

UNIVERZITET U BEOGRADU

SAOBRAĆAJNI FAKULTET

Vojvode Stepe 305, Beograd

NASTAVNO-NAUČNOM VEĆU

KOMISIJI ZA DOKTORSKE STUDIJE

Predmet: Ocena naučne zasnovanosti teme doktorske disertacije kandidata Pavla Bugarčića, master inženjera saobraćaja.

Odlukom Nastavno-naučnog veća Saobraćajnog fakulteta (br. 868/3 od 2. 7. 2024. godine) održanog 2. 7. 2024. godine imenovani smo za članove Komisije za ocenu naučne zasnovanosti teme doktorske disertacije Pavla Bugarčića, master inženjera saobraćaja, pod nazivom „Unapređenje protokola rutiranja za dinamičke bežične *ad hoc* mreže korišćenjem mašinskog učenja“.

Na osnovu materijala priloženog uz Zahtev kandidata, u skladu sa Pravilnikom o doktorskim studijama na Univerzitetu u Beogradu, Komisija podnosi sledeći:

IZVEŠTAJ

1. PODACI O KANDIDATU

1.1 Biografski podaci

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 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 računске i laboratorijske vežbe iz sledećih predmeta na osnovnim akademskim studijama: Osnovi elektronike, Telekomunikaciona elektronika, Telekomunikaciona merenja, Statistička teorija telekomunikacija, Eksploatacija komunikacionih sistema, Prognoziranje u komunikacionom saobraćaju i Planiranje i prognoziranje u telekomunikacijama, a u jednom periodu bio je angažovan i na predmetima: 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, a trenutno je član još nekoliko stručnih komisija na Saobraćajnom fakultetu. Autor je jednog pomoćnog udžbenika, jedanaest radova na domaćim i međunarodnim konferencijama i tri 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.

1.2 Stečeno naučno-istraživačko iskustvo

Položeni ispiti

Tokom doktorskih studija položio je svih 8 ispita predviđenih nastavnim planom i programom, ostvarivši prosečnu ocenu 10. Spisak položenih ispita i ispunjenih obaveza u toku doktorskih studija dat je u tabeli ispod (Tabela 1).

Tabela 1. Položeni ispiti i ispunjene obaveze u toku doktorskih studija

R.br.	Naziv ispita/obaveze	ESPB	Ocena
1.	Transportna ekonomika	7	10
2.	Simulaciono modeliranje	7	10
3.	Planiranje i prognoziranje u komunikacijama	7	10
4.	Upravljanje podacima	7	10
5.	Teorija upravljanja sistemima	7	10
6.	Optimizacija i performanse bežičnih mreža	7	10
7.	Modeliranje i projektovanje pametnih senzora	7	10
8.	Telekomunikacije u inteligentnim transportnim sistemima	7	10
9.	Godišnji rad na seminaru	4	+
Ukupno		60	

Kandidat je dana 26.6.2024. godine podneo Prijavu teme doktorske disertacije pod radnim nazivom „Unapređenje protokola rutiranja za dinamičke bežične *ad hoc* mreže korišćenjem mašinskog učenja“. Uspešno je odbranio predlog istraživanja u okviru doktorske disertacije dana 4. 9. 2024. godine i time stekao još 16 ESPB bodova. Time je kandidat ostvario ukupno **76 ESPB** bodova.

Bibliografija radova kandidata

Rad objavljen u međunarodnom časopisu (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*, 34(6), pp. 893-906. ISSN: 1848-4069. DOI: 10.7307/ptt.v34i6.4159. (IF₂₀₂₂=1.0)

Rad objavljen u nacionalnom časopisu međunarodnog značaja (M24)

2. **Bugarčić P.**, Radojičić V. (2020). Forecasting Demand for a Telephone Call Center. *International Journal for Traffic and Transport Engineering (IJTTE)*, 10(3), pp. 266-277. ISSN: 2217-544X. DOI: 10.7708/ijtte.2020.10(3).01.
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.

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.
8. **Bugarčić P.**, Janković S., Mladenović S. (2021). Forecasting number of calls to the call center using machine learning. In *Proceedings of the 3rd International Scientific Conference Transport for Today's Society (TTS)*. Bitola, North Macedonia, October 14-16., pp. 190-193. ISBN: 978-9989-786-63-1. DOI: 10.20544/TTS2021.1.1.21.p44.

Predavanje po pozivu sa skupa nacionalnog značaja štampano u celini (M61)

9. 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.
10. 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.
11. 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.
12. 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.
13. 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.
14. 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.

1.3 Izveštaj sa javne usmene odbrane predložene teme doktorske disertacije

Javna usmena odbrana predložene teme doktorske disertacije održana je 4. 9. 2024. godine na Saobraćajnom fakultetu u Beogradu, pred Komisijom u sastavu:

1. Prof. dr Goran Marković, redovni profesor, Univerzitet u Beogradu – Saobraćajni fakultet;
2. Prof. dr Mirjana Stojanović, redovni profesor, Univerzitet u Beogradu – Saobraćajni fakultet;
3. Prof. dr Nataša Nešković, redovni profesor, Univerzitet u Beogradu – Elektrotehnički fakultet;

Usmena odbrana predložene teme doktorske disertacije počela je u 14:00 časova.

Na početku odbrane predsednik Komisije prof. dr Goran Marković upoznao je prisutne sa hronologijom prijave teme i odlukama Nastavno-naučnog veća. Zatim je izneta i kratka biografija kandidata sa osnovnim podacima o prijavljenoj temi doktorske disertacije.

Odbrana je nastavljena prezentacijom osnovnih postavki predložene teme, koju je izložio Kandidat u trajanju od 25 minuta.

Po završenoj prezentaciji, članovi Komisije su Kandidatu postavili po nekoliko pitanja i dali sugestije za dalji rad na predloženoj temi.

Komisija se potom povukla na većanje i jednoglasno donela sledeći zaključak:

Komisija je konstatovala da je izlaganje Kandidata bilo jasno, koncizno i kvalitetno, i da je Kandidat uspešno odgovorio na sva postavljena pitanja. Komisija je donela zaključak da je Kandidat uspešno odbranio predloženu temu i time stekao pravo da nastavi rad na doktorskoj disertaciji.

Usmena odbrana predložene teme doktorske disertacije završena je u 14:45 časova. Sa usmene odbrane načinjen je Izveštaj koji su potpisali svi članovi Komisije od dana 4. 9. 2024. godine. Izveštaj o usmenoj odbrani je zaveden pod brojem 868/4 od dana 4. 9. 2024. godine.

1.4 Ocena podobnosti kandidata za rad na predloženoj temi

Na osnovu uvida u navedene podatke o kandidatu, spiska položenih ispita na doktorskim studijama, objavljenih naučno istraživačkih radova Komisija smatra da kandidat Pavle Bugarčić, master inženjer saobraćaja, ispunjava sve uslove za izradu doktorske disertacije na temu: **„Unapređenje protokola rutiranja za dinamičke bežične *ad hoc* mreže korišćenjem mašinskog učenja“**.

Kandidat je ispunio sve obaveze predviđene nastavnim planom i programom doktorskih akademskih studija Univerziteta u Beogradu – Saobraćajnog fakulteta (Pravilnik doktorskih akademskih studija Univerziteta u Beogradu – Saobraćajnog fakulteta – Studijski program Saobraćaj) i stekao formalne uslove za izradu doktorske disertacije. U dosadašnjem celokupnom radu kandidat je pokazao istraživačku radoznalost, sistematičnost i smisao za naučno-istraživački rad. Uvidom u dosadašnji naučni i stručni rad, kao i u reference kandidata koje ga kvalifikuju za uspešan i efikasan rad na predloženoj temi, Komisija smatra da je Pavle Bugarčić, master inženjer saobraćaja, podoban da odbrani predloženu temu.

Na osnovu uvida u prijavu teme doktorske disertacije, kao i na osnovu uspešno odbranjenog predloga istraživanja u okviru doktorske disertacije, Komisija zaključuje da je tema koju predlaže kandidat u naučnom i stručnom smislu značajna i aktuelna i da pruža mogućnost za postizanje naučnog doprinosa koji je kandidat naveo i obrazložio u prijavi.

2. PREDMET I NAUČNI CILJ ISTRAŽIVANJA

Predmet istraživanja disertacije je sagledavanje mogućnosti primene mašinskog učenja za unapređenje protokola rutiranja u dinamičkim bežičnim *ad hoc* mrežama. U okviru mašinskog učenja posebna pažnja će biti posvećena učenju potkrepljivanjem (*Reinforcement Learning*, RL) kao jednoj od vodećih tehnika mašinskog učenja koja se u naučnoj literaturi najčešće primenjuje za rešavanje problema rutiranja. U skladu sa tim, najpre će biti izvršen detaljan pregled aktuelnih dostignuća u primeni RL u protokolima rutiranja za dinamičke bežične *ad hoc* mreže. Na osnovu uočenih prednosti i nedostataka aktuelnih protokola, biće predložen novi protokol rutiranja za bežične *ad hoc* mreže za vozila (*Vehicular Ad hoc Networks*, VANETs) na bazi RL, koji treba da pokaže bolje mrežne performanse od ranijih protokola. Poređenje mrežnih performansi biće ostvareno sprovođenjem simulacione analize u pogodno odabranim simulacionim scenarijima. Na osnovu dobijenih rezultata simulacija i njihove adekvatne predstave biće donešeni zaključci o valjanosti predloženog protokola.

U skladu sa prethodno navedenim, **predmet istraživanja** može se razložiti na sledeće:

- Analiza problema rutiranja u dinamičkim bežičnim *ad hoc* mrežama;
- Primena RL tehnike u protokolima rutiranja sa ciljem unapređenja ukupnih mrežnih performansi u dinamičkim bežičnim *ad hoc* mrežama;
- Komparativna analiza aktuelnih rezultata primene RL u protokolima rutiranja za dinamičke bežične *ad hoc* mreže;
- Razvoj novog protokola rutiranja za VANET mreže na bazi RL;
- Implementacija novog i postojećih protokola na bazi RL u simulaciono okruženje;
- Simulaciona analiza primene novog i postojećih protokola na bazi RL u pogodno odabranim simulacionim scenarijima;
- Analiza rezultata simulacija i davanje smernica za dalja istraživanja.

Osnovni cilj istraživanja je poboljšanje mrežnih performansi dinamičkih bežičnih *ad hoc* mreža kroz unapređenje procesa rutiranja paketa pomoću RL tehnike. Kako bi ovaj cilj bio ispunjen, neophodno je najpre izvršiti detaljnu komparativnu analizu aktuelnih dostignuća u primeni RL u protokolima rutiranja za dinamičke bežične *ad hoc* mreže. Neophodno je što šire obuhvatiti primene RL u dinamičkim *ad hoc* mrežama, uključujući kako VANET, tako i *ad hoc* mreže za letelice (*Flying Ad hoc Networks*, FANETs) koje postaju sve prisutnije i u naučnoj literaturi i u praksi. Posebno je začajno sagledati sve različite tipove RL koji se često koriste u literaturi, kao što su QL, DRL, duelno duboko učenje potkrepljivanjem (*Dueling Deep Reinforcement Learning*, DDRL) (D. Zhang, Yu i ostali, 2019), RL baziran na modelu okruženja (*Model-Based RL*, MBRL) (Jafarzadeh i ostali, 2020) i SARSA algoritam (Bi i ostali, 2020). Takođe, treba uzeti u obzir i druge tehnike koje se eventualno koriste u protokolima (u kombinaciji sa RL) kao što su na primer softverski definisane mreže (*Software-Defined Networking*, SDN) (D. Zhang i ostali, 2020; D. Zhang, Yu i ostali, 2019), *blockchain* (D. Zhang, Yu i ostali, 2019), fazi logika (An i ostali, 2018; Jafarzadeh i ostali, 2020; Jafarzadeh i ostali, 2022; Jiang i ostali, 2021; C. Wu i ostali, 2018; Yang i ostali, 2020; W. Zhang i ostali, 2021), itd. Nakon toga, na osnovu uočenih prednosti i nedostataka aktuelnih istraživanja cilj je razviti novi protokol rutiranja za VANET mreže baziran na RL. Novi protokol treba da, uzimanjem u obzir relevantnih uticajnih faktora, unapredi mrežne performanse u poređenju sa ranijim protokolima rutiranja. Neke od najvažnijih mrežnih performansi koje treba unaprediti su procenat izgubljenih paketa (*Packet Loss Ratio*, PLR), ostvareni aplikacioni protok (*application throughput*), kašnjenje paketa s kraja na kraj mreže (*End-to-End Delay*, E2ED) i džiter (*jitter*). Protokole je moguće uporediti u nekom od mrežnih simulatora, a u ovom istraživanju će biti korišćen *Network Simulator 3* (NS-3) koji predstavlja jedan od najpoznatijih mrežnih simulatora otvorenog koda. Zato je najpre neohodno implementirati odgovarajuće protokole rutiranja u simulaciono okruženje, zatim izvršiti intenzivne simulacije i na kraju prikupiti i adekvatno obraditi rezultate simulacija. Na osnovu ovih rezultata moguće je izvršiti analizu i poređenje ostvarenih mrežnih performansi u slučaju primene odabranih postojećih i novog protokola rutiranja. Dakle, osnovni cilj moguće je razložiti na više naučnih podciljeva:

- Izvršiti detaljnu komparativnu analizu aktuelnih protokola rutiranja za VANET i FANET mreže baziranih na RL, sa posebnim osvrtom na tip RL koji se koristi i korišćenje drugih tehnika u procesu rutiranja;

- Razvoj novog protokola rutiranja za VANET mreže na bazi RL, koji bi doprineo unapređenju najznačajnijih mrežnih performansi;
- Implementacija novog i odgovarajućih postojećih protokola baziranih na RL u NS-3 simulaciono okruženje;
- Sprovođenje intenzivnih simulacija sa ciljem testiranja novog i postojećih protokola;
- Statistička obrada i analiza rezultata simulacija;
- Donošenje adekvatnih zaključaka i davanje predloga za dalja istraživanja.

Kao osnovna literatura koristiće se obiman skup naučno-stručnih radova, od kojih se izdvajaju:

- An C., Wu C., Yoshinaga T., Chen X., Ji Y. (2018). A context-aware edge-based VANET communication scheme for ITS. *Sensors*, 18(7). <https://doi.org/10.3390/s18072022>
- Ahmed U, Lin J., Srivastava G. (2021). Privacy-preserving deep reinforcement learning in vehicle ad hoc networks. *IEEE Consumer Electronics Magazine*, 11(6), pp. 41-48. <https://doi.org/10.1109/MCE.2021.3088408>
- Bi X., Gao D., Yang M. (2020). A reinforcement learning-based routing protocol for clustered EV-VANET. In *Proceedings of the 2020 IEEE 5th Information Technology and Mechatronics Engineering Conference (ITOEC)*, Chongqing, China, June 12-14., pp. 1769–1773. <https://doi.org/10.1109/ITOEC49072.2020.9141805>
- De Assis D., Wille E., Alves J. (2023). New results on the IC_AOMDV protocol for vehicular ad hoc networks in urban areas. *Advances in Electrical & Computer Engineering*, 23(3), pp. 21-28. <https://doi.org/10.4316/AECE.2023.03003>
- Jafarzadeh O., Dehghan M., Sargolzaey H., Esnaashari M. (2020). A novel protocol for routing in vehicular ad hoc network based on model-based reinforcement learning and fuzzy logic. *International Journal of Information and Communication Technology Research*, 12(4), pp. 10-25. https://ijict.itrc.ac.ir/files/site1/user_files_a81e2a/omidjkh-A-10-4359-1-54d986a.pdf
- Jafarzadeh O., Dehghan M., Sargolzaey H., Esnaashari M. (2022). A model based reinforcement learning protocol for routing in vehicular ad hoc network. *Wireless Personal Communications*, 123(1), pp. 975–1001. <https://doi.org/10.1007/s11277-021-09166-9>
- Jiang S., Huang Z., Ji Y. (2021). Adaptive UAV-assisted geographic routing with Q-learning in VANET. *IEEE Communications Letters*, 25(4), pp. 1358-1362. <https://doi.org/10.1109/LCOMM.2020.3048250>
- Jiang Y., Zhu J., Yang K. (2023). Environment-aware adaptive reinforcement learning-based routing for vehicular ad hoc networks. *Sensors*, 24(1), pp. 40-70. <https://doi.org/10.3390/s24010040>
- Li F., Song X., Chen H., Li X., Wang Y. (2019). Hierarchical routing for vehicular ad hoc networks via reinforcement learning. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 68(2), pp. 1852-1865. <https://doi.org/10.1109/TVT.2018.2887282>
- Liu B., Xu G., Xu G., Wang C., Zuo P. (2023). Deep reinforcement learning-based intelligent security forwarding strategy for VANET. *Sensors*, 23(3), pp. 1204-1218. <https://doi.org/10.3390/s23031204>

- Luo L., Sheng L., Yu H., Sun G. (2022). Intersection-based V2X routing via reinforcement learning in vehicular ad hoc networks. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 23(6), pp. 5446-5459. <https://doi.org/10.1109/TITS.2021.3053958>
- Malnar M., Jevtic N. (2022). An improvement of AODV protocol for the overhead reduction in scalable dynamic wireless ad hoc networks. *Wireless Networks*, 28(3), pp. 1039-1051. <https://doi.org/10.1007/s11276-022-02890-5>
- Mnih V. et al. (2015). Human level control through deep reinforcement learning. *Nature*, 518(7540), pp. 529–533. <https://doi.org/10.1038/nature14236>
- Mubarek F., Aliesawi S., Ali Alheeti K., Alfahad N. (2018). Urban-AODV: an improved AODV protocol for vehicular ad-hoc networks in urban environment. *International Journal of Engineering & Technology*, 7(4), pp. 3030-3036. <https://www.sciencepubco.com/index.php/ijet/article/view/21535/10204>
- Nazib R., Moh S. (2021). Reinforcement learning-based routing protocols for vehicular ad hoc networks: a comparative survey. *IEEE Access*, 9, pp. 27552-27587. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3058388>
- Perkins C., Belding–Royer E., Das S. (2003). Ad hoc on demand distance vector (AODV) routing. *RFC 3561, IETF*. <https://www.rfc-editor.org/rfc/rfc3561.html>
- Rezwani S., Choi W. (2021). A survey on applications of reinforcement learning in flying ad-hoc networks. *Electronics*, 10(4), pp. 449-468. <https://doi.org/10.3390/electronics10040449>
- Roh B., Han M., Ham J., Kim K. (2020). Q-LBR: Q-learning based load balancing routing for UAV-assisted VANET. *Sensors*, 20(19), pp. 5685-5703. <https://doi.org/10.3390/s20195685>
- Rui L., Yan Z., Tan Z., Gao Z., Yang Y., Chen X., Liu H. (2023). An intersection-based QoS routing for vehicular ad hoc networks with reinforcement learning. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 24(9), pp. 9068-9083. <https://doi.org/10.1109/TITS.2023.3271456>
- Saini T., Sharma S. (2020). Recent advancements, review analysis, and extensions of the AODV with the illustration of the applied concept. *Ad hoc Networks*, 103, pp. 102-148. <https://doi.org/10.1016/j.adhoc.2020.102148>
- Saravanan M., Ganeshkumar P. (2020). Routing using reinforcement learning in vehicular ad hoc networks. *Computational Intelligence*, 36(2), pp. 682–697. <https://doi.org/10.1111/coin.12261>
- Sarker O., Shen H., Babar M. (2023). Reinforcement learning based neighbour selection for VANET with adaptive trust management. In *Proceedings of the 2023 IEEE 22nd International Conference on Trust, Security and Privacy in Computing and Communications (TrustCom)*, Exeter, United Kingdom, November 1-3., pp. 585-594. <https://doi.org/10.1109/TrustCom60117.2023.00091>
- Sutton R., Barto A. (2018). *Reinforcement learning: An introduction, second edition*. Cambridge, Massachusetts: MIT Press.
- Wang Z., Schaul T., Hessel M., Hasselt H., Lanctot M., Freitas N. (2016). Dueling network architectures for deep reinforcement learning. In *Proceedings of the 33rd International*

- conference on machine learning*, New York, NY, USA, June 20-22., pp. 1995-2003.
<https://proceedings.mlr.press/v48/wangf16.pdf>
- Wu C., Kumekawa K., Kato T. (2010). Distributed reinforcement learning approach for vehicular ad hoc networks. *IEICE Transactions on Communications*, 93(6), pp. 1431-1442. <https://doi.org/10.1587/transcom.E93.B.1431>
- Wu C., Yoshinaga T., Ji Y., Zhang Y. (2018). Computational intelligence inspired data delivery for vehicle-to-roadside communications. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 67(12), pp. 12038-12048. <https://doi.org/10.1109/TVT.2018.2871606>
- Wu J., Fang M., Li H., Li X. (2020). RSU-assisted traffic-aware routing based on reinforcement learning for urban VANETs. *IEEE Access*, 8, pp. 5733-5748.
<https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.2963850>
- Wu J., Fang M., Li X. (2018). Reinforcement learning based mobility adaptive routing for vehicular ad-hoc networks. *Wireless Personal Communications*, 101(4), pp. 2143-2171.
<https://doi.org/10.1007/s11277-018-5809-z>
- Yang Q., Jang S., Yoo S. (2020). Q-learning-based fuzzy logic for multi-objective routing algorithm in flying ad hoc networks. *Wireless Personal Communications*, 113(1), pp. 115-138. <https://doi.org/10.1007/s11277-020-07181-w>
- Yang Q., Yoo S. (2024). Hierarchical reinforcement learning-based routing algorithm with grouped RSU in urban VANETs. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems (Early Access)*, pp. 1-16. <https://doi.org/10.1109/TITS.2024.3353258>
- Ye S., Xu L., Li X. (2021). Vehicle-mounted self-organizing network routing algorithm based on deep reinforcement learning. *Wireless Communications and Mobile Computing*, 2021, pp. 1-9. <https://doi.org/10.1155/2021/9934585>
- Zhang D., Yu R., Yang R. (2019). Blockchain-based distributed software-defined vehicular networks: A dueling deep Q-learning approach. *IEEE Transactions on Cognitive Communications and Networking*, 5(4), pp. 1086–1100.
<https://doi.org/10.1109/TCCN.2019.2944399>
- Zhang D., Yu R., Yang R., Zhu L. (2020). Software-defined vehicular networks with trust management: A deep reinforcement learning approach. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 23(2), pp. 1400-1414.
<https://doi.org/10.1109/TITS.2020.3025684>
- Zhang D., Zhang T., Liu X. (2019). Novel self-adaptive routing service algorithm for application in VANET. *Applied Intelligence*, 49(5), pp. 1866-1879. <https://doi.org/10.1007/s10489-018-1368-y>
- Zhang W., Yang X., Song Q., Zhao L. (2021). V2V routing in VANET based on fuzzy logic and reinforcement learning. *International Journal of Computers, Communications & Control*, 16(1), pp 1-19. <https://doi.org/10.15837/ijccc.2021.1.4123>

3. POLAZNE HIPOTEZE

Na osnovu iznetih predmeta i ciljeva istraživanja proističe osnovna **polazna hipoteza** da performanse VANET mreža značajno zavise od protokola rutiranja koji se koristi za određivanje

optimalne putanje za slanje paketa podataka od izvorišnog do odredišnog čvora. Protokol treba da isprati dinamičku prirodu VANET mreža i da se prilagodi stalnim promenama u mrežnoj topologiji. Tradicionalni protokoli rutiranja nisu na adekvatan način ispunili ovaj zahtev, tako da je neophodno razviti nove modele koji prate promene u mrežnom okruženju i uzimaju ih u obzir pri izboru optimalne putanje. Iz ove osnovne hipoteze proizilaze sledeće **pomoćne hipoteze**:

Hipoteza 1. Moguće je unaprediti proces rutiranja u dinamičkim bežičnim *ad hoc* mrežama korišćenjem RL. RL omogućava stalno praćenje promena u mrežnom okruženju, kroz interakciju agenta učenja sa okruženjem, pa samim tim i prilagođavanje protokola rutiranja ovim promenama. Na ovaj način se mogu postići značajno bolje mrežne performanse u poređenju sa tradicionalnim protokolima rutiranja.

Hipoteza 2. Odabirom relevantnih uticajnih faktora za RL proces, moguće je značajno poboljšati mrežne performanse u dinamičkim bežičnim *ad hoc* mrežama. Ovo se prvenstveno odnosi na procenat izgubljenih paketa, ostvareni aplikacioni protok, kašnjenje paketa i džiter.

Hipoteza 3. Simulaciona analiza predstavlja verodostojan i ekonomičan način za testiranje primene protokola rutiranja u VANET mrežama.

Hipoteza 4. NS-3 simulator predstavlja jedan od najpouzdanijih i najčešće primenjivanih simulacionih alata za testiranje ranije publikovanih protokola rutiranja.

4. NAUČNE METODE KOJE ĆE BITI KORIŠĆENE

Najpre će biti prikupljeni, obrađeni i sistematski klasifikovani svi aktuelni protokoli rutiranja za dinamičke bežične *ad hoc* mreže bazirani na učenju potkrepljivanjem. Uoprednom analizom postojećih protokola rutiranja, uočiće se njihovi ključni nedostaci i ograničenja koji dovode do loših mrežnih performansi poput povećanog gubitka paketa, malog protoka, velikog kašnjenja i slično. Zatim će biti razvijen novi protokol rutiranja za VANET mreže, baziran na RL tehnici.

Predloženi protokol rutiranja treba da otkloni uočene nedostatke i ograničenja postojećih protokola i poboljša sveukupne mrežne performanse. Za predloženi protokol rutiranja biće kreiran adekvatan softverski model u NS-3 mrežnom simulatoru, savremenom i često korišćenom alatu za analizu performansi mrežnih protokola. Evaluacija performansi implementiranog protokola rutiranja za VANET mreže zahteva i generisanje realističnih modela kretanja vozila. Za generisanje modela mobilnosti vozila u simulacijama biće korišćen SUMO (*Simulation of Urban MObility*) simulator. Nakon implementacije predloženog protokola, kao i nekoliko postojećih protokola rutiranja u NS-3 simulatoru, biće izvršena njihova komparativna analiza u više adekvatnih simulacionih scenarija koji su pogodni za urbane saobraćajne uslove. Statistička obrada rezultata simulacija, procena vrednosti parametara mrežnih performansi i njihova komparativna analiza biće izvršeni u programu *Microsoft Excel*.

5. OČEKIVANI REZULTATI I NAUČNI DOPRINOS

Očekivani rezultati disertacije vezuju se, pre svega, za ispunjenje postavljenih ciljeva istraživanja i potvrdu postavljenih hipoteza. Kao najvažniji rezultati i **naučni doprinosi** predloženih istraživanja u okviru doktorske disertacije mogu se izdvojiti:

1. Sveobuhvatan pregled i analiza aktuelnih istraživanja u oblasti primene RL tehnike za unapređenje protokola rutiranja u dinamičkim bežičnim *ad hoc* mrežama;
2. Klasifikacija i komparativna analiza aktuelnih protokola baziranih na RL za dinamičke bežične *ad hoc* mreže, sa posebnim osvrtom na tip mreže, tip RL koji se koristi i primenu drugih tehnika u protokolima;
3. Razvoj novog protokola rutiranja za VANET mreže, koji bi uzimanjem u obzir relevantnih mrežnih parametara kroz RL proces unapredio ukupne mrežne performanse;
4. Implementacija novog protokola rutiranja i relevantnih postojećih protokola sa kojima bi novi protokol bio upoređen u NS-3 simulacionom okruženju;
5. Simulaciona analiza i evaluacija najvažnijih mrežnih performansi u slučaju primene novog i ranijih protokola rutiranja u VANET okruženju;
6. Statistička obrada i komparativna analiza rezultata simulacija.

Najpre se očekuje da će sistematičan pregled aktuelnih istraživanja doprineti boljem sagledavanju dosadašnje primene RL u protokolima rutiranja za dinamičke bežične *ad hoc* mreže i omogućiti dobar izbor pravca daljeg razvoja ovih protokola. Očekuje se zatim da će novi protokol rutiranja unaprediti mrežne performanse u VANET mrežama u pogledu većeg ostvarenog aplikacionog protoka, kao i manjeg procenta izgubljenih paketa, kašnjenja paketa i džitera. Protokol bi trebalo da unapredi mrežne performanse za različite veličine mreža, promenljiv broj čvorova i varijabilnu brzinu kretanja čvorova u mreži, što bi potvrdilo da može da unapredi performanse različitih realnih VANET mreža.

6. PLAN ISTRAŽIVANJA I STRUKTURA RADA

U skladu sa definisanim predmetom i ciljevima istraživanja i očekivanim rezultatima, predlažu se sledeće *faze istraživanja*:

Faza 1. Pregled aktuelne literature iz oblasti primene RL u protokolima rutiranja za dinamičke bežične *ad hoc* mreže.

Faza 2. Klasifikacija i komparativna analiza aktuelnih protokola baziranih na RL za dinamičke bežične *ad hoc* mreže, na osnovu tipa mreže, tipa RL koji se primenjuje i eventualne primene drugih tehnika u protokolima.

Faza 3. Izbor adekvatnih protokola za kasnije poređenje sa predloženim novim protokolom rutiranja.

Faza 4. Izbor odgovarajućeg simulacionog okruženja i implementacija protokola rutiranja iz faze 3 u odabrano simulaciono okruženje.

Faza 5. Razvoj novog protokola baziranog na RL za VANET mreže. Novi protokol treba pri izboru optimalne putanje da uzme u obzir relevantne mrežne performanse VANET mreža.

Faza 6. Implementacija novog protokola u simulaciono okruženje.

Faza 7. Generisanje simulacionih scenarija i sprovođenje intenzivnih simulacija sa ciljem poređenja mrežnih performansi u slučaju primene odabranih postojećih i novog protokola rutiranja.

Faza 8. Statistička obrada i analiza rezultata simulacija, sumiranje zaključnih razmatranja na osnovu dobijenih rezultata. Isticanje prednosti novog modela u odnosu na postojeće. Isticanje naučnih i praktičnih doprinosa istraživanja. Definisane pravaca budućeg istraživanja.

7. OKVIRNI SADRŽAJ DOKTORSKE DISERTACIJE

U skladu sa iznesenom motivacijom, predmetom i naučnim ciljevima istraživanja, predlaže se sledeći *okvirni sadržaj* disertacije:

1. Uvodna razmatranja – Motivacija, predmet i ciljevi disertacije, značaj i perspektiva primene izabrane teme, struktura disertacije.
2. Rutiranje u dinamičkim bežičnim *ad hoc* mrežama – Opis dinamičkih bežičnih *ad hoc* mreža i pojašnjenje tradicionalnog pristupa problemu rutiranja paketa podataka u ovim mrežama.
3. Primena mašinskog učenja u protokolima rutiranja za dinamičke bežične *ad hoc* mreže – Definisane osnovnih tipova mašinskog učenja i izbor RL kao primarnog tipa učenja za ovu primenu, opis principa funkcionisanja i najznačajnijih tipova RL, kao i načina njihove primene u optimizaciji protokola rutiranja za dinamičke bežične *ad hoc* mreže.
4. Klasifikacija protokola rutiranja za dinamičke bežične *ad hoc* mreže baziranih na učenju potkrepljivanjem – Pregled aktuelnih RL baziranih protokola rutiranja za dinamičke bežične *ad hoc* mreže, njihova klasifikacija i komparativna analiza.
5. Predlog novog RL baziranog protokola rutiranja za VANET mreže – Opis novog protokola rutiranja za VANET mreže koji ima za cilj da primenom učenja potkrepljivanjem unapredi osnovne mrežne performanse u VANET mrežama, kroz uključivanje relevantnih uticajnih faktora za ovaj tip mreža.
6. Simulaciono okruženje za testiranje protokola – Opis NS-3 simulacionog okruženja u kom će biti sprovedena simulaciona analiza i poređenje novog i aktuelnih protokola rutiranja za VANET mreže baziranih na RL.
7. Simulaciona analiza – Opis simulacionih parametara i scenarija u kojima su testirani protokoli rutiranja. Predstavljanje i poređenje simulacionih rezultata primene novog i ranijih protokola rutiranja za VANET mreže baziranih na RL. Protokoli bi bili upoređeni na osnovu važnih mrežnih performansi kao što su procenat izgubljenih paketa, ostvareni aplikacioni protok, kašnjenje paketa podataka i džiter.
8. Zaključna razmatranja – Sumiranje rezultata disertacije, praktičnih i naučnih doprinosa i definisanje daljih mogućnosti razvoja oblasti primene RL za rutiranje paketa u dinamičkim bežičnim *ad hoc* mrežama.

8. ZAKLJUČAK I PREDLOG

Na osnovu uvida u prijavu teme doktorske disertacije, kao i na osnovu uspešno odbranjenog predloga istraživanja u okviru doktorske disertacije, Komisija zaključuje da je tema koju

predlaže kandidat Pavle Bugarčić, u naučnom i stručnom smislu vrlo značajna i aktuelna i da pruža mogućnosti za ostvarivanje naučnih doprinosa koji su navedeni i obrazloženi u prijavi.

Tema doktorske disertacije je naučno zasnovana i pripada oblasti Tehničko-tehnoloških nauka, područje „Saobraćajno inženjerstvo”, užoj naučnoj oblasti „Eksploatacija telekomunikacionog saobraćaja i mreža” za koju je matičan Univerzitet u Beogradu – Saobraćajni fakultet.

Uvidom u dosadašnji uspešan naučni i stručni rad i reference kandidata, Komisija smatra da kandidat Pavle Bugarčić, master inženjer saobraćaja, ispunjava formalne i suštinske uslove za prijavu doktorske disertacije. Kandidat je potpuno osposobljen i kompetentan da pristupi obradi predložene teme doktorske disertacije.

Na osnovu svega napred izloženog imenovana Komisija predlaže Nastavno-naučnom veću Univerziteta u Beogradu – Saobraćajnog fakulteta, da prihvati predloženu temu i kandidatu Pavlu Bugarčiću, master inženjeru saobraćaja, odobri izradu doktorske disertacije sa temom **„Unapređenje protokola rutiranja za dinamičke bežične *ad hoc* mreže korišćenjem mašinskog učenja“**.

U Beogradu, 5. 9. 2024. godine

ČLANOVI KOMISIJE

Prof. dr Goran Marković, redovni profesor,
Univerzitet u Beogradu – Saobraćajni
fakultet

Prof. dr Mirjana Stojanović, redovni
profesor, Univerzitet u Beogradu –
Saobraćajni fakultet

Prof. dr Nataša Nešković, redovni profesor,
Univerzitet u Beogradu – Elektrotehnički
fakultet