no. 6, pp. 652-671, Oct. 2012, doi:

---

10.1109/JSTSP.2012.2212417

[21] N. Staelens et al., "Assessing Quality of Experience of IPTV and Video on Demand Services in Real-Life Environments," in *IEEE Transactions on Broadcasting*, vol. 56, no. 4, pp. 458-466, Dec. 2010, doi: 10.1109/TBC.2010.2067710

[22] Möller, Sebastian & Raake, Alexander. (2014). *Quality of Experience: Advanced Concepts, Applications and Methods*. 10.1007/978-3-319-02681-7

[23] Z. Duanmu, K. Zeng, K. Ma, A. Rehman and Z. Wang, "A Quality-of-Experience Index for Streaming Video," in *IEEE Journal of Selected Topics in Signal Processing*, vol. 11, no. 1, pp. 154-166, Feb. 2017, doi: 10.1109/JSTSP.2016.2608329

[24] ITU Recommendations ITU-R BT-500 "Methodology for the subjective assessment of the quality of television pictures BT Series Broadcasting service", Int. Telecommun. Union, vol. 13, pp. 1-48, 2012.

[25] ITU-T Recommendation P.910, "Subjective video quality assessment methods for multimedia applications," Int. Telecommun. Union, Geneva, pp. 1-42, 2009.

[26] C. G. Bampis, Z. Li, I. Katsavounidis, T. -Y. Huang, C. Ekanadham and A. C. Bovik, "Towards Perceptually Optimized Adaptive Video Streaming-A Realistic Quality of Experience Database," in *IEEE Transactions on Image Processing*, vol. 30, pp. 5182-5197, 2021, doi:10.1109/TIP.2021.3073294.

[27] A. Balachandran, V. Sekar, A. Akella, S. Seshan, I. Stoica, and H. Zhang, "A quest for an internet video quality-of-experience metric," in *Proc. 11th ACM Workshop on Hot Topics in Networks*, 2012, pp. 97-102. doi: 10.1145/2390231.2390248

[28] J. D. Vriendt, D. D. Vleeschauwer, and D. C. Robinson, "QoE model for video delivered over an LTE network using HTTP adaptive streaming," *Bell Labs Technical Journal*, vol. 18, no. 4, pp. 45-62, 2014. doi: 10.1002/bltj.21645

[29] C. Alberti et al., "Automated QoE evaluation of Dynamic Adaptive Streaming over HTTP," in *Proc. 2013 Fifth International Workshop on Quality of Multimedia Experience (QoMEX)*, 2013, pp. 58-63. doi: 10.1109/QoMEX.2013.6603211

[30] A. C. Begen, M. N. Akcay, A. Bentaleb and A. Giladi, "Adaptive Streaming of Content-Aware-Encoded Videos in dash.js," *SMPTE Motion Imaging Journal*, vol. 131, no. 4, pp. 30-38, May 2022. doi: 10.5594/JMI.2022.3160560

[31] M. Batalla, "Advanced multimedia service provisioning based on efficient interoperability of adaptive streaming protocol and high efficient video coding," *Journal of Real-Time Image Processing*, vol. 12, pp. 443-454, 2016. doi: 10.1007/s11554-015-0496-4

- 
- [32] M. Azumi, T. Kurosaka and M. Bandai, “A QoE-Aware Quality-Level Switching Algorithm for Adaptive Video Streaming,” in Proc. IEEE Global Communications Conference (GLOBECOM), 2015, pp. 1-5. doi: 10.1109/GLOCOM.2015.7417622
- [33] C. Liu, I. Bouazizi, M. Gabbouj, “Rate adaptation for adaptive HTTP streaming,” in Proc. MMSys '11, 2011, pp. 169-174. doi: 10.1145/1943552.1943575
- [34] W. Huang, Y. Zhou, X. Xie, D. Wu, M. Chen and E. Ngai, “Buffer State is Enough: Simplifying the Design of QoE-Aware HTTP Adaptive Video Streaming,” IEEE Transactions on Broadcasting, vol. 64, no. 2, pp. 590-601, June 2018. doi: 10.1109/TBC.2018.2789580
- [35] T.-Y. Huang, R. Johari and N. McKeown, “Downton abbey without the hiccups: Buffer-based rate adaptation for http video streaming,” in Proc. ACM SIGCOMM Workshop on Future Human-centric Multimedia Networking, 2013, pp. 9-14. doi: 10.1145/2491172.2491179
- [36] K. Spiteri, R. Urgaonkar and R. K. Sitaraman, “BOLA: Near-Optimal Bitrate Adaptation for Online Videos,” IEEE/ACM Transactions on Networking, vol. 28, no. 4, pp. 1698-1711, Aug. 2020. doi: 10.1109/TNET.2020.2996964
- [37] P. Wiśniewski, J. Mongay Batalla, A. Bęben, P. Krawiec, and A. Chydziański, “On Optimizing Adaptive Algorithms Based on Rebuffering Probability,” ACM Transactions on Multimedia Computing Communications and Applications, vol. 13, no. 3s, pp. 1–20, 2017. doi: 10.1145/3092837
- [38] X. Yin, A. Jindal, V. Sekar, B. Sinopoli, “A Control-Theoretic Approach for Dynamic Adaptive Video Streaming over HTTP,” in Proc. SIGCOMM '15, 2015, pp. 325-338. doi: 10.1145/2829988.2787486
- [39] Y. Cao, X. You, J. Wang and L. Song, “A QoE friendly rate adaptation method for DASH,” in Proc. IEEE International Symposium on Broadband Multimedia Systems and Broadcasting, 2014, pp. 1-6. doi: 10.1109/BMSB.2014.6873524
- [40] S. -H. Chang, K. -J. Wang and J. -M. Ho, “Optimal DASH Video Scheduling over Variable-Bit-Rate Networks,” in Proc. 9th International Symposium on Parallel Architectures, Algorithms and Programming (PAAP), 2018, pp. 41-48. doi: 10.1109/PAAP.2018.00015
- [41] W. Rahman, M. D. Hossain, E.-N. Huh, “Fuzzy-Based Quality Adaptation Algorithm for Improving QoE from MPEG-DASH Video,” Applied Sciences, 2021. doi: 10.3390/app11115270
- [42] D. J. Vergados, A. Michalas, A. Sgora, D. D. Vergados and P. Chatzimisios, “FDASH: A Fuzzy-Based MPEG/DASH Adaptation Algorithm,” IEEE Systems Journal, vol. 10, no. 2, pp. 859-868, June 2016. doi: 10.1109/JSYST.2015.2478879

- 
- [43] J. Aguilar-Armijo, C. Timmerer and H. Hellwagner, "EADAS: Edge Assisted Adaptation Scheme for HTTP Adaptive Streaming," in Proc. IEEE 46th Conference on Local Computer Networks (LCN), 2021, pp. 487-494. doi: 10.1109/LCN52139.2021.9524883
- [44] M. Kim and K. Chung, "Edge Computing Assisted Adaptive Streaming Scheme for Mobile Networks," IEEE Access, vol. 9, pp. 2142-2152, 2021. doi: 10.1109/ACCESS.2020.3047373
- [45] J. Luo, F. R. Yu, Q. Chen and L. Tang, "Adaptive Video Streaming With Edge Caching and Video Transcoding Over Software-Defined Mobile Networks: A Deep Reinforcement Learning Approach," IEEE Transactions on Wireless Communications, vol. 19, no. 3, pp. 1577-1592, March 2020. doi: 10.1109/TWC.2019.2955129
- [46] J. O. Fajardo, I. Taboada and F. Liberal, "Improving content delivery efficiency through multi-layer mobile edge adaptation," IEEE Network, vol. 29, no. 6, pp. 40-46, Nov.-Dec. 2015. doi: 10.1109/MNET.2015.7340423
- [47] A. R. Bhat and S. K. Bhadu, "Machine learning based rate adaptation in DASH to improve quality of experience," in Proc. IEEE International Conference on Smart Technologies and Management for Computing, Communication, Controls, Energy and Materials (ICSTM), 2017, pp. 82-89. doi: 10.1109/ICSTM.2017.8089131
- [48] J. Liu, X. Tao and J. Lu, "QoE-Oriented Rate Adaptation for DASH With Enhanced Deep Q-Learning," IEEE Access, vol. 7, pp. 8454-8469, 2019. doi: 10.1109/ACCESS.2018.2889999
- [49] T. Abar, A. Ben Letaifa and S. Elasmı, "Enhancing QoE Based on Machine Learning and DASH in SDN Networks," in Proc. 2018 32nd International Conference on Advanced Information Networking and Applications Workshops (WAINA), 2018, pp. 258-263. doi: 10.1109/WAINA.2018.00095
- [50] S. Nemet, D. Kukolj, G. Ostojic, S. Stankovski, and D. Jovanovic, "Aggregation framework for TSK fuzzy and association rules: interpretability improvement on a traffic accidents case," Applied Intelligence, vol. 49, no. 11, pp. 3909-3922, 2019. doi: 10.1007/s10489-019-01485-6
- [51] I. Basicıevic, D. Kukolj, M. Popovic, "On the application of fuzzy-based flow control approach to High Altitude Platform communications," Applied Intelligence, vol. 34, no. 2, pp. 1-12, 2009. doi: 10.1007/s10489-009-0190-y
- [52] M. Petkovic, I. Basicıevic, D. Kukolj, et al., "Evaluation of Takagi-Sugeno-Kang fuzzy method in entropy-based detection of DDoS attacks," Computer Science Informaation

---

System, vol. 15, no. 1, pp. 139–162, 2018. doi: 10.2298/CSIS160905039P

[53] T. Takagi and M. Sugeno, “Fuzzy identification of systems and its applications to modeling and control,” *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, vol. SMC-15, no. 1, pp. 116-132, Jan.-Feb. 1985. doi: 10.1109/TSMC.1985.6313399

[54] D. Kukolj and E. Levi, “Identification of complex systems based on neural and Takagi-Sugeno fuzzy model,” *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part B (Cybernetics)*, vol. 34, no. 1, pp. 272-282, Feb. 2004. doi: 10.1109/TSMCB.2003.811119

[55] D. Kukolj, “Design of adaptive Takagi-Sugeno-Kang fuzzy models”, *Applied Soft Computing*, vol. 2, no. 2, pp. 89-103, 2002. doi: 10.1016/S1568-4946(02)00032-7

[56] D. Kukolj and E. Levi, "Identification of complex systems based on neural and Takagi-Sugeno fuzzy model," in *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part B (Cybernetics)*, vol. 34, no. 1, pp. 272-282, Feb. 2004, doi: 10.1109/TSMCB.2003.811119.

[57] Available online: <https://github.com/djvergad/dash/> (accessed on 23. Mart 2022).

[58] K. Miller, E. Quacchio, G. Gennari, and A. Wolisz, “Adaptation algorithm for adaptive streaming over HTTP,” in *Proc. 19th Int. IEEE PV Workshop*, 2012, pp. 173–178. doi: 10.1109/PV.2012.6229732

[59] C. Liu, I. Bouazizi, M. M. Hannuksela, and M. Gabbouj, “Rate adaptation for dynamic adaptive streaming over HTTP in content distribution network,” *Signal Processing, Image Communication*, vol. 27, no. 4, pp. 288–311, Apr. 2012. doi: 10.1016/j.image.2011.10.001

[60] G. Tian and Y. Liu, “Towards agile and smooth video adaptation in dynamic HTTP streaming,” in *Proc. 8th Int. CoNEXT*, 2012, pp. 109–120. doi: 10.1145/2413176.2413190

[61] H. Mao, R. Netravali, and M. Alizadeh, “Neural adaptive video streaming with pensieve,” in *Proc. Conf. ACM Special Interest Group Data Commun.*, Aug. 2017, pp. 197–210

[62] L. De Cicco, V. Caldaralo, V. Palmisano and S. Mascolo, "ELASTIC: A Client-Side Controller for Dynamic Adaptive Streaming over HTTP (DASH)," 2013 20th International Packet Video Workshop, San Jose, CA, USA, 2013, pp. 1-8, doi: 10.1109/PV.2013.6691442

[63] Xiaoqi Yin, Abhishek Jindal, Vyas Sekar, and Bruno Sinopoli. 2015. A Control-Theoretic Approach for Dynamic Adaptive Video Streaming over HTTP. *SIGCOMM Comput. Commun. Rev.* 45, 4 (October 2015), 325–338. <https://doi.org/10.1145/2829988.2787486>

[64] Z. Li et al., "Probe and Adapt: Rate Adaptation for HTTP Video Streaming At Scale," in *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol. 32, no. 4, pp. 719-733, April 2014, doi: 10.1109/JSAC.2014.140405

---

[65] Available online: <http://ftp.itec.aau.at/datasets/DASHDataset2014/> (accessed on 23. Mart 2022),

[66] DASH Industry Forum - Guidelines for Implementation: DASH-AVC/264 Test Cases and Vectors. [Online]. Available: <http://dashif.org/guidelines/>,

[67] H. Riiser, P. Vigmostad, C. Griwodz, and P. Halvorsen, "Commute path bandwidth traces from 3G networks: Analysis and applications," in Proc. 4th ACM Multimedia Syst. Conf. (MMSys), 2013, pp. 114–118.



Овај Образац чини саставни део докторске дисертације, односно докторског уметничког пројекта који се брани на Универзитету у Новом Саду. Попуњен Образац укоричити иза текста докторске дисертације, односно докторског уметничког пројекта.

## План третмана података

<b>Назив пројекта/истраживања</b>
Алгоритам за динамичку адаптацију код преноса тока мултимедијалних података
<b>Назив институције/институција у оквиру којих се спроводи истраживање</b>
а) Факултет техничких наука, Универзитет у Новом Саду б) Институт РТ-РК, Нови Сад
<b>Назив програма у оквиру ког се реализује истраживање</b>
Истраживање се реализује у оквиру израде докторске дисертације на студијском програму Рачунарство и аутоматика.
<b>1. Опис података</b>
<i>1.1 Врста студије</i> <i>Укратко описати тип студије у оквиру које се подаци прикупљају</i> Докторска дисертација
<i>1.2 Врсте података</i> <b>а) квантитативни</b> <b>б) квалитативни</b>
<i>1.3. Начин прикупљања података</i> а) анкете, упитници, тестови б) клиничке процене, медицински записи, електронски здравствени записи в) генотипови: навести врсту _____ г) административни подаци: навести врсту _____ д) узорци ткива: навести врсту _____ ђ) снимци, фотографије: навести врсту _____

- е) текст, навести врсту \_\_\_\_\_
- ж) мапа, навести врсту \_\_\_\_\_
- з) остало: описати Рачунарски експерименти и симулације \_\_\_\_\_

### 1.3 Формат података, употребљене скале, количина података

#### 1.3.1 Употребљени софтвер и формат датотеке:

- а) Excel фајл, датотека \_\_\_\_\_
- б) SPSS фајл, датотека \_\_\_\_\_
- с) PDF фајл, датотека \_\_\_\_\_
- д) Текст фајл, датотека \_\_\_\_\_
- е) JPG фајл, датотека \_\_\_\_\_
- ф) Остало, датотека \_\_\_\_\_

#### 1.3.2. Број записа (код квантитативних података)

- а) број варијабли **Велики број** \_\_\_\_\_
- б) број мерења (испитаника, процена, снимака и сл.) **Велики број** \_\_\_\_\_

#### 1.3.3. Поновљена мерења

- а) да
- б) не**

Уколико је одговор да, одговорити на следећа питања:

- а) временски размак између поновљених мера је \_\_\_\_\_
- б) варијабле које се више пута мере односе се на \_\_\_\_\_
- в) нове верзије фајлова који садрже поновљена мерења су именоване као \_\_\_\_\_

Напомене: \_\_\_\_\_

*Да ли формати и софтвер омогућавају дељење и дугорочну валидност података?*

- а) Да**
- б) Не**

Ако је одговор не, образложити \_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

## 2. Прикупљање података

### 2.1 Методологија за прикупљање/генерисање података

#### 2.1.1. У оквиру ког истраживачког нацрта су подаци прикупљени?

а) експеримент, навести тип **Рачунарске симулације** \_\_\_\_\_

б) корелационо истраживање, навести тип \_\_\_\_\_

ц) анализа текста, навести тип **Анализа доступне литературе** \_\_\_\_\_

д) остало, навести шта \_\_\_\_\_

2.1.2 Навести врсте мерних инструмената или стандарде података специфичних за одређену научну дисциплину (ако постоје).

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

### 2.2 Квалитет података и стандарди

#### 2.2.1. Третман недостајућих података

а) Да ли матрица садржи недостајуће податке? Да **Не**

Ако је одговор да, одговорити на следећа питања:

а) Колики је број недостајућих података? \_\_\_\_\_

б) Да ли се кориснику матрице препоручује замена недостајућих података? Да **Не**

в) Ако је одговор да, навести сугестије за третман замене недостајућих података

\_\_\_\_\_

#### 2.2.2. На који начин је контролисан квалитет података? Описати

**Квалитет података је контролисан поређењем експерименталних и теоријских података** \_\_\_\_\_

---

2.2.3. На који начин је извршена контрола уноса података у матрицу?

**Контрола уноса података је изведена на основу експертског знања**

---

### 3. Третман података и пратећа документација

3.1. Третман и чување података

3.1.1. Подаци ће бити депоновани у **Репозиторијуму докторских дисертација на Универзитету у Новом Саду.**

3.1.2. URL адреса \_\_\_\_\_

3.1.3. DOI \_\_\_\_\_

3.1.4. Да ли ће подаци бити у отвореном приступу?

- a) **Да**
- б) Да, али после ембарга који ће трајати до \_\_\_\_\_
- в) **Не**

Ако је одговор не, навести разлог \_\_\_\_\_

3.1.5. Подаци неће бити депоновани у репозиторијум, али ће бити чувани.

Образложење

---

---

3.2 Метаподаци и документација података

3.2.1. Који стандард за метаподатке ће бити примењен? **Стандард који примјењује Репозиторијум докторских дисертација Универзитета у Новом Саду.**

3.2.1. Навести метаподатке на основу којих су подаци депоновани у репозиторијум.

---

---

*Ако је потребно, навести методе које се користе за преузимање података, аналитичке и процедуралне информације, њихово кодирање, детаљне описе варијабли, записа итд.*

---

---

---

---

3.3 Стратегија и стандарди за чување података

3.3.1. До ког периода ће подаци бити чувани у репозиторијуму? \_\_\_\_\_

3.3.2. Да ли ће подаци бити депоновани под шифром? **Да** **Не**

3.3.3. Да ли ће шифра бити доступна одређеном кругу истраживача? **Да** **Не**

3.3.4. Да ли се подаци морају уклонити из отвореног приступа после извесног времена?

**Да** **Не**

Образложити

---

---

## 4. Безбедност података и заштита поверљивих информација

Овај одељак МОРА бити попуњен ако ваши подаци укључују личне податке који се односе на учеснике у истраживању. За друга истраживања треба такође размотрити заштиту и сигурност података.

4.1 Формални стандарди за сигурност информација/података

Истраживачи који спроводе испитивања с људима морају да се придржавају Закона о заштити података о личности ([https://www.paragraf.rs/propisi/zakon\\_o\\_zastiti\\_podataka\\_o\\_licnosti.html](https://www.paragraf.rs/propisi/zakon_o_zastiti_podataka_o_licnosti.html)) и одговарајућег институционалног кодекса о академском интегритету.

4.1.2. Да ли је истраживање одобрено од стране етичке комисије? Да Не

Ако је одговор Да, навести датум и назив етичке комисије која је одобрила истраживање

---

4.1.2. Да ли подаци укључују личне податке учесника у истраживању? Да Не

Ако је одговор да, наведите на који начин сте осигурали поверљивост и сигурност информација везаних за испитанике:

- а) Подаци нису у отвореном приступу
  - б) Подаци су анонимизирани
  - ц) Остало, навести шта
- 
- 

## 5. Доступност података

*5.1. Подаци ће бити*

*а) јавно доступни*

*б) доступни само уском кругу истраживача у одређеној научној области*

*ц) затворени*

*Ако су подаци доступни само уском кругу истраживача, навести под којим условима могу да их користе:*

---

---

*Ако су подаци доступни само уском кругу истраживача, навести на који начин могу приступити подацима:*

---

---

*5.4. Навести лиценцу под којом ће прикупљени подаци бити архивирани.*

**Ауторство –некомерцијално**

---

## 6. Улоге и одговорност

*6.1. Навести име и презиме и мејл адресу власника (аутора) података*

**Раденко Бановић, banovic@protonmail.com**

*6.2. Навести име и презиме и мејл адресу особе која одржава матрицу с подацима*

**Раденко Бановић, banovic@protonmail.com**

*6.3. Навести име и презиме и мејл адресу особе која омогућује приступ подацима другим истраживачима*

**Раденко Бановић, banovic@protonmail.com**