

Analiza parametara performansi podvorbenih sustava s prioritarnim posluživanjem

Ćulibrk, Goran

Master's thesis / Diplomski rad

2020

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:119:454068>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2025-01-12**



Repository / Repozitorij:

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



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET PROMETNIH ZNANOSTI

Goran Čulibrk

ANALIZA PARAMETARA PERFORMANSI
PODVORBENIH SUSTAVA S PRIORITETNIM
POSLUŽIVANJEM

DIPLOMSKI RAD

Zagreb, 2020.

Zagreb, 30. ožujka 2020.

Zavod: **Zavod za informacijsko komunikacijski promet**
Predmet: **Podvorbeni sustavi**

DIPLOMSKI ZADATAK br. 5901

Pristupnik: **Goran Čulibrk (0135231319)**
Studij: **Promet**
Smjer: **Informacijsko-komunikacijski promet**

Zadatak: **Analiza parametara performansi podvorbenih sustava s prioritetskim posluživanjem**

Opis zadatka:

Objasniti osnovna obilježja podvorbenih sustava i vrste podvorbenih sustava. Nakon toga prikazati primjenjivost podvorbenih modela u analizi i modeliranju rada internetskog čvora. Provesti analizu performansi mreže paketnih čvorova korištenjem simulacijskog alata i interpretirati dobivene rezultate koristeći tablične i grafičke prikaze.

Mentor:

Predsjednik povjerenstva za
diplomski ispit:

doc. dr. sc. Marko Matulin

Sveučilište u Zagrebu
Fakultet prometnih znanosti

DIPLOMSKI RAD

ANALIZA PARAMETARA PERFORMANSI
PODVORBENIH SUSTAVA S PRIORITETNIM
POSLUŽIVANJEM

THE ANALYSIS OF PERFORMANCE
PARAMETERS FOR PRIORITY QUEUING
SYSTEMS

Mentor: doc. dr. sc. Marko Matulin

Student: Goran Čulibrk

JMBAG: 0135231319

Zagreb, rujan 2020.

SAŽETAK

Ovaj rad jest napravljen s ciljem opažanja važnosti podvorbenih sustava u kontekstu telekomunikacijskih mreža. Razrađena je tematika pojma podvorbenih sustava, vrste te njihovih načina ponašanja. Iznimno važna je uloga paketnog čvora te je razrađena u zasebnom poglavlju. Za potrebe izrade ovog rada napravljeni su modeli sustava s prioritetnim posluživanjem s jednim, dva te s tri poslužitelja. Mreže su konfigurirane i sastavljene kako bi se na njima mogle odvijati simulacije u cilju opažanja ponašanja sustava u raznim uvjetima pri čemu je ključan parametar kašnjenje. Glavni dio rada predstavljaju simulacije provedene na stvorenim modelima u Simulinku. Provedene su simulacije na način da su se ispitivale performanse sustava u ovisnosti o intenzitetu dolazaka korisnika na svakom poslužitelju, pa posebno provjeravajući performanse za svaku klasu korisnika. U posljednjim poglavljima su predstavljeni i komentirani rezultati dobiveni analizom. Najvažniji zaključci koji se izvlače nakon izrade ovog rada su da kod sustava s više poslužitelja i načinom prioritetnog posluživanja prvi poslužitelj u najvećoj mjeri diktira ponašanje sustava, a prosječno vrijeme zadržavanja direktno ovisi o intenzitetu dolazaka korisnika te s njegovim povećanjem raste. Kada su analizirane klase zasebno, može se zaključiti da klase s nižim prioritetima imaju sve oštrije poraste vremena zadržavanja u sustavu što je bio i očekivan rezultat.

KLJUČNE RIJEČI: podvorbeni sustav; čvor; poslužitelj; mreža; Simulink; prioritet, performanse; klasa

SUMMARY

This paper was made with the aim of observing the importance of sub-system systems in the context of telecommunication networks. The topic of the concept of queuing systems, types and their ways of behavior is elaborated. The role of the packet node is extremely important and is elaborated in a separate chapter. For the purposes of this paper, system models with priority serving with one, two and three servers were made. Networks are configured and assembled so that simulations can take place on them to observe the behavior of the system in various conditions, where the key parameter is the delay. The main part of the paper is the simulations performed on the created models in Simulink. Simulations were performed by examining the performance of the system depending on the intensity of user arrivals on each server, and checking the performance for each class. In the last chapters, the results obtained by the analysis are presented and commented. The most important conclusions drawn after this paper are that in multi-server systems and priority serving, the first server dictates the behavior of the system, and the average delay time directly depends on the intensity of user arrivals and increases with its increase. When the classes are analyzed separately, it can be concluded that the classes with lower priorities have

ever sharper increases in the delay time in the system which was also the expected result.

KEYWORDS: queuing system; node; server; network; Simulink; priority; performance; class

Sadržaj

1. UVOD	1
2. OSNOVNA OBILJEŽJA PODVORBENIH SUSTAVA	3
2.1 Opći opis podvorbenih sustava	3
2.1.1 Korisnik	3
2.1.2 Poslužitelj	5
2.1.3 Rep	6
2.2 Kendall-ova oznaka	7
2.3 Prometna mjerila podvorbenih sustava	8
2.3.1 Ponuđeni promet	8
2.3.2 Jakost prometa	8
2.3.3 Obavljeni promet	8
2.3.4 Iskoristivost poslužitelja	9
3. VRSTE PODVORBENIH SUSTAVA	10
3.1 Jednopuslužiteljski Poissonovi podvorbeni sustavi s beskonačnim izvorištem	10
3.1.1 M/M/1/∞/∞/FCFS	10
3.1.2 M/M/1/K/∞/FCFS	11
3.2 Višeposlužiteljski Poissonovi podvorbeni sustavi s beskonačnim izvorištem	12
3.2.1 M/M/c/∞/∞/FCFS	13
3.2.2 M/M/c/c/∞/FCFS	13
3.2.3 M/M/∞/∞/∞/FCFS	14
3.3 Temeljni ne-poissonovski podvrobeni sustavi	15
3.3.1 M/G/1/∞/∞/FCFS	15
3.3.2 M/Ek/1/∞/∞/FCFS	16
3.4 Grupni podvorbeni sustavi	16
3.4.1 G ^j /G/c/∞/∞/FCFS	16
3.4.2 G/G ^j /c/∞/∞/FCFS	17
3.5 Važnost teorije modela podvorbenih sustava	17
4. ZNAČAJ PAKETNOG ČVORA I PRIMJENA PODVORBENIH MODELA U NJEGOVOM OPISU	19
4.1 Upravljanje usmjeravanjem	19
4.1.1 Metoda slučajnog izbora	20
4.1.2 Fiksno usmjeravanje	20
4.1.3 Adaptivno usmjeravanje	22

4.2 Kontrola toka.....	23
4.3 Kontrola pogrešaka.....	23
4.3.1 Detekcija pogrešaka.....	24
4.3.2 Korekcija pogrešaka.....	24
5. ANALIZA PERFORMANSI MREŽE PAKETNIH ČVOROVA KORIŠTENJEM SIMULACIJSKOG ALATA.....	26
5.1 Opis i oblikovanje radnog okruženja	26
5.2. Analiza sustava bez prioritetskog posluživanja.....	32
5.3. Analiza sustava s prioritetskim posluživanjem.....	33
5.3.1 Analiza sustava s jednim poslužiteljem.....	33
5.3.2 Analiza sustava s dva poslužitelja.....	34
5.3.3 Analiza sustava s tri poslužitelja.....	37
6.INTERPRETACIJA DOBIVENIH REZULTATA	51
6.1 Interpretacija rezultata analize ukupnog vremena zadržavanja u sustavu	51
6.2 Interpretacija rezultata analize za pojedine prioritetske klase s tri serijska poslužitelja .	52
7.ZAKLJUČAK.....	54
LITERATURA	55
POPIS KRATICA	57
POPIS SLIKA	58
POPIS TABLICA.....	59

1. UVOD

Paralelno s razvojem informacijsko – komunikacijskih tehnologija povećava se kompleksnost telekomunikacijskih mreža, ali i očekivanja korisnika u vidu zadovoljenja njihovih potreba po pitanju performansi mreža. Prilikom planiranja različitih sustava koji trebaju ispuniti očekivanja korisnika treba uvažiti različite faktore kao što su trendovi korištenja usluga, zahtjevi za žurnim uslugama, kulturološke i druge razlike. Mreže u današnje vrijeme postaju sve kompleksnije, robusnije, a zahtjevi korisnika sve veći. Inženjerska struka treba dati alate i mehanizme sastavljanja telekomunikacijskih mreža optimalne kompleksnosti, odnosno maksimalnih performansi uz, što je moguće manje, troškove. Različiti sustavi podvorbe mogu korisniku pružiti različite razine usluge.

Analiza ovoga rada ima za cilj utvrđivanje utjecaja različitih parametara performansi podvorbenih sustava na razinu usluge. Ključan parametar u analizi je kašnjenje. Rad je izrađen na temelju vlastitog znanja, korištene literature te programskog alata MATLAB, odnosno sučelja za provođenja programskih simulacija Simulink.

Ovaj rad je podijeljen na sedam dijelova:

1. Uvod
2. Osnovna obilježja podvorbenih sustava
3. Vrste podvorbenih sustava
4. Značaj paketnog čvora i primjena podvorbenih modela u njegovom opisu
5. Analiza performansi mreže paketnih čvorova korištenjem simulacijskog alata
6. Interpretacija dobivenih rezultata
7. Zaključak.

Drugo poglavlje rada predstavlja kratki osvrt na pojam, značenje i ulogu podvorbenih sustava općenito u kontekstu telekomunikacijskih mreža. Objašnjena je notacija kojom se opisuju, važnost pojma varijabli i njihova značenja te parametri koji sačinjavaju i karakteriziraju podvorbene sustave te su nabrojani neki od sustava.

Kako postoji više vrsta podvorbenih sustava, sličnosti i razlike među njima te detaljniji opisi te grafički prikazi svakog od njih nalaze se u trećem poglavlju.

U četvrtom poglavlju razrađena je tematika čvora paketne mreže. Čvor je neophodan dio mreže koji svojim ulogama utječe na rezultate analize te je kao takav iznimno bitan pri analizi podvorbenih sustava, a samim time i za ovaj rad.

Analiza performansi mreže paketnih čvorova korištenjem simulacijskog alata provedena je u petom poglavlju i predstavlja glavni dio ovog rada. Detaljno su prikazani svi koraci, metode i postupci prilikom provođenja analize. Sustavi su analizirani uz implementirano prioritetno posluživanje za konstantno i promjenjivo vrijeme

posluživanja na poslužiteljima. Rezultati dobiveni u analizi su interpretirani u šestom poglavlju, a u sedmom je izveden zaključak na temelju provedene analize, ali i na temelju izrade cijelog rada.

2. OSNOVNA OBILJEŽJA PODVORBENIH SUSTAVA

Općenito se može reći da podvorbeni sustavi imaju zadaću podvoriti korisnika s njemu potrebnim uslugama. Različiti sustavi koji poslužuju korisnike ili grupe korisnika mogu se opisati različitim modelima pružajući im tako i različite razine traženih usluga. Kako bi se sustavi podvorbe lakše razlikovali te kako bi se shvatila njihova važnost treba razumjeti njihovu teoretsku podlogu, a što je prikazano u nastavku.

2.1 Opći opis podvorbenih sustava

Podvorbeni sustavi se pobliže mogu definirati sa tri elementa, a prema [1] to su korisnik, poslužitelj i rep.

2.1.1 Korisnik

Korisnik se definira kao stvar ili osoba koja zahtijeva podvorbu. Pred sustav podvorbe korisnik može pristići kao pojedinac ili kao grupa korisnika. Pristizanje korisnika pred sustav je ulazni proces, odnosno vjerojatnosni zakon vremenskog redoslijeda dolaska korisnika pred sustav podvorbe. Ukoliko je broj korisnika u izvorištu toliki da na vjerojatnost dolazaka na posluživanje ne utječe broj korisnika koji su otprije u sustavu podvorbe, izvorište korisnika se može smatrati beskonačno velikim. Korisnici se mogu razlikovati i načinom kako dolaze pred sustav podvorbe, kako se u njemu poslužuju te kakva su im međudolazna vremena. Ta vremena mogu biti slučajne i neslučajne varijable, [1].

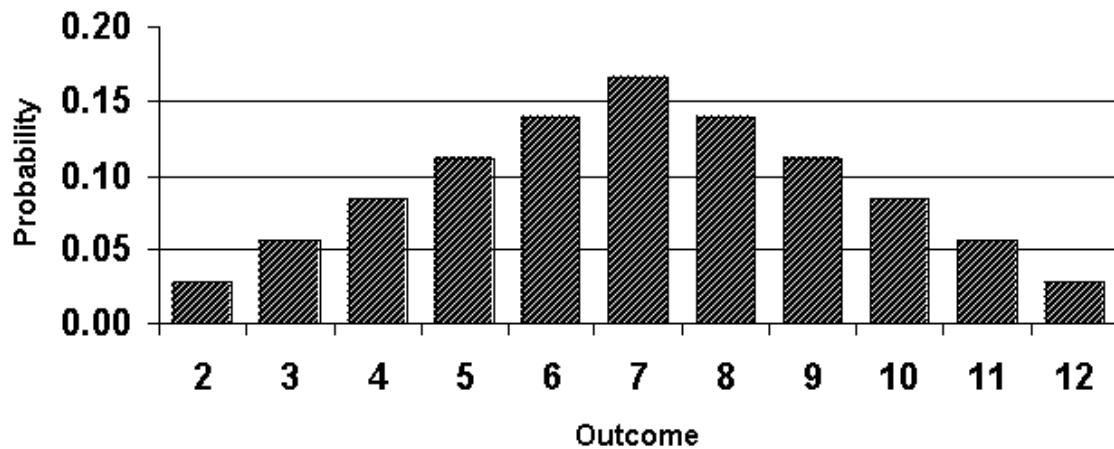
Ukoliko su varijable slučajne, one mogu biti:

- diskretne,
- kontinuirane.

Za potrebe razumijevanja ponašanja sustava podvorbe nužno je poznavati osnove vjerojatnosti i statistike. Općenito se slučajne varijable definiraju kao veličine čije vrijednosti ovise o ishodu slučajnog pokusa, tj. u pojedinim slučajevima dobivaju različite ishode.

Diskretna slučajna varijabla je ona koja poprima konačno mnogo vrijednosti (prebrojiv broj). Diskretnu varijablu karakteriziraju vrijednosti koje može poprimiti (x_1 , x_2 i nadalje) te vjerojatnosti da poprimi baš te vrijednosti (p_1 , p_2 i nadalje). Primjer diskretne slučajne varijable da X poprimi vrijednost između 2 i 12 jest dana na slici 1.

Probability Distribution of X

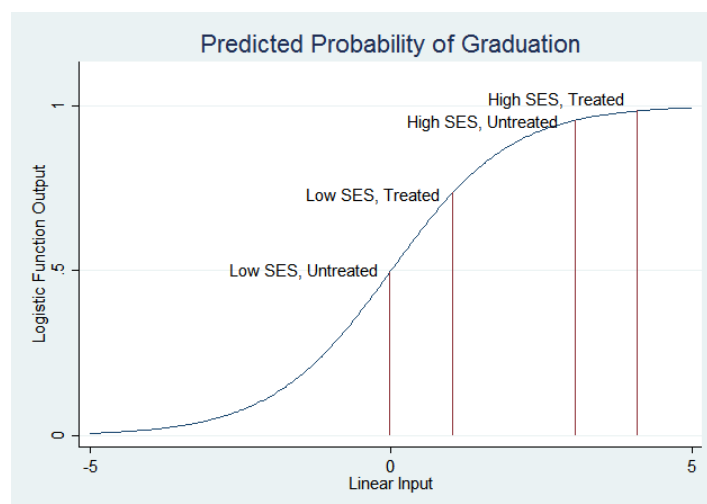


Slika 1. Primjer distribucije diskretnih varijabli, [2]

Neki od primjera koji se mogu također iskazivati diskretnim slučajnim varijablama prema [2] su:

- broj studenata upisanih na nekom kolegiju,
- broj parkiranih vozila,
- broj satelita oko nekog planeta.

Kontinuirane varijable se definiraju kao varijable koje je potrebno izmjeriti. One ne poprimaju konačan (prebrojiv) broj vrijednosti već označavaju određeni interval vrijednosti. Primjer kontinuirane varijable dan je na slici 2.



Slika 2. Primjer kontinuirane varijable, [3]

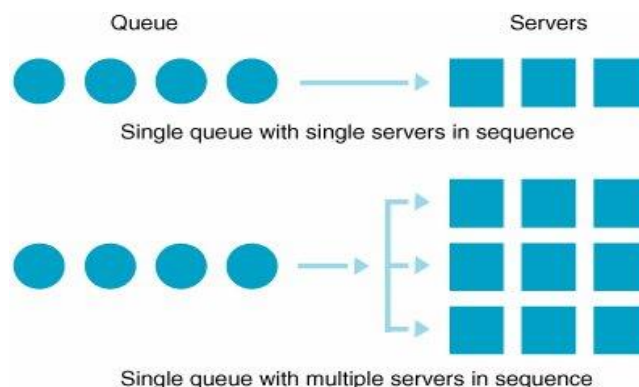
Primjeri kontinuirane varijable prema [2]:

- nedozvoljena tjelesna masa prilikom zaposlenja (npr. više od 100 kg),
- vrijeme nakon kojeg korisnik više ne može zahtijevati povrat novca ili zamjenu proizvoda (npr. nakon 8 dana),
- udaljenost s kojom korisnik ostvaruje neku pogodnost (npr. 40 km i više).

2.1.2 Poslužitelj

Poslužitelj je mjesto, odnosno dio podvorbenog sustava koji obavlja podvorbu korisnika pružajući im tražene usluge. Kako korisnik, tako i poslužitelj može biti osoba ili stvar. Prilikom dimenzioniranja sustava podvorbe, važno je planirati broj poslužitelja, a on može biti bilo koji broj u rasponu od jedan do beskonačno (ovisi o kojem sustavu podvorbe se radi). Također, moguće je planski utvrditi broj poslužitelja unaprijed te zadržavati taj broj fiksnim ili ga naknadno, po potrebi mijenjati. Na slici 3 je prikaz jednog reda (repa) i slučajevi jednog ili više poslužitelja. Ukoliko se radi o više poslužitelja oni se smatraju paralelnima te u svakom trenutku izvršavaju zahtjeve samo jednog korisnika, odnosno jednog korisnika poslužuje samo jedan poslužitelj ako nije drugačije rečeno. U kontekstu podvorbenih sustava, poslužitelji mogu biti općenito poredani na dva načina, serijski ili paralelno. Ukoliko se govori o serijskom rasporedu poslužitelja sustava podvorbe oni obavljaju međusobno različite, dok paralelni obavljaju iste poslove, [1].

Bitan parametar je trajanje posluživanja, a ono se definira kao vrijeme boravka korisnika kod poslužitelja. Trajanje posluživanja može ovisiti o više faktora, a može se govoriti o konstantnom vremenu posluživanja ili o slučajnom. Koliko će posluživanje trajati ovisi svakako i o tipu korisnika ili tipu njegovih zahtjeva, ali i o količini korisnika koja odjednom prolazi kroz sustav (pojedinačni korisnik ili grupa korisnika). Također, na vrijeme posluživanja može utjecati i trenutak u kojem se posluživanje odvija, primjerice, doba dana, dan u tjednu, neki period u mjesecu ili neko određeno razdoblje tijekom godine.



Slika 3. Prikaz reda i poslužitelja, [4]

2.1.3 Rep

U repu se nalaze korisnici koji još nisu posluženi, odnosno koji čekaju podvorbu. Rep predstavlja obvezu ili teret poslužitelju. Za očekivati je da će svi korisnici koji se nalaze u repu, prije ili kasnije biti posluženi od strane poslužitelja. Rep je definiran s tri pravila:

- pravilo ulaska u rep,
- pravilo boravka u repu,
- pravilo izlaska iz repa.

Kada je riječ o ulasku prometnih entiteta u rep može se govoriti o temeljnom sustavu s gubicima kod kojega ne postoji mogućnost stajanja u redu ili o općem sustavu gdje rep postoji ali je ograničenog kapaciteta, o sustavu s čekanjem ili eventualnom odustajanjem od ulaska u rep, [1]. Pravilo boravka u repu govori kako se entiteti u repu ponašaju za vrijeme čekanja na posluživanje, dok pravilo izlaska iz repa govori kako entiteti iz repa izlaze i započinje njihovo posluživanje kod poslužitelja.

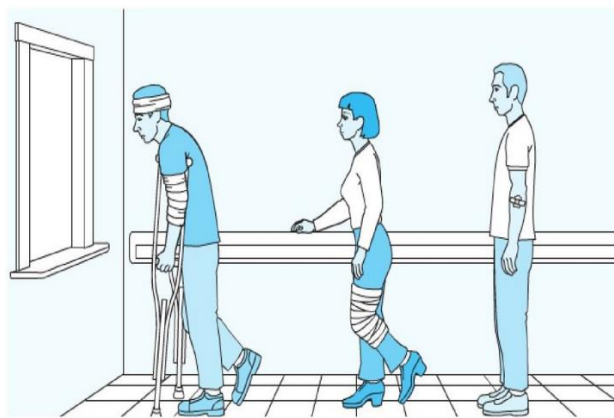


Slika 4. Primjer tvorbe i upravljanja redom, [5]

Na slici 4 je na jednostavan način prikazana tvorba reda unutar nekog sustava (u ovom slučaju bankovnog) kao i način upravljanja tim redom. Entiteti, u ovom slučaju korisnici usluga banke, ulaze u red i čekaju da netko od službenika preuzme njihov slučaj. Može se reći da se tu radi o načinu tvorbe reda da korisnik koji je ranije pristigao bude i ranije poslužen, odnosno da je podvorbena stega „prvi došao – prvi poslužen“.

Prema [6] redoslijed izlaska iz repa može biti:

- FCFS (*First Come First Serve*),
- LCFS (*Last Come First Serve*),
- SIRO (*Service in Random Order*),
- SPT (*Shortest Processing Time*),
- RR (*Round Robin*),
- PRI (*Priority*).



Slika 5. Primjer reda s prioritetima određenih entiteta, [7]

U raznim situacijama (unutar telekomunikacijskog sektora, ali i općenito) dolazi do potrebe da se određenim korisnicima dodijele „veća prava“, odnosno određeni prioritet. Slika 5 zorno prikazuje jedan logičan slijed tvorbe reda za čekanje prilikom posjete zdravstvenoj ustanovi. Korisnik koji i naizgled ima najveće poteškoće i treba najveću pomoć ide na podvorbu prvi, zatim korisnica s manjim stupnjem žurnosti, a potom naposljetku korisnik koji nema gotovo nikakav stupanj žurnosti. Ovo je primjer repa podvorbenog sustava s prioritetnim posluživanjem.

2.2 Kendall-ova oznaka

Postoje mnoge vrste podvorbenih sustava, a unutar njih sustavi različitih parametara. Kako bi se ponajprije stekao osjećaj o kojem se sustavu radi u što kraćim crtama, koristi se Kendall-ova oznaka. Predložena 1953. godine, a sastavljena od šest simbola, predstavlja skraćeni i najbolji opis obilježja podvorbenih sustava.

Elementi Kendallove oznake jednoznačno i nedvosmisleno opisuju sustav, a njihov raspored unutar oznake se ne smije mijenjati.

$$A / B / C / K_q / K_i / P.S.$$

Elementi iz generičkog primjera jednadžbe su prema [6] kako slijedi:

1. A – razdioba međudolaznih vremena,
2. B – razdioba trajanja posluživanja,
3. C – broj poslužitelja,
4. K_q – kapacitet sustava,
5. K_i – kapacitet izvora,
6. P.S. – podvorbena stega.

2.3 Prometna mjerila podvorbenih sustava

Prometne veličine najbolje oslikavaju performanse podvorbenih sustava, one povezuju ulazne i izlazne veličine.

Kod prometnih mjerila valja svakako izdvojiti:

- ponuđeni promet,
- jakost prometa,
- obavljeni promet,
- iskoristivost poslužitelja.

2.3.1 Ponuđeni promet

Ponuđeni promet se označava slovom a i on je jednak prosječnom broju korisnika ponuđenih podvorbenom sustavu tijekom razdoblja koje je jednako prosječnoj vrijednosti trajanja posluživanja jednog korisnika. Parametar λ predstavlja intenzitet dolazaka korisnika, a T_s predstavlja vrijeme posluživanja. Mjerna jedinica je erlang, a izraz je prema [6]:

$$a = \frac{\lambda}{\mu} = \lambda \cdot T_s = \frac{T_s}{T_a} \quad (1)$$

2.3.2 Jakost prometa

Jakost prometa se označava simbolom ρ i definira se kao količina nekog entiteta po raspoloživom resursu, odnosno konkretno jakost prometa je ponuđeni promet po jednom poslužitelju. Izraz za određivanje jakosti prometa pri čemu parametar c predstavlja broj paralelnih poslužitelja koji rade prosječnom brzinom μ prema [1] je:

$$\rho = \frac{a}{c} = \frac{\lambda}{\mu \cdot c} \quad (2)$$

2.3.3 Obavljeni promet

Obavljeni promet se označava simbolom a' i usko je vezan uz ponuđeni promet, a temeljna je razlika što se on ne gubi na ulazu u podvorbeni sustav, već ulazi u njega te se poslužuje. Može se reći da je obavljeni promet svojevrsni „ostatak“ od ukupnog ponuđenog prometa umanjenog za izgubljeni promet zbog djelovanja gubitaka, [1].

$$a' = a [1 - B(a)] \quad (3)$$

Obavljeni promet je umnožak ponuđenog prometa i vjerojatnosti posluživanja korisnika. Vjerojatnost posluživanja se može prikazati i kao „1 – vjerojatnost gubitka“. Vjerojatnost gubitka je vjerojatnost da korisnik neće biti poslužen odmah.

2.3.4 Iskoristivost poslužitelja

Iskoristivost poslužitelja se označava simbolom ρ' i predstavlja obavljeni promet na jednoga poslužitelja, odnosno dio vremena promatranja unutar kojega je poslužitelj zaposlen. Iskoristivost poslužitelja se označava oznakom ρ' , a izraz je kako slijedi:

$$\rho' = \frac{a'}{c} \quad (4)$$

3.VRSTE PODVORBENIH SUSTAVA

Postoji više vrsta podvorbenih sustava. Različiti sustavi pružaju različite performanse i djeluju na različite načine. Podvorbeni sustavi se mogu razlikovati prema razdiobi međudolaznih vremena, razdiobi trajanja posluživanja, broju poslužitelja, kapacitetu sustava, kapacitetu izvora te podvorbenoj stezi. Nadalje će u radu biti prikazano kako dolasci entiteta pred sustav posluživanja mogu biti pojedinačni, grupni te kako se mogu ravnati prema određenim razdiobama. Također odlasci entiteta iz sustava mogu biti pojedinačni, grupni, broj poslužitelja može biti od jedan do beskonačno. Kapacitet sustava i kapacitet izvora mogu biti ograničeni ili beskonačni, a podvorbena stega se dodjeljuje ovisno o namijeni samog sustava posluživanja. U daljnjoj podjeli sustava, oni će bit objašnjeni, prikazani njihovi dijagrami prijelaza te primjeri za vjerojatnost da se sustav nađe u određenom stanju. Sve slike prikaza modela u nastavku su osobno kreirane.

3.1 Jednopuslužiteljski Poissonovi podvorbeni sustavi s beskonačnim izvorištem

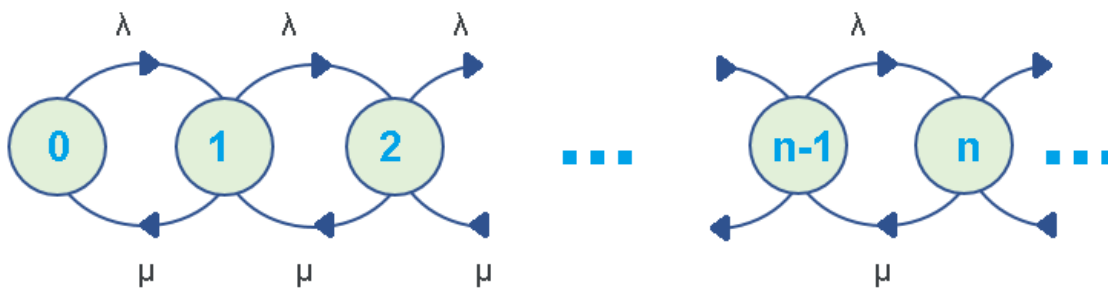
Jednopuslužiteljski sustavi su sustavi čiju podvorbu obavlja jedan poslužitelj. Klijenti ili entiteti koji nisu odmah na podvorbi bivaju ili odbačeni ili formiraju red. Da je sustav Poissonov znači da su mu proces dolazaka i posluživanja Poissonovi slučajni procesi. U nastavku su navedeni te objašnjeni osnovni jednopuslužiteljski Poissonovi podvorbeni sustavi koji imaju beskonačno izvorište:

- $M/M/1/\infty/\infty/FCFS$
- $M/M/1/K/\infty/FCFS$

3.1.1 $M/M/1/\infty/\infty/FCFS$

Kao najjednostavniji jednopuslužiteljski podvorbeni sustav ali i općenito može se izdvojiti $M/M/1/\infty/\infty/FCFS$. Oznaka „M“ predstavlja eksponencijalnu razdiobu pa se prema njoj ravnaju međudolazna vremena i trajanje posluživanja. Treća oznaka u Kendall-ovoj oznaci govori da ovaj sustav ima točno jednog poslužitelja. Prema iduće dvije oznake vidljivo je da sustav ima beskonačni kapacitet, a time i spremnik te da izvorište nema ograničenja. Entiteti se poslužuju po principu „prvi došao – prvi poslužen“. Za svaki sustav podvorbe iznimno je bitno prikazati dijagrame prijelaza koji su za ovaj model prikazani na slici 6 u nastavku.

Važno za napomenuti je kako prelazak iz nižeg u više stanje ovisi o brzini dolazaka korisnika u sustav λ , a prelazak iz višeg u niže stanje o brzini posluživanja, a koja pak ovisi o broju zauzetih poslužitelja.



Slika 6. Dijagram prijelaza za sustav $M/M/1/\infty/\infty/FCFS$

Na ovom i svim idućim dijagramima stanja, brojevi predstavljaju broj korisnika u sustavu. Kao što je vidljivo na slici 6, sustav nema ograničen kapacitet ni izvorište. Vjerojatnost da se nađe u stanju „1“ jednaka je zbroju vjerojatnosti koje slijede:

1. sustav se nalazio u stanju „0“ i da je u nekom vremenu Δt pristigao jedan korisnik na posluživanje,
2. sustav se nalazio u stanju „1“ i u nekom vremenu Δt taj korisnik nije otišao,
3. sustav se nalazio u stanju „1“ ali u nekom vremenu Δt nije pristigao novi korisnik na posluživanje,
4. sustav se nalazio u stanju „2“ i jedan korisnik je otpušten u nekom vremenu Δt (završilo posluživanje).

3.1.2 $M/M/1/K/\infty/FCFS$

Sustav $M/M/1/K/\infty/FCFS$ je svojevrsna modifikacija sustava $M/M/1/\infty/\infty/FCFS$. Razlika je što sada postoji ograničeni kapacitet sustava i on iznosi K . Sustav također ima eksponencijalnu razdiobu međudolaznih vremena kao i trajanje posluživanja uz jednog poslužitelja. S obzirom da je kapacitet sustava ograničen, a on i dalje posjeduje svoj spremnik, maksimalan broj korisnika može se iskazati kao jedan kod poslužitelja i $(K-1)$ u repu. Razlog tomu jest upravo broj poslužitelja što znači da može posluživati samo jednog korisnika u određenom trenutku, a spremnik je umanjeno upravo za tog korisnika koji je na posluživanju. S obzirom da postoji ograničenje sustava, ukoliko entitet ulazi u sustav u kojemu se već nalazi K entiteta, on biva odbijen te nepovratno izgubljen za dotični podvorbni sustav. Govoreći o modelu $M/M/1/K/\infty/FCFS$ može se reći da je to opći sustav s gubicima. Izvorište je i dalje beskonačno i neograničavajuće a stega podvorbe je „prvi došao – prvi poslužen“, [1]. Na slici 7 je prikazan dijagram prijelaza za sustav $M/M/1/K/\infty/FCFS$.



Slika 7. Dijagram prijelaza za sustav M/M/1/K/∞/FCFS

Primjerice, vjerojatnost da se sustav nađe u stanju „K-1“ jednaka je sumi sljedećih vjerojatnosti:

1. sustav se nalazio u stanju „K-2“ i u nekom vremenu Δt pristigao je jedan korisnik na posluživanje,
2. sustav se nalazio u stanju „K-1“ ali u nekom vremenu Δt nijedan korisnik nije otišao,
3. sustav se nalazio u stanju „K-1“ ali u nekom vremenu Δt nijedan korisnik nije pristigao,
4. sustav se nalazio u stanju „K“ i bio maksimalno zauzet, ali u nekom vremenu Δt jedan korisnik je otpušten iz sustava.

Na slici 7 je vidljivo da nakon stanja „K“ nema ucrtanih idućih stanja ni strelica koje bi označavale takav prijelaz iz razloga što je to stanje „K“ ograničavajuće, odnosno maksimalni kapacitet ovakvog sustava što je temeljna razlika u odnosu na ranije spomenuti sustav M/M/1/∞/∞/FCFS, a što je također vidljivo i na načinu određivanja vjerojatnosti da se sustav nađe u određenom stanju.

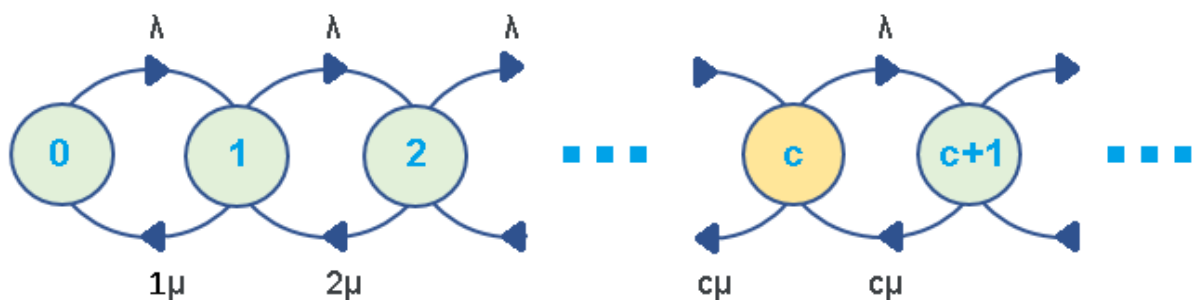
3.2 Višeposlužiteljski Poissonovi podvorbeni sustavi s beskonačnim izvorištem

Višeposlužiteljski sustavi su sustavi kod kojih podvorbu obavlja više poslužitelja istovremeno. Ovakvim projektiranjem sustava omogućuje se veća brzina posluživanja zbog istovremenosti, ali i smanjenje broja izgubljenih entiteta u usporedbi s jednoposlužiteljskim sustavima za iste prometne zahtjeve. Osim u telekomunikacijskom sustavu, višeposlužiteljski sustavi koriste se i u bankovnom sektoru, trgovinama s više istovremeno aktivnih blagajni, naplata cestarina itd. Unatoč činjenici da postoji i velik broj višeposlužiteljskih sustava, naglasak je na Poissonovskim, odnosno onima koji proces dolazaka i posluživanja entiteta ravnaju prema eksponencijalnoj razdiobi. Nadalje su navedeni i objašnjeni neki od takvih sustava:

- $M/M/c/\infty/\infty/FCFS$,
- $M/M/c/c/\infty/FCFS$,
- $M/M/\infty/\infty/\infty/FCFS$.

3.2.1 $M/M/c/\infty/\infty/FCFS$

Kao prvi model višeposlužiteljskog podvorbenog sustava u ovom radu uzima se $M/M/c/\infty/\infty/FCFS$. Kao i ranije spomenuti i objašnjeni jednoposlužiteljski modeli, tako i ovaj karakterizira dolazak entiteta slučajnim Poissonovim procesom. Razdioba vremena posluživanja je također eksponencijalna za svaki pojedini poslužitelj koji egzistira unutar sustava, te se označava s parametrom μ . U ovom slučaju sustav ima više od jednog poslužitelja te se njihov broj označava parametrom c . Poslužitelji funkcioniraju na način da svaki poslužuje određenog korisnika i da je pri tome jedini pri podvorbi tog korisnika, odnosno da tog korisnika ne poslužuje ni u jednom trenutku dva ili više poslužitelja (osim ako je drugačije eksplicitno navedeno). Paralelni poslužitelji su oni koji rade istovremeno. Kod modela $M/M/c/\infty/\infty/FCFS$ korisnici u pravilu nemaju mogućnost proizvoljnog odabira kod kojeg će poslužitelja ići na podvorbu već to ovisi isključivo o tome koji je poslužitelj postao slobodan i dostupan za posluživanje u određenom trenutku. Iz Kendall-ove oznake vidljivo je da ovaj model ima beskonačan kapacitet, odnosno rep za korisnike koji čekaju podvorbu nije ograničen i novi korisnici uvijek se mogu smještati u repu. Politika posluživanja je također „prvi došao – prvi poslužen“, [1]. Na slici 8 je prikazan dijagram prijelaza za podvorbeni sustav $M/M/c/\infty/\infty/FCFS$.

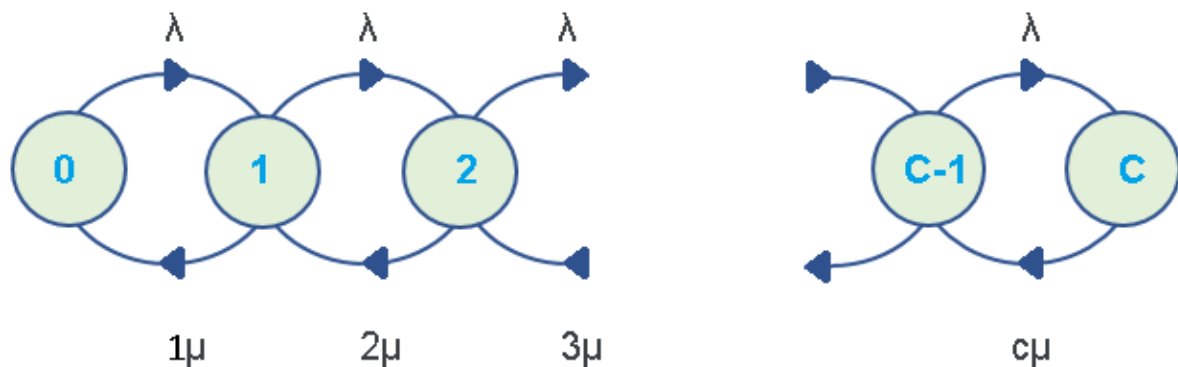


Slika 8. Dijagram prijelaza za sustav $M/M/c/\infty/\infty/FCFS$

3.2.2 $M/M/c/c/\infty/FCFS$

Specifičan slučaj višeposlužiteljskog podvorbenog sustava je $M/M/c/c/\infty/FCFS$. Iz Kendallove oznake je vidljivo kako sustav ima c poslužitelja, ali i kapacitet mu iznosi c . Dakle, maksimalni kapacitet sustava je jednak broju poslužitelja što znači da korisnici bivaju ili odmah posluživani ili odbačeni. Ovaj model podvorbenog sustava nema mogućnost stvaranja repa iz razloga što za taj rep nema dovoljnog kapaciteta.

Razdioba međudolaznih vremena korisnika je i dalje eksponencijalna, baš kao i razdioba vremena posluživanja korisnika. Iz razloga što korisnici ne mogu stvarati rep ovaj sustav se smatra temeljnim podvorbenim sustavom s gubitcima. Entiteti koji nailaze na svih c zaposlenih poslužitelja bivaju blokirani. Razlika temeljnog i općeg sustava s gubitcima jest što kod općeg sustava postoji mogućnost stvaranja repa, [1]. Slika 9 prikazuje dijagram prijelaza za sustav $M/M/c/c/\infty/FCFS$.



Slika 9. Dijagram prijelaza za sustav $M/M/c/c/\infty/FCFS$

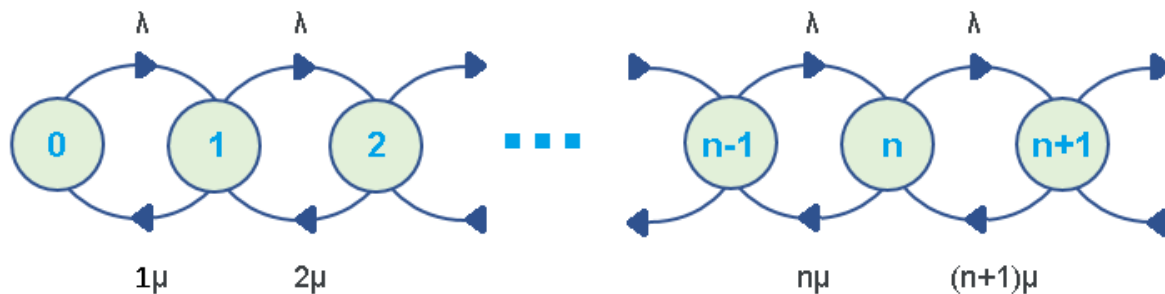
Za model $M/M/c/c/\infty/FCFS$ bitan je slučaj kada je sustav u potpunosti zauzet, odnosno kada je svih c poslužitelja zauzeto i nema mogućnosti stvaranja repa. To je moguće u sljedećim slučajevima:

- ukoliko je sustav bio maksimalno zauzet (u stanju c) i nije završilo posluživanje korisnika,
- ukoliko je sustav bio maksimalno zauzet (u stanju c) i pred sustav je pokušao doći novi korisnik ali je odbačen zbog nemogućnosti formiranja repa,
- ukoliko je sustav bio maksimalno zauzet (u stanju c) i pred sustav nije došao novi korisnik,
- ukoliko je sustav bio u stanju $c-1$ i došao je jedan novi korisnik.

3.2.3 $M/M/\infty/\infty/\infty/FCFS$

Posljednji obrađeni višeposlužiteljski sustav u ovome radu je $M/M/\infty/\infty/\infty/FCFS$. Sustav se razlikuje od prethodnih utoliko što je njegov kapacitet beskonačan, odnosno posao podvorbe obavlja beskonačno mnogo poslužitelja. Do sada spomenuti podvorbeni sustavi su uglavnom imali određen broj poslužitelja pa ukoliko je kapacitet sustava bio veći od tog broja, stvarao bi se rep, a repa ne bi bilo ukoliko je kapacitet sustava jednak broju poslužitelja. Kod ovog sustava nema stvaranja repa iz razloga što je moguće uvijek primiti nove korisnike jer će za svakoga biti raspoloživih poslužitelja. Međudolazna vremena korisnika se ravnaaju po eksponencijalnoj razdiobi, isto kao i razdioba vremena posluživanja. Vjerojatnost prelaska iz višeg u niže stanje

obavezno ovisi i o broju zauzetih poslužitelja, [1]. Dijagram prijelaza za model $M/M/\infty/\infty/\infty/FCFS$ je na slici 10.



Slika 10. Dijagram prijelaza za sustav $M/M/\infty/\infty/\infty/FCFS$

3.3 Temeljni ne-poissonovski podvrobeni sustavi

Da je sustav ne-poissonovski znači da mu proces dolazaka korisnika na posluživanje i/ili proces posluživanja korisnika nije Poissonov, odnosno ne može se koristiti svojstvo zaboravljivosti eksponencijalne razdiobi. Bez previše ulaženja u dubinu, ne-poissonovski sustavi u ovom radu će biti s općom i erlangovom razdiobom. Tako će spomenuti i objašnjeni biti:

- $M/G/1/\infty/\infty/FCFS$
- $M/E_k/1/\infty/\infty/FCFS$

Kod procesa čija se međudolazna vremena i vremena posluživanja ravnaju po eksponencijalnoj razdiobi moguće je koristiti svojstvo zaboravljivosti, odnosno pretpostaviti da svi budući procesi ovise isključivo o sebi, a ne o prethodnim stanjima. Prilikom dimenzioniranja ne-poissonovskih sustava tako nešto nije moguće pretpostaviti jer se spomenuta vremena ne ravnaju po eksponencijalnoj razdiobi, već entiteti dolaze ili odlaze onako kako to definira razdioba po kojoj se ravnaju.

3.3.1 $M/G/1/\infty/\infty/FCFS$

Prvi ne-poissonovski podvrobeni sustav koji će se obraditi u ovome radu je $M/G/1/\infty/\infty/FCFS$. To je najjednostavniji sustav kojemu se neki element ne ravna po eksponencijalnoj razdiobi, u ovom slučaju proces posluživanja korisnika koji se označava slovom G i ravna se nekom općom razdiobom. Proces dolazaka je i dalje Poissonov slučajni proces, a međudolazna vremena ravnaju se prema eksponencijalnoj razdiobi. Ovo je jednoposlužiteljski sustav, a kapacitet mu je beskonačan, odnosno rep nema ograničenja. Izvorište sustava je beskonačno, a politika posluživanja je „prvi došao – prvi poslužen“, [6].

3.3.2 M/E_k/1/∞/∞/FCFS

Osim eksponencijalne i opće (G) razdiobe, međudolazna vremena i vremena posluživanja se prema [6] mogu ravnati i po erlangovoj razdiobi k-tog reda, a to je slučaj kod raspodjele vremena posluživanja za model M/E_k/1/∞/∞/FCFS. Za ovaj sustav proces dolazaka korisnika je i dalje Poissonov slučajni proces s eksponencijalnom razdiobom međudolaznih vremena uz jednog poslužitelja koji ispunjava zahtjeve korisnika. Kapacitet sustava je beskonačan, baš kao i izvorište iz kojega korisnici mogu pristizati.

3.4 Grupni podvorbeni sustavi

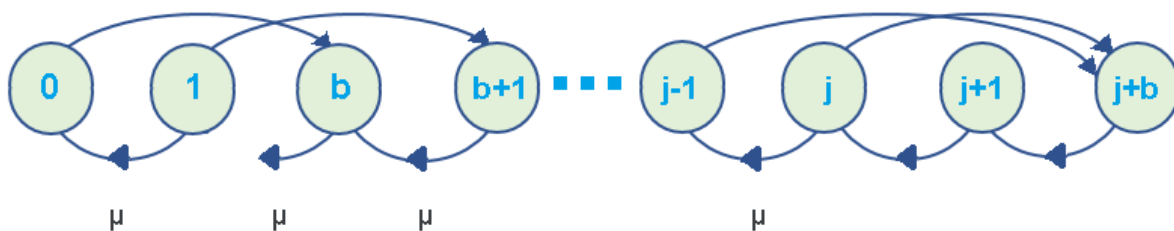
U ranije spomenutim i opisanim podvorbenim sustavima, a neovisno o raspodjeli koja karakterizira proces dolazaka korisnika pred sustav ili njihovo posluživanje svaki proces je podrazumijevao pojedinačnost korisnika. Ovdje je cilj razmotriti slučajeve kada korisnici dolaze u grupama pred sustav na podvorbu ili kada se grupno poslužuju i otpuštaju iz sustava. Nadalje, postoji mogućnost da i proces dolazaka korisnika u sustav kao i njihova podvorba budu grupni, stoga se može reći da postoje tri vrste grupnih podvorbenih sustava kako slijedi:

- Gⁱ/G/c/∞/∞/FCFS
- G/Gⁱ/c/∞/∞/FCFS
- Gⁱ/Gⁱ/c/∞/∞/FCFS

Ni jedan od navedenih sustava nema Poissonov proces jer nemaju ni međudolazna vremena ni vrijeme posluživanja koje se ravna prema eksponencijalnoj razdiobi.

3.4.1 Gⁱ/G/c/∞/∞/FCFS

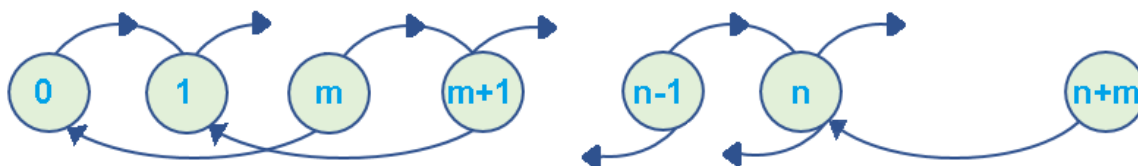
Sustav Gⁱ/G/c/∞/∞/FCFS je grupni podvorbeni sustav kod kojega je proces dolazaka korisnika na podvorbu grupni. Proces posluživanja korisnika nije grupni već je u ovom slučaju opisan nekom općom razdiobom. Sustav ima c poslužitelja uz beskonačan kapacitet i izvorište te politiku posluživanja „prvi došao – prvi poslužen“. Slika 11 prikazuje dijagram prijelaza među stanjima, a vidljivo je kako dijagram iz stanja 0 prelazi u neko stanje b zato što dolazi grupa od b korisnika. Nadalje iz stanja 1 može preći u stanje b+1 ili iz bilo kojeg stanja j u j+b. Proces povrata, odnosno prelazak iz višeg u niže stanje je zapravo umanjivanje za 1 pa će tako iz stanja j+1 vratiti se u j, baš kao i iz stanja 1 u stanje 0, [1].



Slika 11. Dijagram prijelaza za sustav $G^i/G/c/\infty/\infty/FCFS$

3.4.2 $G/G^i/c/\infty/\infty/FCFS$

Osim grupnih dolazaka korisnika oni mogu grupno i napuštati podvorbeni sustav. Primjer takvog sustava je $G/G^i/c/\infty/\infty/FCFS$. I procesi dolaska i napuštanja sustava se ravnaju po općoj razdiobi pa se kaže da sustav nije Poissonov. Ovisan o broju poslužitelja c , sustav ima beskonačan kapacitet te beskonačno izvorište novih korisnika, [1].



Slika 12. Dijagram prijelaza za sustav $G/G^j/c/\infty/\infty/FCFS$

Na slici 12 je vidljiv dijagram prijelaza između stanja za podvorbeni sustav $G/G^j/c/\infty/\infty/FCFS$. Jasno je vidljivo kako u procesu dolazaka korisnika sustav prelazi u više stanje, svaki puta uvećavajući se za 1 (iz stanja 0 u stanje 1, iz stanja m u stanje $m+1$ te iz $n-1$ u stanje n). Proces posluživanja korisnika je grupni te je vidljivo kako sustav iz stanja $n+m$ prelazi u stanje n , odnosno umanjeno je točno za m , a to je očito veličina grupe koja je otpuštena iz sustava. Isto tako prelazak iz stanja $m+1$ u stanje 1 rezultat je posluživanja grupe od m korisnika, kao i prelazak iz m u stanje 0.

3.5 Važnost teorije modela podvorbenih sustava

Mreže su sastavljene od čvorova i linkova koji povezuju čvorove u smislene sustave. Osnovna zadaća čvora je primiti paket te ga proslijediti idućem čvoru. Teorija podvorbenih sustava iznimno je bitna jer objašnjava ponašanje i performanse određenih sustava kao podloge za dimenzioniranje sustava u stvarnosti. Čvorovi mogu i ne moraju imati repove, a o tome u velikoj mjeri ovisi ponašanje sustava. Ranije su

prikazani sustavi koji imaju neograničene repove, ograničene te oni kojima je kapacitet sustava jednak broju poslužitelja, odnosno nemaju rep. Kod sustava s neograničenim repovima korisnici stalno mogu pristizati i čekati u repu na podvorbu i taj sustav se nikada neće prepuniti. Kod sustava s ograničenim repovima, korisnici će pristizati sve dok se rep ne napuni, a svaki idući pristigli korisnik će se odbaciti, dok kod sustava bez repa ($M/M/c/c/\infty/FCFS$), ukoliko nema slobodnog poslužitelja, korisnik odmah biva odbačen. Kako bi entiteti što efikasnije pristizali određištanim čvorovima, kako bi postojala što manja zagušenja u mreži te pogreške bile otklonjene, čvorovi imaju svoje zadaće, a to je detaljnije vidljivo u poglavlju koje slijedi.

4. ZNAČAJ PAKETNOG ČVORA I PRIMJENA PODVORBENIH MODELA U NJEGOVOM OPISU

U paketnm mrežama entiteti (paketi) putuju od čvora do čvora prema unaprijed dogovorenim pravilima (protokolima). Čvor je dio paketne mreže koji obavlja određene operativne postupke u procesu transmisije paketa unutar mreže.

Pojam čvora veže se uz mnoge prometne sustave, a ovdje je naglasak na telekomunikacijskom. Unutar mreža postoji veći broj čvorova. Svaki čvor može biti drugačije konfiguriran te postavke jednog ne vežu nužno i drugi čvor, no za ispravno i sinkronizirano djelovanje mreže postoje zajedničke karakteristike čvorova.

Općenito se uloge paketnog čvora mogu kategorizirati na sljedeće:

- upravljanje usmjeravanjem (eng. *routing control*),
- kontrola toka (eng. *flow control*),
- kontrola pogrešaka (eng. *error control*).

4.1 Upravljanje usmjeravanjem

Osnovna zadaća paketnog čvora u mreži je upravljanje usmjeravanjem. Cilj svake komunikacije je informaciju prenijeti od izvorišta do odredišta. U telekomunikacijskom sustavu je nužno da tako formirani paketi prođu niz čvorova kako bi stigli do krajnjeg odredišta. Konkretno, određivanje rute, odnosno putanje kojom će se paketi kretati kroz mrežu predstavlja upravljanje usmjeravanjem. Ono predstavlja i rješenje kako bi se zadovoljili zahtjevi korisnika.

Za upravljanje usmjeravanjem izvor [8] navodi da je zadatak uspostaviti putove (fizičke ili virtualne) između izvorišta i odredišta uz angažiranje raspoloživih mrežnih resursa na efikasan i efektivan način.

Paketni čvorovi usmjeravanje (rutiranje) obavljaju na način da svakom entitetu koji dođe u sustav (paketu) dodijele izlaznu liniju koja ih vodi prema odredištu. Upravljanje se odnosi na svaki paket koji prolazi kroz čvor i putuje dalje kroz mrežu, [8].

Nadalje, izvor [8] navodi da je upravljanju usmjeravanjem cilj optimizirati performanse u ograničenjima sa sljedećim kriterijima:

- vrijeme prijenosa paketa,
- čekanje,
- pouzdanost i drugo.

Ne postoji neko univerzalno upravljanje usmjeravanjem, već i tu postoji nekoliko koncepata po kojemu se konfiguriraju čvorovi za daljnji rad.

Prema [8], osnovna podjela upravljanja usmjeravanjem daje tri osnovna načina te su u nastavku objašnjena:

1. metoda slučajnog izbora,
2. fiksno usmjeravanje,
3. adaptivno usmjeravanje.

4.1.1 Metoda slučajnog izbora

Kao što i naziv kaže, ovaj način upravljanja usmjeravanjem nema neki unaprijed definirani način ili protokol niti ovisi o bilo kakvim drugim parametrima. Kod metode slučajnog izbora smjerovi se odabiru prema probabilističkim zakonitostima. Prije ulaska u čvor svi paketi imaju jednako vjerojatne smjerove izlaska, no neki se smjerovi mogu preferirati. U ovom slučaju čvorovi nemaju unaprijed definirane tablice usmjeravanja.

4.1.2 Fiksno usmjeravanje

Za razliku od slučajnog izbora, kod fiksnog i adaptivnog usmjeravanja postoje određene pravilnosti usmjeravanja. Fiksno usmjeravanje je jednostavnije u odnosu na adaptivno te podrazumijeva tablice rutiranja u svakom čvoru. Stanje u mreži u svakom trenutku varira i nekad nije najbolje rješenje isporučiti pakete po principu unaprijed definirane rute. Fiksno usmjeravanje upravo to radi i svakom paketu se dodjeljuje izlazna linija bez obzira na trenutno stanje u mreži. Prema [9] fiksno usmjeravanje nije pogodno za procese sa uslugama u stvarnom vremenu. Pojam se u izvorima naziva i „statičko usmjeravanje“.

Fiksno usmjeravanje nije inferiorno adaptivnome u svim situacijama. Konkretno, fiksno usmjeravanje zahtjeva manje logike čime su manje zahtjevni procesi. Čvorovi koji funkcioniraju po principu fiksnog usmjeravanja imaju manje kompleksne algoritme i mehanizme usmjeravanja pa efikasnije iskoriste manje kapacitete sustava [9].

Iako je ranije rečeno da kod fiksnog usmjeravanja rute u tablici usmjeravanja ostaju nepromijenjene, one se mogu promijeniti iznimno u slučajevima kada se promijeni topologija mreže. Osnovna tablica usmjeravanja stvorena je po principu najmanjeg zauzeća, odnosno najkraćeg (najjeftinijeg) puta kroz mrežu [10]. U tablici 1 prikazan je primjer jedne takve tablice usmjeravanja za čitavu mrežu.

Tablica 1. Primjer tablice usmjeravanja

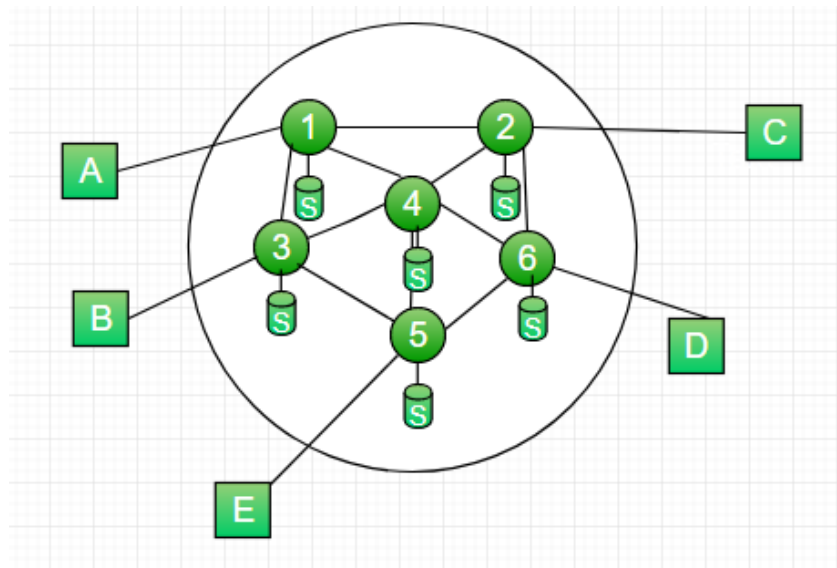
U čvor							
		1	2	3	4	5	6
Iz čvora	1	-	2	3	2	2	2
	2	1	-	1	6	6	6
	3	1	1	-	4	5	1
	4	6	6	3	-	5	6
	5	4	4	3	4	-	4
	6	2	2	2	4	4	-

U tablici 2 je prikazano zapravo ono što je za čvor 1 zapisano u tablici usmjeravanja a proizašlo iz tablice 1. Vidljivo je da čvor 1 može proslijediti paket čvorovima 2, 3, 4, 5 i 6 te na koji čvor mora preusmjeriti paket kako bi on došao do svojeg odredišta.

Tablica 2. Primjer kretanja paketa iz odredišnog u sljedeći čvor

ČVOR 1	
Odredišni čvor	Sljedeći čvor
Čvor 2	2
Čvor 3	3
Čvor 4	2
Čvor 5	2
Čvor 6	2

Primjerice, vidljivo je na slici 13 da između čvora 1 i čvora 5 nema direktne poveznice pa će tako paket biti preusmjeren na čvor 2. Iako je moguće do odredišta doći i putem čvora 3, preferirat će se putanja preko čvora 2 jer je tako definirano tablicom usmjeravanja što je vidljivo u tablicama 1 i 2.



Slika 13. Primjer topologije mreže, [11]

4.1.3 Adaptivno usmjeravanje

Adaptivno usmjeravanje je znatno kompleksnije u odnosu na fiksno. U čvorištima također postoje tablice usmjeravanja prema kojima čvorovi obavljaju svoj posao. Temeljna je razlika što se sada čvorovi ne drže unaprijed definiranih tablica baš u svakoj situaciji već se one mogu mijenjati s obzirom na trenutno stanje u mreži. Adaptivno se usmjeravanje naziva još i dinamičkim te zahtjeva veće sposobnosti sustava kako bi čvor logikom odredio na koji izlaz pustiti paket. Većina današnjih mreža funkcionira na način da čvorovi adaptivnom metodom prosljeđuju pakete. U svakoj mreži osim one koja je relativno mala i nepromjenjiva ovaj način ostvaruje prednosti, a pogotovo ukoliko se koriste usluge u stvarnom vremenu. Prednosti adaptivnog načina usmjeravanja prema [10] su:

- u slučaju prekida nekog linka, promet se usmjerava na neki drugi link,
- povećava performanse mreže u cijelosti,
- pomaže u izbjegavanju zagušenja mreže.

Usmjeravanje na temelju trenutnog stanja ne bi bilo moguće bez protokola usmjeravanja, a izvor [12] navodi da su glavni među njima:

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

4.2 Kontrola toka

Prema [15] kontrola toka ima za cilj:

- preventivno djelovati da ne dođe do gubitaka podataka zbog ograničenih memorijskih kapaciteta mrežnih spremnika,
- spriječiti zagušenja i preopterećenja,
- poboljšati propusne performanse mreže uz iste ili niže troškove resursa.

Funkcionalnosti kontrole toka mogu biti implementirane u bilo koji podsustav paketne mreže. Tako postoje fiksne (statičke) te varijabilne (dinamičke) kontrolne metode.

Klasifikacija kontrole toka obuhvaća tzv. „otvorenu petlju“ koja podrazumijeva kontrolu dopuštanja slanja podataka, ima statičku karakteristiku i odvija se za vrijeme uspostave konekcije i zatvorenu petlju koja predstavlja adaptivnu kontrolu toka za vrijeme trajanja veze, [15].

4.3 Kontrola pogrešaka

Tijekom prijenosa mrežnog prometa uvijek postoji mogućnost da se dogodi pogreška. Sustav kod kojeg nema nikakve mogućnosti za pogrešku, odnosno onaj kod kojega je svaki stupanj rizika otklonjen ne postoji. U ovom kontekstu pogreškom se smatra kada paket od pošiljatelja ne pristigne ka primatelju. Problematiku nepristiglih paketa se ne može zanemariti, a upravo čvorovi imaju implementiranu tehniku kontrole i sanacije pogrešaka u prijenosu, [13].

Izvor [13] navodi dva tipa kategorizacije pogrešaka prilikom prijenosa paketa:

1. pogreška jednog bita,
2. pogreška „praska“.

Pogreškom jednog bita smatra se promjena jednog bita u odnosu na originalno odaslanu informaciju. Primjerice, pošiljatelj je odaslao 101 bit, a primatelj primio 100 bitova. Pogreška „praska“ naziv je za slučaj kada dođe do promjene u dva ili više bitova originalno odaslanih podataka.

Kontrola pogrešaka ima ovisno o izvoru dvije ili tri faze. Izvor [13] navodi tri a to su:

- detekcija pogreške,
- potvrda o prijemu (negativna),
- retransmisija.

Prva i ključna faza prilikom kontrole pogrešaka u sustavu je njihova detekcija. Potrebno je usporediti informaciju pristiglu na odredišnu stranu s onom na strani pošiljatelja te tako ustanoviti ima li pogrešaka ili ne.

4.3.1 Detekcija pogrešaka

Detekcija pogrešaka uključuje sljedeće provjere:

- provjera vertikalne redundantnosti,
- provjera longitudinalne redundantnosti,
- ciklička provjera redundantnosti,
- provjera sume.

Provjera vertikalne i longitudinalne redundantnosti nazivaju se još i provjerom pariteta. To je najjednostavnija metoda detekcije pogrešaka. Parni paritet predstavlja paran, a neparni predstavlja neparan broj jedinica u nizu.

Ciklička provjera redundantnosti (*Cyclic Redundancy Check* – CRC) je metoda gdje dolazi do podjele bitova koje je potrebno prenesti, a izvor [14] ih označava slovom D. Pošiljalac i primatelj se moraju složiti oko uzorka s $r+1$ bitova, a [14] ga naziva generatorom i označava slovom G. Podatkovnim bitovima D potrebno je odabrati dodatne bitove R. Uzorak s $d+r$ bitova treba biti djeljiv s generatorom (G). Pri provjeri na strani prijavnika dolazi do dijeljenja $d+r$ i G te ukoliko ostatak nije nula radi se o pogrešci, [14].

Provjera sume je način detekcije pogreške kada pošiljalac generira sumu vezanu uz podatke radi lakše detekcije pogreške. Primatelj također generira sumu na temelju primljenih podataka. Na strani pošiljalca se poruka dijeli na određen broj bitova, nad svime se obavlja komplementacija, nakon komplementacije nastaje *checksum* i pošiljalac šalje podatke zajedno sa sumom. Kod primatelja se poruka dijeli na određen broj riječi, zbrajaju se riječi korištenjem jednog komplementa, vrijednost nakon komplementacije postaje suma čija je vrijednost bitna, jer ukoliko je ona nula poruka će se prihvatiti, a u suprotnome odbaciti [13].

4.3.2 Korekcija pogrešaka

Retransmisija se pokreće kada je bilo kakva pogreška u prijenosu detektirana, odnosno kada je ustanovljeno da određeni dijelovi poruke ili neke metode detekcije nisu pristigli. Taj se proces oslanja na metodi automatskog zahtjeva za ponavljanje (*Automatic Repeat Request* – ARQ). Retransmisija može djelovati na dva načina:

- stani i čekaj ARQ (eng. *stop and wait ARQ*)
- *sliding window* ARQ

Neophodno je korištenje ARQ protokola. Metoda „stani-i-čekaj“ funkcionira po principu da ukoliko primatelj ne primi potvrdu o primitku s određene strane u određenom vremenu shvaća da podaci nisu uspješno primljeni te ponavlja postupak odašiljanja, tj. obavlja retransmisiju. Ukoliko primatelj detektira neku pogrešku u pristiglim paketima šalje negativnu potvrdu prijema (eng. *negative acknowledgement* – NACK). Nakon primanja NACK poruke, pošiljalac ponovno odašilje sadržaj.

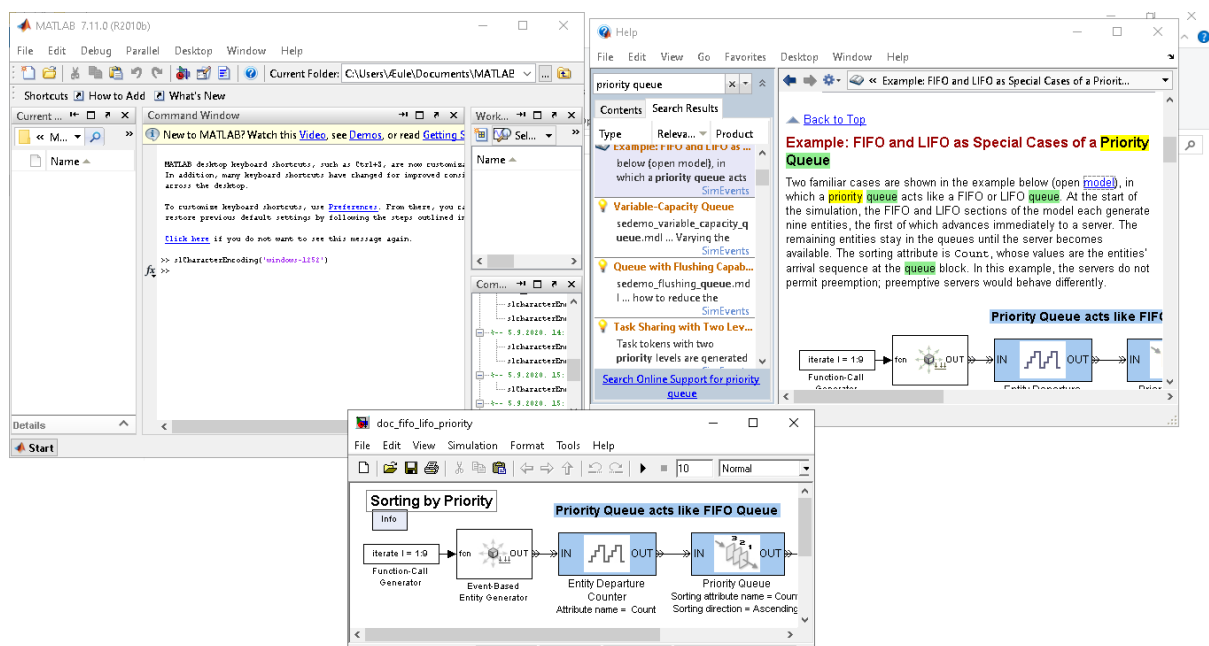
Metodom „klizećih prozora“ pošiljalatelj odjednom može poslati više okvira podataka u istom vremenu i zadržava zapis o tome sve dok nisu paketi potvrđeni od strane primatelja. Primatelj može poslati ACK ili NACK poruku ovisno o tome jesu li pogreške detektirane te je li sadržaj ispravno primljen ili izgubljen, [13].

5. ANALIZA PERFORMANSI MREŽE PAKETNIH ČVOROVA KORIŠTENJEM SIMULACIJSKOG ALATA

5.1 Opis i oblikovanje radnog okruženja

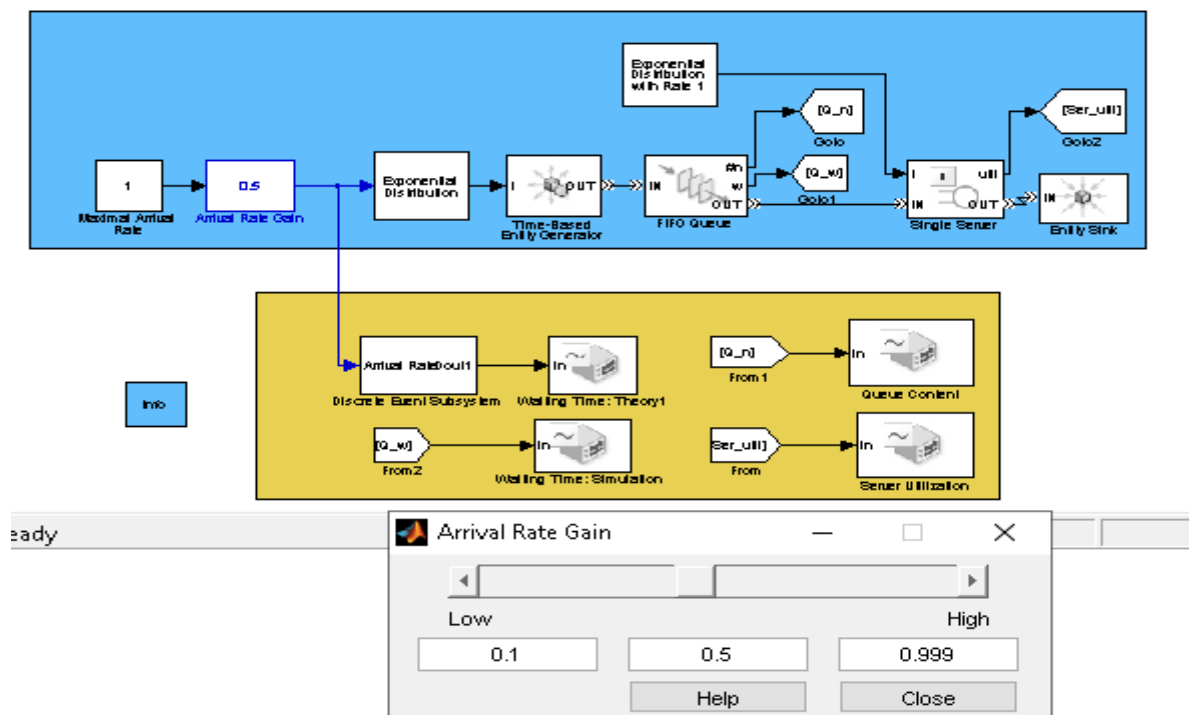
U ovom poglavlju bit će prikazana suština ovog diplomskog rada, programsko okruženje za provedbu analize te i provedba same analize. Kako je tema rada analiza parametara performansi podvorbjenih sustava s prioritetskim posluživanjem može se takve sustave usporediti sa sustavima bez prioriteta, primjerice sa sustavom M/M/1/∞/∞/FCFS kod kojega se podvorba obavlja po modelu „prvi došao – prvi poslužen“.

Simulacijski alat u kojemu su provedene analize je MATLAB R2010b. Unutar programskog okruženja postoji simulator pomoću kojega je moguće obavljati analize raznih vrsta sustava, a koji se zove Simulink. Radno okruženje alata MATLAB te simulatora Simulink s otvorenim definiranim modelom za prioritetsno posluživanje prikazan je na slici 14.



Slika 14. Radno okruženje alata MATLAB

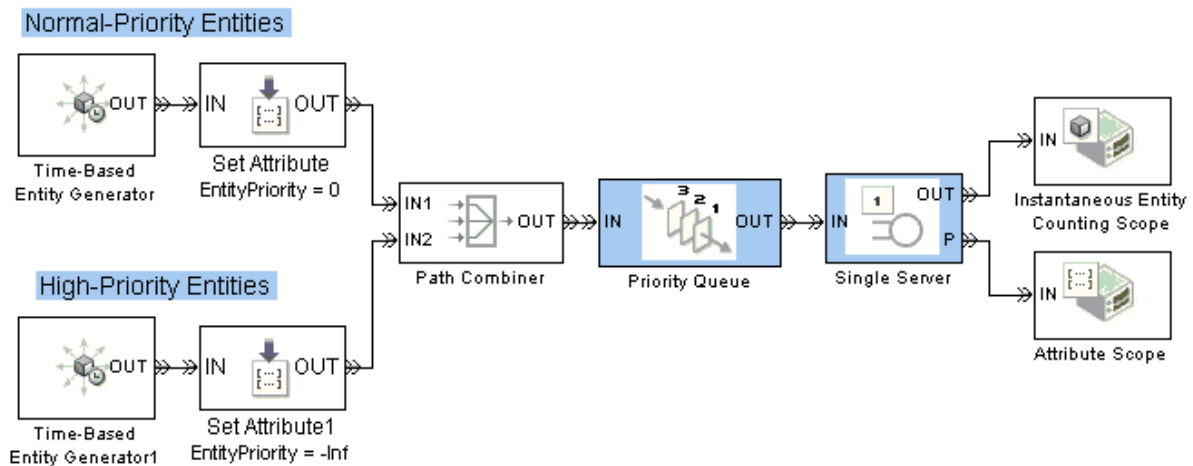
Kako bi se sastavio sustav s prioritetskim posluživanjem, potrebno je ponajprije poznavati neke zakonitosti vezane uz posluživanje bez prioriteta. Simulink sadrži unaprijed definirane modele koji se mogu iskoristiti u samoj analizi, ali i proizvoljno modificirati. Za potrebe ovog rada iskorišten je sustav M/M/1/∞/∞/FCFS čiji se model nalazi na slici 15.



Slika 15. Model M/M/1/∞/∞/FCFS u Simulinku

Bitno je objasniti značenje pojedinih elemenata na shemi. Tako se *Maximal Arrival Rate* i *Arrival Rate Gain* zajedno množe, a njihov umnožak predstavlja intenzitet dolazaka entiteta. Sljedeći element je *Exponential Distribution* koji međudolazna vremena ravna prema eksponencijalnoj razdiobi. Element *Time Based Entity Generator* je zapravo element koji generira entitete, a na shemi je vidljivo kako su elementi prije njega spojeni na ulaz t. Dakle, on generira entitete kao umnožak elemenata *Maximal Arrival Rate* i *Arrival Rate Gain* ravnanjući njihova međudolazna prema eksponencijalnoj distribuciji. Element *FIFO Queue* je red u koji entiteti pristižu te čekaju na podvorbu, u ovom slučaju po modelu „prvi došao – prvi poslužen“. Nakon reda, entiteti dolaze do elementa *Single Server* koji predstavlja poslužitelja, a njegov je ulaz (IN) ujedno i izlaz iz repa. Poslužitelju je u ovom slučaju pridružen i t-ulaz na koji je dodan element za eksponencijalnu razdiobu, a to znači da se vremena posluživanja ravnaju po njoj. Element *Entity Sink* znači da su entiteti izašli iz sustava ili završili podvorbu. Kasnije mogu biti proizvoljno dodani elementi za ispis rezultata u brojčanom ili grafičkom obliku.

Nakon prikazanog modela bez prioritnog posluživanja bitno je prikazati model koji preferira određene entitete. U Simulinku također postoji nekoliko unaprijed definiranih takvih modela, no za potrebe ovog rada uzeta je određena kombinacija, ranije definiranog modela uz neke izmjene. Primjer jednog jednostavnog modela s prioritima nalazi se na slici 16.



Slika 16. Model podvorbe s prioritetskim posluživanjem

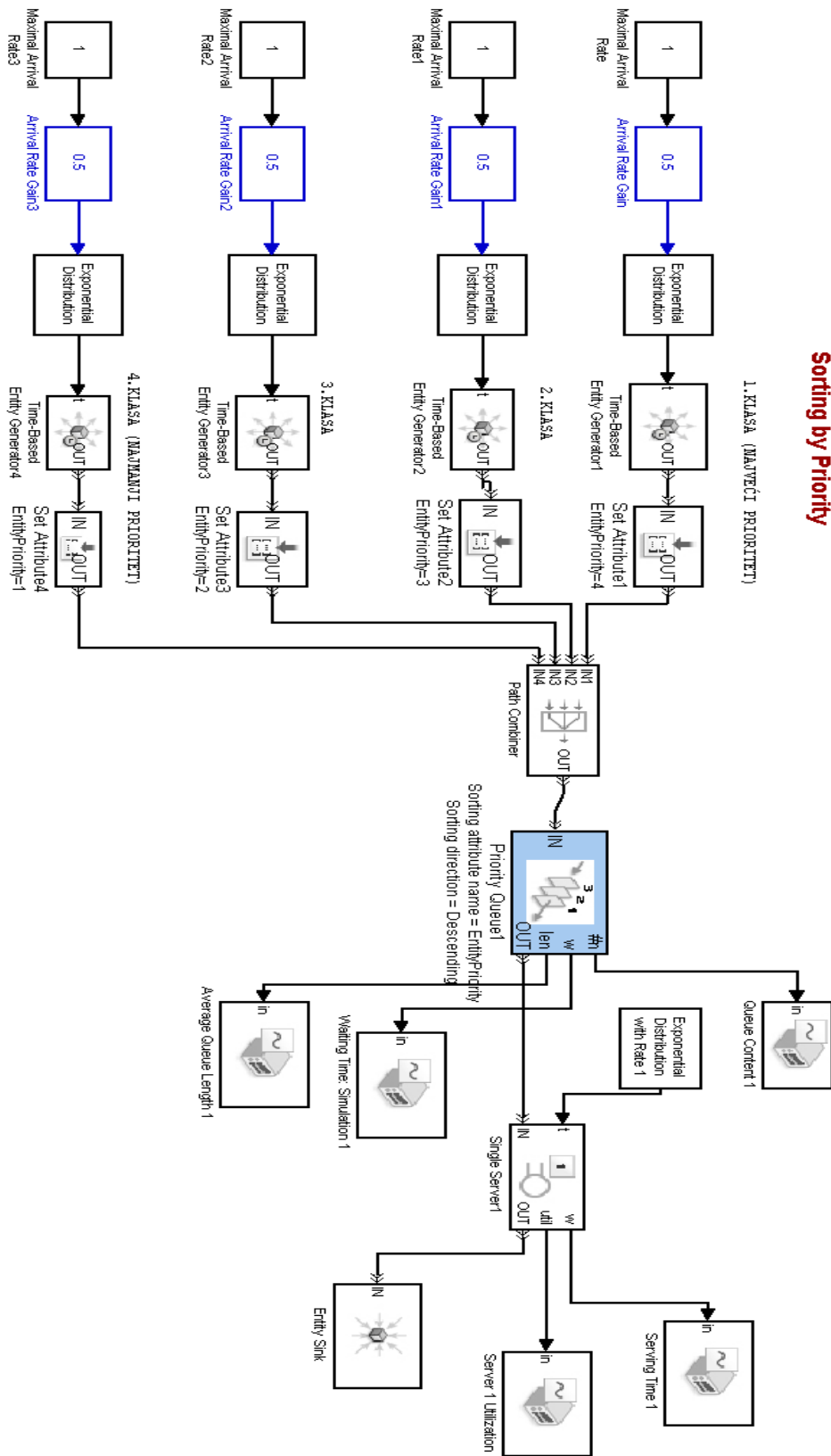
Kako je rečeno, postoji nekoliko vrsta modela s prioritetima, a za potrebe ovog rada najlogičniji izbor bi bio model prikazan na slici 16. *Element Time-Based Entity Generator* generira ulazne entitete baš kao i na modelu prikazanom na slici 15 (za sustav M/M/1/∞/∞/FCFS) te ih prosljeđuje do elementa koji se zove *Set Attribute*. Taj element je od visoke važnosti za model jer se u njemu definira popis atributa po kojima se može određivati prioritet podvorbe. U nastavku rada će biti detaljnije opisan jer je tako konfiguriran koeficijent važnosti pojedinog entiteta, a samim time se može reći da su im dodijeljene klase. Nadalje, *Path Combiner* element se može smatrati svojevrsnom „spojnicom“ odnosno mjestom gdje se više ulaza entiteta stapa u jedan. On prosljeđuje entitete dalje ka *Priority Queue* elementu koji predstavlja red (rep), isto kao FIFO Queue element kod modela M/M/1/∞/∞/FCFS. Također moguće je rep konfigurirati na način da mu se mijenjaju kapacitet, kriterij odabira entiteta za podvorbu te izlazni portovi, prema poslužitelju ili za ispis rezultata. Kod reda je moguće ispisati rezultate za vrijeme čekanja, prosječnu duljinu reda te sadržaj reda. *Single Server* element je poslužitelj, može se definirati otkuda ravna svoje vrijeme posluživanja te također izlazni portovi za ispis vremena posluživanja te zauzeća poslužitelja.

Na slici 16 nakon poslužitelja dolaze elementi za ispis, a u nastavku gdje su prikazani modeli s jednim, dva i tri serijska poslužitelja izlaz iz jednog ujedno znači ulaz u novi poslužitelj. U odnosu na unaprijed definirani model prikazan na slici 16, napravljene su sljedeće izmjene:

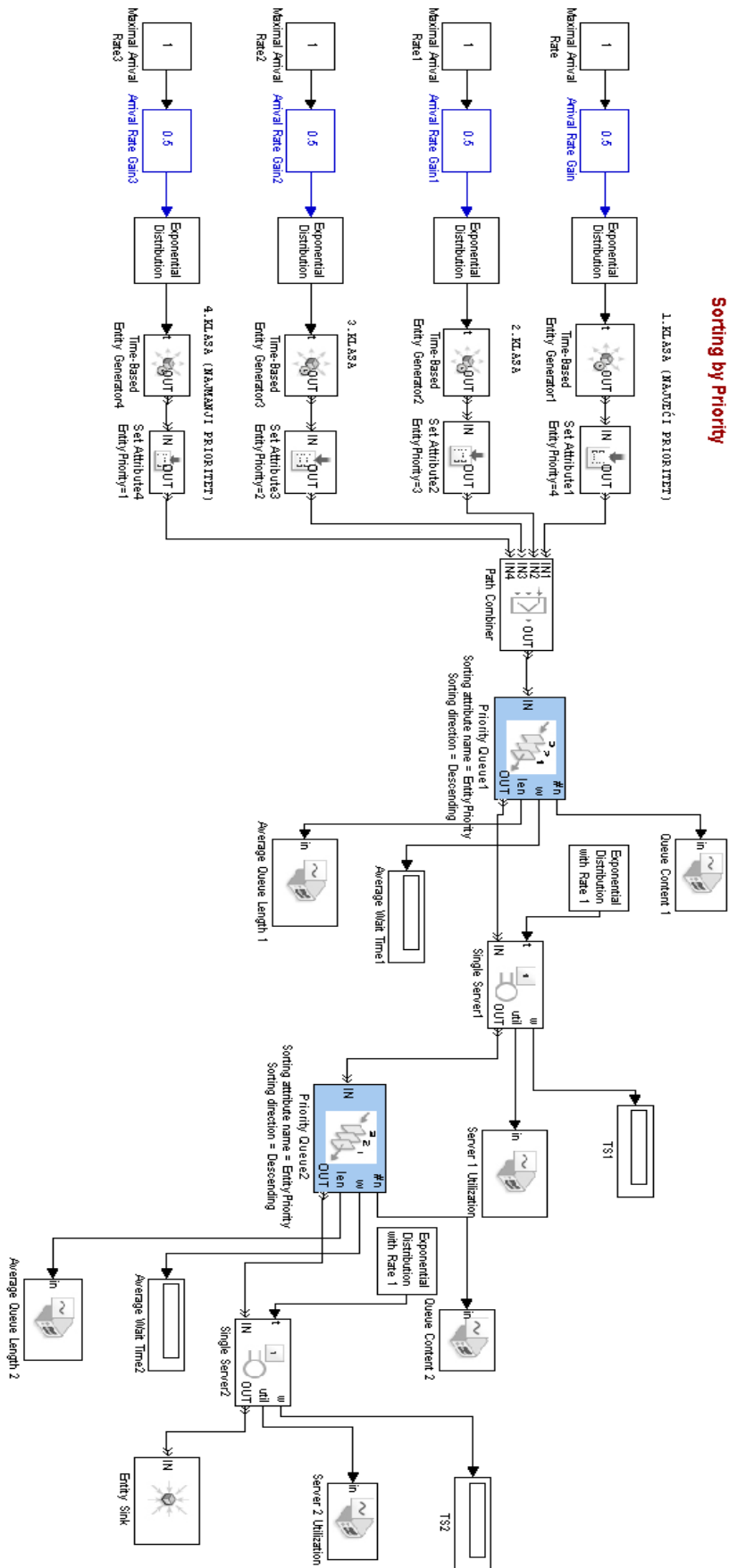
- postaviti elemente za određivanje intenziteta dolazaka entiteta,
- postaviti eksponencijalno ravnanje međudolaznih vremena,
- postaviti važnost entiteta (time se definiraju klase),
- prilagoditi broj ulaza s obzirom na broj klasa u elementu *Path Combiner*,
- kod reda postaviti kao atribut ravnjanja odabrati koeficijent važnosti entiteta,
- poslužitelju dodati ravnanje posluživanja po eksponencijalnoj razdiobi,
- nakon poslužitelja povezati novi red i novi poslužitelj (tako da ih bude tri) .

Prikaz modela s prioritetskim posluživanjem nalazi se na slici 17 za jedan, na slici 18 za dva te na slici 19 za tri čvora.

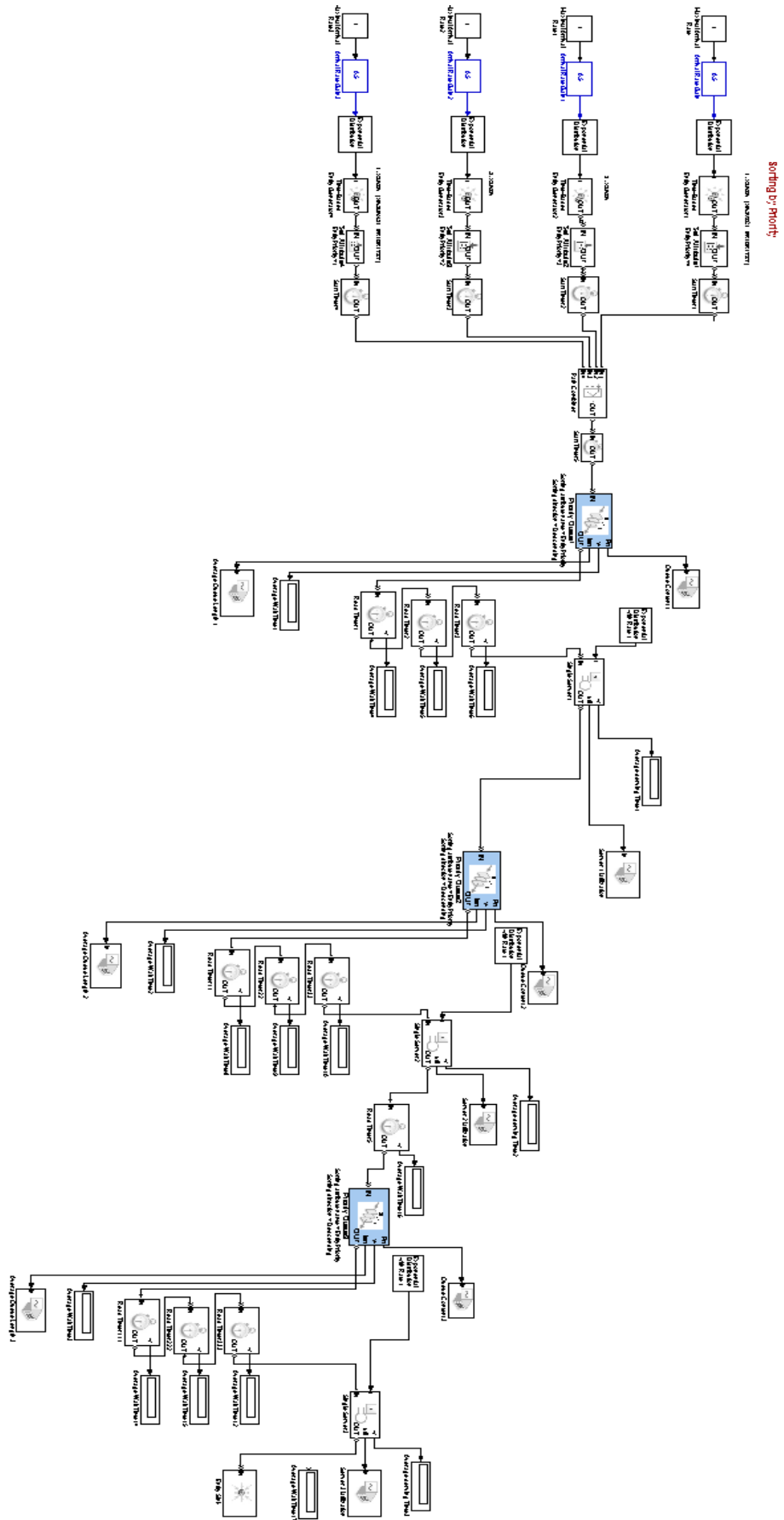
Sorting by Priority



Slika 17. Model sustava s jednim poslužiteljem za prioritetno posluživanje



Slika 18. Model sustava s dva poslužitelja za prioritarno posluživanje



Slika 19. Model sustava s tri poslužitelja za prioritetno posluživanje

Zamisao je da se analiza prvo provede za jedan sustav bez prioriteta, a potom za sustav s prioritetom. Najprije će se analizirati sustavi s jednim poslužiteljem, a potom sustavi s dva i tri serijska poslužitelja.

Kod svakog sustava važni parametri su:

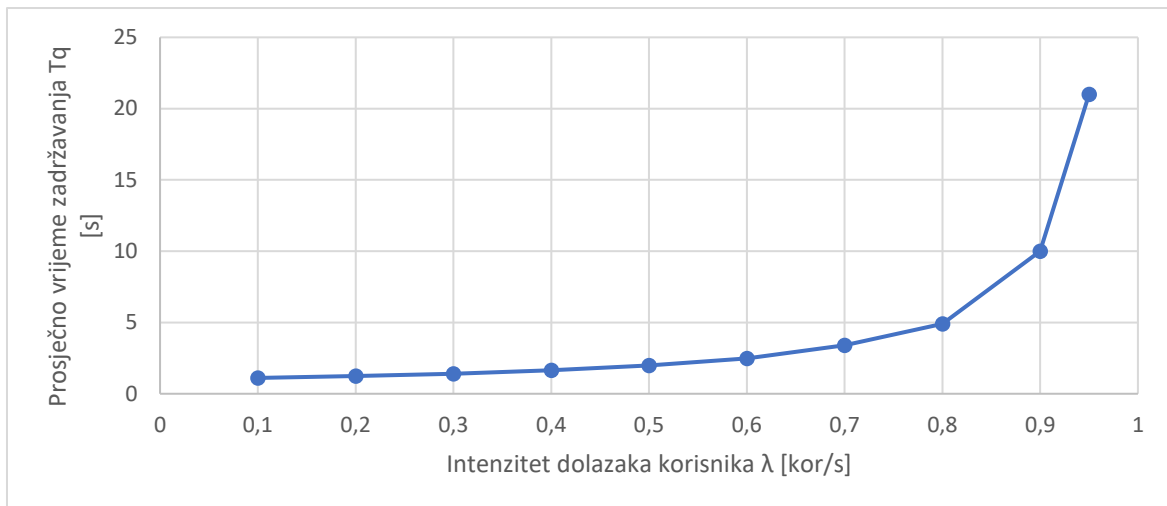
- prosječno vrijeme čekanja u redu (T_w),
- vrijeme posluživanja na poslužitelju (T_s),
- intenzitet dolazaka korisnika (λ),
- prosječno vrijeme zadržavanja u sustavu (T_q).

5.2. Analiza sustava bez prioritnog posluživanja

Kod prve analize postaviti će se vrijeme posluživanja kao fiksno te ono iznosi $T_s=1s$. Parametar koji će se mijenjati jest intenzitet dolazaka korisnika (λ) pred podvorbni sustav, a iznosi koji će biti korišteni u analizi su od 0,1 do 0,95 [kor/s]. Rezultati simulacija dani su u tablici 3, a s obzirom da je zadržavanje ključan parametar, ono je prikazano i grafički na slici 20.

Tablica 3. Rezultati analize sustava bez prioritnog posluživanja

Broj simulacije	Intenzitet dolazaka λ [kor/s]	Prosječno vrijeme čekanja T_w [s]	Vrijeme posluživanja T_s [s]	Prosječno vrijeme zadržavanja T_q [s]
1	0,1	0,11	1	1,11
2	0,2	0,24	1	1,24
3	0,3	0,4	1	1,4
4	0,4	0,65	1	1,65
5	0,5	0,99	1	1,99
6	0,6	1,49	1	2,49
7	0,7	2,4	1	3,4
8	0,8	3,9	1	4,9
9	0,9	9	1	10
10	0,95	20	1	21



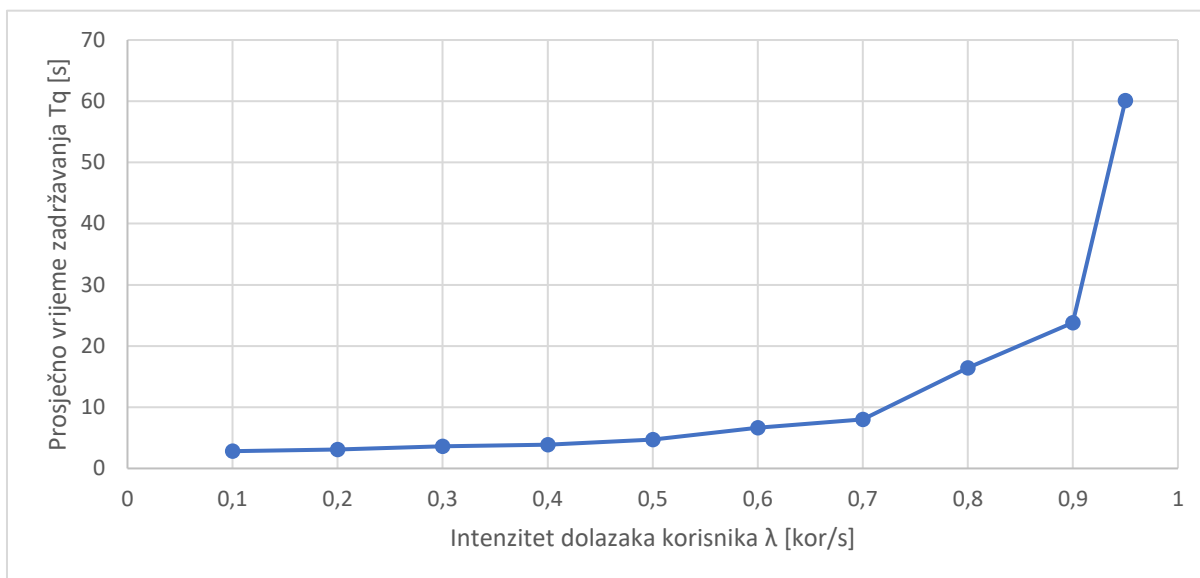
Slika 20. Graf kretanja prosječnog vremena zadržavanja za sustav M/M/1/ ∞ / ∞ /FCFS

5.3. Analiza sustava s prioritetnim posluživanjem

5.3.1 Analiza sustava s jednim poslužiteljem

Nakon analize ovisnosti prosječnog vremena zadržavanja o intenzitetu dolazaka za sustav bez prioriteta, ista analiza je provedena za sustav s dodijeljenim prioritetima. Na slici 17 je vidljiv model stvoren u Simulinku s prioritetima uz jednog poslužitelja. To je idealan način za ispitati sličnosti i razlike u odnosu na ranije analizirani sustav. Na istoj je slici vidljivo kako se radi o četiri klase važnosti i da je za svaku definiran parametar λ , odnosno intenzitet dolazaka korisnika. Bitno je napomenuti da se kod svake od simulacija dodjeljuje isti intenzitet dolazaka za svaku klasu, primjerice $\lambda=0,1$ za sve četiri klase. Na slikama koje prikazuju modele s implementiranim prioritetnim posluživanjem (slika 17, 18 i 19) vidljivo je kako je za svaku klasu stvoreno jedno izvorište. Ovdje je bitno naglasiti da se intenziteti dolazaka svih četiriju klasa zbrajaju. S obzirom da su u trenutku svake simulacije identični intenziteti dolazaka korisnika za sve klase kojih ima četiri, potrebno je unesti četiri puta manje vrijednosti intenziteta dolazaka za svaku klasu pojedinačno u odnosu na ukupni željeni intenzitet, primjerice za ukupni željeni intenzitet $\lambda=0,1$ [kor/s] za svaku klasu treba postaviti $\lambda=0,025$ [kor/s].

Provedena analiza daje rezultate prosječnog vremena zadržavanja prikazanog grafički na slici 21.



Slika 21. Graf prosječnog vremena zadržavanja za sustav s jednim poslužiteljem za prioritetnu podvorbu

Analiza provedena na sustavu s prioritetskim posluživanjem za fiksno vrijeme posluživanja $T_s = 1$ sekunda dalo je rezultat prikazan na slici 21. Vidljivo je kako se s promjenom intenziteta nailazaka korisnika mijenja i prosječno vrijeme zadržavanja. Sustav ima minimalno vrijeme zadržavanja pri intenzitetu dolazaka $\lambda=0,1$ [kor/s] i ono iznosi $T_q = 2,819$ [s]. Maksimalno vrijeme zadržavanja u sustavu je za maksimalni zadani intenzitet dolazaka $\lambda=0,95$ [kor/s] i iznosi $T_q = 60,13$ [s]. S povećanjem intenziteta dolazaka između minimalnog i maksimalnog vrijeme zadržavanja paketa u sustavu se povećava. Analiza je provedena za sve intenzitete dolazaka dva puta kako bi se povećala vjerodostojnost dobivenih i prikazanih rezultata.

5.3.2 Analiza sustava s dva poslužitelja

Analiza je provedena i nad sustavom podvorbe s dva serijska poslužitelja uz implementirano dodjeljivanje prioriteta klasama. Shema takvog sustava prikazana je na slici 18. Ponovno valja napomenuti kako je postavljeno vrijeme posluživanja na oba poslužitelja jednako i ono iznosi $T_s = 1$ sekunda. Simulacije su također obavljene uz modifikaciju intenziteta dolazaka korisnika uz napomenu da su u trenutku svake simulacije svakoj klasi dodijeljeni identični intenziteti dolazaka korisnika. Postavljeni ulazni parametri kao i rezultati dobiveni provedenom analizom vidljivi su u tablici 4.

Tablica 4. Rezultati analize sustava s dva serijska poslužitelja za prioritarno posluživanje

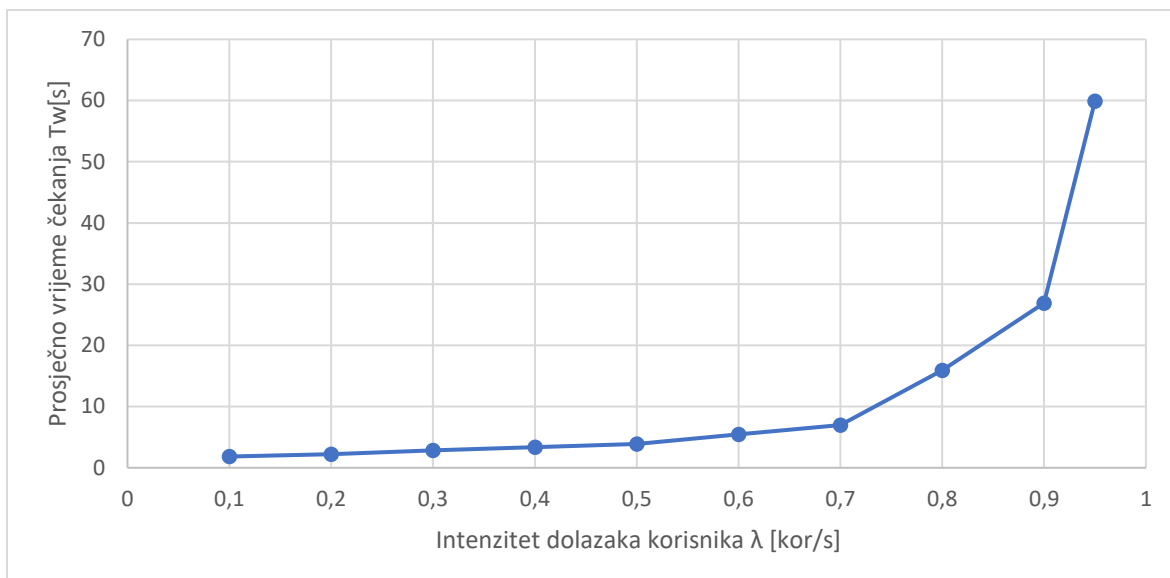
Broj simulacije	Intenzitet dolazaka korisnika λ [kor/s]	Ts1 [s], Ts2[s]	Tw1 [s]	Tw2 [s]	Tq [s]
1	0,1	1	1,837	0,005439	3,842439
2	0,2	1	2,195	0,04416	4,23916
3	0,3	1	2,823	0,0531	4,8761
4	0,4	1	3,365	0,06352	5,42852
5	0,5	1	3,875	0,08055	5,95555
6	0,6	1	5,449	0,209	7,658
7	0,7	1	6,977	0,06021	9,03721
8	0,8	1	15,93	0,2262	18,1562
9	0,9	1	26,88	0,06245	28,94245
10	0,95	1	59,93	0,01298	61,94298

Ponovno je kašnjenje ključan parametar pa se analiza performansi sustava temelji na analizi čekanja, a potom se radi izračun prosječnog vremena zadržavanja. Općenito se vrijeme zadržavanja (T_q) može definirati kao zbroj vremena čekanja u svim redovima i vremena posluživanja na svakom poslužitelju. Za dva poslužitelja spojena serijski, vrijeme zadržavanja se može prikazati kao:

$$T_{q2} = T_{w1} + T_{s1} + T_{w2} + T_{s2} \quad (5)$$

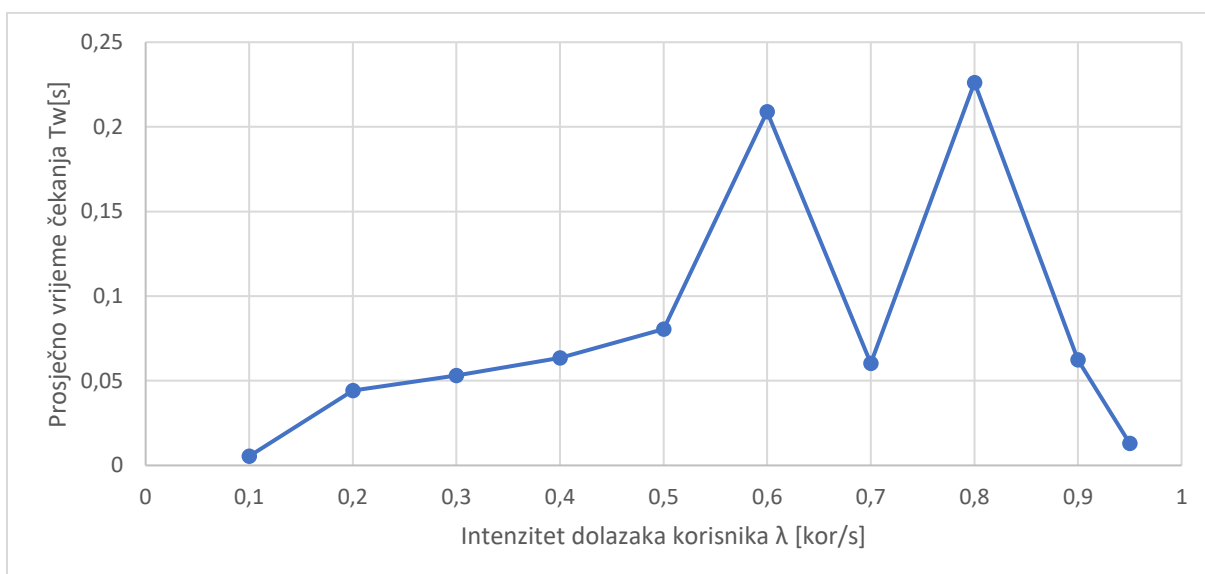
Za svaku simulaciju zbrojena su vremena posluživanja i čekanja u svakom čvoru te dobivene vrijednosti vremena zadržavanja u cijelom sustavu.

Na slici 22 je prikazana ovisnost vremena čekanja o intenzitetu dolazaka korisnika na prvom serijskom poslužitelju.



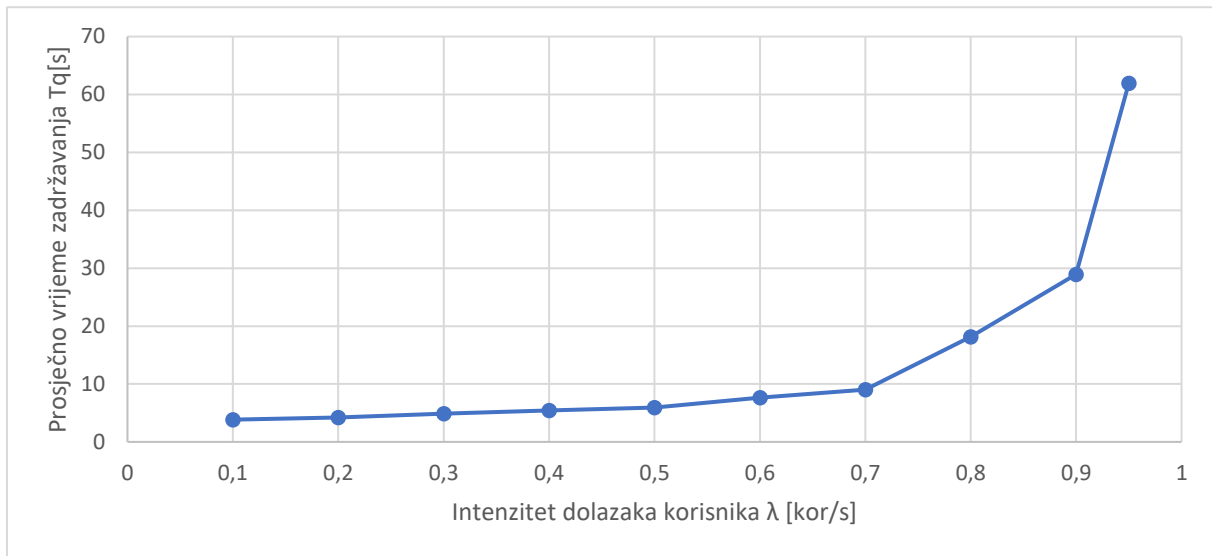
Slika 22. Graf prosječnog vremena čekanja na prvom od dva serijska poslužitelja

Na grafu na slici 22 je vidljivo kako se prosječno vrijeme čekanja na prvom poslužitelju kod sustava s dva serijska poslužitelja kreće na način da pri intenzitetu dolazaka korisnika 0,1 [kor/s] prosječno vrijeme čekanja iznosi 1,837 [s] i postepeno raste sve do intenziteta 0,7 [kor/s] kada počinje sve oštrije rasti. Pri maksimalnom testiranom intenzitetu 0,95 [kor/s] prosječno vrijeme čekanja iznosi 59,93 [s]. Ovakvo kretanje prosječnog vremena čekanja direktno utječe na kretanje prosječnog vremena zadržavanja što je vidljivo u nastavku. Slijedi slika 23 s grafom ovisnosti prosječnog vremena čekanja o intenzitetu dolazaka korisnika pri drugom poslužitelju.



Slika 23. Graf prosječnog vremena čekanja na drugom od dva serijska poslužitelja

Graf na slici 23 prikazuje rast prosječnog vremena čekanja s rastom intenziteta dolazaka korisnika na drugom poslužitelju. Oštrij rast je vidljiv do intenziteta od 0,6 [kor/s] te oštar pad za 0,7 [kor/s]. Ponovni rast se bilježi za intenzitet 0,8 [kor/s] nakon čega slijedi postepeno smanjenje prosječnog vremena čekanja.



Slika 24. Graf prosječnog vremena zadržavanja u sustavu s dva serijska poslužitelja

Graf na slici 24 prikazuje ovisnost prosječnog vremena zadržavanja u sustavu za entitete u ovisnosti o intenzitetu dolazaka korisnika. Minimalno ukupno vrijeme zadržavanja je pri minimalnom intenzitetu $\lambda=0,1$ [kor/s] te iznosi 3,844 [s]. Nakon toga je vidljiv porast prosječnog vremena čekanja s rastom intenziteta dolazaka pa svoj maksimum doseže pri maksimalnom intenzitetu dolazaka $\lambda=0,95$ [kor/s] i iznosi 61,94 [s]. S obzirom da je vrijeme čekanja na drugom poslužitelju gotovo zanemarivo u odnosu na vrijeme čekanja na prvom poslužitelju, očekivan je bio rezultat prikazan na slici 24. Može se reći da prvi poslužitelj uglavnom diktira sveukupno vrijeme zadržavanja u sustavu.

5.3.3 Analiza sustava s tri poslužitelja

Provedena je analiza nad sustavom s prioritetskim posluživanjem s tri serijska poslužitelja u nizu. Parametri su isti kao i u prethodnoj analizi, kod sustava s dva serijska poslužitelja. Postavljeno je fiksno vrijeme posluživanja i ono iznosi $T_s=1$ sekunda. U tablici 5 su kao i u prethodnom slučaju prikazani rezultati simulacija. Opet ne postoji nikakva razlika u intenzitetu nailazaka korisnika između klasa. Prikupit će se podaci o prosječnom vremenu kašnjenja te uz fiksno vrijeme posluživanja izračunat će se prosječno vrijeme zadržavanja u sustavu.

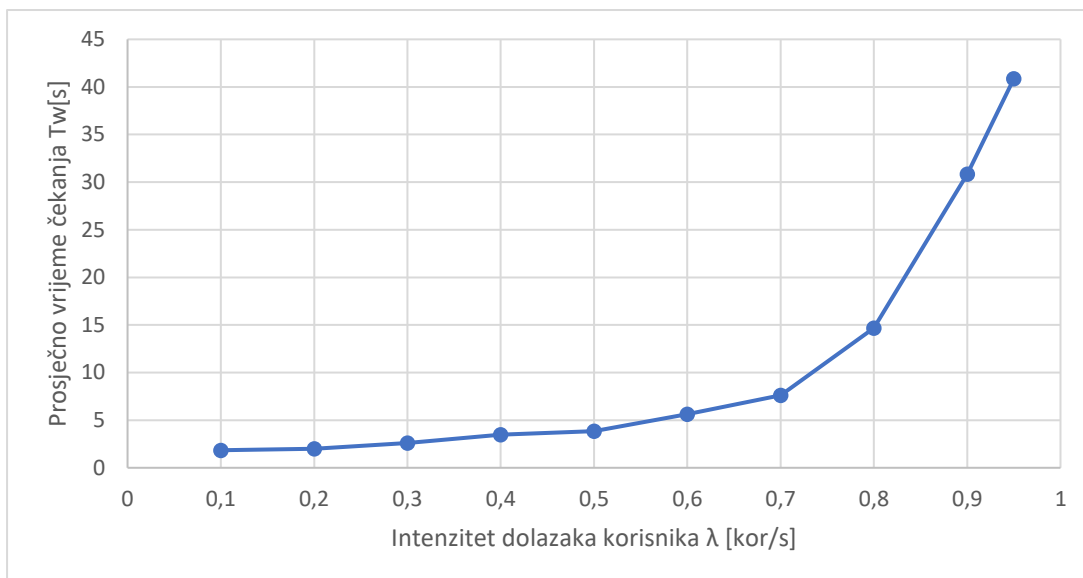
Za sustav s tri poslužitelja prosječno vrijeme zadržavanja u sustavu je zbroj vremena posluživanja na sva tri poslužitelja i svih prosječnih vremena čekanja u repovima :

$$T_{q3} = T_{w1} + T_{s1} + T_{w2} + T_{s2} + T_{w3} + T_{s3} \quad (6)$$

Tablica 5. Rezultati analize sustava s tri serijska poslužitelja za prioritarno posluživanje

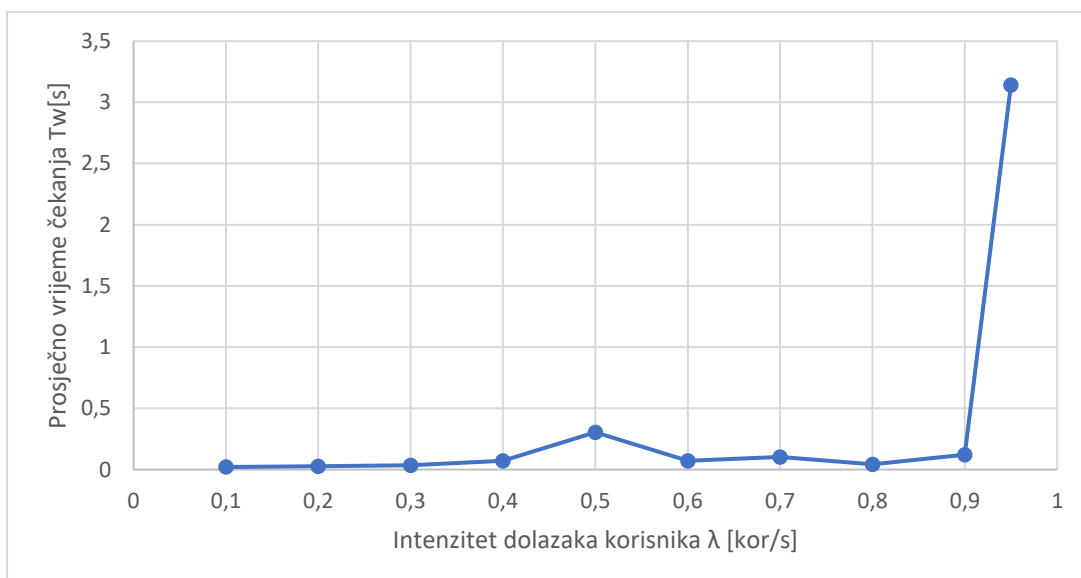
Broj simulacije	Intenzitet dolazaka korisnika λ [kor/s]	Ts1 [s], Ts2 [s], Ts3 [s]	Tw1 [s]	Tw2 [s]	Tw3 [s]	Tq [s]
1	0,1	1	1,842	0,02081	0,004619	4,8674
2	0,2	1	1,994	0,02736	0,005418	5,0267
3	0,3	1	2,587	0,03376	0,0225	5,6432
4	0,4	1	3,47	0,07176	0,0292	6,5709
5	0,5	1	3,856	0,3041	0,04131	7,2014
6	0,6	1	5,627	0,07241	0,1335	8,8329
7	0,7	1	7,622	0,1037	0,09135	10,81705
8	0,8	1	14,66	0,0427	0,05445	17,75715
9	0,9	1	30,85	0,1209	0,2669	34,2378
10	0,95	1	40,86	3,143	0,002113	47,00511

Nakon prikaza rezultata u tablici 5, zbog zornijeg pregleda slijede grafovi dobiveni obradom rezultata analize za tri serijska poslužitelja. Na slici 25 je vidljiv graf ovisnosti prosječnog vremena čekanja o intenzitetu dolazaka korisnika za prvi od tri serijska poslužitelja. Vrijeme čekanja ponovno raste s porastom intenziteta dolazaka korisnika pa tako za minimalni intenzitet dolazaka korisnika $\lambda=0,1$ [kor/s] prosječno vrijeme čekanja iznosi 1,842 [s], postepeno raste te pri maksimalnom ispitanom intenzitetu dolazaka $\lambda=0,95$ [kor/s] iznosi 40,86 [s].



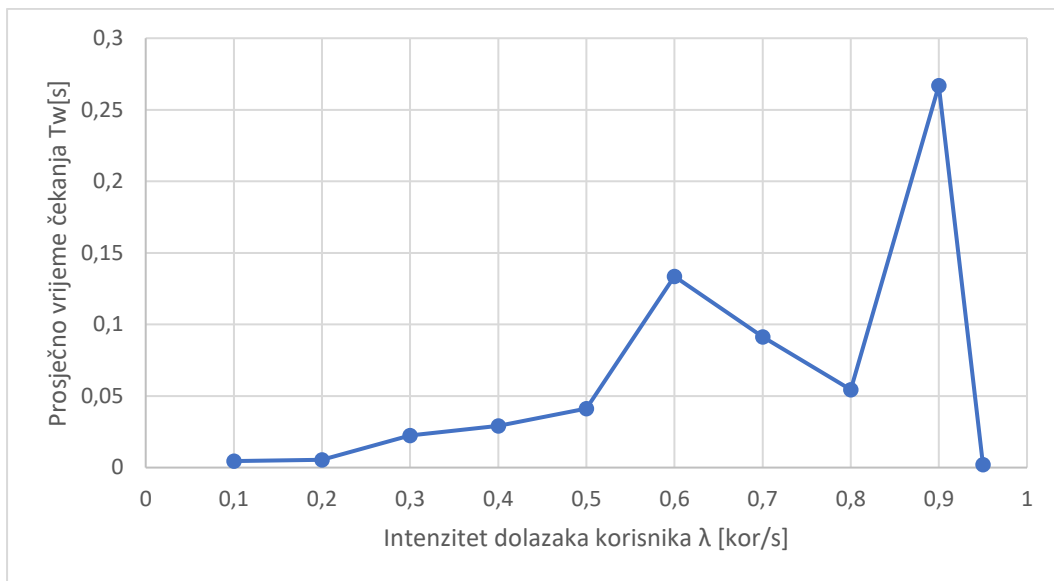
Slika 25. Graf prosječnog vremena čekanja na prvom od tri serijska poslužitelja

Na slici 26 slijedi graf za ovisnost prosječnog vremena čekanja o intenzitetu dolazaka korisnika na drugom od tri serijska poslužitelja. Za intenzitet od 0,1 korisnika po sekundi sada prosječno vrijeme čekanja iznosi 0,02081 [s], te se postepeno povećava do intenziteta 0,4 [kor/s] kada do intenziteta 0,5 [kor/s] značajnije poraste pa se u 0,6 [kor/s] ponovno umanju na razinu otprilike kao i za 0,4 [kor/s]. Izrazito povećanje prosječnog vremena čekanja događa se pri povećanju intenziteta dolazaka s 0,9 na 0,95 [kor/s] i iznosi 3,143 [s].



Slika 26. Graf prosječnog vremena čekanja na drugom od tri serijska poslužitelja

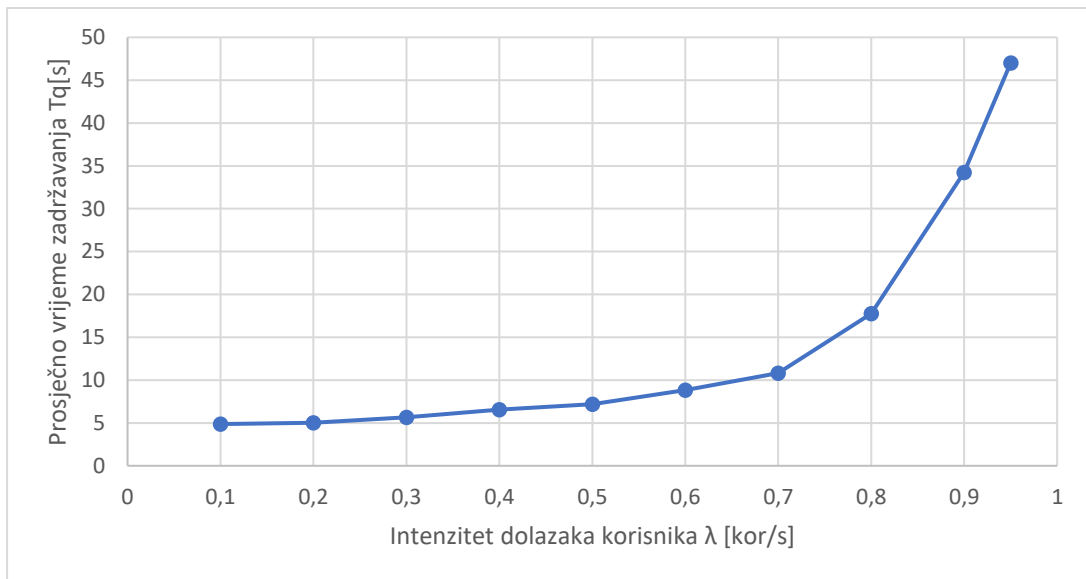
Nakon prikazanih rezultata za drugi poslužitelj slijedi graf prosječnog vremena čekanja i intenziteta dolazaka korisnika za posljednji, treći poslužitelj u sustavu s prioritetnim posluživanjem, a koji je prikazan na slici 27 koja slijedi.



Slika 27. Graf prosječnog vremena čekanja na posljednjem od tri serijska poslužitelja

Pri intenzitetu od 0,1 korisnika po sekundi vrijeme čekanja na trećem poslužitelju iznosi 0,004619 [s] dok je na drugom poslužitelju iznosilo 0,02081 [s]. Prosječno vrijeme čekanja postepeno raste do intenziteta 0,5 [kor/s] kada se počinje gotovo pravocrtno umanjivati do intenziteta 0,8 [kor/s]. Nakon toga je slijedio oštar rast vremena čekanja na iznos 0,2669 [s] za intenzitet 0,9 [kor/s] te pad za intenzitet 0,95 [kor/s].

Nakon provedene analize i prikaza grafova za svaki poslužitelj zasebno, rezultati su sumirani kako je prikazano u tablici 5, a graf na slici 28 prikazuje ukupno zadržavanje entiteta u cijelom sustavu s tri poslužitelja.

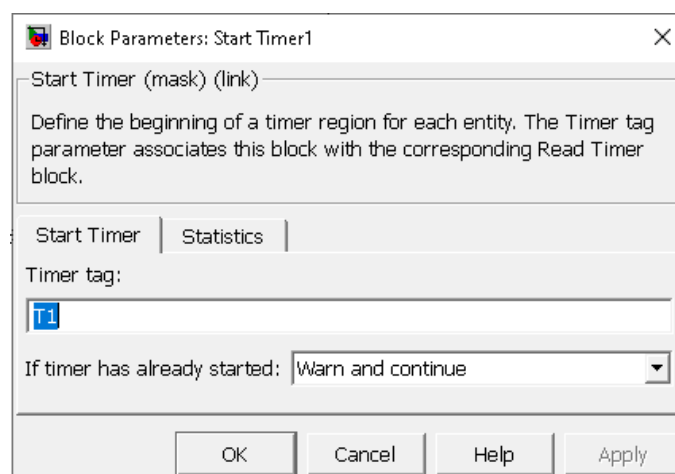


Slika 28. Graf prosječnog vremena zadržavanja u sustavu s tri serijska poslužitelja

Rezultati za ukupno vrijeme zadržavanja u sustavu prate kretanje vremena čekanja na prvom poslužitelju što je i očekivano jer su vremena čekanja na drugom i trećem poslužitelju gotovo zanemariva u odnosu na prvi.

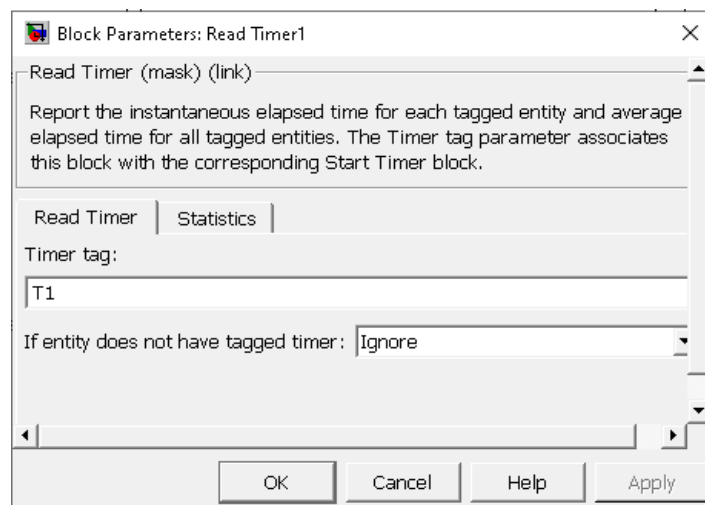
Nakon provedene analize s izmjenom intenziteta dolazaka korisnika te stalnim vremenom posluživanja, sada slijedi analiza parametara performansi sustava s prioritarnim posluživanjem pri čemu je analizirano kretanje prosječnog vremena čekanja i zadržavanja za svaku pojedinu klasu na svakom od poslužitelja.

Na slici 19 je prikazan model sustava s tri poslužitelja napravljen u Simulinku. Sada se koriste elementi *Start Timer* i *Read Timer* kao mjerači vremena.



Slika 29. Sučelje za konfiguraciju elementa *Start Timer*

Na slici 29 je vidljivo sučelje za konfiguraciju početnog mjerača vremena. Na svakome od njih kao parametar *Timer tag* postavljena je oznaka s obzirom na klasu na koju se odnosi (T1 za klasu najvećeg prioriteta, T4 za klasu najmanjeg prioriteta).



Slika 30. Sučelje za konfiguraciju elementa *Read Timer*

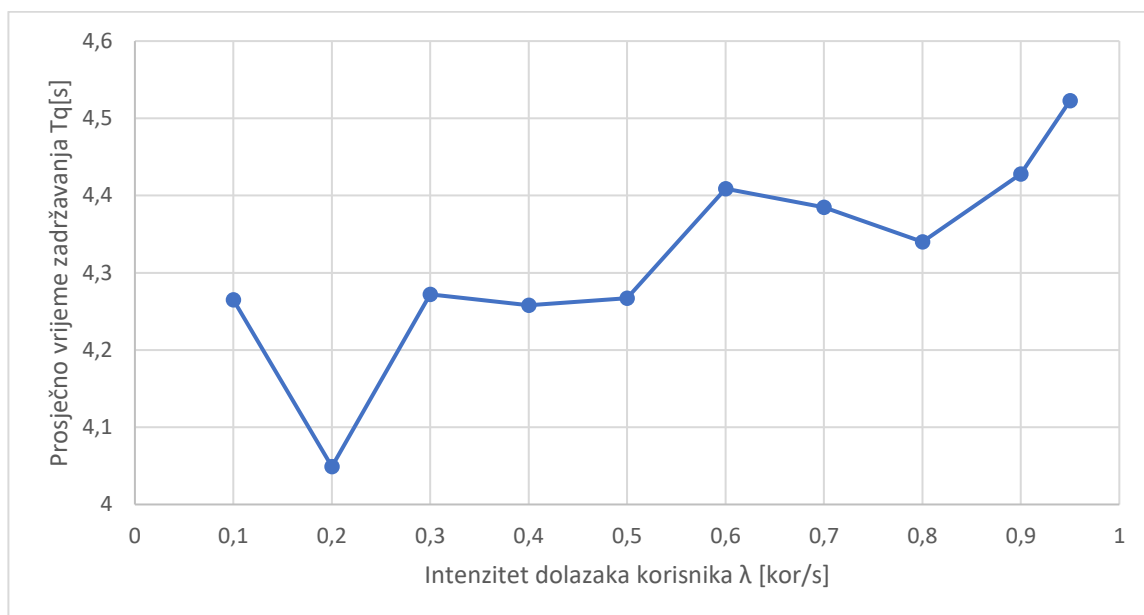
Slika 30 prikazuje sučelje za konfiguraciju mjerača za očitavanje vremena. Ovdje je najbitnije paziti da parametar *Timer tag* bude isti kao i na početnom mjeraču (*Start Timer*) kako bi Simulink znao između kojih entiteta se mjeri vrijeme čekanja ili zadržavanja. S obzirom da je na slikama 29 i 30 parametar *Timer tag* postavljen na T1, ovdje se radi o mjerenju vremena čekanja za entitete prve klase. Nakon procesa postavljanja mjerača vremena, provedena je analiza performansi sustava s tri serijska poslužitelja za svaku pojedinu klasu te se nalaze u tablicama 6, 7, 8 i 9. Intenzitet dolazaka je u trenutku svake simulacije bio identičan za sve četiri klase a vrijeme posluživanja svakog poslužitelja iznosilo je $T_s=1$ [s].

Tablica 6. Rezultati analize performansi za prvu klasu

Prva klasa				
Intenzitet dolazaka λ [kor/s]	Tw1 [s]	Tw2 [s]	Tw3 [s]	Tq [s]
0,1	1,12	0,011	0,134	4,265
0,2	1,029	0	0,02	4,049
0,3	1,17	0,009	0,093	4,272
0,4	1,096	0,085	0,077	4,258
0,5	1,13	0,087	0,05	4,267

0,6	1,257	0,063	0,089	4,409
0,7	1,284	0,086	0,015	4,385
0,8	1,268	0,041	0,031	4,34
0,9	1,278	0,063	0,087	4,428
0,95	1,296	0,169	0,058	4,523

Tablica 6 prikazuje rezultate parametara performansi za prvu prioritetnu klasu. Vidljivo je kako do opterećenja dolazi najviše na prvom poslužitelju koji uglavnom diktira i prosječno vrijeme zadržavanja prikazano grafom na slici 31. Za izračun prosječnih vremena zadržavanja sumi prosječnih vremena čekanja po poslužiteljima potrebno je dodati još 3 sekunde zbog tri poslužitelja od kojih svaki ima postavljeno vrijeme posluživanja $T_s = 1[s]$.



Slika 31. Graf prosječnog vremena zadržavanja za prvu prioritetnu klasu

Slijedi tablica 7 s rezultatima za drugu prioritetnu klasu. Svi ulazni parametri ostaju nepromijenjeni kao i u prethodnoj analizi. Dakle, vrijeme posluživanja svakog

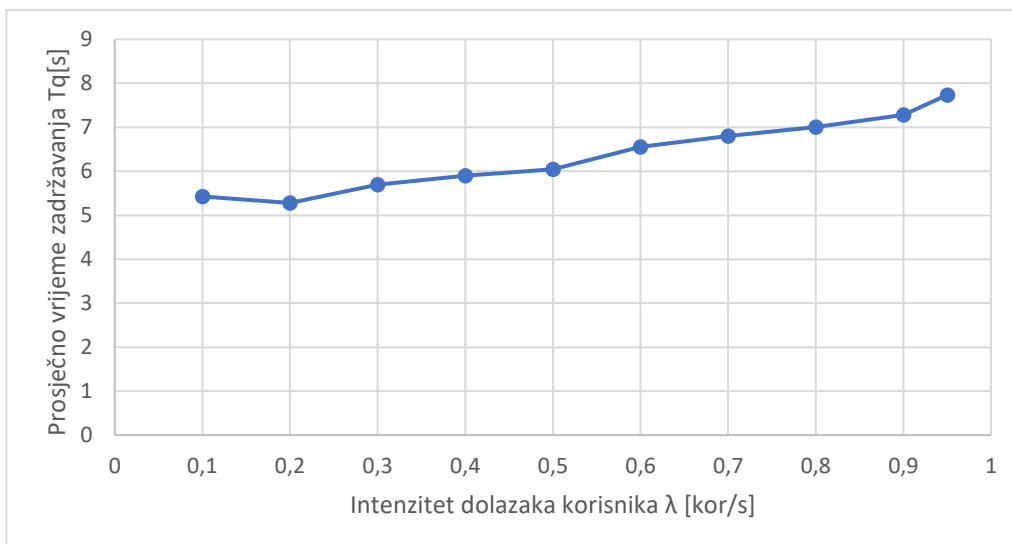
poslužitelja je i dalje $T_s = 1$ [s] i u trenutku svake simulacije intenziteti dolazaka korisnika za svaku od prioriternih klasa je bio identičan.

Tablica 7. Rezultati analize performansi za drugu klasu

Druga klasa				
Intenzitet dolazaka λ [kor/s]	Tw1 [s]	Tw2 [s]	Tw3 [s]	Tq [s]
0,1	2,199	0,154	0,076	5,429
0,2	2,16	0,045	0,074	5,279
0,3	2,581	0,06	0,051	5,692
0,4	2,748	0,103	0,046	5,897
0,5	2,819	0,165	0,058	6,042
0,6	3,364	0,093	0,101	6,558
0,7	3,6	0,092	0,11	6,802
0,8	3,933	0,022	0,053	7,008
0,9	4,043	0,102	0,136	7,281
0,95	4,156	0,539	0,04	7,735

Analiza provedena za drugu prioritetnu klasu dala je rezultate prikazane u tablici 7. Iz sume dobivenih prosječnih vremena čekanja te vremena posluživanja na svakom poslužitelju dobiveni su iznosi prosječnih vremena zadržavanja u sustavu.

Grafom na slici 32 je prikazano kretanje prosječnog vremena zadržavanja u odnosu na intenzitet dolazaka korisnika za drugu prioritetnu klasu.



Slika 32. Graf prosječnog vremena zadržavanja za drugu prioritetnu klasu

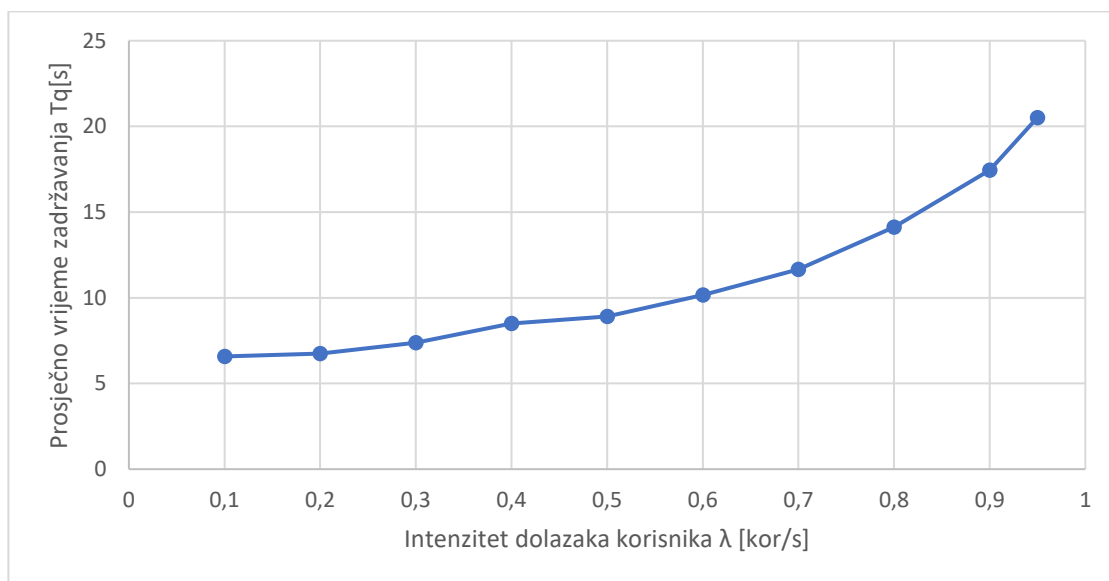
Dalje slijede rezultati analize za treću prioritetnu klasu. Ulazni parametri su isti kao i u prethodnoj analizi. Vrijeme posluživanja je na svakom poslužitelju isto i iznosi $T_s=1$ [s] i intenziteti dolazaka korisnika u svakoj simulaciji jednaki su za sve četiri klase. Tablica 8 prikazuje rezultate dobivene analizom za treću prioritetnu klasu.

Tablica 8. Rezultati analize performansi za treću klasu

Treća klasa				
Intenzitet dolazaka λ [kor/s]	T_{w1} [s]	T_{w2} [s]	T_{w3} [s]	T_q [s]
0,1	3,475	0,1	0,003	6,578
0,2	3,603	0,098	0,037	6,738
0,3	4,228	0,111	0,045	7,384
0,4	5,324	0,115	0,054	8,493
0,5	5,503	0,317	0,084	8,904
0,6	7,003	0,042	0,108	10,153
0,7	8,379	0,128	0,153	11,66
0,8	11,02	0,04	0,06	14,12

0,9	14,01	0,14	0,29	17,44
0,95	16,41	1,05	0,06	20,52

Nakon dobivenih rezultata prikazanih u tablici 8 slijedi graf prosječnog vremena zadržavanja u sustavu za treću prioritetnu klasu.



Slika 33. Graf prosječnog vremena zadržavanja za treću prioritetnu klasu

Na grafu na slici 33 vidljivo je kako se mijenja prosječno vrijeme zadržavanja u sustavu za entitete treće prioritetne klase s obzirom na intenzitet dolazaka. S porastom intenziteta dolazaka raste i prosječno vrijeme zadržavanja. Pri minimalnom intenzitetu dolazaka od 0,1 [kor/s] vrijeme zadržavanja je minimalno i iznosi 6,578 [s], a pri maksimalnom intenzitetu dolazaka (0,95 [kor/s]) dolazi i do maksimalnog prosječnog vremena zadržavanja u sustavu koje iznosi 20,52 [s].

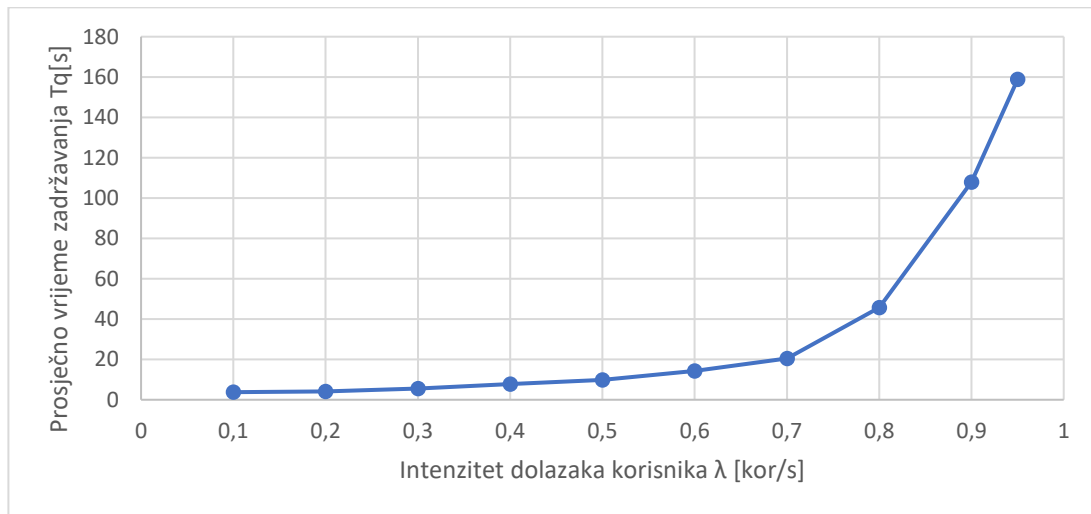
Kako se ovaj rad bazira na modelu sustava s četiri prometne klase, sada je red na analizi performansi posljednje od njih. Četvrta prioritetna klasa je najmanjeg značaja, odnosno najmanjeg prioriteta. Provedena je analiza te su dobiveni rezultati prosječnog vremena čekanja i zadržavanja koji su vidljivi u tablici 9.

Tablica 9. Rezultati analize performansi za četvrtu klasu

Četvrta klasa				
Intenzitet dolazaka λ [kor/s]	Tw1 [s]	Tw2 [s]	Tw3 [s]	Tq [s]
0,1	0,5768	0,1742	0,008	3,759
0,2	1,178	0,004	0,008	4,19
0,3	2,371	0,111	0,018	5,5
0,4	4,715	0,082	0,056	7,853
0,5	5,974	0,719	0,093	9,786
0,6	10,89	0,13	0,28	14,3
0,7	17,23	0,17	0,14	20,54
0,8	42,58	0,12	0,08	45,78
0,9	104,3	0,2	0,5	108
0,95	144,8	11	0	158,8

Prema rezultatima danim u tablici 9 može se vidjeti kako četvrta klasa ima najveći porast prosječnog vremena zadržavanja u sustavu s porastom intenziteta dolazaka. To je logičan slijed s obzirom da se radi o entitetima najmanje važnosti koji

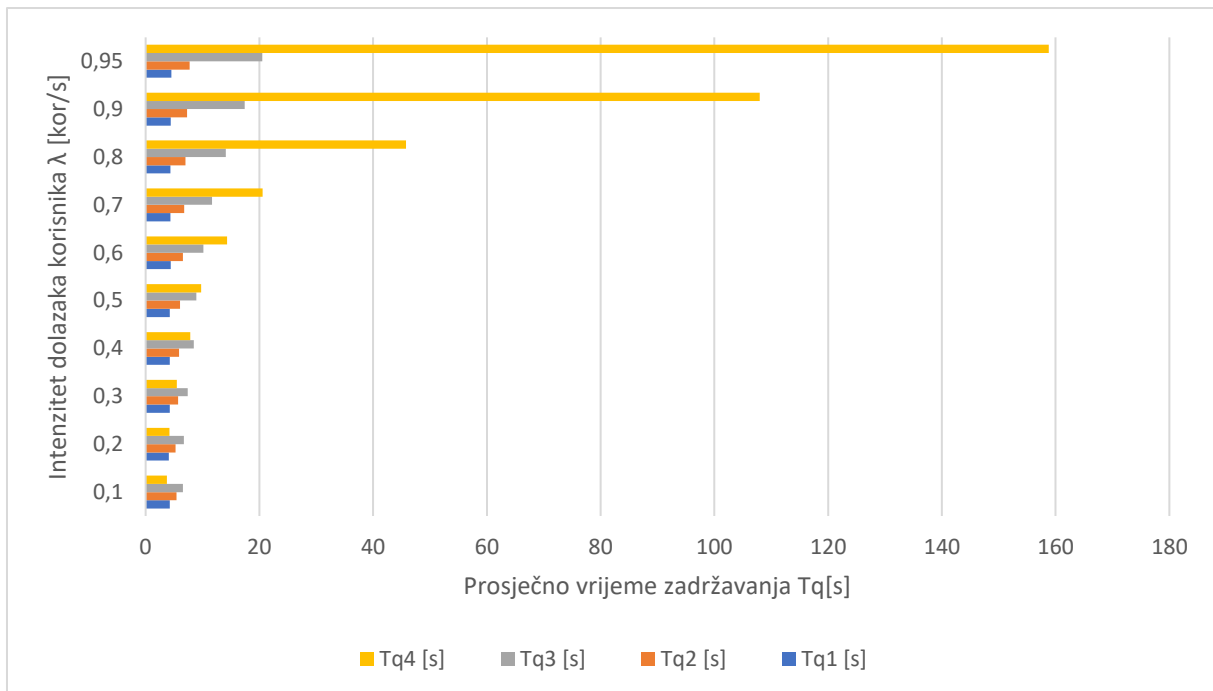
smiju najviše čekati. Grafom na slici 34 prikazano je kretanje prosječnog vremena zadržavanja u ovisnosti i intenzitetu dolazaka korisnika za četvrtu klasu.



Slika 34. Graf prosječnog vremena zadržavanja za četvrtu prioritetnu klasu

Ponovno je slučaj da s povećanjem intenziteta dolazaka raste i prosječno vrijeme zadržavanja u sustavu. Pri minimalnom intenzitetu 0,1 [kor/s] prosječno vrijeme zadržavanja iznosi 3,759 [s] te nastavlja postepeno rasti. S povećanjem intenziteta od 0,7 [kor/s] i više prosječno vrijeme zadržavanja počinje se sve više povećavati, odnosno funkcija na grafu postaje sve strmija, a maksimalno vrijeme zadržavanja u sustavu je za maksimalni intenzitet dolazaka $\lambda=0,95$ [kor/s] i iznosi 158,8 [s].

U konačnici, graf na slici 35 prikazuje odnos prosječnog vremena zadržavanja u sustavu za sve ispitane intenzitete dolazaka korisnika za sve četiri prioritetne klase. Jasno je vidljivo kako općenito prosječno vrijeme zadržavanja u sustavu raste s porastom intenziteta dolazaka, a pogotovo je to izraženo kod klasa nižeg prioriteta.



Slika 35. Odnos prosječnog vremena zadržavanja i intenziteta dolazaka korisnika za sve četiri ispitane klase

Provedena je još jedna kratka analiza kojom se željelo ispitati kako različiti intenziteti dolazaka korisnika utječu na performanse sustava. Vrijeme posluživanja na svakom poslužitelju je ostalo nepromijenjeno i iznosi $T_s = 1$ [s]. Rezultati provedene analize vidljivi su u tablici 10.

Tablica 10. Rezultati analize s različitim intenzitetima dolazaka po klasama

λ_1 [kor/s]	λ_2 [kor/s]	λ_3 [kor/s]	Tw1 [s]	Tw2 [s]	Tw3 [s]	Tq [s]
Prva klasa						
0,5	0,2	0,2	1,783	0,147	0,057	4,9987
0,2	0,5	0,2	1,315	0,08	0,077	4,472
0,2	0,2	0,5	1,315	0,08	0,077	4,472
Druga klasa						
0,5	0,2	0,2	6,593	0,275	0,143	10,011
0,2	0,5	0,2	3,772	0,22	0,083	7,075
0,2	0,2	0,5	3,501	0,147	0,06	6,708

Treća klasa						
0,5	0,2	0,2	36,53	0,63	0,09	40,25
0,2	0,5	0,2	36,53	0,63	0,09	40,25
0,2	0,2	0,5	16,21	0,41	0,1	19,72

U tablici 10 je moguće vidjeti kako je analiza provedena na način da je jednoj prioritetnoj klasi dodijeljen jedan intenzitet a drugim dvjema identičan intenzitet tako da u konačnici suma intenziteta iznosi 0,9 [kor/s]. Jasno je vidljivo kako kretanje prosječnog vremena zadržavanja u sustavu opada kako se smanjuje intenzitet klase višeg prioriteta. To je i očekivan rezultat jer entiteti višeg prioriteta uvijek se poslužuju prvi bez obzira na čekanje entiteta niže razine. Kada se intenzitet dolazaka entiteta višeg prioriteta poveća, oni idu na posluživanje a svi ostali entiteti nižih prioriteta čekaju na trenutak kada mogu biti posluženi, odnosno onda kada sustav nije opterećen posluživanjem entiteta viših prioriteta.

6.INTERPRETACIJA DOBIVENIH REZULTATA

Nakon provedenih analiza, ovo poglavlje bavi se interpretacijom dobivenih rezultata. Bit će prikazani i objašnjeni svi rezultati dobiveni u analizi što stvara podlogu za donošenje zaključaka, a što je u konačnici i cilj provedbe analize kao i ovog rada općenito.

6.1 Interpretacija rezultata analize ukupnog vremena zadržavanja u sustavu

Kako bi se mogli usporediti rezultati performansi sustava, provedena je analiza jednog podvorbene sustava bez prioritetnog posluživanja. Provedeno je deset simulacija uz konstantno vrijeme posluživanja. Tijekom simulacija izmjenjivan je parametar intenziteta dolazaka korisnika. Kao ključan parametar performansi uzima se vrijeme zadržavanja u sustavu te se može uočiti kako ono raste s povećanjem intenziteta dolazaka. S obzirom da ovdje nije naglasak na sustavima bez prioritetnog posluživanja, sustav je analiziran samo s jednim poslužiteljem pa je očekivan bio ovakav rezultat. Ukoliko sustav stalno poslužuje korisnike iste važnosti (nema prioriteta), logično je da s povećanjem intenziteta više korisnika ulazi u rep poslužitelja a samim time im se povećava i vrijeme provedeno u repu (T_w), što u konačnici povećava i cjelokupno vrijeme zadržavanja u sustavu (T_q).

Naglasak ove analize je na sustavima s prioritetnim posluživanjem. Prvo je analiziran sustav bez dodatnih serijskih poslužitelja. Vidljivo je kako ovisnost prosječnog vremena zadržavanja direktno ovisi o intenzitetu dolazaka korisnika, odnosno kada je sustav izložen većem intenzitetu dolazaka korisnika vrijeme zadržavanja u sustavu se povećava. Za minimalni intenzitet dolazaka 0,1 [kor/s] prosječno vrijeme zadržavanja je 2,819 [s] a za maksimalni intenzitet od 0,95 [kor/s] iznosi 60,13 [s].

Analiza provedena na sustavu s dva serijska poslužitelja u konačnici je dala rezultat isti kao i analiza provedena na sustavu bez dodatnih serijskih poslužitelja i time potvrdila ispravnost. Kretanje prosječnog vremena zadržavanja prati kretanje intenziteta dolazaka korisnika. Za minimalni intenzitet od 0,1 [kor/s] prosječno vrijeme čekanja iznosi 3,84 [s], a pri maksimalnom ispitanom intenzitetu 0,95 [kor/s] ono iznosi 61,94 [s]. S obzirom na prikazano u prethodnom poglavlju, jasno je kako prvi poslužitelj u najvećoj mjeri diktira performanse sustava, odnosno čekanje na prvom poslužitelju u najvećoj mjeri utječe na prosječno vrijeme zadržavanja u sustavu.

Ista analiza provedena je i na sustavu s tri serijska poslužitelja. Također kretanje ovisnosti vremena čekanja o intenzitetu dolazaka korisnika je isto kao i kod sustava bez dodatnih serijskih poslužitelja ali i kod sustava s dva serijska poslužitelja. U prethodnom poglavlju je vidljivo kako ponovno prvi poslužitelj diktira performanse sustava u najvećoj mjeri pa tako prosječno vrijeme čekanja na njemu je minimalno za minimalni intenzitet dolazaka korisnika 0,1 [kor/s] i iznosi 1,842 [s], a maksimum

postiže pri maksimalnom ispitanom intenzitetu dolazaka 0,95 [kor/s] i iznosi 40,86 [s]. Dakle, prosječno vrijeme zadržavanja se s povećanjem intenziteta povećava. Minimalno je pri intenzitetu 0,1 [kor/s] i iznosi 4,867 [s], a maksimalno je pri intenzitetu 0,95 [kor/s] i iznosi 47,005 [s].

6.2 Interpretacija rezultata analize za pojedine prioritetne klase s tri serijska poslužitelja

Provedena je analiza za svaku od četiri pojedine prioritetne klase. Izmjenjivani su intenziteti dolazaka korisnika te je praćeno kako se mijenja vrijeme zadržavanja entiteta pojedine klase u sustavu. Analiza je rađena na sustavu s tri serijska poslužitelja.

Prva prioritetna klasa je najvišeg prioriteta. U prethodnom poglavlju je prikazano kako kretanje prosječnog vremena zadržavanja za prvu klasu blago varira ali s tendencijom povećanja pri višim intenzitetima dolazaka. Ova klasa svakako ostvaruje najmanje vrijeme čekanja u odnosu na preostale tri, a to i jest smisao prioritetnog posluživanja. Takvi se entiteti u sustavu preferiraju unatoč činjenici da će entiteti ostalih klasa nižih prioriteta morati više čekati.

Prosječno vrijeme zadržavanja druge prioritetne klase tijekom povećanja intenziteta dolazaka poprima sve veće vrijednosti. Smanjuju se odstupanja koja su izraženija kod prve prioritetne klase i može se reći da je izraženije povećanje čekanja s višim intenzitetima dolazaka. Ova klasa ima manji prioritet od prve, a samim time veće čekanje i zadržavanje u sustavu.

Kod treće prioritetne klase, funkcija prosječnog vremena zadržavanja u sustavu sve više izravno ovisi o kretanju parametra intenziteta dolazaka. Minimalno vrijeme zadržavanja je pri intenzitetu 0,1 [kor/s] i iznosi 6,578 [s], a maksimalno pri intenzitetu 0,95 [kor/s] i iznosi 20,52 [s].

Prioritetom najniža klasa jest četvrta. Minimalno vrijeme zadržavanja za četvrtu klasu je pri intenzitetu 0,1 [kor/s] i iznosi 3,759 [s], a maksimalno vrijeme zadržavanja u sustavu je pri intenzitetu 0,95 [kor/s] i iznosi 158,5 [s]. Ovdje je jasno vidljivo kako pri većem opterećenju sustava (uslijed povećanog intenziteta dolazaka korisnika) dolazi do značajnijeg povećanja vremena čekanja, a samim time i zadržavanja u sustavu za entitete najniže prioritetne klase. Razlog tomu jest što sustav u tom trenutku mora poslužiti entitete više važnosti uslijed povećanja njihova broja. Ta situacija je jasno prikazana grafom na slici 35.

Posljednja, kratka analiza imala je za cilj ustanoviti kako postavljanje različitih intenziteta dolazaka korisnika utječe na vrijeme zadržavanja u sustavu. Rezultati upućuju na to da smanjenjem intenziteta dolazaka entiteta viših klasa dolazi do svojevrsnog smanjenja opterećenosti sustava, mogućnosti posluživanja entiteta nižih

prioriteta a samim time i smanjenja ukupnog vremena zadržavanja u sustavu, sve u cilju kako bi se optimizirale performanse sustava.

7.ZAKLJUČAK

Postoje razne vrste podvorbenih sustava, a sve imaju osnovni cilj ispunjenja zahtjeva korisnika. Svima su im zajednički elementi korisnik, poslužitelj i rep. U repu korisnici čekaju podvorbu od strane poslužitelja. Postoje jednposlužiteljski, višeposlužiteljski te temeljni ne-poissonovski podvorbeni sustavi. Bitan parametar kod napuštanja repa jest podvorbena stega, odnosno način na koji se obavlja selekcija entiteta za podvorbu. Kendall-ova oznaka omogućuje jedinstvenu identifikaciju podvorbenog sustava s obzirom na sve bitne parametre. Za većinu sustava moguće je načiniti dijagram stanja koji vizualizira mogućnosti prijelaza. Entiteti u sustav mogu pristizati i iz njega odlaziti pojedinačno i grupno.

Suština rada je bila provedena analiza u petom poglavlju. Najvažniji dio je testiranje performansi s tri serijska poslužitelja. Analiza je provedena na način da su postavljena vremena posluživanja na svim poslužiteljima identičnog iznosa a mijenjali su se intenziteti dolazaka korisnika na način da su u svakoj simulaciji svim klasama dodijeljeni isti intenziteti. Nakon provedene analize bez dodatnih serijskih poslužitelja, s dva te potom s tri serijska poslužitelja u nizu nedvojbeno se može zaključiti kako prvi poslužitelj u najvećoj mjeri diktira performanse sustava, odnosno da prosječno vrijeme čekanja na prvom poslužitelju u najvećoj mjeri utječe na prosječno vrijeme zadržavanja u cijelom sustavu. Nadalje, zaključuje se kako promjenama intenziteta dolazaka korisnika (povećanjem) dolazi do povećanja prosječnog vremena čekanja, a samim time i prosječnog vremena zadržavanja u sustavu.

Također analiza je provedena i na način da su ispitivane performanse sustava s obzirom na pojedine prioritetne klase. Zaključuje se kako će prva klasa uvijek ostvarivati minimalno prosječno vrijeme čekanja i zadržavanja te će se ta vremena najmanje mijenjati s promjenama intenziteta dolazaka. Spuštajući se prema nižim klasama može se zaključiti također da se za svaku povećava prosječno vrijeme čekanja i zadržavanja iz razloga što su njihovi entiteti sustavu manje važni te ih poslužuje kada za to ima dovoljno vremena na način da ne ugrozi podvorbu entiteta viših prioriteta. Što je klasa nižeg prioriteta, sustav je tretira na način da može provesti više vremena čekajući te zadržavajući se u sustavu. Kod posljednje analizirane, četvrte prioritetne klase, vidljivo je kako s povećanjem intenziteta dolazaka na grafu postoji sve oštiji rast prosječnog vremena zadržavanja.

Nadalje moguće je zaključiti kako se postavljanjem nižeg intenziteta dolazaka korisnika više prioritetne klase smanjuje prosječno vrijeme provedeno u sustavu iz razloga što sustav ima više vremena obavljati podvorbu entiteta nižih prioritetnih klasa.

Ovakva analiza provedena u programskom alatu daje dobru podlogu za dimenzioniranje mreža korištenjem računalnih alata, što uvelike doprinosi inženjerskoj struci, a tehnologiji telekomunikacija nove mogućnosti povećanja performansi uz smanjenje utrošenog vremena i potrebnih resursa.

LITERATURA

[1] Mrvelj, Š., Matulin, M.: Autorizirana predavanja iz kolegija Podvorbeni sustav, Fakultet prometnih znanosti, Zagreb, 2018.

[2] HenryK12

(<http://www.henry.k12.ga.us/ugh/apstat/chapternotes/7supplement.html>) (kolovoz 2020.)

[3] Social Science Computing Cooperative

(https://www.ssc.wisc.edu/sscc/pubs/stata_margins.htm) (kolovoz 2020.)

[4] FlyLib.com

(<https://flylib.com/books/en/3.287.1.178/1/>) (srpanj 2020.)

[5] The blog of Logistics at MGEPS at UPV

(<https://logisticsmgepsupv.wordpress.com/2018/04/22/queuing-management-system-in-banks/>) (kolovoz 2020)

[6] Begović, M.: Podvorbeni sustavi, Fakultet prometnih znanosti, Zagreb, 2006.

[7] Mehmet H.G.: *Queues and Priority Queues*, 2017.

(<https://slideplayer.com/slide/14051109/>) (kolovoz 2020.)

[8] Bošnjak, I.: Telekomunikacijski promet II, Zagreb: Fakultet prometnih znanosti, 2001.

[9] Technopedia.com

(<https://www.techopedia.com/definition/24782/fixed-routing>) (srpanj 2020.)

[10] *Routing and Congestion Control*, Version 2, CSE IIT, Kharagpur
(<https://nptel.ac.in/content/storage2/courses/106105080/pdf/M7L1.pdf>) (srpanj 2020.)

[11] GeeksforGeeks
(<https://www.geeksforgeeks.org/fixed-and-flooding-routing-algorithms/>) (kolovoz 2020.)

[12] Comparitech
(<https://www.comparitech.com/net-admin/routing-protocol-types-guide/>) (kolovoz 2020.)

[13] AfterAcademy
(<https://afteracademy.com/blog/what-is-error-control-in-networking>) (kolovoz 2020.)

[14] IDC Technologies
(https://www.idc-online.com/technical_references/pdfs/data_communications/Error_Control_and_Detection.pdf) (rujan 2020.)

[15] Mrvelj, Š., Matulin, M.: *Autorizirana predavanja iz kolegija Tehnologija telekomunikacijskog prometa 1*, Fakultet prometnih znanosti, Zagreb, 2016.

(http://e-student.fpz.hr/Predmeti/T/Tehnologija_telekomunikacijskog_prometa_I/Materijali/7_pr edavanje.pdf) (rujan 2020.)

POPIS KRATICA

FCFS	(First Come First Serve) – podvorbena stega „prvi došao – prvi poslužen“
ACK	(Acknowledgment) – poruka ostalim čvorovima o primitku
CRC	(<i>Cyclic Redundancy Check</i>) – ciklička provjera redundantnosti
NACK	(negative acknowledgement) – negativna poruka prijema
RIP	(Routing Information Protocol) – usmjerivački protokol
IGRP	(Interior Gateway Protocol) – unutarnji protokol usmjeravanja između usmjernika
OSPF	(Open Shortest Path First) – protokol stanja veze
EGP	(Exterior Gateway Protocol) – protokol komunikacije susjednih uređaja
EIGRP	(Enhanced Interior Gateway Routing Protocol) – unutarnji protokol usmjeravanja
BGP	(Border Gateway Protocol) – protokol za razmjenu podataka između usmjernika
IS-IS	(Intermediate System-to-Intermediate System)
FIFO	(First in First out – stega „prvi došao – prvi poslužen“
FCLS	(First Come Last Served) – stega „prvi došao – zadnji poslužen“
SIRO	(Service in Random Order) – posluživanje slučajnim odabirom
RR	(Round Robin)
PRI	(Priority) – posluživanje s prioritetom
SPT	(Shortest Processing Time) – najkraće vrijeme procesiranja

POPIS SLIKA

Slika 1. Primjer distribucije diskretnih varijabli, [2]	4
Slika 2. Primjer kontinuirane varijable, [3]	4
Slika 3. Prikaz reda i poslužitelja, [4]	5
Slika 4. Primjer tvorbe i upravljanja redom, [5].....	6
Slika 5. Primjer reda s prioritetima određenih entiteta, [7].....	7
Slika 6. Dijagram prijelaza za sustav M/M/1/∞/∞/FCFS.....	11
Slika 7. Dijagram prijelaza za sustav M/M/1/K/∞/FCFS.....	12
Slika 8. Dijagram prijelaza za sustav M/M/c/∞/∞/FCFS.....	13
Slika 9. Dijagram prijelaza za sustav M/M/c/c/∞/FCFS.....	14
Slika 10. Dijagram prijelaza za sustav M/M/∞/∞/∞/FCFS.....	15
Slika 11. Dijagram prijelaza za sustav G/G/c/∞/∞/FCFS	17
Slika 12. Dijagram prijelaza za sustav G/Gj/c/∞/∞/FCFS	17
Slika 13. Primjer topologije mreže, [11].....	22
Slika 14. Radno okruženje alata MATLAB.....	26
Slika 15. Model M/M/1/∞/∞/FCFS u Simulinku.....	27
Slika 16. Model podvorbe s prioritetnim posluživanjem.....	28
Slika 17. Model sustava s jednim poslužiteljem za prioritetno posluživanje.....	29
Slika 18. Model sustava s dva poslužitelja za prioritetno posluživanje	30
Slika 19. Model sustava s tri poslužitelja za prioritetno posluživanje.....	31
Slika 20. Graf kretanja prosječnog vremena zadržavanja za sustav M/M/1/∞/∞/FCFS	33
Slika 21. Graf prosječnog vremena zadržavanja za sustav s jednim poslužiteljem za prioritetnu podvorbu	34
Slika 22. Graf prosječnog vremena čekanja na prvom od dva serijska poslužitelja.....	36
Slika 23. Graf prosječnog vremena čekanja na drugom od dva serijska poslužitelja	36
Slika 24. Graf prosječnog vremena zadržavanja u sustavu s dva serijska poslužitelja	37
Slika 25. Graf prosječnog vremena čekanja na prvom od tri serijska poslužitelja	39
Slika 26. Graf prosječnog vremena čekanja na drugom od tri serijska poslužitelja	39
Slika 27. Graf prosječnog vremena čekanja na posljednjem od tri serijska poslužitelja.....	40
Slika 28. Graf prosječnog vremena zadržavanja u sustavu s tri serijska poslužitelja	41
Slika 29. Sučelje za konfiguraciju elementa Start Timer.....	41
Slika 30. Sučelje za konfiguraciju elementa Read Timer.....	42
Slika 31. Graf prosječnog vremena zadržavanja za prvu prioritetnu klasu.....	43
Slika 32. Graf prosječnog vremena zadržavanja za drugu prioritetnu klasu	45
Slika 33. Graf prosječnog vremena zadržavanja za treću prioritetnu klasu.....	46
Slika 34. Graf prosječnog vremena zadržavanja za četvrtu prioritetnu klasu.....	48
Slika 35. Odnos prosječnog vremena zadržavanja i intenziteta dolazaka korisnika za sve četiri ispitane klase	49

POPIS TABLICA

Tablica 1. Primjer tablice usmjeravanja.....	21
Tablica 2. Primjer kretanja paketa iz odredišnog u sljedeći čvor	21
Tablica 3. Rezultati analize sustava bez prioritnog posluživanja.....	32
Tablica 4. Rezultati analize sustava s dva serijska poslužitelja za prioritno posluživanje ..	35
Tablica 5. Rezultati analize sustava s tri serijska poslužitelja za prioritno posluživanje	38
Tablica 6. Rezultati analize performansi za prvu klasu.....	42
Tablica 7. Rezultati analize performansi za drugu klasu	44
Tablica 8. Rezultati analize performansi za treću klasu.....	45
Tablica 9. Rezultati analize performansi za četvrtu klasu	47
Tablica 10. Rezultati analize s različitim intenzitetima dolazaka po klasama	49