

# Utjecaj duljine paketa na performanse internetskog čvora

---

**Novosel, Kristijan**

**Undergraduate thesis / Završni rad**

**2024**

*Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj:* **University of Zagreb, Faculty of Transport and Traffic Sciences / Sveučilište u Zagrebu, Fakultet prometnih znanosti**

*Permanent link / Trajna poveznica:* <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:119:024468>

*Rights / Prava:* [In copyright](#)/[Zaštićeno autorskim pravom.](#)

*Download date / Datum preuzimanja:* **2025-02-20**



*Repository / Repozitorij:*

[Faculty of Transport and Traffic Sciences - Institutional Repository](#)



Sveučilište u Zagrebu  
Fakultet prometnih znanosti

## ZAVRŠNI RAD

**UTJECAJ DULJINE PAKETA NA PERFORMANSE  
INTERNETSKOG ČVORA**

**THE IMPACT OF PACKET LENGTH ON THE PERFORMANCE OF  
AN INTERNET NODE**

Mentor: izv. prof. dr. sc. Marko Matulin

Student: Kristijan Novosel

JMBAG: 0135260449

Zagreb, kolovoz 2024.

Zagreb, 23. travnja 2024.

Zavod: **Zavod za informacijsko komunikacijski promet**  
Predmet: **Tehnologija telekomunikacijskog prometa I**

## ZAVRŠNI ZADATAK br. 7598

Pristupnik: **Kristijan Novosel (0135260449)**  
Studij: **Promet**  
Smjer: **Informacijsko-komunikacijski promet**

Zadatak: **Utjecaj duljine paketa na performanse internetskog čvora**

### Opis zadatka:

Opisati funkcionalnost internetskog čvora i zahtjeve aplikacija vezano uz kvalitetu usluge. Analitički opisati utjecaj duljine paketa na performanse čvora. Opisati programsko okruženje u Matlab-u koje će se koristiti u testnim scenarijima (različiti prometni tokovi i njihov utjecaj na performanse čvora). Prezentirati skup testnih scenarija pomoću kojih se radi analiza performansi. Diskutirati rezultate analize.

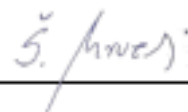
Mentor:



---

izv. prof. dr. sc. Marko Matulin

Predsjednik povjerenstva za  
završni ispit:



## **Sažetak**

Ovaj rad analizira utjecaj duljine paketa na performanse internetskog čvora, s fokusom na ključne parametre poput: vremena čekanja, duljine reda, kašnjenja i iskorištenosti poslužitelja. U tu svrhu, simuliran je M/M/1 model sustava posluživanja u Matlab programskom alatu. Kroz različite scenarije (duljine paketa) prikazano je kako se sustav ponaša u različitim uvjetima opterećenja. Dobiveni rezultati su analitički razmotreni i detaljno opisani, kako bi se pojasnile promjene stanja sustava kroz različite vrijednosti ključnih parametara.

KLJUČNE RIJEČI: duljina paketa; internetski čvor; performanse

## **Summary**

This paper analyzes the impact of packet length on the performance of an Internet node, focusing on key parameters such as: waiting time, queue length, latency and server utilization. For this purpose, the M/M/1 model of the serving system was simulated in the Matlab software tool. Through different scenarios (packet lengths), it is shown how the system behaves under different load conditions. The obtained results were analytically discussed and described in detail, in order to clarify the changes in the state of the system through different values of key parameters.

KEY WORDS: packet length; Internet node; performances

## Sadržaj

<b>1. UVOD.....</b>	<b>1</b>
<b>2. FUKCIONALNOST INTERNETSKOG ČVORA .....</b>	<b>3</b>
2.2. Usmjernik.....	4
2.3. Usmjeravanje .....	5
2.3. Topologija.....	7
<b>3. UTJECAJ DULJINE PAKETA NA PERFORMANSE ČVORA.....</b>	<b>9</b>
3.1. QoS zahtjevi za različite aplikacije .....	10
3.2. Modeli sustava posluživanja.....	12
3.2.1. M/M/1 model.....	14
3.2.2. M/M/m model.....	15
3.2.3. M/D/1 model.....	16
<b>4. TESTNO OKRUŽENJE U MATLAB-U .....</b>	<b>17</b>
4.1. Simulacija M/M/1 modela.....	18
4.2. Testni scenariji.....	20
<b>5. OPIS TESTNIH SCENARIJA .....</b>	<b>24</b>
<b>6. REZULTATI ANALIZA .....</b>	<b>27</b>
<b>7. ZAKLJUČAK .....</b>	<b>31</b>
<b>LITERATURA.....</b>	<b>32</b>
<b>POPIS SLIKA .....</b>	<b>34</b>
<b>POPIS GRAFIKONA .....</b>	<b>35</b>
<b>POPIS TABLICA.....</b>	<b>36</b>

## 1. UVOD

Internetski čvorovi predstavljaju temeljne komponente modernih komunikacijskih mreža, omogućujući prijenos, usmjeravanje i obradu podataka između različitih dijelova mreže. Komunikacija u tim mrežama temelji se na komutaciji paketa, načinu prijenosa gdje se podaci (informacije) segmentiraju na manje dijelove ili pakete. Na taj način svaki segment (paket) može neovisno putovati kroz mrežu i biti ponovno sastavljen na odredištu. Paketni prijenos omogućuje efikasno korištenje mrežnih resursa i povećava otpornost na potencijalne smetnje.

Duljina paketa jedan je od ključnih parametara koji može značajno utjecati na performanse internetskog čvora i cijele mreže. Ovisno o specifičnim karakteristikama i ciljevima, različite aplikacije imaju određene zahtjeve u pogledu duljine paketa i kvalitete usluge. Zbog toga duljina paketa mora biti precizno optimizirana, kako bi se postigle najbolje mrežne performanse. Da bi se pokazalo kako duljina paketa utječe na performanse internetskog čvora, u ovom radu je napravljena simulacija čvora paketne mreže i analiza ključnih parametara za različite scenarije. Rad je podijeljen u sedam poglavlja:

1. Uvod
2. Funkcionalnost internetskog čvora
3. Utjecaj duljine paketa na performanse čvora
4. Testno okruženje u Matlab-u
5. Opis testnih scenarija
6. Rezultati analiza
7. Zaključak.

U drugom poglavlju je opisano na koji način funkcionira internetski čvor. Navedeni su postupci usmjeravanja uključujući protokole i opisane su vrste topologija.

U trećem poglavlju su definirani zahtjevi različitih aplikacija za kvalitetu usluge. Opisani su različiti modeli sustava posluživanja, uključujući matematičke formule koje se koriste za izračun ključnih parametara.

Četvrto poglavlje prikazuje Matlab programsko okruženje i korišteni simulacijski model. Model je opisan po blokovima i odrađena je simulacija za različite režime rada (scenarije).

U petom poglavlju su detaljnije opisani testni scenariji uključujući ulazne vrijednosti varijabli i prikazani su ključni parametri dobiveni iz simulacije.

U šestom poglavlju su detaljnije analizirani i uspoređeni dobiveni iznosi ključnih parametara za procjenu performansi čvora. Grafički su prikazane njihove međusobne ovisnosti, omogućujući bolji uvid utjecaja na sustav.

## 2. FUKCIONALNOST INTERNETSKOG ČVORA

Mrežu se može definirati kao skup različitih komunikacijskih uređaja povezanih raznim komunikacijskim vezama, koji se koriste za razmjenu podataka i resursa povezivanjem više elemenata unutar određenog područja.

Mrežni čvor u komunikacijskoj mreži predstavlja točku povezivanja koja služi za prijenos, primanje, stvaranje ili spremanje podataka putem distribuiranih mrežnih ruta. Svaki mrežni čvor može biti krajnja točka ili točka preraspodjele, koja omogućava prijenos podataka i informacija između mreža. Imaju ključnu ulogu u uspostavljanju veza, prijenosu i primanju paketa podataka, upravljanju mrežnim prometom, kao i pružanju mrežnih usluga.

U računalnoj znanosti to su podatkovne točke ili uređaji unutar mreže, poput osobnih računala, pisača ili telefona. Čvorovi su programirani za identifikaciju i prijenos podataka s jednog čvora na drugi, te predstavljaju točke spajanja unutar mreže. Koncept čvorova potječe iz upotrebe distribuiranih mreža i komutacije paketa, omogućujući razne funkcije temeljene na specifičnim aplikacijama [1].

Mrežni čvorovi djeluju kao posrednici, olakšavajući protok podataka kroz mreže. Čvorovi posjeduju specifične karakteristike koje određuju njihovu ulogu i ponašanje unutar mreže. Dodijeljene su im jedinstvene IP (engl. *Internet Protocol*) adrese i MAC (engl. *Media Access Control*) adrese. IP adrese olakšavaju usmjeravanje i pomažu identificirati izvor i odredište podatkovnih paketa. MAC adrese omogućuju identifikaciju pojedinačnih uređaja unutar mreže.

Bitno je pridržavati se mrežnih protokola kako bi se osigurala interoperabilnost. Bilo da se radi o TCP/IP paketu ili specifičnim protokolima, kompatibilnost omogućuje čvorovima učinkovitu komunikaciju.

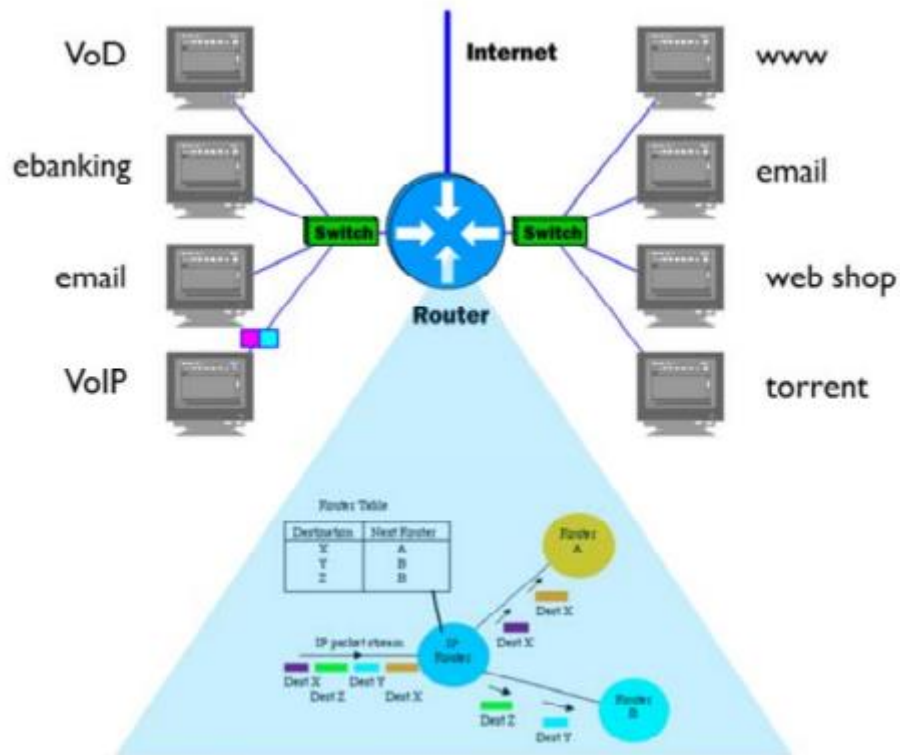
Procesorska snaga i kapacitet memorije utječu na njihovu sposobnost upravljanja mrežnim prometom. Čvorovi visokih performansi s velikim resursima mogu podnijeti velika prometna opterećenja i osigurati nesmetan rad mreže.

Točke povezivanja mogu biti žične i bežične. Žične veze omogućuju prijenos podataka velikim brzinama, dok bežične veze nude fleksibilnost i mobilnost [1].

Slika 1 prikazuje primjer Internetskog čvora. Da bi zadaća usmjeravanja pristiglih paketa bila obavljena, čvorovi čitaju podatke zapisane u zaglavlju paketa te obrađuju prikupljene informacije. Za to vrijeme paketi su pohranjeni u memoriji čvora gdje čekaju na



odlazni link. Samo usmjeravanje obavlja se temeljem tablice usmjeravanja (engl. *routing table*). Upravo zbog tog procesa čekanja paketa, mogu se koristiti različiti modeli iz područja teorije redova za opisivanje procesa posluživanja paketa. Modeli omogućuju analizu ponašanja sustava pod različitim opterećenjima i pružaju uvid u ključne parametre [2], što će biti detaljnije pokazano i analizirano kasnije u radu.



Slika 1. Čvor paketne mreže [2]

## 2.2. Usmjernik

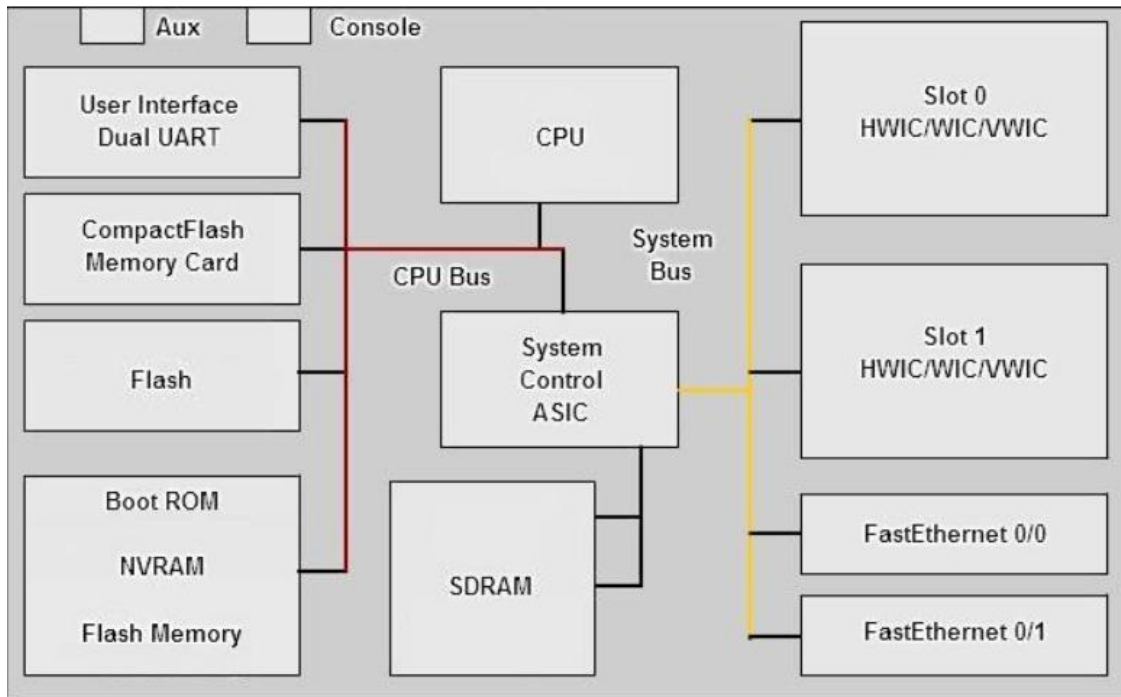
Usmjernik (engl. *router*) je aktivni mrežni uređaj koji radi na mrežnoj razini OSI (engl. *Open Systems Interconnection*) referentnog modela. Osnovne funkcije usmjernika su [3]:

- Prosljeđivanje paketa iz jedne u drugu mrežu (engl. *forwarding*),
- Određivanje najboljih puteva paketa kroz mrežu (engl. *routing*).

Na slici 2 je prikazana arhitektura elemenata od kojih se sastoji usmjernik. Kad usmjernik na jednom od svojih sučelja primi paket, na temelju određene IP adrese upisane u zaglavlje paketa i tablice usmjeravanja, donosi odluku na koje će sučelje proslijediti paket.

Paralelno s procesom prosljeđivanja paketa svaki usmjernik izračunava najbolje puteve paketa kroz mrežu pomoću algoritama usmjerenja, odnosno koristeći usmjerivačke protokole.

Centralna procesorska jedinica (engl. *Central Processing Unit* - CPU) upravlja obradom paketa i određuje njihovo prosljeđivanje kroz mrežu. Paketi se spremaju u međuspremnicima usmjernika dok se ne donese odluka o tome gdje će se usmjeriti paket [3].



**Slika 2.** Arhitektura usmjernika [3]

### 2.3. Usmjeravanje

Usmjeravanjem se određuje način prosljeđivanja paketa od njihove izvorišne mreže do krajnjeg odredišta, a preko posrednih čvorova. Usmjeravanje paketa provodi se na temelju tablica usmjerenja u kojima su zabilježene najbolje rute među pojedinim mrežnim odredištima. Zbog toga je za efikasno usmjeravanje presudan odgovarajući postupak stvaranja i održavanja tablica usmjerenja.

Tablica usmjerenja igra ključnu ulogu u određivanju najboljih ruta do svih odredišta unutar mreže. Kada usmjernik prosljeđuje pakete, on konzultira tablicu usmjerenja kako bi odredio optimalni put do željenog odredišta. Informacije u tablici usmjerenja mogu se popuniti na dva načina: ručnim unosom (statičko usmjeravanje) ili automatskim ažuriranjem (dinamičko usmjeravanje) [4].

U statičkom usmjeravanju, putevi između dva usmjernika ručno su konfigurirani i ne mogu se ažurirati automatski. Ako postoje promjene na mrežnoj strani, tablica usmjeravanja mora se ručno ažurirati kako bi odražavala nove puteve. Statičko usmjeravanje nudi poboljšanu sigurnost, jednostavnost dizajna i implementacije. Idealan je za manje i manje složene mreže gdje se promjene događaju rijetko.

Nasuprot tome, dinamičko usmjeravanje automatski ažurira tablicu usmjeravanja, prilagođavajući se promjenama u mreži. Kada dođe do promjene, poput kvara ili nove veze, zahvaćeni usmjerivači razmjenjuju informacije, a algoritmi se koriste za izračun novih putanja usmjeravanja. Tablica usmjeravanja se tada ažurira u skladu s tim informacijama. Dinamičko usmjeravanje posebno je prikladno za veće i složenije mreže u kojima dolazi do čestih promjena. Međutim, zbog automatskih ažuriranja i potencijalne izloženosti mrežnim promjenama, dinamičko usmjeravanje smatra se manje sigurnim od statičkog [4].

Protokol je skup pravila koja određuju kako dva uređaja međusobno komuniciraju te definiraju format podatkovnih paketa koji se šalju komunikacijskim linijama. Protokoli usmjeravanja usmjerivačima omogućuju dinamičko oglašavanje i učenje dostupnih ruta među pojedinim mrežnim uređajima, te zaključivanje koje od tih ruta su najbolje po nekom kriteriju. Protokoli usmjeravanja iz skupine TCP/IP protokolnog složaja su [5]:

- RIP (engl. *Routing Information Protocol*),
- OSPF (engl. *Open Shortest Path First*),
- IS-IS (engl. *Intermediate System to Intermediate System*),
- IGRP (engl. *Interior Gateway Routing Protocol*),
- EIGRP (engl. *Enhanced IGRP*),
- BGP (engl. *Border Gateway Protocol*).

Postoje dvije osnovne vrste usmjerivačkih protokola, a dijele se prema načinu izračunavanja optimalnog puta na [6]:

- Protokole koji se temelje na vektoru udaljenosti (engl. *distance-vector*),
- Protokole koji se temelje stanju veze (engl. *link-state*).

Protokoli koji se temelje na vektoru udaljenosti određuju najbolji put na osnovu informacije koliko je udaljeno odredište paketa. Udaljenost može biti broj usmjernika do

odredišta, a može biti i kombinacija nekih vrijednosti koje će definirati tu udaljenost. Susjednim usmjernicima se šalje cijela tablica usmjeravanja. Ovi protokoli su jednostavni i učinkoviti u malim mrežama te su laki za konfiguriranje. Najpoznatiji protokol vektora udaljenosti je RIP. Za velike mreže, protokoli koji se temelje na vektoru udaljenosti imaju loša konvergenijska svojstva, pa su zato razvijeni usmjerivački protokoli s boljim svojstvima, a to su protokoli koji se temelje stanju veze [6].

Protokoli koji se temelje stanju veze rade na način da svaki usmjernik zna topologiju mreže i ne šalje se cijela tablica usmjeravanja, nego se svim usmjernicima u mreži šalje samo informacija o stanju veze u obliku malih LSA (engl. *Link State Advertisement*) paketa. Na osnovu dobivenih informacija usmjernici ponovno izračunaju puteve. Ova metoda je pouzdanija, troši manje pojase širine mreže i jednostavnije je otkloniti nastalu pogrešku, nego u slučaju protokola koji se temelje na vektoru udaljenosti. Negativne strane ovakvog pristupa su što se koristi kompleksniji algoritam što znači veće opterećenje procesora usmjernika i veća potrošnja memorije. Protokol OSPF je predstavnik ove vrste protokola.

Usmjerivački protokoli se također dijele na unutarnje i vanjske. Unutarnji se koriste za usmjeravanje prometa unutar autonomnog sustava, a vanjski se koriste za usmjeravanje prometa između autonomnih sustava. Autonomni sustav (AS) se najčešće poklapa s administrativnim granicama mreže. Primjeri unutarnjih usmjerivačkih protokola su već spomenuti RIP i OSPF. Primjer vanjskog protokola usmjeravanja je BGP [6].

### **2.3. Topologija**

Mrežna topologija odnosi se na raspored različitih elemenata (čvorova, veza, uređaja) u mreži. Ona definira strukturu mreže, način na koji su čvorovi međusobno povezani i kako komuniciraju. Najčešća podjela mrežne topologije se odnosi na fizičku topologiju i logičku topologiju. Fizička mrežna topologija prikazuje tlocrt fizičkog rasporeda čvorova u mreži i njihove povezanosti. Vrste različitih fizičkih topologija su [7]:

- topologija od točke do točke (engl. *Point-to-point*),
- sabirnička topologija (engl. *Bus*),
- prstenasta topologija (engl. *Ring*),
- zvjezdasta topologija (engl. *Star*),

- stablasta topologija (engl. *Tree*),
- isprepletena topologija (engl. *Mesh*).

Topologija od točke do točke sastoji se od dva čvora povezana jednim linkom, preko kojeg međusobno komuniciraju.

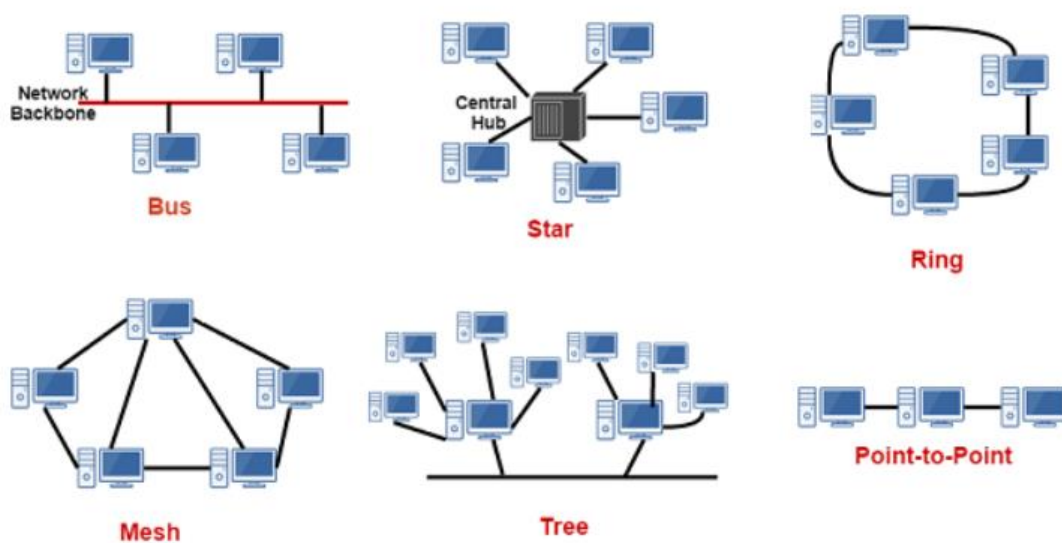
Sabirnička topologija koristi središnji vodič na koji su povezani ostali čvorovi. Vodič ima dva kraja koja moraju biti pravilno terminirana kako bi se spriječile refleksije signala i smetnje. U slučaju prekida u topologiji dolazi do kompletnog prestanka komunikacije između čvorova.

Prstenasta topologija povezuje čvorove kablovima s koncentраторom poput *hub-a* ili *switch-a*. Prestanak rada koncentratora zaustavlja cijelu mrežu.

Stablasta topologija ima centralni čvor (engl. *root*) i hijerarhijski povezane slojeve. Da bi topologija bila stablasta, treba imati najmanje tri sloja.

Isprepletena topologija se sastoji od više međusobno povezanih čvorova u mreži ili svih povezanih čvorova u mreži (engl. *full mesh*). Potpuna isprepletenost je rijetka zbog troškova i složenosti, tako da se koristi samo na mjestima gdje je najdužnije (npr. nuklearne centrale).

Logička mrežna topologija prikazuje tlocrt smjerova putanji paketa koji putuju između čvorova na mreži. Logičke topologije su najčešće povezane sa načinom na koji se pristupa mediju za slanje podataka (MAC). One se oslanjaju na primjenu unutar komunikacijskih protokola, a ne na sami fizički tlocrt mreže. Nije nužno da logička prstenasta topologija bude istovremeno i fizička prstenasta topologija [7]. Slika 3 prikazuje opisane topologije.



**Slika 3.** Prikaz mrežnih topologija [7]

### 3. UTJECAJ DULJINE PAKETA NA PERFORMANSE ČVORA

U ovom radu pod internetskim čvorom smatra se usmjernik. U takav čvor dolaze paketi različitih duljina koje generiraju različite aplikacije kao što su VoIP (engl. *Voice over Internet Protocol*), *online video igre*, *video streaming* itd.

Red je skup objekata (paketa) koji čekaju na posluživanje. U paketno komutiranoj mreži kao što je Internet gotovo je nemoguće predvidjeti koliko će korisnika, kada i u kojoj količini početi slati podatke pa su neki dijelovi mreže zagušeni, a neki nisu.

Čekanje na prijenos započinje kada paketi koji trebaju biti obrađeni i poslani dolaze brže nego je to moguće obraditi. Zbog toga proizlazi da što je veći broj paketa i njihova veličina, to će kašnjenje biti veće. U sustavima posluživanja s čekanjem i bez ograničenja reda čekanja, svi pristigli paketi bit će posluženi.

Različite aplikacije postavljaju različite zahtjeve u pogledu rukovanja mrežnim prometom koji generiraju. Svaka aplikacija stvara promet različitim brzinama i obično zahtijeva da mreža bude u stanju prenositi taj promet brzinom kojom se generira. Osim toga, aplikacije pokazuju različite razine tolerancije prema kašnjenju (engl. *delay*) i varijacijama u kašnjenju unutar mreže. Neke aplikacije mogu podnijeti određeni stupanj gubitka paketa (engl. *packet loss*), ali neke to ne mogu. Ovi zahtjevi aplikacija izraženi su putem odgovarajućih QoS (engl. *Quality of Service*) parametara [8].

Kašnjenje ili latencija je vrijeme koje je potrebno paketu da se prenese od izvora do odredišta. Telefonija je primjer mrežne usluge u stvarnome vremenu, koja je jako osjetljiva na kašnjenje. Zbog toga su paketi govornih aplikacija manjih duljina od npr. podatkovnih.

Na kašnjenje paketa kroz mrežu utječu sljedeći čimbenici [8]:

- kašnjenje zbog kodiranja i dekodiranja,
- kašnjenje zbog komprimiranja i dekomprimiranja,
- kašnjenje zbog paketizacije i depaketizacije,
- kašnjenje zbog prijenosa na linku,
- kašnjenje zbog propagacije,
- kašnjenje zbog usmjeravanja u čvorovima i
- kašnjenje zbog čekanja u međuspremnicima usmjerivača.

Neke komponente kašnjenja su fiksne, dok su druge varijabilne. Komponente koje se odnose na kašnjenja u mreži teško se mogu predvidjeti jer ovise o trenutnom opterećenju čvorova kao i o performansama mrežnih elemenata. Na varijabilnost određenih komponenata utječu različito vrijeme čekanja u čvorovima mreže i duljina paketa koja je različita za pojedine aplikacije, a i iste aplikacije mogu imati različite duljine paketa [8].

Varijacija kašnjenja (*jitter*) tipično se definira kao razlika u kašnjenju između susjednih paketa iste sesije. Potrebno je jasno razlikovati pojam *jitter* od varijacije kašnjenja. Varijacija kašnjenja odnosi se na mjeru koja pokazuje ukupnu varijabilnost kašnjenja tijekom promatranog vremenskog razdoblja, dok se *jitter* specifično odnosi na varijacije u kašnjenju između uzastopnih paketa unutar iste sesije. Mjere *jitter-a* ovise o učestalosti slanja paketa i fokusiraju se na kratkoročne efekte. S druge strane, varijacije kašnjenja nisu osjetljive na frekvenciju paketa, te obuhvaćaju i kratkoročne i dugoročne promjene. Prema tome, varijacija kašnjenja čini se boljim izborom.

Gubitak paketa nastaje onda kada dođe do prepunjivanja spremnika u čvorovima paketne mreže (usmjernicima), kao posljedica čekanja paketa u redovima za usmjeravanje. Međutim, za neke aplikacije, ako paket kasni prekomjerno, to je isto kao da je izgubljen. Zbog toga treba proširiti definiciju gubljenja, tako da se uključi prekomjerno kašnjenje paketa [8].

### **3.1. QoS zahtjevi za različite aplikacije**

Aplikacijski QoS odnosi se na zahtjeve u pogledu kvalitete koji se postavljaju pred aplikacije. U okviru aplikacijskog QoS-a, specificiraju se svojstva uređaja i mrežnih elemenata koji sudjeluju u procesu komuniciranja. QoS zahtjevi za aplikacije su tipično tzv. zahtjevi od kraja do kraja koje nameću odgovarajuće zahtjeve performansi i na mrežu i na krajnje sustave/aplikacije. QoS se odnosi na sposobnost sustava da pruži što bolju uslugu za odabrani promet. S obzirom na zahtjeve pojedinih vrsta aplikacija generalno mogu biti podijeljene u kategorije: aplikacije za prijenos podataka, govorne aplikacije i video aplikacije [8].

Na slici 4 prikazani su QoS zahtjevi za različite govorne i video aplikacije. Govorne aplikacije zahtijevaju kašnjenje manje od 150 ms, s maksimalnim ograničenjem do 400 ms, dok varijacija kašnjenja mora biti ispod 1 ms kako bi se osigurala kvaliteta govora. Ljudsko uho je tolerantno na umjereno izobličenje govornog signala, pa prihvatljiv gubitak paketa za govorne aplikacije iznosi do 3% PLR (engl. *packet loss ratio*).

Za video aplikacije, preporučeno kašnjenje je također ispod 150 ms, uz dodatno ograničenje za sinkronizaciju usana od 80 ms. Varijacija kašnjenja mora biti ispod 1 ms, a gubitak paketa ne smije prelaziti 1% kako bi se održala kvaliteta videoprijenosa.

Medium	Application	Degree of symmetry	Typical data rates	Key performance parameters and target values			
				One-way delay	Delay variation	Information loss (Note 2)	Other
Audio	Conversational voice	Two-way	4-64 kbit/s	<150 ms preferred (Note 1) <400 ms limit (Note 1)	< 1 ms	< 3% packet loss ratio (PLR)	
Audio	Voice messaging	Primarily one-way	4-32 kbit/s	< 1 s for playback < 2 s for record	< 1 ms	< 3% PLR	
Audio	High quality streaming audio	Primarily one-way	16-128 kbit/s (Note 3)	< 10 s	<< 1 ms	< 1% PLR	
Video	Videophone	Two-way	16-384 kbit/s	< 150 ms preferred (Note 4) <400 ms limit		< 1% PLR	Lip-synch: < 80 ms
Video	One-way	One-way	16-384 kbit/s	< 10 s		< 1% PLR	

**Slika 4.** QoS zahtjevi za glasovne i video aplikacije [9]

Na slici 5 prikazani su QoS zahtjevi za različite podatkovne aplikacije. Za aplikacije poput web-pregledavanja i transakcijskih usluga (npr. e-trgovina) prihvatljivo je kašnjenje do 4 s, bez gubitka paketa. Interaktivne igre i Telnet zahtijevaju vrlo nisko kašnjenje manje od 200 ms. Vrijednosti varijacije kašnjenja nisu specifično navedene, ali bi trebale biti minimalne kako bi se održala kvaliteta usluge. U suprotnom, varijabilnost kašnjenja može ozbiljno utjecati na korisničko iskustvo, posebno kod aplikacija koje zahtijevaju brzi odgovor. Gubitak paketa je kritičan i mora biti nula za gotovo sve aplikacije, osim za faks poruke kada može biti minimalan.



Medium	Application	Degree of symmetry	Typical amount of data	Key performance parameters and target values		
				One-way delay (Note)	Delay variation	Information loss
Data	Web-browsing – HTML	Primarily one-way	~10 KB	Preferred < 2 s /page Acceptable < 4 s /page	N.A.	Zero
Data	Bulk data transfer/retrieval	Primarily one-way	10 KB-10 MB	Preferred < 15 s Acceptable < 60 s	N.A.	Zero
Data	Transaction services – high priority e.g. e-commerce, ATM	Two-way	< 10 KB	Preferred < 2 s Acceptable < 4 s	N.A.	Zero
Data	Command/control	Two-way	~ 1 KB	< 250 ms	N.A.	Zero
Data	Still image	One-way	< 100 KB	Preferred < 15 s Acceptable < 60 s	N.A.	Zero
Data	Interactive games	Two-way	< 1 KB	< 200 ms	N.A.	Zero
Data	Telnet	Two-way (asymmetric)	< 1 KB	< 200 ms	N.A.	Zero
Data	E-mail (server access)	Primarily one-way	< 10 KB	Preferred < 2 s Acceptable < 4 s	N.A.	Zero
Data	E-mail (server to server transfer)	Primarily one-way	< 10 KB	Can be several minutes	N.A.	Zero
Data	Fax ("real-time")	Primarily one-way	~ 10 KB	< 30 s/page	N.A.	<10 <sup>-6</sup> BER
Data	Fax (store & forward)	Primarily one-way	~ 10 KB	Can be several minutes	N.A.	<10 <sup>-6</sup> BER
Data	Low priority transactions	Primarily one-way	< 10 KB	< 30 s	N.A.	Zero
Data	Usenet	Primarily one-way	Can be 1 MB or more	Can be several minutes	N.A.	Zero

Slika 5. QoS zahtjevi za podatkovne aplikacije [9]

### 3.2. Modeli sustava posluživanja

Obrada IP paketa odnosi se na način na koji mrežni uređaji, poput usmjernika i prekidača, upravljaju dolaznim paketima. Svaki uređaj ima ograničene kapacitete za obradu i prosljeđivanje paketa, što može rezultirati stvaranjem redova čekanja i zagušenjem. Kako bi se poboljšalo upravljanje mrežnim prometom, koriste se različiti modeli obrade koji određuju kako i kojim redosljedom paketi prolaze kroz mrežu, osiguravajući efikasnost i smanjenje kašnjenja.

Kendall-ov model sastoji se od 6 oznaka koji su označeni slovima [10]:

A/B/C/D/E/F

Značenje oznaka je sljedeće:

A - distribucija međudolaznih vremena,

B - distribucija vremena posluživanja,

C - broj poslužitelja,

D - kapacitet sustava,

E - kapacitet izvora,

F – disciplina posluživanja.

Postoji više različitih distribucija kojima se mogu opisati prometni tokovi, uključujući eksponencijalnu, determinističku, Gaussovu, Poissonovu, uniformnu distribuciju itd. U nastavku je za primjer opisana razlika između eksponencijalne i determinističke distribucije vremena posluživanja paketa. U eksponencijalnom sustavu duljina paketa može se opisati eksponencijalnom distribucijom, dok u determinističkom sustavu svi paketi imaju istu veličinu. Eksponencijalna distribucija se često koristi u modelima redova čekanja zbog specifičnih svojstava, poput konstantne stope dolaska ili odlaska paketa. S druge strane, deterministička distribucija podrazumijeva da dolasci ili vrijeme posluživanja imaju fiksne vremenske intervale, što znači da su događaji posluživanja ujednačeni [10].

Tri osnovna modela sustava posluživanja su: M/M/1, M/M/m, i M/D/1. Ovo su skraćene oznake, jer se koriste samo prva 3 polja Kendall-ova modela. Podrazumijeva se da su D i E polja označavaju beskonačnost, tj. da kapaciteti sustava i izvora nisu ograničeni. F oznaka podrazumijeva FCFS disciplinu posluživanja (engl. *First-Come, First-Served*), tj. paketi u redu poslužuju se točno onim redosljedom kojim su stigli, bez prioriteta [10].

Za svaki od navedenih modela vrijede iste osnovne relacije bez obzira na funkciju koja opisuje tok dolazaka i vrijeme posluživanja, gdje vrijeme čekanja i duljina reda izravno ovise o stopi dolazaka paketa ( $\lambda$ ) i vremenu posluživanja ( $T_s$ ). U nastavku su prikazani izrazi (formule) koji se mogu koristiti za opisivanje performansi internetskog čvora, preuzeti iz [11].

Prosječno kašnjenje paketa sastoji se od prosječnog vremena posluživanja ( $T_s$ ) i prosječnog čekanja paketa ( $T_w$ ).

$$T_q = T_w + T_s \quad (1)$$

Prosječno vrijeme posluživanja paketa ( $T_s$ ) prikazano je sljedećim izrazom:

$$T_s = \frac{\bar{p}}{C} \quad (2)$$

gdje je  $\bar{p}$  prosječna duljina paketa, a  $C$  brzina prijenosa.

Veličina prometa ( $A$ ) se može izračunati uz prosječno vrijeme posluživanja ( $T_s$ ) i intenzitet nailaska paketa ( $\lambda$ ):

$$A = \lambda \cdot T_s \quad (3)$$

Prosječna duljina reda ( $L_w$ ) ovisi o intenzitetu nailaska paketa i prosječnom čekanju ( $T_w$ ), te se može prikazati sljedećim izrazom:

$$L_w = \lambda \cdot T_w \quad (4)$$

### 3.2.1. M/M/1 model

Model M/M/1 koristi Kendall-ovo označavanje različitih karakteristika sustava posluživanja. Ovaj model je ključan za izračunavanje prosječnog kašnjenja paketa ( $T_q$ ) u sustavima s jednim kanalom.

Prva oznaka „M“ označava eksponencijalnu razdiobu međudolaznih vremena (N paketa dolazi u određenom vremenskom intervalu). Poisson-ov proces često se koristi za opisivanje dolaznog toka paketa u internetskim čvorovima.

Druga oznaka „M“ znači da paketi koji dolaze u sustav posluživanja su različite veličine i da se njihove duljine, tj. vrijeme posluživanja, mogu opisati eksponencijalnom razdiobom.

Treća oznaka „1“ se odnosi na broj poslužitelja, odnosno prijenosnih kanala.

Prosječno vrijeme čekanja paketa ( $T_w$ ) može se prikazati sljedećim izrazom:

$$T_w = \frac{\rho \bar{p}}{(1 - \rho)C} \quad (5)$$

gdje je  $\rho$  prometno opterećenje linka, a ostale oznake imaju isto značenje kako je i prethodno navedeno.

Kada se u izraz (1) uvedu izrazi proširenih formula (2) i (5), dobije se formula (6) pomoću koje se izračunava prosječno kašnjenje paketa.

$$T_q = \frac{\bar{p}}{C} + \frac{\rho \bar{p}}{(1 - \rho)C} = T_s = \left(1 + \frac{\rho}{1 - \rho}\right) = \frac{T_s}{1 - \rho} \quad (6)$$

U sustavu se nalazi samo jedan kanal (poslužitelj), pa su veličina prometa ( $A$ ) i prometno opterećenje linka ( $\rho$ ) jednaki:

$$A = \rho \cdot m, A = \rho \cdot 1, A = \rho \quad (7)$$

### 3.2.2. M/M/m model

Razlika u označavanju između modela M/M/1 i M/M/m je u trećoj oznaci koja se odnosi na broj kanala koji se koriste u sustavu. Broj kanala se označuje malim slovom „ $m$ “ i može biti u intervalu  $1 < m < \infty$ .

Svrha M/M/m modela također je izračunavanje prosječnog kašnjenja paketa ( $T_q$ ) za  $N$  pridošlih paketa koji prolaze kroz  $m$  kanala.

Prosječno vrijeme čekanja paketa ( $T_w$ ) prikazano je sljedećim izrazom:

$$T_w = \frac{\pi \bar{p}}{(m - A)C} \quad (8)$$

gdje je  $\pi$  vjerojatnost da će pristigli paket čekati na posluživanje.

Kada se u izraz (1) uvedu izrazi proširenih formula (2) i (8), dobije se formula (9) pomoću koje se izračunava prosječno kašnjenje paketa.

$$T_q = \frac{\bar{p}}{C} + \frac{\pi \bar{p}}{(m - A)C} \quad (9)$$

U sustavu se nalazi  $m$  linkova, stoga se veličina prometa ( $A$ ) može izraziti korištenjem vrijednosti za prometno opterećenje linka ( $\rho$ ) prema izrazu:

$$A = \rho \cdot m \quad (10)$$

### 3.2.3. M/D/1 model

Sustav M/D/1 također ima istu prvu oznaku kao i prethodna dva sustava.

Druga oznaka „D“ je različita zato što paketi koji dolaze na posluživanje u čvor više nisu različitih duljina, već su svi jednake duljine.

Treća oznaka je jedan što znači da je također riječ o sustavu s jednim kanalom.

Svrha M/D/1 modela također je izračunavanje prosječnog kašnjenja paketa ( $T_q$ ) za N pristiglih s eksponencijalno distribuiranim međudolaznim vremenima.

Prosječno vrijeme čekanja paketa ( $T_w$ ) može se prikazati sljedećim izrazom:

$$T_w = \frac{\rho \bar{p}}{2(1 - \rho)C} \quad (11)$$

Kada se u izraz (1) uvedu izrazi proširenih formula (2) i (11), dobije se formula (12) pomoću koje se izračunava prosječno kašnjenje paketa.

$$T_q = \frac{\bar{p}}{C} + \frac{\rho \bar{p}}{2(1 - \rho)C} \quad (12)$$

U sustavu se nalazi samo jedan link, stoga se veličina prometa ( $A$ ) računa prema izrazu (7).

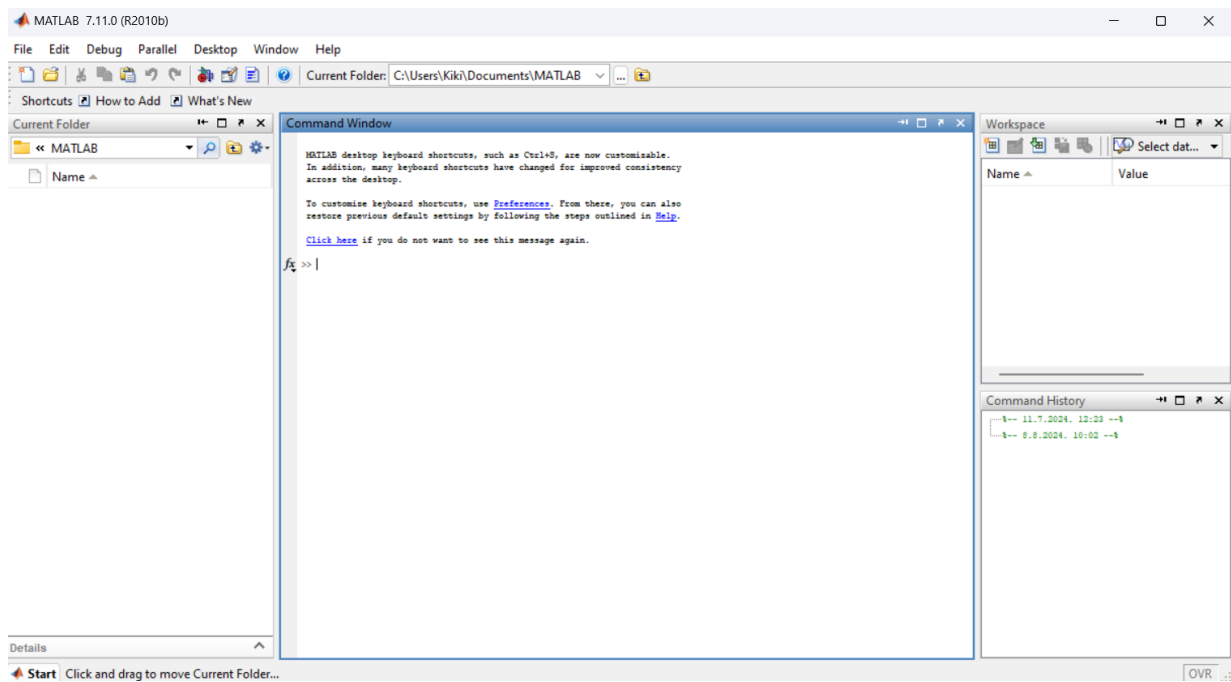
## 4. TESTNO OKRUŽENJE U MATLAB-U

MATLAB (Matrix Laboratory) je višenamjenski softverski alat razvijen od strane MathWorks-a, koji se koristi za računalne simulacije, numeričke proračune, analizu podataka i vizualizaciju. Koristeći napredno programsko okruženje, MATLAB omogućuje inženjerima i znanstvenicima brzu i učinkovitu analizu podataka, implementaciju algoritama, razvoj modela i kreiranje korisničkih sučelja. Glavne značajke MATLAB-a uključuju [12]:

1. Interaktivno okruženje: MATLAB omogućava brzo testiranje i evaluaciju ideja kroz interaktivne sesije.
2. Funkcionalnost za matrice i linearnu algebru: kako je originalno razvijen za rad s matricama, MATLAB nudi opsežnu podršku za linearne algebarske operacije.
3. Algoritmi i numeričke metode: MATLAB uključuje brojne ugrađene funkcije za numeričku integraciju, diferencijaciju, optimizaciju i rješavanje diferencijalnih jednadžbi.
4. Vizualizacija podataka: MATLAB nudi moćne alate za grafičku prezentaciju podataka, uključujući 2D i 3D grafiku, animacije i interaktivne grafikone.
5. Simulink: integrirani alat za modeliranje, simulaciju i analizu dinamičkih sustava, koristi se u različitim industrijama za projektiranje i simulaciju kontrolnih sustava, obradu signala i druge primjene.

MATLAB je također zamišljen kao sustav u kojem korisnik na jednostavan način može graditi svoje vlastite alate i biblioteke te modificirati postojeće. Slika 6 prikazuje sučelje programskog alata Matlab nakon pokretanja programa.

Simulink je dio MATLAB-a namijenjen simuliranju dinamičkih sustava. Za sam unos i opis sustava koji se simulira koristi se jednostavno grafičko sučelje u kojem se sastavlja model kombinirajući gotove komponente. Takvim pristupom je simulacija sustava značajno olakšana jer se od korisnika ne zahtijeva unos diferencijalnih ili diferencijskih jednadžbi koje opisuju sustav uz poznavanje MATLAB programskog jezika već je dovoljno znati blok-shemu sustava [12].



Slika 6. Programsko sučelje Matlab-a

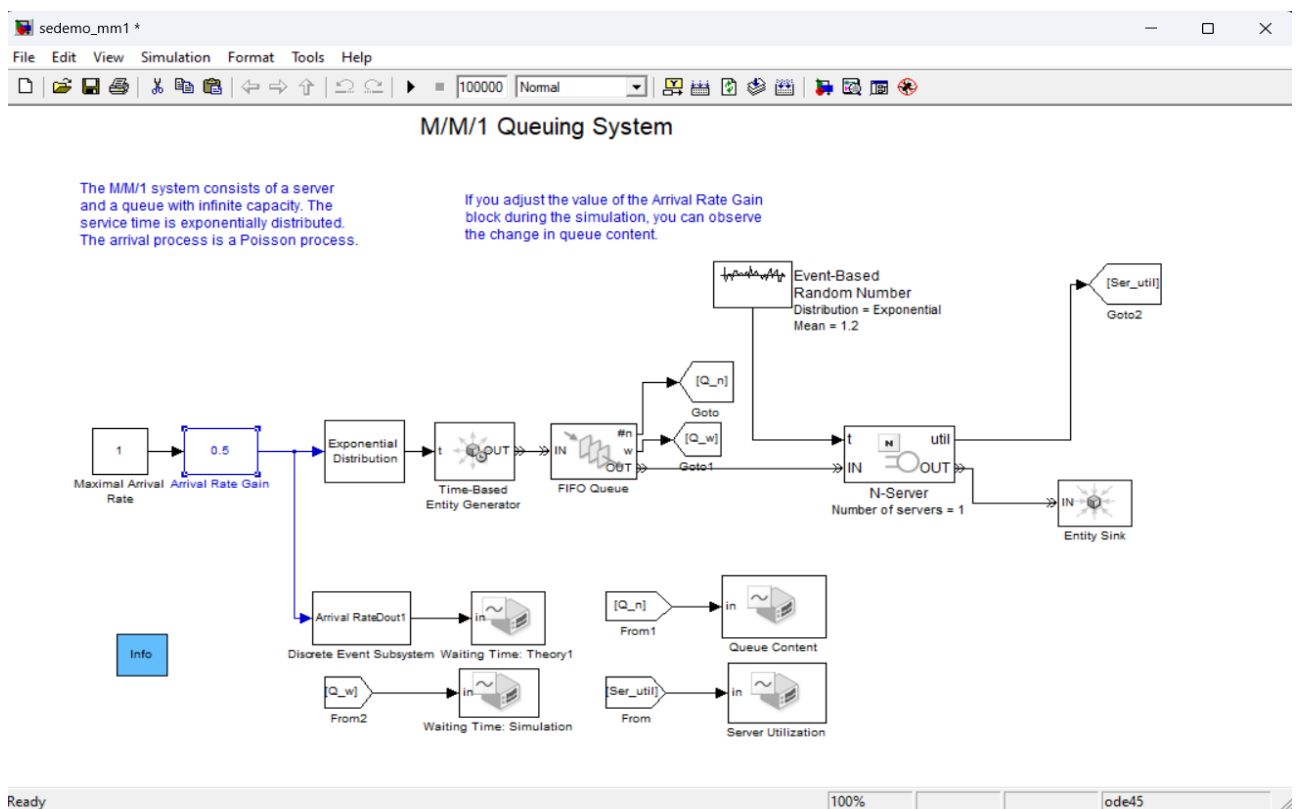
#### 4.1. Simulacija M/M/1 modela

U ovom radu, simuliran je M/M/1 sustav redova, koji se sastoji od jednog poslužitelja i reda s beskonačnim kapacitetom. Dolazni proces je Poissonov proces, a vrijeme posluživanja je eksponencijalno distribuirano. Ova simulacija pomaže u istraživanju kako promjene u duljini paketa utječu na performanse mreže, što je ključno za optimizaciju i projektiranje učinkovitih mrežnih sustava. Korišteni model je prikazan na slici 7, a sastoji se od sljedećih blokova:

1. Maximal Arrival Rate: postavlja maksimalnu stopu dolazaka entiteta u sustav.  
U ovom primjeru, vrijednost je postavljena na 1 entitet po jedinici vremena.
2. Arrival Rate Gain: prikazuje intenzitet nailazaka paketa u sustav.
3. Exponential Distribution: generira vrijeme između dolazaka prema eksponencijalnoj raspodjeli, što je karakteristično za Poissonov proces.
4. Time-Based Entity Generator: generira entitete u sustavu na temelju eksponencijalne distribucije vremena dolazaka.
5. FIFO Queue: prvi-ulaz-prvi-izlaz (engl. *first in, first out*) red koji prima entitete iz generatora i zadržava ih dok nisu poslani na posluživanje. Svi paketi se

jednako tretiraju i stavljaju u isti red. Paket koji je prvi došao, prvi će biti i poslužen.

6. Event-Based Random Number: generira eksponencijalno distribuirane nasumične brojeve sa zadanom prosječnom vrijednošću. Ta vrijednost zapravo predstavlja prosječno vrijeme posluživanja.
7. N-Server (Number of servers): simulira poslužitelje koji uslužuju entitete iz reda. U ovom slučaju, samo je jedan poslužitelj.
8. Entity Sink: prima entitete koji su prošli kroz poslužitelj i označava završetak njihove obrade.
9. Discrete Event Subsystem: sadrži dodatne blokove za prikupljanje i prikaz statističkih podataka kao što su:
  - Queue Content: prikazuje broj entiteta u redu,
  - Server Utilization: prikazuje iskorištenost poslužitelja,
  - Waiting Time: Theory i Waiting Time: Simulation: prikazuju teoretsko i simulirano vrijeme čekanja.



**Slika 7.** Prikaz M/M/1 modela



Prikazani M/M/1 model može se jednostavno prilagoditi za simulaciju ostalih modela (M/D/1 i M/M/m) promjenom nekoliko parametara.

Kako bi se osnovni M/M/1 model prilagodio za M/M/m model, potrebno je promijeniti broj poslužitelja unutar bloka N-Server (Number of servers). U bloku se postavlja broj poslužitelja ( $m$ ) na željenu vrijednost. Na primjer, za simulaciju M/M/3 modela, broj poslužitelja treba postaviti na 3. Ova promjena omogućuje paralelni rad više poslužitelja koji poslužuju dolazne pakete iz istog reda.

Za simulaciju M/D/1 modela potrebno je promijeniti distribuciju vremena posluživanja u modelu. U M/M/1 modelu vrijeme posluživanja je eksponencijalno distribuirano. Za M/D/1 model potrebno je tu distribuciju promijeniti u determinističku, odnosno fiksnu vrijednost. U Event-Based Random Number bloku potrebno je postaviti konstantnu vrijednost, koja se odnosi na vrijeme posluživanja. Ova promjena osigurava da svi paketi imaju isto vrijeme posluživanja.

Ograničenje kapaciteta reda u simulacijskom modelu može se jednostavno podesiti unutar bloka FIFO Queue. U postavkama toga bloka moguće je definirati maksimalni broj paketa koje red može prihvatiti, prije nego što bude odbačen.

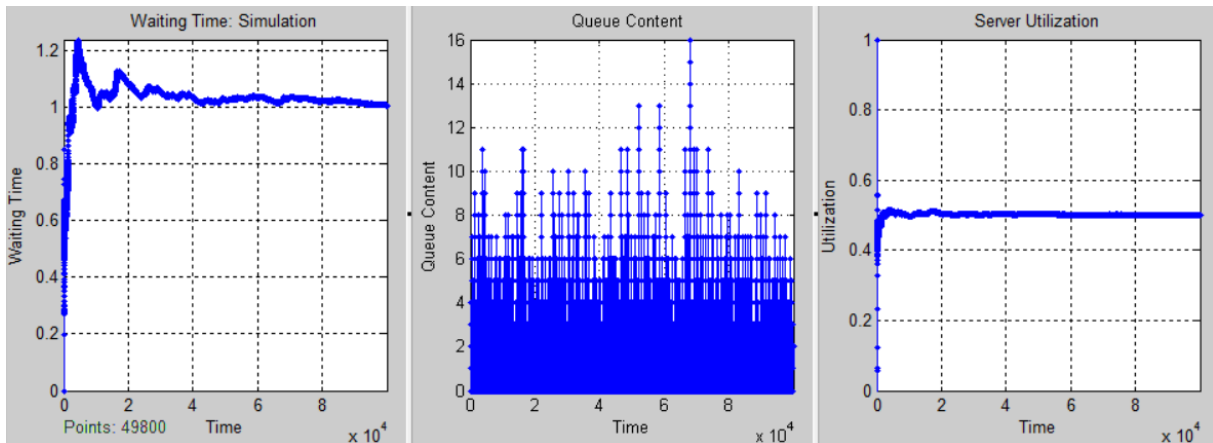
#### **4.2. Testni scenariji**

U ovom radu, simulacija ne koristi konkretne entitete za promjenu duljine paketa, već koristi red čekanja i vrijeme posluživanja kako bi simulirao utjecaj duljine paketa na performanse čvora. Uvidom u izraz (3), prosječno vrijeme posluživanja ( $T_s$ ) ovisno je o prosječnoj duljini paketa i brzini prijenosa. S obzirom da je brzina u navedenoj simulaciji konstantna, duljina paketa se može promatrati kroz vrijeme posluživanja. Bitno je napomenuti kako gubitak paketa u ovoj simulaciji iznosi nula, jer je pretpostavka da je rep dovoljno dugačak da spremi sve pakete.

Može se interpretirati kao duljina paketa u kontekstu vremena potrebnog za obradu paketa. Promjenom vrijednosti u Event-Based Random Number bloku, prilagođava se prosječno vrijeme posluživanja, što indirektno utječe na duljinu paketa. Fokus je na prilagodbi vremena posluživanja ( $T_s$ ) kako bi se istražilo kako ove promjene utječu na ključne performanse sustava, kao što su duljina reda čekanja, prosječno vrijeme čekanja i iskorištenost poslužitelja.

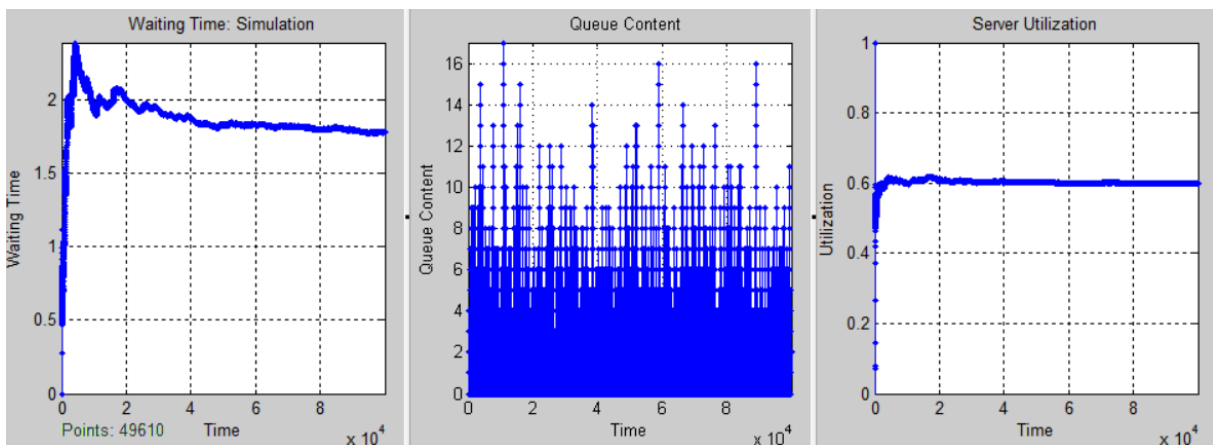
Scenariji simulacije obuhvaćaju različite vrijednosti  $T_s$  (1 / 1,2 / 1,4 / 1,6 / 1,8 i 1,9) gdje svaka vrijednost  $T_s$  daje uvid u različite režime rada sustava. U simulaciji nije definirana specifična mjerna jedinica za vrijeme, nego se vrijeme promatra kroz generičku vremensku jedinicu.

Na slici 8 su prikazane karakteristike sustava za 1. scenarij  $T_s = 1$ . Lijevi graf (Waiting Time: Simulation) prikazuje simulirano prosječno vrijeme čekanja paketa u redu tijekom vremena. Središnji graf (Queue Content) prikazuje broj entiteta u redu čekanja tijekom vremena. Desni graf (Server Utilization) prikazuje iskorištenost poslužitelja, tj. postotak vremena tijekom kojeg je poslužitelj bio zauzet obradom paketa. Prema rezultatima za prvi scenarij, prosječno vrijeme čekanja iznosi 1, a iskorištenost poslužitelja je 0,5.



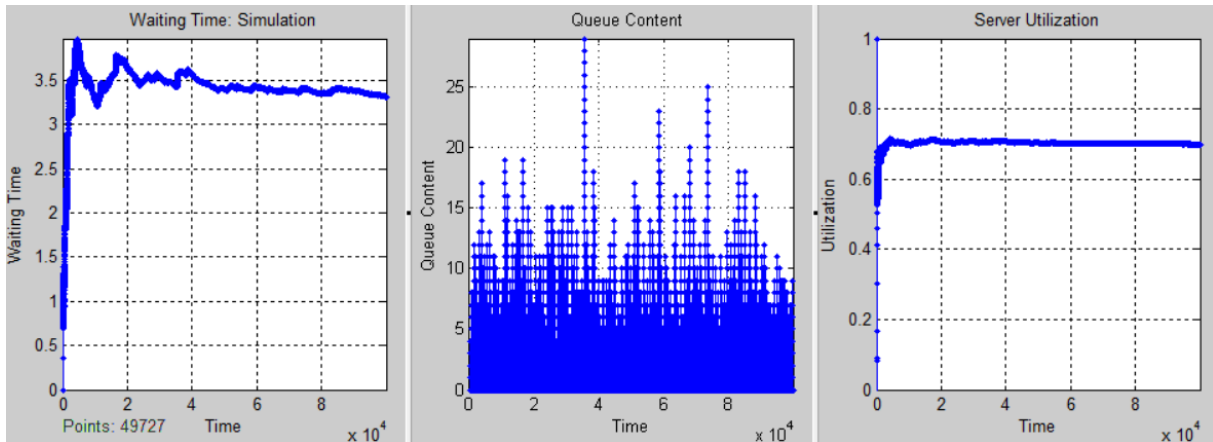
**Slika 8.** Karakteristike sustava za 1. scenarij

Slika 9 prikazuje karakteristike sustava za 2. scenarij  $T_s = 1,2$ . Prosječno vrijeme čekanja iznosi oko 1,8, a iskorištenost poslužitelja 0,6.



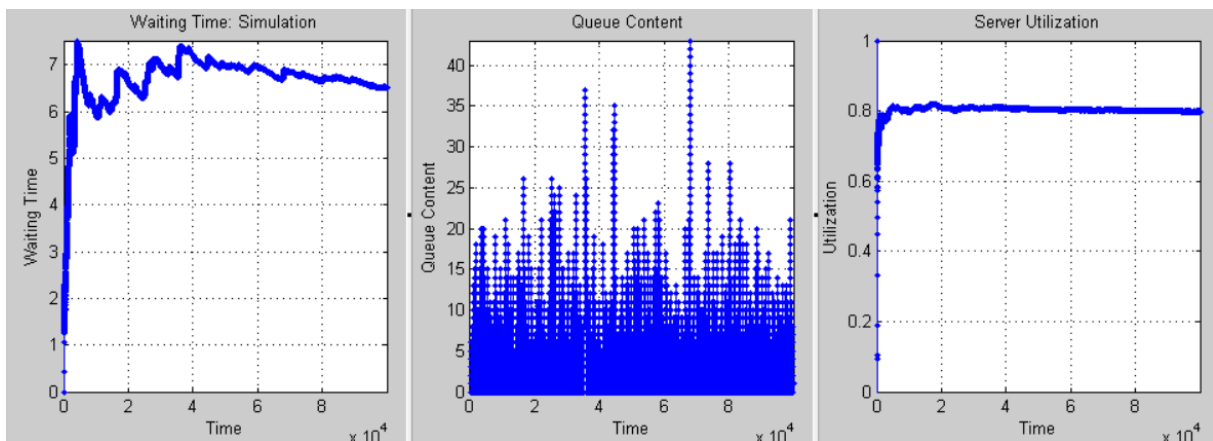
**Slika 9.** Karakteristike sustava za 2. scenarij

Karakteristike sustava za 3. scenarij  $T_s = 1,4$  prikazani su na slici 10. Prosječno vrijeme čekanja iznosi oko 3,2, a iskorištenost poslužitelja 0,7.



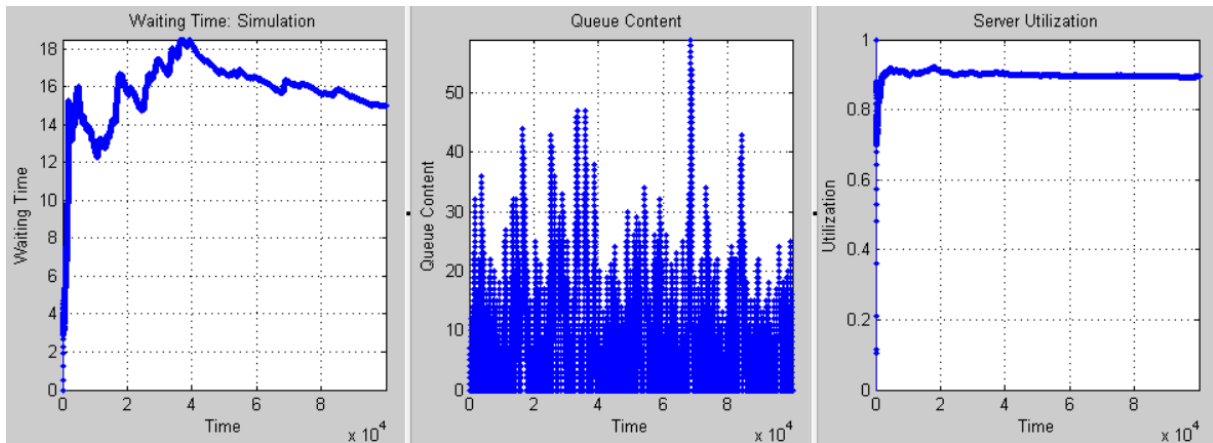
**Slika 10.** Karakteristike sustava za 3. scenarij

Slika 11 prikazuje karakteristike sustava za 4. scenarij  $T_s = 1,6$ . Prosječno vrijeme čekanja iznosi oko 6,3, a iskorištenost poslužitelja 0,8.



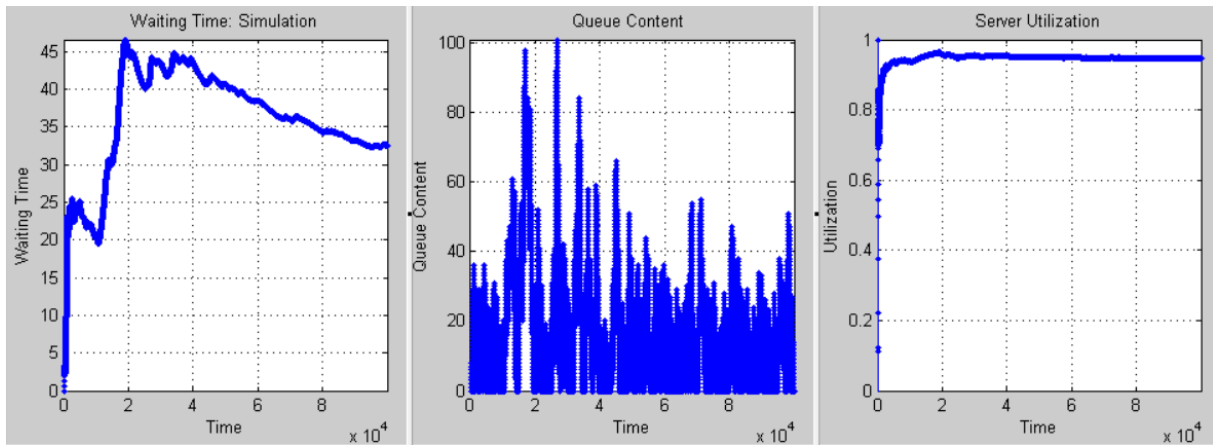
**Slika 11.** Karakteristike sustava za 4. scenarij

Na slici 12 su prikazane karakteristike sustava za 5. scenarij  $T_s = 1,8$ . Prosječno vrijeme čekanja iznosi oko 15, a iskorištenost poslužitelja 0,9.



**Slika 12.** Karakteristike sustava za 5. scenarij

Slika 13 prikazuje karakteristike sustava za 6. simulaciju  $T_s = 1,9$ . Prosječno vrijeme čekanja iznosi oko 35, a iskorištenost poslužitelja 0,95.



**Slika 13.** Karakteristike sustava za 6. scenarij

## 5. OPIS TESTNIH SCENARIJA

Kao što je pokazano u prethodnom poglavlju, simuliran je rad čvora s različitim vremenima posluživanja paketa u sustavu kroz 6 scenarija. Rezultati simulacije se mogu usporediti sa teorijskim vrijednostima koje je moguće izračunati prema izrazima iz poglavlja 3.

Intenzitet dolazaka u svakom je scenariju definiran jednako,  $\lambda = 0.5$ . Prema izrazu (3) i (7), može se izračunati prometno opterećenje poslužitelja ( $\rho$ ) za svaki scenarij. Uz poznati iznos opterećenja poslužitelja se zatim može izračunati prosječno kašnjenje ( $T_q$ ) prema izrazu (6). Zatim se prosječno vrijeme čekanja ( $T_w$ ) može provjeriti iz izraza (1). Nakon što je provjeren i poznat iznos vremena čekanja, može se izračunati prosječna duljina reda ( $L_w$ ) prema izrazu (4).

Vrijednosti temeljene na teoriji služe kao referentna točka za procjenu točnosti simulacije. U svakom scenariju vrijednost  $T_s$  izravno utječe na sve ostale parametre.

U prvom scenariju vrijeme posluživanja  $T_s$  postavljeno je na 1. Uz  $T_s = 1$ , prosječno vrijeme čekanja ( $T_w$ ) je 1, a prosječna duljina reda ( $L_w$ ) je 0,5 paketa. Prosječno kašnjenje ( $T_q$ ) iznosi 2, dok je iskorištenost poslužitelja ( $\rho$ ) 0,5.

Ovaj scenarij prikazuje osnovni rad sustava s kratkim vremenom posluživanja od 1, što simulira sustav s relativno brzom obradom paketa. U takvom sustavu poslužitelj može učinkovito obrađivati dolazne pakete bez stvaranja značajnog zagušenja. Red čekanja je relativno kratak, a opterećenje poslužitelja je dovoljno nisko da održava stabilne performanse bez značajnog kašnjenja.

U drugom scenariju, vrijeme posluživanja  $T_s$  povećano je na 1,2, što dovodi do povećanja prosječnog vremena čekanja ( $T_w$ ) na 1,8. S porastom  $T_s$ , prosječna duljina reda ( $L_w$ ) također raste na 0,9 paketa. Prosječno kašnjenje ( $T_q$ ) se povećava na 3, dok iskorištenost poslužitelja ( $\rho$ ) raste na 0,6.

Povećanjem vremena posluživanja, sustav postaje nešto sporiji u obradi dolaznih paketa. Iako se na prvi pogled ova promjena čini minimalnom, u kontekstu M/M/1 sustava i malo povećanje vremena posluživanja može dovesti do primjetnog porasta vremena čekanja i duljine reda. Povećava se opterećenje poslužitelja, što znači da će red čekanja postati dulji, a

paketi će duže čekati na posluživanje. Sustav je još uvijek u stanju održavati prihvatljive performanse, ali se mogu uočiti prvi znakovi opterećenja.

Kod  $T_s = 1,4$ , primjetno je daljnje povećanje vremena čekanja ( $T_w$ ) na 3,27, dok prosječna duljina reda ( $L_w$ ) raste na 1,63 paketa. Prosječno kašnjenje ( $T_q$ ) sada iznosi 4,67, a iskorištenost poslužitelja ( $\rho$ ) raste na 0,7.

Daljnjim povećanjem vremena posluživanja sustav počinje pokazivati jasnije znakove zagušenja. Red čekanja postaje znatnije dulji, a paketi kasne sve više. Sustav se približava granici svoje efikasnosti, gdje male promjene u opterećenju mogu imati velik utjecaj na ukupne performanse.

U četvrtom scenariju, s  $T_s = 1,6$ , dolazi do značajnog skoka u prosječnom vremenu čekanja ( $T_w$ ), koje sada iznosi 6,4. Prosječna duljina reda ( $L_w$ ) povećava se na 3,2 paketa, dok prosječno kašnjenje ( $T_q$ ) doseže 8. Iskorištenost poslužitelja ( $\rho$ ) također se povećava na 0,8.

Ovaj scenarij jasno pokazuje kako sustav postaje sve zagušeniji s povećanjem duljine dolaznih paketa, tj. vremena posluživanja. Sustav ulazi u fazu gdje postaje sve manje učinkovit, s većim brojem paketa koji čekaju na obradu. Povećana iskorištenost poslužitelja sugerira da se poslužitelj nalazi blizu svojeg maksimalnog kapaciteta, gdje bilo kakvo dodatno opterećenje može značajno smanjiti performanse sustava.

S  $T_s = 1,8$ , sustav ulazi u stanje visokog opterećenja. Prosječno vrijeme čekanja ( $T_w$ ) naglo raste na 16,2, dok se prosječna duljina reda ( $L_w$ ) povećava na 8,1 paket. Prosječno kašnjenje ( $T_q$ ) sada iznosi 18, dok iskorištenost poslužitelja ( $\rho$ ) doseže 0,9.

Ovo stanje sustava ukazuje na blizinu zasićenja, pri čemu poslužitelj jedva uspijeva obraditi sve dolazne pakete. Redovi čekanja postaju vrlo dugi, a paketi moraju čekati znatno dulje na posluživanje. Ovaj scenarij jasno pokazuje kako sustav postaje preopterećen i kako se performanse pogoršavaju. Sustav je sada blizu granice zasićenja, gdje poslužitelj više nije u stanju učinkovito upravljati dolaznim prometom.

U posljednjem 6. scenariju, vrijeme posluživanja  $T_s$  postavljeno je na 1,9, što dovodi sustav na rub zasićenja. Prosječno vrijeme čekanja ( $T_w$ ) iznosi 36,1, a prosječna duljina reda ( $L_w$ ) je 18,05 paketa. Prosječno kašnjenje ( $T_q$ ) iznosi 38, dok je iskorištenost poslužitelja ( $\rho$ ) 0,95.

Sustav dolazi blizu krajnje granice efikasnosti. Redovi čekanja postaju još dulji, a vrijeme čekanja dramatično se povećava. Ovaj scenarij pokazuje sustav u gotovo potpuno zasićenom stanju. Opterećenje je vrlo blizu maksimalne razine, a svaki dodatni paket dodatno pogoršava situaciju, dovodeći do eksponencijalnog povećanja kašnjenja.

Nakon opisa svakog scenarija pojedinačno, svi ključni parametri su navedeni u tablici 1. Može se primijetiti da simulacijski rezultati u velikoj mjeri odgovaraju teoretskim očekivanjima, što ukazuje na to da je korištena simulacija ispravna i da precizno replicira ponašanje sustava u stvarnim uvjetima.

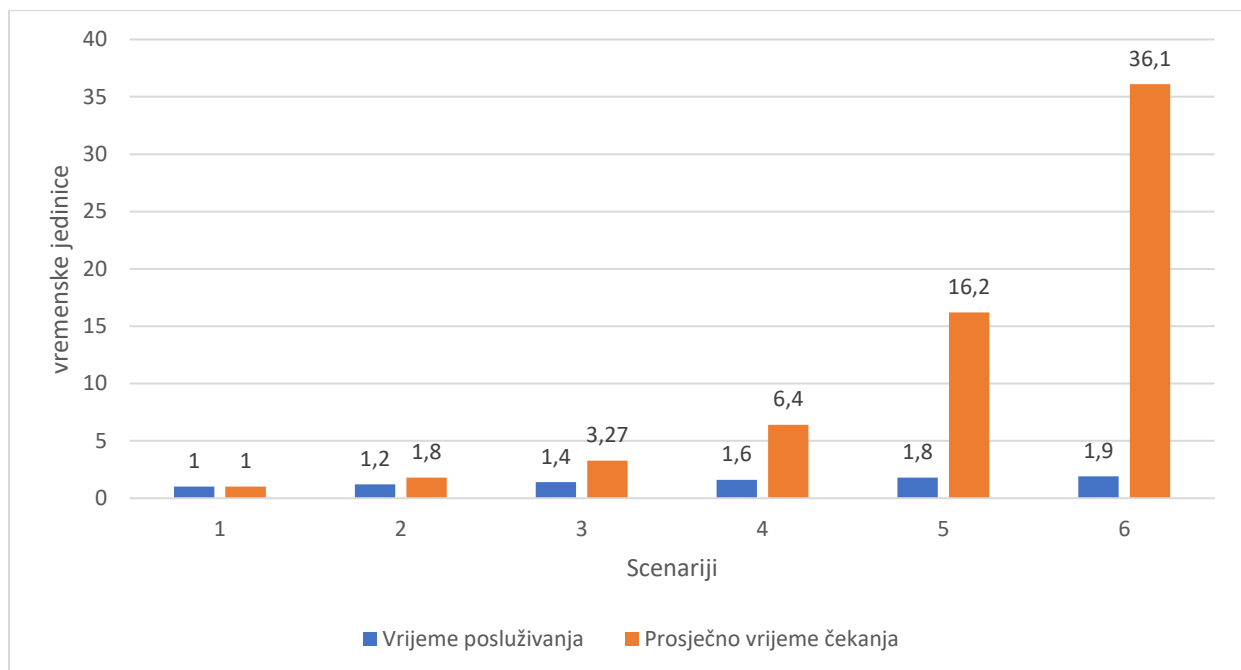
**Tablica 1.** Performanse čvora za svaki scenarij

Scenarij	Vrijeme posluživanja ( $T_s$ )	Prosječno vrijeme čekanja ( $T_w$ )	Prosječna duljina reda ( $L_w$ )	Prosječno kašnjenje ( $T_q$ )	Iskorištenost poslužitelja ( $\rho$ )
1	1	1	0,5	2	0,5
2	1,2	1,8	0,9	3	0,6
3	1,4	3,27	1,63	4,67	0,7
4	1,6	6,4	3,2	8	0,8
5	1,8	16,2	8,1	18	0,9
6	1,9	36,1	18,05	38	0,95

## 6. REZULTATI ANALIZA

U ovom poglavlju odrađena je ukupna analiza rezultata simulacije kako duljina paketa, odnosno vrijeme posluživanja ( $T_s$ ), utječe na performanse sustava. U nastavku su grafički prikazani odnosi vremena posluživanja s ključnim parametrima kao što su prosječno vrijeme čekanja ( $T_w$ ), prosječna duljina reda ( $L_w$ ) i prosječno kašnjenje ( $T_q$ ).

Graf 1 prikazuje odnos između vremena posluživanja ( $T_s$ ) i prosječnog vremena čekanja u sustavu ( $T_w$ ). Na početku dok je  $T_s$  relativno nizak,  $T_w$  ostaje na minimalnim vrijednostima, što ukazuje na sustav s malim opterećenjem, gdje se paketi brzo obrađuju i čekanja su mala. Međutim, kako  $T_s$  raste,  $T_w$  počinje eksponencijalno rasti. Ova promjena ukazuje na to da sustav postaje zagušeniji kako vrijeme obrade pojedinog paketa raste, što uzrokuje gomilanje paketa u redu čekanja i produljenje vremena koje provode čekajući na posluživanje. Eksponencijalni rast  $T_w$  ukazuje na to da postoji kritična točka nakon koje čak i mala promjena u  $T_s$  može rezultirati znatnim pogoršanjem performansi sustava. Može se zaključiti da veća duljina paketa rezultira većim čekanjem na posluživanje.

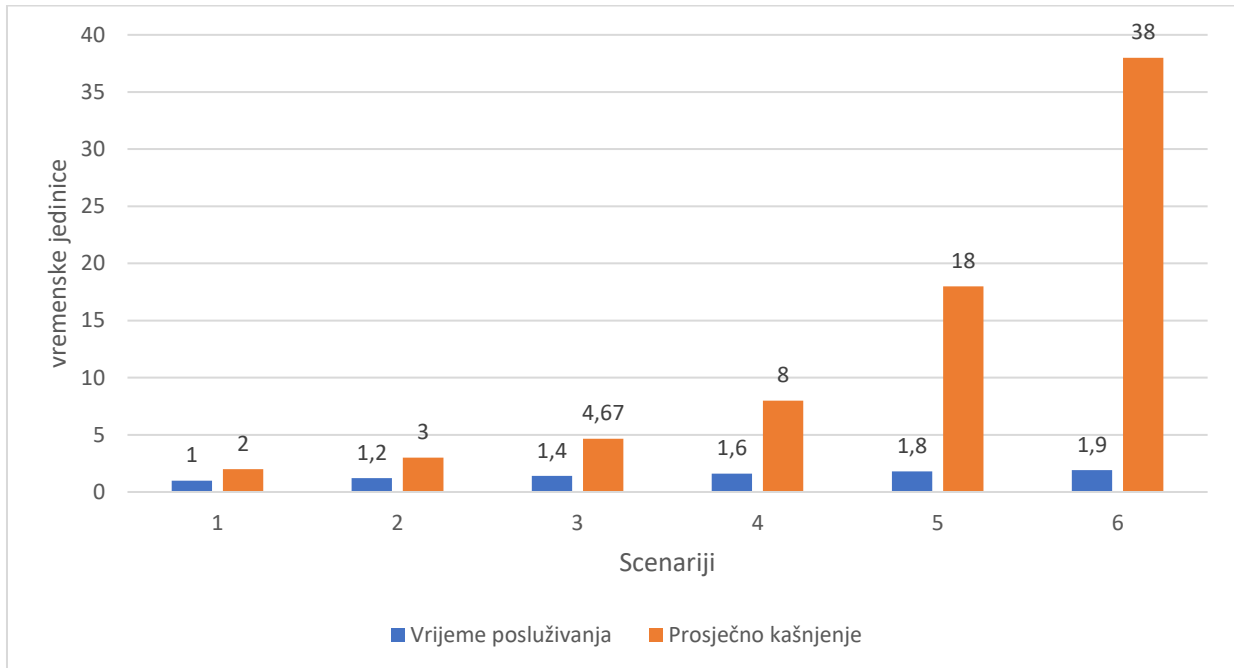


**Graf 1.** Odnos vremena posluživanja i prosječnog vremena čekanja

Graf 2 prikazuje kako vrijeme posluživanja ( $T_s$ ) utječe na prosječno kašnjenje ( $T_q$ ), koje uključuje ukupno vrijeme koje paket provodi u sustavu (čekanje u redu i obradu). Sličan trend

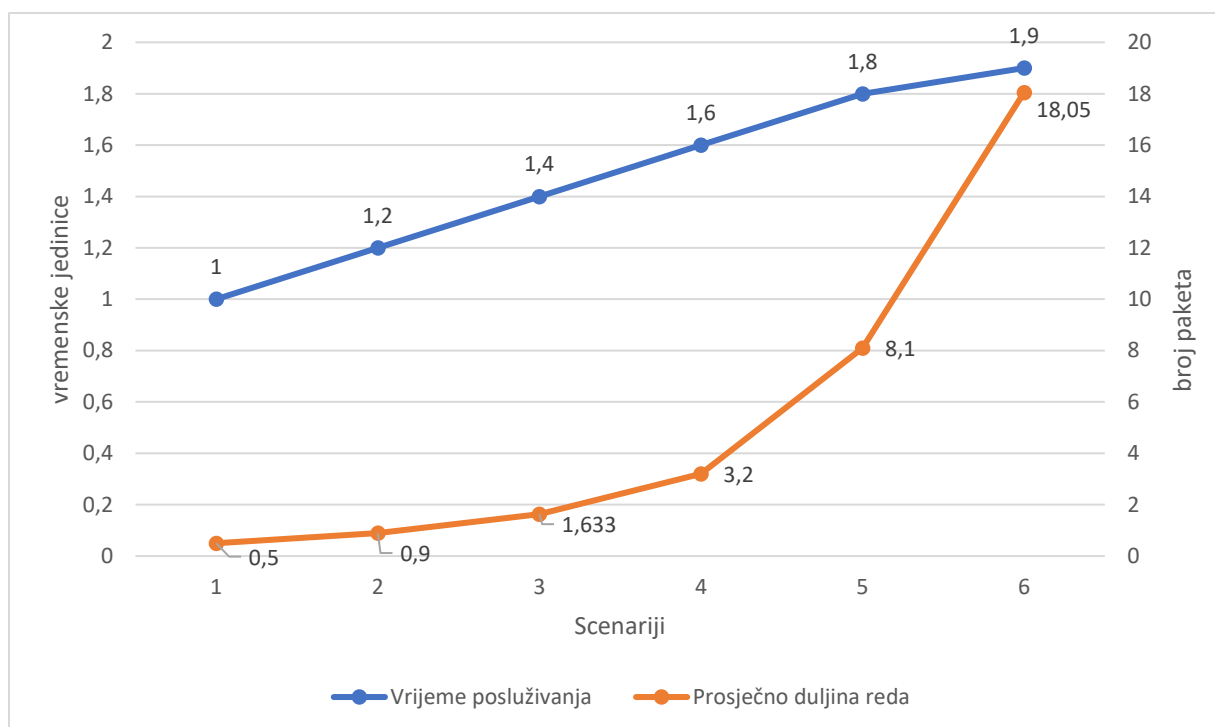


kao kod  $T_w$  može se primijetiti i ovdje. U početnim fazama,  $T_q$  je relativno nisko, što ukazuje na učinkovito procesiranje i minimalno zagušenje u sustavu. Kako  $T_s$  raste,  $T_q$  također počinje značajno rasti, što odražava kombinirani učinak dužeg vremena čekanja i dužeg vremena obrade svakog paketa. Graf jasno pokazuje kako se sustav približava granici svojih kapaciteta, gdje svaki dodatni porast  $T_s$  uzrokuje proporcionalno veće kašnjenje. Može se zaključiti da veća duljina paketa rezultira većim kašnjenjem.



**Graf 2.** Odnos vremena posluživanja i prosječnog kašnjenja

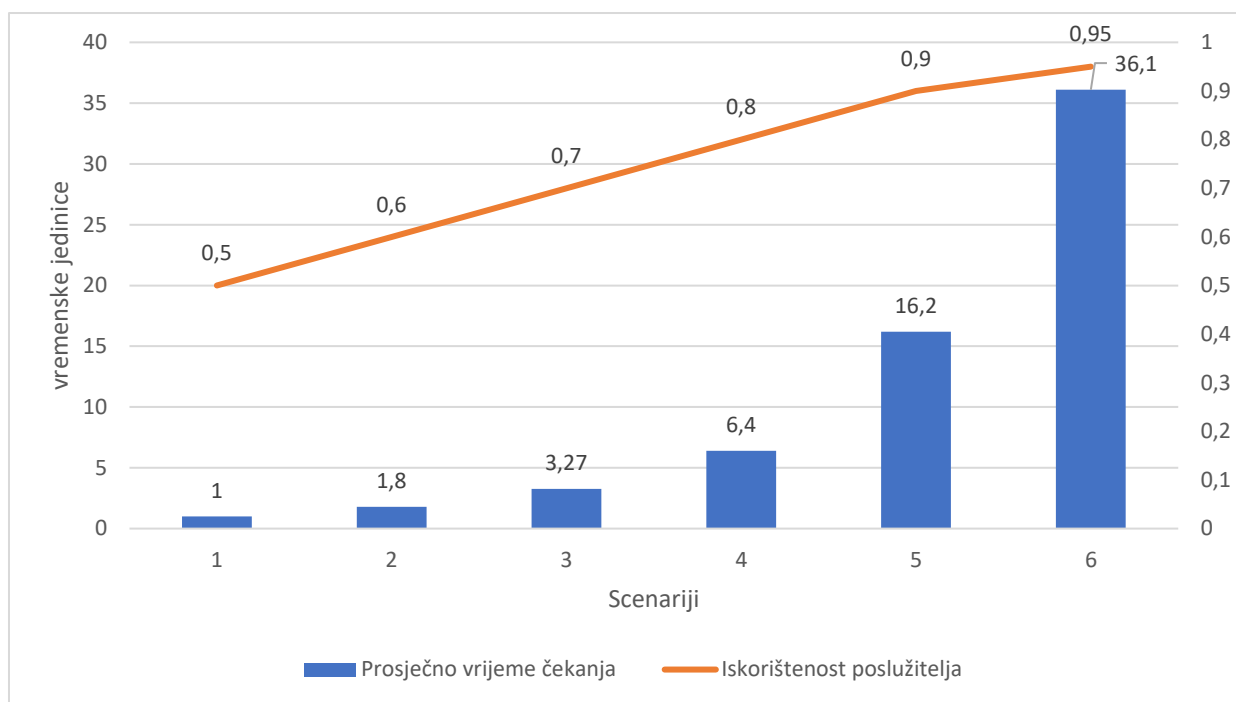
Graf 3 prikazuje odnos između vremena posluživanja ( $T_s$ ) i prosječne duljine reda ( $L_w$ ). Na početku, dok je  $T_s$  nizak,  $L_w$  ostaje na minimalnim vrijednostima, što sugerira da red čekanja gotovo i ne postoji jer poslužitelj brzo obrađuje dolazne pakete. Međutim, kako  $T_s$  raste,  $L_w$  također počinje rasti, prvo postepeno, a zatim sve brže kako se vrijeme posluživanja povećava. Ovaj porast duljine reda ukazuje na sve veće zagušenje u sustavu, gdje se paketi gomilaju u redu čekanja jer poslužitelj više ne može pravovremeno obraditi sve dolazne pakete. Ovo zagušenje dodatno opterećuje sustav i dovodi do pogoršanja svih ostalih performansi. Graf jasno pokazuje kako povećanje vremena posluživanja rezultira značajnim produljenjem reda čekanja, što može biti indicacija da je sustav pod velikim opterećenjem i da bi moglo doći do zastoja ako se opterećenje nastavi povećavati.



**Graf 3.** Odnos vremena posluživanja i prosječne duljine reda

Graf 4 prikazuje odnos između prosječnog vremena čekanja ( $T_w$ ) i iskorištenosti poslužitelja ( $\rho$ ). Kako se iskorištenost poslužitelja povećava, prosječno vrijeme čekanja također raste. Na početku, gdje je  $\rho$  niži, prosječno vrijeme čekanja je minimalno, što znači da sustav ima dovoljno kapaciteta za obradu dolaznih paketa bez stvaranja značajnih zastoja. Međutim, kako se  $\rho$  približava vrijednosti od 1, prosječno vrijeme čekanja počinje eksponencijalno rasti. To znači da je sustav gotovo potpuno zasićen, što ukazuje na rizik od preopterećenja, gdje poslužitelj više ne može učinkovito obraditi nove dolazne pakete. Preopterećenje zatim uzrokuje duže redove, što u konačnici smanjuje performanse cijelog sustava.

Rast navedenih parametara nije linearan, već eksponencijalan, što znači da i male promjene u duljini paketa mogu uzrokovati znatno pogoršanje performansi, pogotovo kada sustav već radi blizu svojih kapaciteta. Optimalna duljina paketa osigurava ravnotežu između brzine obrade i minimalnog kašnjenja, što je ključno za stabilan i učinkovit rad internetskog čvora.



**Graf 4.** Odnos prosječnog vremena čekanja i iskorištenosti poslužitelja

## 7. ZAKLJUČAK

Internetski čvor je ključna točka u mreži koja omogućuje prijenos, primanje, generiranje i pohranu podataka (paketa). Usmjeravanje među čvorovima se odvija pomoći tablica i protokola za usmjeravanje. U takav čvor dolaze paketi različitih duljina koje generiraju različite aplikacije. Kako bi se poboljšalo upravljanje mrežnim prometom, koriste se različiti modeli obrade koji određuju kako i kojim redoslijedom paketi prolaze kroz mrežu, osiguravajući efikasnost i smanjenje kašnjenja.

U ovom radu simuliran je M/M/1 sustav redova, koji se sastoji od jednog poslužitelja i beskonačnog reda, tj. pretpostavka je da nema gubitka paketa. Međudolazna vremena i vremena posluživanja eksponencijalno su distribuirana, a paket koji je prvi došao, prvi će biti poslužen. Rezultati simulacije uspoređeni su s teorijskim vrijednostima, pri čemu pokazuju jasnu vezu između duljine paketa i performansi sustava. Analizom rezultata može se zaključiti da kako duljina paketa raste, dolazi do eksponencijalnog povećanja ključnih parametara sustava kao što su: prosječno vrijeme čekanja, prosječna duljina reda, prosječno kašnjenje i iskorištenost poslužitelja.

Duljina paketa ima izravan utjecaj na iskorištenost poslužitelja, što zatim lančano djeluje na ostale parametre. S povećanjem duljine paketa, sustav se sve više opterećuje, što dovodi do produljenja vremena koje paketi provode čekajući na posluživanje. Samim time što raste prosječno vrijeme čekanja, raste prosječno kašnjenje i prosječna duljina reda jer se paketi gomilaju u redu na posluživanje. Iako povećana iskorištenost poslužitelja može izgledati kao znak efikasnog rada, zapravo signalizira da se sustav približava svojim kapacitetima. Rast navedenih parametara nije linearan, nego eksponencijalan, što znači da čak i male promjene u duljini paketa mogu imati značajan utjecaj na performanse internetskog čvora. Prema tome, optimalno upravljanje duljinom paketa ključno je za osiguranje stabilnog i pouzdanog rada internetskog čvora.

## LITERATURA

- [1] What is my IP. *What Is a Node in Networking? Nodes Explained*. Preuzeto s: <https://www.whatismyip.com/what-is-a-node/> [Pristupljeno: kolovoz, 2024.]
- [2] Matulin M. *Tehnologija telekomunikacijskog prometa*. [Prezentacija] Modeli sustava posluživanja sa čekanjem. Fakultet prometnih znanosti Sveučilišta u Zagrebu. 2024.
- [3] Računalne mreže. *Usmjernik*. Preuzeto s: <http://mreze.layer-x.com/index.html> [Pristupljeno: kolovoz, 2024.]
- [4] Gcore. *What Is a Router? | How Does a Router Work?* Preuzeto s: <https://gcore.com/learning/what-is-a-router/> [Pristupljeno: kolovoz 2024.]
- [5] CARnet. *Osnove mrežnog usmjeravanja*. Preuzeto s: <https://www.cis.hr/www.edicija/LinkedDocuments/CCERT-PUBDOC-2007-02-183.pdf> [Pristupljeno: kolovoz, 2024.]
- [6] Mrvelj Š. *Tehnologija telekomunikacijskog prometa*. [Prezentacija] Komutacijski i transmisijski sustavi paketske mreže. Fakultet prometnih znanosti Sveučilišta u Zagrebu. 2024.
- [7] SystemZone. *Computer Network Topology Outline*. Preuzeto s: <https://systemzone.net/computer-network-topology-outline/> [Pristupljeno: kolovoz, 2024.]
- [8] Mrvelj Š. *Tehnologija telekomunikacijskog prometa*. [Prezentacija] Ciljevi razine usluge. Fakultet prometnih znanosti Sveučilišta u Zagrebu. 2024.
- [9] ITU. *G.1010 : End-user multimedia QoS categories*. Preuzeto s : <https://www.itu.int/rec/T-REC-G.1010-200111-I> [Pristupljeno: kolovoz, 2024.]
- [10] Mrvelj Š. *Tehnologija telekomunikacijskog prometa*. [Prezentacija] Odabir prometnog modela. Fakultet prometnih znanosti Sveučilišta u Zagrebu. 2024.
- [11] Matulin M. *Tehnologija telekomunikacijskog prometa*. [Prezentacija] Analitičko opisivanje toka dolazaka procesa posluživanja. Fakultet prometnih znanosti Sveučilišta u Zagrebu. 2024.

[12] Zavod za elektroničke sustave i obradbu informacija. *Kratke upute za korištenje MATLAB-a*. Preuzeto s: [https://www.fer.unizg.hr/download/repository/matlab\\_upute.pdf](https://www.fer.unizg.hr/download/repository/matlab_upute.pdf)  
[Pristupljeno: kolovoz, 2024.]

## POPIS SLIKA

<b>Slika 1.</b> Čvor paketne mreže [2] .....	4
<b>Slika 2.</b> Arhitektura usmjernika [3] .....	5
<b>Slika 3.</b> Prikaz mrežnih topologija [7] .....	8
<b>Slika 4.</b> QoS zahtjevi za glasovne i video aplikacije [9] .....	11
<b>Slika 5.</b> QoS zahtjevi za podatkovne aplikacije [9] .....	12
<b>Slika 6.</b> Programsko sučelje Matlab-a .....	18
<b>Slika 7.</b> Prikaz M/M/1 modela.....	19
<b>Slika 8.</b> Karakteristike sustava za 1. scenarij .....	21
<b>Slika 9.</b> Karakteristike sustava za 2. scenarij .....	21
<b>Slika 10.</b> Karakteristike sustava za 3. scenarij .....	22
<b>Slika 11.</b> Karakteristike sustava za 4. scenarij .....	22
<b>Slika 12.</b> Karakteristike sustava za 5. scenarij .....	23
<b>Slika 13.</b> Karakteristike sustava za 6. scenarij .....	23

## POPIS GRAFIKONA

<b>Graf 1.</b> Odnos vremena posluživanja i prosječnog vremena čekanja .....	27
<b>Graf 2.</b> Odnos vremena posluživanja i prosječnog kašnjenja .....	28
<b>Graf 3.</b> Odnos vremena posluživanja i prosječne duljine reda .....	29
<b>Graf 4.</b> Odnos prosječnog vremena čekanja i iskorištenosti poslužitelja.....	30



## POPIS TABLICA

<b>Tablica 1.</b> Performanse čvora za svaki scenarij.....	26
--	----

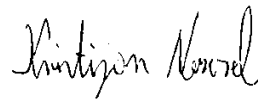
Sveučilište u Zagrebu  
Fakultet prometnih znanosti  
Vukelićeva 4, 10000 Zagreb

## IZJAVA O AKADEMSKOJ ČESTITOSTI I SUGLASNOSTI

Izjavljujem i svojim potpisom potvrđujem da je \_\_\_\_\_ završni rad \_\_\_\_\_  
(vrsta rada)  
isključivo rezultat mojega vlastitog rada koji se temelji na mojim istraživanjima i oslanja se na objavljenu literaturu, a što pokazuju upotrijebljene bilješke i bibliografija. Izjavljujem da nijedan dio rada nije napisan na nedopušten način, odnosno da je prepisan iz necitiranog rada te da nijedan dio rada ne krši bilo čija autorska prava. Izjavljujem, također, da nijedan dio rada nije iskorišten za bilo koji drugi rad u bilo kojoj drugoj visokoškolskoj, znanstvenoj ili obrazovnoj ustanovi.

Svojim potpisom potvrđujem i dajem suglasnost za javnu objavu završnog/diplomskog rada pod naslovom UTJECAJ DULJINE PAKETA NA PERFORMANSE INTERNETSKOG ČVORA, u Nacionalni repozitorij završnih i diplomskih radova ZIR.

Student/ica:



(ime i prezime, potpis)

U Zagrebu, 30.8.2024.