

UNIVERZITET U BEOGRADU
SAOBRAĆAJNI FAKULTET
Vojvode Stepe 305, Beograd

NASTAVNO-NAUČNOM VEĆU

**PREDMET: REFERAT O URAĐENOJ DOKTORSKOJ DISERTACIJI KANDIDATA
PAVLA BUGARČIĆA, MASTER INŽENJERA SAOBRAĆAJA**

Odlukom Nastavno-naučnog veća Univerziteta u Beogradu - Saobraćajnog fakulteta, broj: 339/4 od 09.04.2025. godine, imenovani smo za članove Komisije za pregled, ocenu i odbranu doktorske disertacije kandidata Pavla Bugarčića, master inženjera saobraćaja pod naslovom:

**„UNAPREĐENJE PROTOKOLA RUTIRANJA ZA DINAMIČKE BEŽIČNE
AD HOC MREŽE KORIŠĆENJEM MAŠINSKOG UČENJA“**

Posle pregleda dostavljene disertacije i drugih pratećih materijala i razgovora sa kandidatom, Komisija je sačinila sledeći

R E F E R A T

1. Uvod

1.1. Hronologija odobravanja i izrade disertacije

Na osnovu predatih zahteva kandidata Pavla Bugarčića, master inženjera saobraćaja i donetih odluka Univerziteta u Beogradu – Saobraćajnog fakulteta, hronologija odobravanja i izrade disertacije je:

- | | |
|------------------|---|
| 10.10.2018. god. | Kandidat Pavle Bugarčić, master inženjer saobraćaja, je upisao doktorske akademske studije; |
| 26.06.2024. god. | Kandidat Pavle Bugarčić, master inženjer saobraćaja, podneo je prijavu predloga istraživanja u okviru doktorske disertacije Nastavno–naučnom veću Univerziteta u Beogradu – Saobraćajnog fakulteta (br. 868/1), uz zahtev da se sprovede postupak za ocenu podobnosti kandidata i predložene teme i za mentore predložio dr Mariju Malnar, redovnog profesora Univerziteta u Beogradu – Saobraćajnog fakulteta i dr Nenada Jevtića, vanrednog profesora Univerziteta u Beogradu – Saobraćajnog fakulteta; |

- 02.07.2024. god. Na sednici Nastavno-naučnog veća Univerziteta u Beogradu – Saobraćajnog fakulteta doneta je odluka (br. 868/3) o formiranju Komisije za ocenu naučne zasnovanosti teme doktorske disertacije Pavla Bugarčića, master inženjera saobraćaja, u sastavu:
- Dr Goran Marković, redovni profesor, Univerzitet u Beogradu – Saobraćajni fakultet;
 - Dr Mirjana Stojanović, redovni profesor, Univerzitet u Beogradu – Saobraćajni fakultet;
 - Dr Nataša Nešković, redovni profesor, Univerzitet u Beogradu – Elektrotehnički fakultet;
- 05.09.2024. god. Komisija za ocenu naučne zasnovanosti teme doktorske disertacije podnela je pozitivan izveštaj (br. 868/5) Nastavno–naučnom veću Univerziteta u Beogradu – Saobraćajnog fakulteta;
- 10.09.2024. god. Na sednici Nastavno–naučnog veća Univerziteta u Beogradu – Saobraćajnog fakulteta doneta je odluka (br. 868/6) kojom se pozitivno ocenjuje naučna zasnovanost i podobnost kandidata i prihvata predložena tema za izradu doktorske disertacije kandidata Pavla Bugarčića, master inženjera saobraćaja;
- 23.09.2024. god. Na sednici Veća naučnih oblasti tehničkih nauka Univerziteta u Beogradu, doneta je odluka (br. 61206-3326/2-24) kojom se daje saglasnost na predlog teme doktorske disertacije kandidata Pavla Bugarčića, master inženjera saobraćaja;
- 10.03.2025. god. Kandidat Pavle Bugarčić, master inženjer saobraćaja, podneo je zahtev Nastavno-naučnom veću Univerziteta u Beogradu – Saobraćajnog fakulteta za početak postupka za pregled, ocenu i odbranu doktorske disertacije (br. 339/1);
- 08.04.2025. god. Na sednici Nastavno-naučnog veća Univerziteta u Beogradu – Saobraćajnog fakulteta doneta je odluka (br. 339/4 od 09.04.2025. godine) o formiranju Komisije za pregled, ocenu i odbranu doktorske disertacije kandidata Pavla Bugarčića, master inženjera saobraćaja u sastavu:
- Dr Goran Marković, redovni profesor, Univerzitet u Beogradu – Saobraćajni fakultet;
 - Dr Mirjana Stojanović, redovni profesor, Univerzitet u Beogradu – Saobraćajni fakultet;
 - Dr Nataša Nešković, redovni profesor, Univerzitet u Beogradu – Elektrotehnički fakultet;
 - Dr Valentina Radojičić, redovni profesor, Univerzitet u Beogradu – Saobraćajni fakultet;
 - Dr Predrag Ivaniš, redovni profesor, Univerzitet u Beogradu – Elektrotehnički fakultet.

Na osnovu člana 101. stav 4 Statuta Univerziteta u Beogradu i odluke dekana Saobraćajnog fakulteta br. 1059/3, od 30.08.2024. godine, odobreno je produženje roka za završetak studija do isteka trostrukog broja školskih godina potrebnih za realizaciju upisanog studijskog programa (br. 1223/1 od 24.09.2024. godine).

1.2. Naučna oblast disertacije

Doktorska disertacija pod nazivom “Unapređenje protokola rutiranja za dinamičke bežične *ad hoc* mreže korišćenjem mašinskog učenja” pripada naučnoj oblasti Saobraćajno inženjerstvo i užoj naučnoj oblasti Eksploatacija telekomunikacionog saobraćaja i mreža, za koju je matičan Univerzitet u Beogradu – Saobraćajni fakultet.

Mentor, dr Marija Malnar, dipl. inž. elektrotehnike, redovni profesor Univerziteta u Beogradu – Saobraćajnog fakulteta, birana je za užu naučnu oblast Eksploatacija telekomunikacionog saobraćaja i mreža. Bavi se naučno–istraživačkim radom iz oblasti bežičnih *ad hoc* mreža, sa akcentom na rutiranje u bežičnim mrežama. Posebno interesovanje prof. Marije Malnar obuhvata dinamičke bežične *ad hoc* mreže, sa akcentom na mreže vozila. U dosadašnjem radu, dr Marija Malnar objavila je preko 40 naučnih i stručnih radova, od čega je 9 radova objavljeno u međunarodnim časopisima sa SCI liste. Koautor je dva udžbenika koji se koriste u nastavnom procesu na Univerzitetu u Beogradu – Saobraćajnom fakultetu i dva pomoćna udžbenika. Član je programskog odbora simpozijuma Postel i upravnog odbora Društva za telekomunikacije. Njeni radovi citirani su u svetskoj literaturi 164 puta (baza *Google Scholar*). Indeks naučne kompetentnosti profesora Marije Malnar iznosi $h = 8$ (baza *Google Scholar*).

Mentor, dr Nenad Jevtić, dipl. inž. elektrotehnike, vanredni profesor Univerziteta u Beogradu – Saobraćajnog fakulteta, biran je za užu naučnu oblast Informaciono komunikacione tehnologije. Bavi se naučno–istraživačkim radom iz oblasti bežičnih komunikacija, posebno bežičnih senzorskih mreža, pametnih senzora i Interneta stvari. U dosadašnjem radu, dr Nenad Jevtić objavio je preko 50 naučnih i stručnih radova, od čega je 11 radova objavljeno u međunarodnim časopisima sa SCI liste. Koautor je jednog udžbenika koji se koristi u nastavnom procesu na Univerzitetu u Beogradu – Saobraćajnom fakultetu i dva pomoćna udžbenika. Član je programskog odbora simpozijuma Postel. Radovi su citirani u svetskoj literaturi 200 puta (baza *Google Scholar*). Indeks naučne kompetentnosti profesora Nenada Jevtića iznosi $h = 9$ (baza *Google Scholar*).

1.3. Biografski podaci o kandidatu

Pavle Bugarčić je rođen 17.10.1994. godine u Čačku. Nakon završene osnovne škole u Guči, upisao je prirodno-matematički smer Gimnazije u Čačku koju je završio 2013. godine. Iste godine upisao je Saobraćajni fakultet Univerziteta u Beogradu. Diplomirao je u septembru 2017. godine na modulu za Telekomunikacioni saobraćaj i mreže, sa prosečnom ocenom 9,69. Master akademske studije na Saobraćajnom fakultetu Univerziteta u Beogradu, na Modulu za telekomunikacioni saobraćaj i mreže, upisao je školske 2017/18. godine i završio iste školske godine sa maksimalnom prosečnom ocenom 10,00. U oktobru 2018. godine upisao je doktorske akademske studije na studijskom programu “Saobraćaj” Saobraćajnog fakulteta Univerziteta u Beogradu i položio sve ispite predviđene nastavnim planom sa prosečnom ocenom 10,00. Tokom studija, na osnovu izuzetnog uspeha, bio je nosilac brojnih stipendija, između ostalih i dve stipendije “Dositeja”.

Takođe, za školsku 2016/17. godinu, dobio je nagradu Saobraćajnog fakulteta za uspeh u završnoj (četvrtoj) godini studija, tokom koje je ostvario prosek 10,00.

Od maja 2018. godine zaposlen je na Saobraćajnom fakultetu Univerziteta u Beogradu, najpre kao saradnik u nastavi, a zatim kao asistent na Katedri za telekomunikacioni saobraćaj i mreže. U okviru svog zaposlenja održava računske i laboratorijske vežbe iz sledećih predmeta na osnovnim akademskim studijama: Osnovi elektronike, Telekomunikaciona elektronika, Telekomunikaciona merenja, Slučajni procesi u telekomunikacijama, Eksploatacija komunikacionih sistema, Prognoziranje u komunikacionom saobraćaju i Planiranje i prognoziranje u telekomunikacijama, a u jednom periodu bio je angažovan i na predmetima: Statistička teorija telekomunikacija, Osnovi telekomunikacionih sistema i Elementi razvoja informacionog društva. Na master akademskim studijama angažovan je na predmetu Prognoziranje novih servisa. U svom dosadašnjem radu učestvovao je u realizaciji jednog naučnog projekta. Bio je član brojnih komisija za odbranu završnih radova. Autor je jednog pomoćnog udžbenika, dvanaest radova na domaćim i međunarodnim konferencijama i četiri rada u domaćim i međunarodnim časopisima. Član je organizacionog odbora simpozijuma Postel. Uža oblast naučno-stručnog interesovanja mu je optimizacija rutiranja saobraćaja u bežičnim komunikacionim mrežama primenom veštačke inteligencije.

2. OPIS DISERTACIJE

2.1. Sadržaj disertacije

Doktorska disertacija kandidata Pavla Bugarčića, master inženjera saobraćaja, napisana je u skladu sa "Uputstvom o obliku i sadržaju doktorske disertacije koja se brani na Univerzitetu u Beogradu". Doktorska disertacija je napisana na srpskom jeziku, latiničnim pismom, na papiru A4, ukupnog obima 123 strane, sa 7 tabela i 50 slika. Na početku disertacije dat je rezime na srpskom i engleskom jeziku sa ključnim rečima, zatim sadržaj disertacije, spisak slika i spisak tabela.

Doktorska disertacija je strukturno koncipirana kroz sedam poglavlja sa sledećim naslovima:

1. Uvod
2. Rutiranje u dinamičkim WANET mrežama
3. Pregled protokola rutiranja baziranih na RL za dinamičke WANET mreže
4. Predlog novog RL baziranog protokola rutiranja za VANET mreže
5. Simulaciono okruženje za testiranje protokola
6. Simulaciona analiza
7. Zaključak

U nastavku disertacije prikazan je spisak literature koji sadrži 103 reference, koje su korišćene u izradi doktorske disertacije. Na kraju, data je biografija autora i potpisane izjave o autorstvu, istovetnosti štampane i elektronske verzije doktorskog rada i o korišćenju doktorskog rada.

Prema strukturi rada, primenjenim naučnim metodama, sprovedenim analizama, istraživanjima i postignutim rezultatima, disertacija u potpunosti zadovoljava kriterijume i standarde predviđene za ovakvu vrstu naučnog rada.

2.2. Kratak prikaz pojedinačnih poglavlja

U prvom, uvodnom poglavlju obrazloženi su motivi za izbor teme doktorske disertacije, definisani su predmet, cilj i metode istraživanja, postavljene su polazne hipoteze i predstavljen je sadržaj disertacije.

U drugom poglavlju su detaljnije opisane bežične *ad hoc* mreže (*Wireless Ad hoc Networks*, WANETs), sa posebnim osvrtom na bežične *ad hoc* mreže za vozila (*Vehicular Ad hoc Networks*, VANETs) i bežične *ad hoc* mreže za letelice (*Flying Ad hoc Networks*, FANETs). Predstavljani su izazovi sa kojima se susreću protokoli rutiranja i pojašnjen je tradicionalni pristup rutiranju podataka u ovim mrežama. Takođe, izvršena je klasifikacija tradicionalnih protokola rutiranja i objašnjen je princip funkcionisanja *Ad hoc on-demand distance vector* (AODV), *Dynamic source routing* (DSR) i *Destination-sequenced distance-vector* (DSDV) protokola, koji predstavljaju neke od najznačajnijih tradicionalnih protokola rutiranja.

U trećem poglavlju su definisani osnovni principi funkcionisanja učenja potkrepljivanjem (*Reinforcement Learning*, RL), predstavljeni su i objašnjeni najznačajniji RL algoritmi, kao i primeri njihove primene u optimizaciji protokola rutiranja za dinamičke WANET mreže. Takođe, u ovom poglavlju je izvršen pregled i klasifikacija aktuelnih protokola rutiranja baziranih na RL za dinamičke WANET mreže, kao i kratak opis principa funkcionisanja po jednog protokola iz svake izvedene klase. Nakon toga je izvršena detaljna komparativna analiza aktuelnih protokola i sumirani su zaključci izvršene klasifikacije i komparativne analize. Na kraju je objašnjen princip funkcionisanja *Q-learning* AODV (QLAODV) i *Adaptive routing protocol based on reinforcement learning* (ARPRL) protokola, koji su izabrani za reprezentativne predstavnike RL baziranih protokola rutiranja.

U četvrtom poglavlju je predložen i predstavljen novi dinamički protokol rutiranja na bazi RL za urbane VANET mreže (*QL-based dynamic routing algorithm for urban VANETs*, Q-DRAV). Ovde su opisani metodologija razvoja, detaljna matematička formulacija i princip funkcionisanja novog protokola.

U petom poglavlju je opisano simulaciono okruženje, u kom je sprovedena simulaciona analiza i poređenje novog i odabranih postojećih protokola rutiranja. Najpre je izvršeno poređenje osnovnih karakteristika najpoznatijih mrežnih simulatora, a zatim su opisani osnovni koncepti i elementi *Network simulator 3* (NS-3) simulatora za modelovanje *ad hoc* mreža. Na kraju poglavlja ukratko je opisan *Simulation of urban mobility* (SUMO) simulator, kao jedan od najznačajnijih simulatora mobilnosti čvorova.

U šestom poglavlju je dat opis simulacionih parametara i scenarija u kojima su testirani protokoli. Zatim su predstavljeni i upoređeni rezultati simulacione analize i testiranja primene novog Q-DRAV protokola, odabranih QLAODV i ARPRL protokola baziranih na RL i tradicionalnog AODV protokola rutiranja. Protokoli su upoređeni na osnovu procenta izgubljenih paketa, ostvarenog aplikacionog protoka, kašnjenja paketa i džitera.

U sedmom poglavlju data su zaključna razmatranja, sumirani su rezultati disertacije, praktični i naučni doprinosi. Takođe, definisane su dalje mogućnosti razvoja oblasti primene RL u protokolima rutiranja za dinamičke WANET mreže.

Doktorska disertacija je tehnički kvalitetno obrađena u skladu sa savremenim tehničkim mogućnostima u oblasti izdavaštva. Slike i dijagrami su jasno i kvalitetno predstavljani.

3. OCENA DISERTACIJE

3.1. Savremenost i originalnost

Doktorska disertacija obrađuje aktuelnu temu rutiranja u dinamičkim WANET mrežama, iz uže naučne oblasti Eksploatacija telekomunikacionog saobraćaja i mreža. Rezultati predstavljeni u disertaciji proizvod su višegodišnjeg bavljenja kandidata naučnoistraživačkim radom.

Izbor optimalne putanje za slanje podataka u dinamičkim WANET mrežama predstavlja kompleksan zadatak, s obzirom na stalne promene u mrežnoj topologiji i brzinu kretanja mrežnih čvorova. Jedan od pristupa za prevazilaženje ovog problema je korišćenje RL u protokolima rutiranja. RL predstavlja savremenu tehniku mašinskog učenja, koja omogućava prilagođavanje procesa rutiranja zahtevima inteligentnih transportnih sistema. Primena ove inovativne tehnike u postupku rutiranja doprinosi savremenosti disertacije.

Osnovni cilj istraživanja je unapređenje mrežnih performansi dinamičkih WANET mreža kroz poboljšanje procesa rutiranja paketa korišćenjem RL tehnike. Da bi se postigao ovaj cilj, bilo je prvo potrebno sprovesti detaljan pregled aktuelnih rezultata primene RL u protokolima rutiranja za dinamičke WANET mreže, njihovu klasifikaciju i komparativnu analizu. Autentični pristupi klasifikaciji i komparativnoj analizi protokola rutiranja doprinose originalnosti ove disertacije.

Nakon toga, na osnovu uočenih prednosti i nedostataka aktuelnih istraživanja, predložen je i razvijen novi protokol rutiranja za WANET mreže koji za izbor optimalne putanje za slanje paketa koristi RL baziran algoritam. Novi protokol je razvijen sa ciljem da unapredi mrežne performanse u poređenju sa ranijim protokolima rutiranja, uzimajući u obzir relevantne uticajne faktore. Predlog potpuno novog i autentičnog protokola rutiranja takođe značajno doprinosi originalnosti disertacije.

Testiranje protokola izvršeno je u NS-3 simulatoru, koji predstavlja jedan od najčešće korišćenih simulacionih alata u savremenoj literaturi. Ovaj simulator se konstantno razvija i prilagođava realnim mrežama, pa njegova upotreba za sprovedene simulacione analize doprinosi aktuelnosti istraživanja izvršenih u okviru doktorske disertacije. Kako bi bilo moguće sprovesti kvalitetnu simulacionu analizu, najpre je bilo neophodno upoznati se sa strukturom simulatora, zatim implementirati odgovarajuće protokole rutiranja u simulaciono okruženje, izvršiti intenzivne simulacije i na kraju prikupiti i adekvatno obraditi rezultate simulacija. Na osnovu ovih rezultata izvršena je analiza i poređenje mrežnih performansi postignutih primenom odabranih postojećih protokola i novog protokola rutiranja.

Savremenost i originalnost teme disertacije potvrđeni su i objavljivanjem rezultata istraživanja u časopisima međunarodnog karaktera sa SCI liste, domaćim naučnim časopisima i u zbornicima radova međunarodnih i domaćih naučnih skupova. Literatura korišćena u disertaciji dodatno ukazuje na savremenost i aktuelnost istraživane oblasti.

3.2. Osvrt na referentnu i korišćenu literaturu

U disertaciji je korišćena brojna relevantna literatura, koja obuhvata 103 reference. Literaturu čine najaktuelniji radovi iz oblasti primene RL u protokolima rutiranja za VANET i FANET mreže, ali i brojne publikacije u kojima su predloženi tradicionalni protokoli rutiranja, relevantne knjige iz obrađene oblasti, dokumentacija korišćenih simulatora, kao i odgovarajuće stručne preporuke i standardi. Kandidat je pravilno referisao brojne naučno-stručne radove i time pokazao visok nivo poznavanja rezultata istraživanja prisutnih u naučnoj oblasti rutiranja u WANET mrežama. Pored navoda drugih autora, kandidat se u navedenoj literaturi poziva i na sopstvene naučnoistraživačke radove.

3.3. Opis i adekvatnost primenjenih naučnih metoda

U okviru istraživanja su korišćene naučnoistraživačke metode klasifikacije, komparativne analize, simulacione analize i statističke analize. Sveobuhvatan pregled, klasifikacija i komparativna analiza aktuelnih istraživanja doprineli su boljem sagledavanju dosadašnje primene RL u protokolima rutiranja za VANET i FANET mreže i omogućili su dobru osnovu za izbor pravca daljeg razvoja ovih protokola. Uzimajući u obzir prednosti i nedostatke prethodnih protokola, razvijen je novi protokol rutiranja koji je doprineo dodatnom unapređenju mrežnih performansi u VANET mrežama. U razvoju novog protokola korišćena je jedna od tehnika mašinskog učenja, Q-učenje (*Q-Learning*, QL), koja na adekvatan način odgovara zahtevima rutiranja u dinamičkim WANET mrežama. Simulaciona analiza i testiranje protokola sprovedeni su korišćenjem NS-3 simulatora, dok je SUMO simulator poslužio kao pomoćni alat za generisanje modela mobilnosti vozila u simulacijama. Statistička obrada rezultata simulacija, procena vrednosti mrežnih parametara i njihova analiza izvršeni su korišćenjem programa *Microsoft Excel*.

Uzimajući u obzir prirodu razmatranih problema, kao i ostvarene rezultate, Komisija zaključuje da primenjeni naučni metodi i tehnike predstavljaju adekvatan izbor, odgovaraju po značaju, strukturi i primeni teme doktorske disertacije, što je dovelo do ispunjenja postavljenih ciljeva ove disertacije.

3.4. Primenljivost ostvarenih rezultata

Rezultati doktorske disertacije, pored naučne vrednosti, imaju i praktičnu primenu. Iako celularne mreže (poput 5G i 6G) u poslednje vreme privlače značajnu pažnju zbog visokih protoka i malih kašnjenja koje obezbeđuju pri prenosu podataka, VANET i FANET mreže i dalje nude brojne prednosti, čime ostaju veoma važan deo inteligentnih transportnih sistema. Takođe, postoje i velike mogućnosti kombinovanja ovih mreža sa celularnim mrežama radi postizanja što bolje komunikacije između mobilnih korisnika (u koje se ubrajaju i vozila i bespilotne letelice). Iz tog razloga se može zaključiti da postoji velika potreba za razvojem novih protokola rutiranja kako za VANET tako i za FANET mreže.

Predloženi Q-DRAV protokol testiran je u simulacionim scenarijima koji približno odgovaraju realnim saobraćajnim uslovima u urbanim VANET mrežama. Testiranje je izvršeno u malim i velikim mrežnim područjima, za varijabilne maksimalne dozvoljene brzine i gustine čvorova u mreži. U svim simuliranim scenarijima protokol pokazuje značajno unapređenje mrežnih performansi u poređenju sa svojim prethodnicima. Dobri rezultati u različitim saobraćajnim uslovima pokazali su da Q-DRAV protokol ima perspektivu da značajno poboljša mrežne

performanse u realnim VANET mrežama, koje su sklone stalnim promenama u gustini i brzini kretanja mrežnih čvorova. Predloženi algoritam ne zahteva prevelike računarske resurse, jer koristi relativno jednostavnu QL tehniku, što olakšava njegovu praktičnu implementaciju. Postoji veliki potencijal za primenu sličnih protokola i u FANET mrežama.

Takođe, kako bi se drugim istraživačima olakšao razvoj budućih protokola rutiranja i omogućilo jednostavnije poređenje sa predloženim Q-DRAV protokolom rutiranja, implementacioni kôd ovog protokola u NS-3 simulatoru javno je dostupan.

3.5. Ocena dostignutih sposobnosti kandidata za samostalni naučni rad

Kandidat je tokom izrade predmetne doktorske disertacije pokazao da uspešno vlada savremenim naučnim saznanjima, metodama i tehnikama, kao i da je u stanju da samostalno rešava naučne i stručne probleme. Takođe, kandidat je ispoljio zahtevanu naučnu zrelost i osposobljen je za dalji uspešan naučnoistraživački rad.

4. OSTVARENI NAUČNI DOPRINOS

4.1. Prikaz ostvarenih naučnih doprinosa

Komisija smatra da je kandidat disertacijom dokumentovano proširio postojeća znanja, verifikovao i ostvario naučni doprinos u naučnoj oblasti Eksploatacija telekomunikacionog saobraćaja i mreža za koju je matičan Univerzitet u Beogradu – Saobraćajni fakultet. Najznačajniji naučni doprinosi doktorske disertacije su:

- Izvršen je sveobuhvatan pregled i analiza aktuelnih istraživanja u oblasti primene RL tehnike za unapređenje protokola rutiranja u dinamičkim WANET mrežama;
- Izvršena je klasifikacija aktuelnih protokola baziranih na RL za dinamičke WANET mreže, sa posebnim osvrtom na tip mreže, tip RL koji se koristi i primenu drugih tehnika u protokolima;
- Izvršena je komparativna analiza aktuelnih protokola baziranih na RL za VANET i FANET mreže na osnovu uticajnih faktora u RL procesu, posmatranih parametara u postupku evaluacije protokola i korišćenih simulacionih alata;
- Razvijen je novi protokol rutiranja za VANET mreže, koji uzimanjem u obzir relevantnih mrežnih parametara kroz RL proces unapređuje ukupne mrežne performanse u pogledu procenta izgubljenih paketa, ostvarenog protoka, kašnjenja paketa i džitera;
- Novi protokol rutiranja i relevantni postojeći protokoli rutiranja bazirani na RL, sa kojima je novi protokol upoređen, implementirani su u NS-3 simulaciono okruženje;
- Sprovedena je simulaciona analiza i evaluacija najvažnijih mrežnih performansi u slučaju primene novog i ranijih protokola rutiranja u urbanom VANET okruženju;
- Izvršena je statistička obrada i komparativna analiza rezultata simulacija.

4.2. Kritička analiza rezultata istraživanja

Uvidom u postavljenu problematiku, hipoteze, ciljeve istraživanja i dobijene rezultate, konstatovali smo da je kandidat odgovorio na suštinska pitanja koja su značajna za rešenje problema kojim se bavi doktorska disertacija. Sprovedena je originalna i detaljna klasifikacija i komparativna analiza protokola rutiranja baziranih na RL za VANET i FANET mreže, što je potvrđeno uvidom u publikaciju kandidata u časopisu *Promet-Traffic&Transportation*. Ova analiza pomaže u sistematičnom sagledavanju aktuelnih rešenja i predstavlja značajnu polaznu osnovu za dalji razvoj ove oblasti.

Takođe, predložen je novi i autentični protokol rutiranja za VANET mreže koji doprinosi unapređenju ključnih performansi ovih mreža. Dobri rezultati koje pokazuje ovaj protokol u različitim saobraćajnim uslovima potvrđuju njegov potencijal za dalje unapređenje procesa rutiranja u inteligentnim transportnim sistemima. Originalnost ovog protokola potvrđena je publikacijom kandidata u časopisu *Advances in Electrical and Computer Engineering*. Na osnovu navedenog, konstatujemo da je kandidat istraživanjem prezentovanim u ovoj disertaciji došao do novih rezultata koji nisu ranije publikovani, čime je doprineo razvoju naučne oblasti kojoj pripada disertacija.

4.3. Verifikacija naučnih doprinosa

Naučni doprinosi disertacije su verifikovani publikovanjem rezultata istraživanja u referentnim međunarodnim i domaćim časopisima i zbornicima radova međunarodnih i domaćih naučnih skupova. Ostvareni naučni doprinosi u okviru ove doktorske disertacije verifikovani su objavljivanjem 14 publikacija, od čega su dva rada u međunarodnim časopisima sa SCI liste, jedan rad u nacionalnom časopisu međunarodnog značaja, 4 rada na međunarodnim konferencijama i 7 radova na domaćim naučnim skupovima:

Radovi objavljeni u naučnim časopisima međunarodnog značaja – M20

Međunarodni časopis (M23)

1. **Bugarčić P.**, Jevtić N., Malnar M. (2022). Reinforcement learning-based routing protocols in vehicular and flying ad hoc networks – A literature survey. *Promet-Traffic&Transportation*, 34(6), pp. 893-906. ISSN: 1848-4069. DOI: 10.7307/ptt.v34i6.4159. (IF₂₀₂₂ = 1.0)
2. **Bugarčić P.**, Jevtić N., Malnar M., Stojanović M. (2024). Enhanced QL-based dynamic routing protocol for urban VANETs. *Advances in Electrical and Computer Engineering*, 24(4), pp. 27-36. ISSN: 1582-7445. DOI: 10.4316/AECE.2024.04003 (IF₂₀₂₃ = 0.7)

Nacionalni časopis međunarodnog značaja (M24)

3. Jevtić N., **Bugarčić P.** (2023). Comparison of traditional and reinforcement learning based routing protocols in VANET scenario. *International Journal for Traffic and Transport Engineering (IJTTE)*, 13(1), pp. 125-137. ISSN: 2217-544X. DOI: 10.7708/ijtte2023.13(1).10

Zbornici radova sa naučnih skupova međunarodnog značaja – M30

Saopštenje sa međunarodnog skupa štampano u celini (M33)

4. **Bugarčić P.**, Malnar M., Jevtić N. (2018). Performance analysis of MANET networks based on AODV protocol in NS-3 simulator. In *Proceedings of the 26th Telecommunication*

- Forum – TELFOR*. Belgrade, Serbia, November 20-21., pp. 152-155. ISBN: 978-1-5386-7170-2. DOI: 10.1109/TELFOR.2018.8612100.
5. **Bugarčić P.**, Jevtić N., Malnar M. (2019). An extension of NS-3 simulator to support efficient MANET performance analysis. In *Proceedings of the 14th International Conference on Advanced Technologies, Systems and Services in Telecommunications (TELSIKS)*. Niš, Serbia, October 23-25., pp. 290-293. ISBN: 978-1-7281-0877-3. DOI: 10.1109/TELSIKS46999.2019.9002027.
 6. **Bugarčić P.**, Malnar M., Jevtić N. (2019). Modifications of AODV protocol for VANETs: performance analysis in NS-3 simulator. In *Proceedings of the 27th Telecommunication Forum – TELFOR*. Belgrade, Serbia, November 26-27., pp. 731-734. ISBN: 978-1-7281-4789-5. DOI: 10.1109/TELFOR48224.2019.8971283.
 7. **Bugarčić P.**, Jevtić N., Malnar M. (2021). An extension of building model for indoor - communication in NS-3 simulator. In *Proceedings of the 29th Telecommunication Forum – TELFOR*. Belgrade, Serbia, November 23-24., pp. 118-121. ISBN: 978-1-6654-2584-1. DOI: 10.1109/TELFOR52709.2021.9653272.

Predavanja po pozivu na skupovima nacionalnog značaja – M60

Saopštenje sa skupa nacionalnog značaja štampano u celini (M63)

8. Jevtić N., Malnar M., **Bugarčić P.** (2018). Dizajn i implementacija aplikacije za merenje performansi mreže u NS-3 simulatoru. U *Zborniku radova sa XXXVI Simpozijuma o novim tehnologijama u poštanskom i telekomunikacionom saobraćaju – PosTel 2018*. Beograd, Srbija, 4-5. decembar. str. 275-284. ISBN: 978-86-7395-395-3.
9. Malnar M., Jevtić N., **Bugarčić P.** (2019). Nove metrike rutiranja za smanjenje overhead-a u dinamičkim *ad hoc* mrežama. U *Zborniku radova sa XXXVII Simpozijuma o novim tehnologijama u poštanskom i telekomunikacionom saobraćaju – PosTel 2019*. Beograd, Srbija, 3-4. decembar. str. 267-276. ISBN: 978-86-7395-410-3.
10. Malnar M., Jevtić N., **Bugarčić P.** (2020). Unapređenje modela propagacije - u zatvorenom prostoru za NS-3 simulator. U *Zborniku radova sa XXXVIII Simpozijuma o novim tehnologijama u poštanskom i telekomunikacionom saobraćaju – PosTel 2020*. Beograd, Srbija, 1-2. decembar. str. 231-238. ISBN: 978-86-7395-431-8.
11. Jevtić N., Malnar M., **Bugarčić P.** (2021). Primena učenja potkrepljivanjem u protokolima rutiranja za dinamičke bežične *ad hoc* mreže. U *Zborniku radova sa XXXIX Simpozijuma o novim tehnologijama u poštanskom i telekomunikacionom saobraćaju – PosTel 2021*. Beograd, Srbija, 30. novembar - 1. decembar. str. 249-258. ISBN: 978-86-7395-445-5.
12. Jevtić N., **Bugarčić P.** (2022). Analiza protokola rutiranja baziranih na učenju potkrepljivanjem za VANET mreže. U *Zborniku radova sa XL Simpozijuma o novim tehnologijama u poštanskom i telekomunikacionom saobraćaju – PosTel 2022*. Beograd, Srbija, 29-30. novembar. str. 375-384. ISBN: 978-86-7395-461-5.
13. Jevtić N., Malnar M., **Bugarčić P.** (2023). Unapređenje protokola rutiranja za VANET mreže korišćenjem mašinskog učenja. U *Zborniku radova sa XLI Simpozijuma o novim tehnologijama u poštanskom i telekomunikacionom saobraćaju – PosTel 2023*. Beograd, Srbija, 28-29. novembar. str. 191-200. ISBN: 978-86-7395-475-2.
14. Malnar M., **Bugarčić P.** (2024). Primena učenja potkrepljivanjem u protokolima rutiranja za FANET mreže. U *Zborniku radova sa XLII Simpozijuma o novim tehnologijama u poštanskom i telekomunikacionom saobraćaju – PosTel 2024*. Beograd, Srbija, 26-27. novembar. str. 205-214. ISBN: 978-86-7395-489-9.

Zaključno sa 17.04.2025. godine, radovi koji su u direktnoj vezi sa temom doktorske disertacije su citirani: 29 (Google Scholar), 19 (Scopus) i 12 (Web of Science).

5. ZAKLJUČAK I PREDLOG

Razmatrajući strukturu rada, naučne doprinose, primenjene naučne metode, kvalitet istraživanja i dobijene rezultate, Komisija zaključuje da doktorska disertacija kandidata Pavla Bugarčića, master inženjera saobraćaja, ispunjava sve kriterijume, standarde i uslove predviđene Zakonom o visokom obrazovanju, Statutom Univerziteta u Beogradu i Statutom Saobraćajnog fakulteta.

Komisija konstatuje da doktorska disertacija predstavlja savremen i originalan naučni doprinos u oblasti Eksploatacije telekomunikacionog saobraćaja i mreža, izveden kroz sveobuhvatna istraživanja primene RL tehnike za unapređenje procesa rutiranja u dinamičkim WANET mrežama. Kandidat je ostvario originalne naučne doprinose u vidu pregleda, klasifikacije i komparativne analize protokola rutiranja baziranih na RL za dinamičke WANET mreže, kao i kroz predlog novog protokola ovog tipa koji dodatno unapređuje performanse WANET mreža.

Rezultati naučnoistraživačkog rada u ovoj disertaciji verifikovani su objavljivanjem 14 radova povezanih sa temom i sadržajem doktorske disertacije, od kojih su dva rada objavljena u međunarodnim časopisima sa SCI liste, jedan u nacionalnom časopisu međunarodnog značaja, 4 rada na međunarodnim konferencijama i 7 radova na domaćim naučnim skupovima. Disertacija je originalan naučni rad i dokaz naučnoistraživačke zrelosti kandidata.

Saglasno navedenom, Komisija sa zadovoljstvom predlaže Nastavno-naučnom veću Univerziteta u Beogradu – Saobraćajnog fakulteta, da podnetu doktorsku disertaciju pod nazivom “Unapređenje protokola rutiranja za dinamičke bežične *ad hoc* mreže korišćenjem mašinskog učenja”, kandidata Pavla Bugarčića, master inženjera saobraćaja, posle izlaganja na uvid javnosti, prihvati i uputi na usvajanje Veću naučnih oblasti tehničkih nauka Univerziteta u Beogradu.

U Beogradu, 28.04.2025. godine

ČLANOVI KOMISIJE:

Dr Goran Marković, redovni profesor,
Univerzitet u Beogradu - Saobraćajni fakultet

Dr Mirjana Stojanović, redovni profesor,
Univerzitet u Beogradu - Saobraćajni fakultet

Dr Nataša Nešković, redovni profesor,
Univerzitet u Beogradu - Elektrotehnički fakultet

Dr Valentina Radojičić, redovni profesor,
Univerzitet u Beogradu - Saobraćajni fakultet

Dr Predrag Ivaniš, redovni profesor,
Univerzitet u Beogradu - Elektrotehnički fakultet