https://doi.org/10.37528/FTTE/9788673955223/TESi.2026.05

Upravljanje radom izolovane signalisane raskrsnice primenom metoda veštačke inteligencije[6]

Nikola Barać, ELCOM BGD doo, Beograd, nikola.barac@elcombgd.rs
Dragomir Leković, ELCOM BGD doo, Beograd, dragomir.lekovic@elcombgd.rs
Stefan Mladenović, ELCOM BGD doo, Beograd, stefan.mladenovic@elcombgd.rs
Aleksandar Jovanović, Univerzitet u Kragujevcu, Fakultet inženjerskih nauka, Kragujevac, a.jovanovic@kg.ac.rs

Rezime: Porast broja stanovnika i stepena motorizacije u gradovima doveo je do saobraćajnih zagušenja, povećanja vremena putovanja, većeg broja zaustavljanja vozila, ali i do nepovoljnijih uticaja saobraćaja na životnu sredinu. Jedan od načina da se ovi problemi ublaže jeste bolje upravljanje radom svetlosnih signala. Klasični signalni planovi često ne mogu dovoljno dobro da odgovore na neravnomernosti u saobraćajnim zahtevima. Zbog toga se poslednjih godina sve više pažnje posvećuje metodama zasnovanim na veštačkoj inteligenciji, koje mogu da koriste podatke iz saobraćajnog sistema i da na osnovu njih prilagođavaju rad signala. U ovom radu razmatra se primena fazi logike tipa 1 i Proximal Policy Optimization (PPO) algoritma sa transformer arhitekturom neuronske mreže. Njihova efikasnost ocenjena je poređenjem pokazatelja rada raskrsnice, pre svega vremenskih gubitaka i ukupnog protoka vozila na raskrsnici, kao i upoređivanjem normiranog zauzeća detektora na raskrsnici. Istraživanje se zasniva na modelu realne raskrsnice, formiranom i kalibrisanom u simulacionom alatu SUMO. Za izradu i proveru modela korišćeni su podaci prikupljeni na terenu, uključujući i podatke sa detektora. Predloženi algoritmi upravljanja implementirani su u programskom jeziku Python, uz korišćenje TraCI modula, kojim se omogućava razmena podataka između simulacionog modela i eksternog upravljačkog koda. Rezultati metoda zasnovanih na veštačkoj inteligenciji upoređeni su sa rezultatima postojećeg signalnog plana na terenu, optimizovanog fiksnog režima rada i klasičnog upravljanja zasnovanog na detektorima. Rezultati pokazuju da testirane metode veštačke inteligencije ostvaruju oko 6% - 12% veću efikasnost zavisno od scenarija saobraćajnog zahteva. Algoritam PPO sa transformer arhitekturom neuronske mreže pokazao je značajan potencijal u pogledu automatizacije procesa kreiranja načina upravljanja na signalisanim raskrsnicama.

Ključne reči: izolovana signalisana raskrsnica, veštačka inteligencija, optimizacija svetlosnih signala, simulacija

1 UVOD

Ubrzani razvoj i širenje gradova doveli su do porasta broja stanovnika i stepena motorizacije u urbanim sredinama. Ovakav trend rasta stvara značajne probleme na saobraćajnim mrežama gradova. Saobraćajna zagušenja, povećanje vremena putovanja i

[6] CC-BY licenca

povećane emisije štetnih gasova najizraženije su na raskrsnicama. U cilju rešavanja navedenih problema, pristupa se upravljanju svetlosnim signalima na raskrsnicama.

Osnovni način upravljanja svetlosnim signalima predstavlja fiksni režim rada, koji podrazumeva fiksnu raspodelu zelenog vremena po tokovima, nezavisno od saobraćajnog zahteva u datom trenutku. Ovakav način upravljanja optimizuje se na osnovu istorijskih vrednosti protoka na raskrsnici, međutim nailazak vozila je po prirodi slučajan događaj zbog čega optimizovani fiksni signalni planovi ne uspevaju u potpunosti da odgovore na stohastički saobraćajni zahtev na raskrsnicama.

Razvoj tehnike doprineo je sve većoj primeni detektorskih uređaja, koji omogućavaju pristup informacijama o saobraćajnom toku na raskrsnicama u realnom vremenu. Poznavanje vrednosti parametara saobraćajnog toka u svakom trenutku otvorilo je mogućnost upravljanja raskrsnicama u realnom vremenu. U tu svrhu razvijen je veliki broj algoritama, sa namerom da upravljanje saobraćajem prilagode saobraćajnom zahtevu u cilju maksimiziranja efikasnosti raskrsnice.

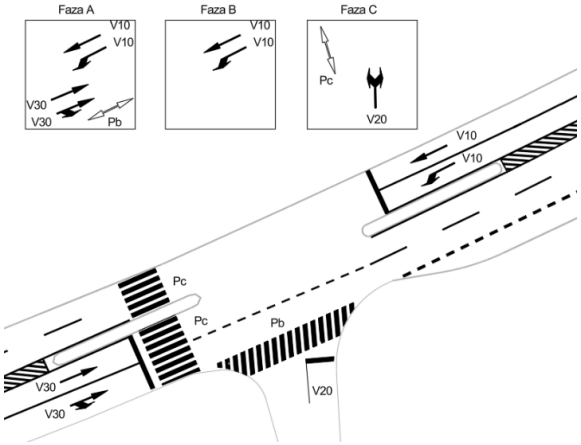
U stručnoj literaturi postoji značajan broj radova na temu upravljanja saobraćajem korišćenjem metoda veštačke inteligencije [1, 2, 3, 4]. Pokazano je da se njihovom primenom može ostvariti veća efikasnost raskrsnice u odnosu na fiksni način upravljanja i klasično upravljanje zasnovano na detektorima.

Cilj ovog rada bio je da se ispita efikasnost odabranih metoda veštačke inteligencije u upravljanju saobraćajem i mogućnost njihove primene na realnoj signalisanoj raskrsnici. Akcenat rada jeste na praktičnoj primeni metoda, zbog čega su odabrani algoritmi kreirani tako da zadovolje ograničenja uređaja koji se implementiraju na terenu. Takođe, u tu svrhu korišćeni su detaljni podaci o karakteristikama raskrsnice, kao i realni podaci o saobraćajnom zahtevu.

2 OPIS PROBLEMA

Predmetna raskrsnica ima tri kraka i nalazi se u Kragujevcu (

Slika 1). Tokovi na raskrsnici se opslužuju u tri faze: u prvoj fazi opslužuju se vozačke signalne grupe V10 i V30 sa uslovno kompatibilnom pešačkom signalnom grupom Pb, nakon čega se samostalno opslužuje vozačka signalna grupa V10, dok se u trećoj fazi opslužuje vozačka signalna grupa V20 sa uslovno kompatibilnom pešačkom signalnom grupom Pc. U slučajevima upravljanja u realnom vremenu treća faza se može opsluživati bez pešačkih tokova u slučaju da ne postoji najavna detekcija pešaka preko glavnog pravca. U slučaju opsluge bez pešaka tokovi pravo V10 se opslužuju sa uslovnim signalom za pravo.



Slika 1: Geometrija raskrsnice u Kragujevcu

3 METODE VEŠTAČKE INTELIGENCIJE

U radu su testirana dva algoritma upravljanja saobraćajem korišćenjem veštačke inteligencije: fazi logički algoritam i Proximal Policy Optimization algoritam sa transformer arhitekturom neuronske mreže. Pretpostavka je da oba algoritma koriste detekcije popunjenosti trake sa video detektora. Ulazi algoritama su vrednosti od 0 do 1 koje se dobijaju kao količnik trenutnog broja vozila u traci i maksimalnog broja vozila koji može biti detektovan u toj traci na prilazu raskrsnici.

3.1 Fazi logički algoritam

Fazi logika (eng. *Fuzzy logic*) je matematička teorija koja se bavi rezonovanjem korišćenjem nepreciznih informacija. U klasičnoj logici neki element ili pripada ili ne pripada nekom skupu (1 ili 0), dok se u fazi logici dozvoljavaju neprecizni opisi pripadnosti nekom skupu (vrednosti između 0 i 1). Ovakav pristup opisivanju promenljivih bliže odgovara načinu na koji ljudi percepiraju promenljive. Zbog toga se fazi logički sistemi koriste za donošenje odluka u oblastima gde ljudske percepcije imaju značajnu ulogu. Cilj fazi logičkih sistema je da u svakom trenutku imitira ljudski (ekspertski) način odlučivanja za potrebe automatizacije donošenja odluke.

Za potrebe upravljanja raskrsnicom u ovom radu je napravljen fazi logički sistem koji na osnovu popunjenosti traka na prilazima donosi odluku o produžavanju, odnosno prekidu određene faze u realnom vremenu. Ekspertskom procenom definisani su fazi skupovi koji opisuju šta prestavlja veoma mala, mala, srednja, velika i veoma velika popunjenost trake na prilazu. Tako bi, na primer, za neku vrednost popunjenosti trake, moglo da se kaže da pripada fazi skupovima mala i srednja sa određenim vrednostima stepena pripadnosti između 0 i 1. Takođe, kreirana su fazi pravila kojima se ugrađuje ekspertski način zaključivanja u fazi logički sistem. Fazi logički sistem sposoban je da u svakoj sekundi generiše vrednost urgentnosti da se u tom trenutku faza prekine. Ova vrednost nalazi se između 0 i 1, gde 0 predstavlja veoma malu urgentnost za promenom, a 1 veoma veliku urgentnost za promenom faze. Nakon što ekspert definiše kritičnu vrednost urgentnosti, fazi logički algoritam je sposoban da upravlja raskrsnicom u realnom vremenu.

3.2 Proximal Policy Optimization algoritam sa transformer arhitekturom neuronske mreže

Proximal Policy Optimization (PPO) algoritam spada u grupu algoritama za učenje podsticanjem (eng. *Reinforcement Learning*). Ideja iza ovih algoritama jeste da se kreira agent koji samostalno uči da donosi odluke u sistemu. Proces učenja je definisan tako da agent za dobre odluke dobija nagradu, dok za loše odluke dobija kaznu. Cilj je da agent nauči da donosi odluke tako da maksimizira nagradu, odnosno minimizuje kaznu koju dobija. Nagrada, odnosno kazna, koju agent dobija definiše se u skladu sa ciljevima specifičnog zadatka koji bi trebalo da nauči da obavlja. Za potrebe upravljanja saobraćajem u ovom radu agent je naučen da donosi odluke o produženju, odnosno prekidanju faze u realnom vremenu.

Specifično PPO algoritam zasniva se na Izvršilac-Kritičar (eng. *Actor-Critic*) konceptu, gde je uloga Izvršioca da donosi odluke, dok je uloga Kritičara da evaluira te odluke i usmeri Izvršioca ka većoj nagradi. Izvršilac i Kritičar su neuronske mreže čiji se parametri optimizuju u cilju nalaženja strategije odlučivanja koja donosi najveću nagradu. Ove dve mreže spojene su sa detekcijama popunjenosti trake preko posebne neuronske mreže sa transformer arhitekturom. Cela arhitektura se trenira u celosti tako da maksimizuje nagradu koja je u skladu sa ciljevima upravljanja saobraćajem. Agent je nagrađivan proporcionalno broju vozila koje uspe da propusti kroz raskrsnicu, dok je s druge strane kažnjavan za stvaranje vremenskih gubitaka i produžavanje zelenog vremena ukoliko ne postoji zahtev za opslugom. Potrebno je naglasiti da je za učenje približno optimalne strategije upravljanja neophodno obimno treniranje u različitim scenarijima saobraćajnog zahteva. Nakon završenog treniranja agent je sposoban da donosi odluke o produženju, odnosno prekidu faze na osnovu detekcija popunjenosti traka u realnom vremenu.

4 REZULTATI

Testiranje metoda veštačke inteligencije za upravljanje saobraćajem izvršeno je u simulacionom softveru SUMO. Evaluacija rezultata urađena je za saobraćajni zahtev u 4 karakteristična sata u toku radnog dana. Pored njih testirani su postojeći fiksni signalni program (Fix), fiksni program optimizovan u softveru LISA na osnovu saobraćajnog opterećenja sa detektora (Fix LISA) i klasičan algoritam baziran na merenju intervala sleđenja vozila (Algoritam). Postojeći program ima ciklus od 90 s sa zelenim vremenima 45 s, 7 s i 21 s po fazama (Pc 14 s), a optimizovani program ciklus od 70 s sa zelenim vremenima 22 s, 17 s i 16 s (Pc 7 s) i skraćenim zaštitnim vremenima, pri čemu V10 dobija zeleno 2 s pre V30. Klasičan algoritam radi sa minimalnim zelenim vremenima od 5–10 s i maksimalnim od 90 s: nakon isteka minimalnog zelenog faza se produžava po 1 s dok je interval sleđenja na udaljenoj petlji aktivnog pravca do 3 s (prva faza i dok nema zahteva sa V10 levo, V20 i pešaka), a treća faza se opslužuje sa ili bez Pc u zavisnosti od najavne detekcije pešaka. Za svaki scenario saobraćajnog zahteva i svaki način upravljanja rezultati efikasnosti dobijeni su kao aritmetička sredina 10 simulacija sa različitom inicijalnom vrednošću za generisanje pseudoslučajnih brojeva. Metode veštačke inteligencije rade pod istim signalnim planom kao i algoritam.

Za potrebe evaluacije pet načina upravljanja korišćeni su prosečni vremenski gubici vozila, ukupan časovni protok vozila na raskrsnici i normirano zauzeće induktivnih petlji. Poslednji parametar efikasnosti definiše se na sledeći način:

$$Occ_{norm} = \frac{\sum_{i=1}^{n} Occ_i * q_i}{\sum_{i=1}^{n} q_i} \quad (1)$$

gde su:
Occ_{norm} – normirano zauzeće,
Occ_i – zauzeće detektora i,
q_i – časovni protok na detektoru i.

Iako se radi o prekinutim saobraćajnim tokovima, normirano zauzeće je izabrano kao parametar efikasnosti jer za razliku od vremenskih gubitaka može biti utvrđeno na terenu. Na taj način moguće je pratiti ovaj parametar efikasnosti i nakon implementacije određenih načina upravljanja na terenu.

Rezultati pokazuju da su optimizacijom fiksnog signalnog programa postignuti manji prosečni vremenski gubici u odnosu na postojeće fiksne signalne programe u sva četiri scenarija. Takođe, primenom klasičnog algoritamskog rada ostvareni su manji prosečni vremenski gubici u odnosu na optimizovani fiksni signalni program u sva četiri scenarija. Implementacijom fazi logičkog algoritma ostvareni su manji prosečni vremenski gubici u odnosu na klasičan algoritamski rad. Takođe, pokazalo se da PPO transformer algoritam ostvaruje manje ili jednake prosečne vremenske gubitke u odnosu na fazi logički algoritam u tri od četiri scenarija. U satu 03-04 ovaj algoritam beleži veće vremenske gubitke od optimizovanog fiksnog signalnog programa, klasičnog algoritma i fazi logičkog algoritma, ali je u ovom scenariju zabeležio najmanje normirano zauzeće detektora.

Rezultati su takođe pokazali da postoji povezanost između prosečnih vremenskih gubitaka i normiranog zauzeća detektora, međutim ne može se uspostaviti direktna zavisnost ova dva parametra u opštem slučaju.

Tabela 2: Rezultati testiranja po scenarijima na raskrsnici u Kragujevcu

Čas	Mere efikasnosti	Fix	Fix LISA	Algoritam	Fuzzy	PPO Transformer
03-04	Prosečni vremenski gubici (s/voz)	17,4	11,0	7,7	7,2	12,4
	Ukupan protok (voz/h)	154	153	154	154	153
	Normirano zauzeće (%)	3,0	3,0	0,9	1,0	0,8
07-08	Prosečni vremenski gubici (s/voz)	28,6	23,1	20,1	18,6	17,7
	Ukupan protok (voz/h)	2049	2067	2076	2077	2079
	Normirano zauzeće (%)	28,0	31,9	24,8	22,1	21,5
16-17	Prosečni vremenski gubici (s/voz)	43,6	27,1	21,2	19,8	19,8
	Ukupan protok (voz/h)	2538	2594	2605	2608	2605
	Normirano zauzeće (%)	36,4	36,5	29,9	27,6	27,6
21-22	Prosečni vremenski gubici (s/voz)	28,0	21,6	17,9	16,7	16,4
	Ukupan protok (voz/h)	1681	1678	1672	1674	1671
	Normirano zauzeće (%)	28,3	27,3	21,2	19,9	20,3

5 ZAKLJUČAK

U radu su testirane dve metode veštačke inteligencije upravljanja saobraćajem na raskrsnici. Dobijeni rezultati pokazali su da se primenom ovih metoda prosečni vremenski gubici mogu smanjiti u rasponu od 6% do 12% u odnosu na klasičan algoritamski rad.

Poseban značaj rada zasniva se na činjenici da za razliku od ostalih načina upravljanja kreiranje PPO transformer algoritma ne zahteva aktivnu uključenost inženjera u proces optimizacije procesa upravljanja saobraćajem. Dovoljno je automatizovati proces treniranja dok agent ne nauči optimalnu strategiju upravljanja na konkretnoj raskrsnici. Mana ovakvog pristupa ogleda se u tome što se treniranje agenta vrši unutar simulacije. Ukoliko model raskrsnice nije dovoljno dobro kalibrisan u odnosu na realno stanje na terenu, može doći do značajnih odstupanja u pogledu efikasnosti.

U budućnosti bi trebalo posvetiti pažnju istraživanju metoda kalibrisanja agenta na samoj raskrsnici, kao i mogućnosti treniranja agenta korišćenjem standardnih induktivnih petlji. Takođe, trebalo bi ispitati mogućnost primene metoda u slučaju da se faze ne smenjuju ciklično, već je dozvoljeno preskakanje faza, kao i u slučaju upravljanja saobraćajem na nivou zone.

LITERATURA

[1] Jovanović, A., Kukić, K., Stevanović, A., Teodorović, D. (2022), Restricted crossing U-turn traffic control by interval Type-2 fuzzy logic, Expert Systems with Applications, 211, 118613.

[2] Zhao, R., Hu, H., Li, Y., Fan, Y., Gao, F., Gao, Z. (2024), Sequence Decision Transformer for Adaptive Traffic Signal Control, Sensors, 24(19), 6202.

[3] Huang, X., Wu, D., Boulet, B. (2026), Traffic Signal Control Using Lightweight Transformers: An Offline-to-Online RL Approach, IEEE Open Journal of Intelligent Transportation Systems, 7, 396-411.

[4] Jovanović, A., Stevanović, A., Kukić, K., Teodorović, D. (2026), Median U-Turn intersection traffic control in field-like traffic signal controllers: fuzzy logic Type 2 approach, Engineering Computations, 43(3), 1256-1280.

SUMMARY

Traffic Control of an Isolated Signalized Intersection Using Artificial Intelligence Methods

Abstract: The increase in the population and motorization rate in cities has led to traffic congestion, longer travel times, a greater number of vehicle stops, as well as more adverse effects of traffic on the environment. One way to alleviate these problems is through better traffic signal control. Traditional signal plans often cannot adequately respond to the fluctuations in traffic demand. As a result, in recent years, increasing attention has been focused on methods based on artificial intelligence, which can utilize data from the traffic system and adjust signal operations accordingly. This paper examines the application of Type 1 fuzzy logic and the Proximal Policy Optimization (PPO) algorithm with a transformer neural network architecture. Their efficiency was assessed by comparing the performance indicators of the intersection, primarily the time losses and the total volume at the intersection, as well as by comparing the normalized occupancy of the detectors at the intersection. The research is based on a model of a real intersection, developed and calibrated in the simulation tool SUMO. The model was created and verified using real-world data gathered from field detectors. The proposed control algorithms were implemented in the Python programming language, using the TraCI module, which enables data exchange between the simulation model and the external control code. The results of the methods based on artificial intelligence were compared with the results of the existing signal plan in the field, the optimized fixed operation mode, and the classical detector-based control. The results show that the tested artificial intelligence methods achieve about 6% - 12% greater efficiency depending on the traffic demand scenario. The PPO algorithm with a transformer architecture of neural networks has shown significant potential in terms of automating the process of creating control strategies at signalized intersections.

Key words: isolated signalized intersection, artificial intelligence, optimization of traffic signals, simulation