

Primena velikih jezičkih modela u upravljanju signalisanom raskrsnicom¹⁰

Jovan Grba, TTK Traffic, Beograd, jovan.grba@ttk.rs

Stamenka Stanković, Saobraćajni fakultet, Beograd, s.stankovic@sf.bg.ac.rs

Katarina Kukić, Saobraćajni fakultet, Beograd, k.kukic@sf.bg.ac.rs

Nikola Čelar, Saobraćajni fakultet, Beograd, n.celar@sf.bg.ac.rs

Ana Uzelac, Saobraćajni fakultet, Beograd, ana.uzelac@sf.bg.ac.rs

Rezime: U ovom radu razvijen je model upravljanja svetlosnim signalima u realnom vremenu, zasnovan na analizi parametara kritičnog broja vozila na prilazu raskrsnici (OC) u simulacionom okruženju PTV Vissim. Rad obuhvata dve faze istraživanja: prva, u kojoj se upravljanje vrši klasičnim VAP kontrolerom bez primene veštačke inteligencije. Druga faza, u kojoj se proces odlučivanja nadograđuje upotrebom velikih jezičkih modela (Large Language Model).

U osnovnom modelu, upravljanje signalnim grupama vrši se na osnovu unapred definisanih graničnih vrednosti za kritičan broj vozila na prilazima raskrsnici (OC). U proširenom modelu, veliki jezički model funkcioniše kao agent koji na svakih 600 sekundi analizira rezultate simulacije i određuje nove vrednosti OC parametara, sa ciljem optimizacije procesa pražnjenja reda na raskrsnici.

Kao rezultat analize pored se parametri efikasnosti rada svetlosnih signala, odnosno pored se vremenski gubici za svaki od primenjenih načina upravljanja. Poređenjem vremenskih gubitaka zaključilo se da upotreba LLM modela, sa logikom koja je prikazana u radu, nije opravdana.

Ključne reči: Svetlosni signali, Upravljanje saobraćajem u realnom vremenu, Raskrsnice, Simulacija.

1 UVODNA RAZMATRANJA

Saobraćajni problemi sa kojima se susreću stanovnici urbanih sredina predstavljaju jedan od glavnih nedostataka kada je reč o kvalitetu života u gradskim sredinama. Usled velikih zahteva učesnika u saobraćaju koji ne mogu da se zadovolje sa postojećim kapacitetima pribegava se tehnikama koje pokušavaju da upravljaju saobraćajnim zahtevima i na taj način optimalnije koriste postojeće kapacitete. Mesta koja predstavljaju kritične tačke koje korisnici koriste pri svom svakodnevnom kretanju su svakako raskrsnice. Usled velikog broja učesnika i tokova koji se susreću, a ujedno i razlikuju prema načinu korišćenja saobraćajne infrastrukture, neophodno je svakom omogućiti efikasan i bezbedan način prolaska kroz raskrsnicu. Postavljanje svetlosne saobraćajne signalizacije na mestima ukrštanja saobraćajnih tokova već dugi niz godina predstavlja jedno od najrasprostranjenijih rešenja koje se implementira sa ciljem optimizacije saobraćajnog procesa. Usled napretka tehnologije prikupljanja podataka i

¹⁰ CC-BY licenca

njihove obrade razvili su se sistemi koji pružaju savremeniji i napredniji način upravljanja signalisanim raskrsnicama, konkretno u ovom radu koriste se veliki jezički modeli u upravljanju i njihov način upravljanja poredi se sa sistemom baziranim na pravilima.

Kako je primena veštačke inteligencije aktuelna tema u različitim oblastima tako je našla primenu i u saobraćajnom inženjstvu. Jedna od oblasti gde se analizira primena veštačke inteligencije, jeste njena integracija u sisteme autonomnih vozila. Neka istraživanja su pokazala da je moguće pomoću LLM-a preneti preferencije vozača, odnosno putnika o načinu na koji autonomno vozilo treba da se kreće, da ono vozi kako vozač želi[1]. Takođe je testirana njegova primena u prepoznavanju saobraćajnih situacija na putu, gde se LLM navodi da donosi odluke i ponaša se kako bi čovek reagovao u datim okolnostima, gde se došlo do zaključka da bi mogao da ima značajan uticaj na povećanje bezbednosti i efikasnosti saobraćaja [2].

Kada je reč o testiranju modela upravljanja signalisanim raskrsnicama testirani su različiti modeli kao i različiti scenariji upravljanja, da bi se došlo do zaključka o mogućnostima LLM-a. Kako postoji više modela, pretpostavka da nisu svi podjednako efikasni u zavisnosti od oblasti primene, navela je istraživače da testiraju kako različiti modeli donose odluke i kakav uticaj te odluke imaju na performanse sistema. Zaključeno je da model GPT 4.0 daje najbolje rezultate od testiranih [3].

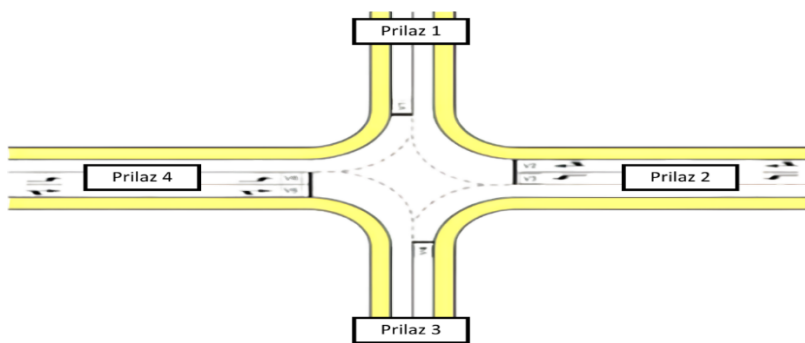
Takođe su sprovedena testiranja u složenijim situacijama kada postoje vanredne okolnosti, nailazak vozila kojima se daje prvenstvo prolaza i slične situacije gde je potrebno da se LLM prilagodi novim okolnostima. Zaključak da LLM može razumno upravljati signalisanom raskrsnicom uz obrazloženje donetih odluka [4].

2 METODOLOGIJA ISTRAŽIVANJA

U ovom delu rada biće predstavljena metodologija sprovedenog istraživanja. Koraci koji su pratili istraživanje: odabir predmeta (lokacije) istraživanja, sredstvo istraživanja, definisanje ulaznih parametara, tehnologija detekcije vozila na raskrsnici, odabir načina upravljanja raskrsnicom, i metoda analize i poređenja različitih načina upravljanja.

2.1 Saobraćajne karakteristike hipotetičke raskrsnice

Predmet istraživanja je model hipotetičke izolovane četvorokrake raskrsnice na kojoj će se porediti parametri efikasnosti rada svetlosnih signala za dva načina upravljanja. Nailazak vozila na izolovanu raskrsnicu je slučajan.



Slika 1: Prikaz hipotetičke raskrsnice

Na raskrsnici nema pešaka, biciklista, parkiranja i stajališta javnog gradskog prevoza. Definisan je pun režim saobraćaja što znači da ne postoje ograničenja. Sve trake raskrsnice su širine 3 metra, radijusi desnih i levih skretanja su 12 metara. Na slici 1. je prikazan formiran model hipotetičke raskrsnice.

2.2 Ulazni podaci

Kada je reč o ulaznim podacima treba definisati vremenski period u kojem se sprovodi istraživanje kao i podatke o saobraćajnom opterećenju u periodu istraživanja. Istraživanje se sprovodi simulacijom opterećenja raskrsnice u trajanju od 3 sata. Vrednosti protoka se menjaju na časovnom nivou, što je prikazano Tabelom 1. U prvom satu su zadate početne vrednosti koje predstavljaju nezasićeno stanje. Nakon prvog sata protoci se uvećavaju za 20%, kako bi se testiralo funkcionisanje raskrsnice pri većim protocima. Treći sat predstavlja stanje u kojem su protoci na prilazima najmanji osim sporednog prilaza 1 koji ima najveće vrednosti protoka u 3 satu. Na ovaj način se testira uticaj povećanja broja zahteva na sporednom prilazu. Raspodela tokova po smerovima kretanja se menja na nivou od 15 minuta. Kada je reč o strukturi toka na hipotetičkoj raskrsnici njega čine samo putnički automobili, čime su uspostavljeni praktično idealni uslovi.

Tabela 1: Saobraćajno opterećenje raskrsnice za svaki sat simulacije

Prilaz	Sat Simulacije		
	1. sat	2. sat	3. sat
1	200	240	350
2	700	840	595
3	250	300	213
4	600	720	510

2.3 Sredstvo istraživanja

Kada je reč o poređenju različitih sistema upravljanja u realnom vremenu obično se koriste mikro simulacioni modeli što je slučaj i u ovom radu. Istraživanje je sprovedeno u PTV Vissim softveru koji pruža mogućnost modelovanja, simulacije i analize saobraćajnih rešenja. Takođe, razvoj rešenja realizovan je u okruženju PyCharm 2025.2.0.1, uz korišćenje COM interfejsa za rad sa softverom PTV Vissim i LLM modela Gemini 2.5 Flash . Parametar koji je korišćen za poređenje efikasnosti upravljanja dva sistema su prosečni vremenski gubici po vozilu.

2.4 Tehnologija detekcije vozila na raskrsnici

Prethodno je rečeno da se raskrsnicom upravlja u realnom vremenu, za njeno upravljanje je neophodno posedovati podatke o zahtevima u realnom vremenu. Tehnologija koja se koristi za detekciju vozila na raskrsnici je video tehnologija koja daje evidenciju o broju vozila na prilazima raskrsnici na nivou jedne sekunde. Vozila se broje na prilazima raskrsnici na dužini od 100 metara.

2.5 Odabir načina upravljanja raskrsnicom

U radu su odabrana dva načina upravljanja. Prvi koji predstavlja sistem upravljanja baziran na pravilima. U današnjoj praksi u ovakvim sistemima se najčešće koristi interval sleđenja između vozila (t_h) kao parametar koji vrednuje intenzitet pražnjenja reda na

prilazima signalisanoj raskrsnici. Kako je t_h parametar mikroskopski, ideja rada je da se on zameni sa jednim makroskopskim pokazateljom koji opisuje stanje u kojem se nalazi saobraćajni tok. Usled razvoja video tehnologije i mogućnosti detektovanja vozila na odseku nekog puta, izabran je parametar najbližiji gustini saobraćajnog toka koji ima zadatak u zavisnosti od postavljene kritične vrednosti parametra da vrednuje intenzitet pražnjenja reda vozila na prilazu. Parametar je definisan kao broj vozila na dužini od 100 metara prilaza raskrsnici, ukoliko je broj vozila manji ili jednak kritičnoj vrednosti parametra znači da se red ne prazni željenim intenzitetom i da treba da se pređe u drugu fazu. Situacija kada je broj vozila veći od kritične vrednosti znači da se prilaz prazni željenim intenzitetom i da treba da se ostane u fazi. Prethodno opisan parametar u radu se naziva uniforman kritičan broj vozila na prilazu (OC- Occupation).. Algoritam upravljanja svetlosnim signalima zasnovan na pravilima kreiran je u „VisVAP-u“. Parametar OC se testira za vrednosti od 1 do 10 vozila na 100 metara. Analizom parametara efikasnosti rada svetlosnih signala primenom svake od vrednosti parametra OC, vrednuje se njegov uticaj na rad svetlosnih signala kako bi se identifikovala optimalna vrednost parametra OC.

Drugi način upravljanja koristi logiku modela zasnovanog na pravilima i potpomaže se upotrebom LLM modela. U skorijem istraživanju primene LLM u upravljanju signalisanim raskrsnicom gde se koristio LLM actor-critic algoritam, analizom primenjenog modela je zaključeno da se ostvaruju veće uštede primenom LLM-a nego upotrebom drugih modela upravljanja. Kako u navedenom istraživanju su se koristili actor i critic algoritmi, a u ovom istraživanju samo actor ukratko će se objasniti razlike između njih. Actor ima zadatak da na osnovu trenutnih okolnosti (situacije) donese odluku, odnosno određenu akciju koja bi trebalo da bude definisana određenim skupom akcija (npr. U zavisnosti od situacije produži zeleno za 1, 2, 3, 4 ili 5 sekundi ili pređi u narednu fazu). Kritik ima zadatak da analizira donesenu odluku actor-a na osnovu čega nagrađuje actora prema kvalitetu donesene odluke. Nagrade se zapisuju u bazu podataka prema okolnostima u kojima je donesena odluka. Kasnije actor koristi bazu podataka kao bazu iskustava prema kojima donosi odluke u budućnosti [5].

U ovom radu se koristi samo actor LLM model zbog čega je jednostavniji što možda i predstavlja jedan od razloga zbog čega su rezultati lošiji. LLM model koji je korišćen u istraživanju je „Gemini 2.5 flash“. LLM na svakih 600 sekundi simulacije donosi nove vrednosti parametra OC za svaku fazu, u ovom slučaju parametar nije uniforman.

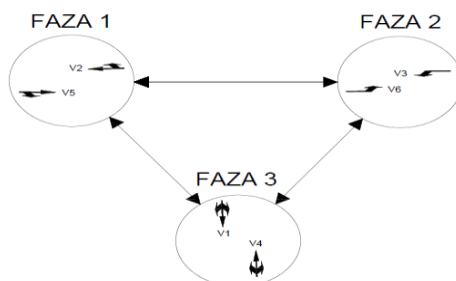
3 OPTIMIZACIJA RADA SVETLOSNIH SIGNALA

3.1 Model upravljanja svetlosnim signalima zasnovan na pravilima

Ideja izrade algoritma se ne zasniva na tradicionalnim načinima optimizacije rada na raskrsnici u realnom vremenu. Parametri kao što su minimalno i maksimalno zeleno vreme ne predstavljaju izlaz iz nekog od modela optimizacije svetlosnog signala, već su ove vrednosti u direktnoj sprezi sa brojem vozila koji se nalazi u jednom trenutku na raskrsnici.

Raskrsnicom se upravlja u tri faze (Slika 2.), pri čemu je omogućen prelazak između svih faza i prelazak zavisi od ispunjenosti uslova u algoritmu.

Broj vozila na prilazima se koriste za proračun maksimalnih i minimalnih zelenih vremena, zbog čega su trajanja minimalnog odnosno maksimalnog zeleneog dinamična i menjaju se u zavisnosti od saobraćajne situacije.



Slika 2: faze opsluživanja raskrsnice i mogući prelasci između faza

3.1.1 Minimalna zelena vremena

Minimalna zelena vremena algoritam računa se u prelaznom stanju, kada je odabrana faza u koju se prelazi, u tom trenutku se obrađuju podaci o broju vozila koji se nakupio za vreme crvenog signalnog pojma i traži se signalna grupa faze koja dobija zeleno sa većim brojem vozila, jer je ona merodavna za formiranje minimalnog zelenog vremena faze. Kao izlaz se dobija minimalno zeleno vreme koje je potrebno za opsluživanje reda koji se nakupio na prilazu za vreme crvenog. Formula za obračun minimalnog zelenog vremena:

$$Z_{min} = MAX(OCV) * t_h \quad (1)$$

Z_{min} – minimalno zeleno vreme (s)

$MAX(OCV)$ – maksimalan broj vozila signalne grupe faze koja dobija zeleno (voz)

$t_h=2$ – interval sleđenja vozila pri pražnjenju reda (s)

3.1.2 Maksimalno zeleno vreme

Maksimalno zeleno vreme je takođe dinamično, i zavisi od tri uslova koja su vezana za stanje na raskrsnici.

- 1) Prvi uslov može da se smatra osnovnim ,koji je u najvećoj meri vremenski određen, formiran je na osnovu kriterijuma da nijedna signalna grupa ne bi trebalo da čeka duže od 120 sekundi. Pošto je neophodno da prođe prvo uslov minimalnog zelenog definisana je vrednost kod uslova trajanja crvenog neke faze od 110 sekundi. Ukoliko je vreme trajanja ≥ 110 s, izlaz iz uslova je DA, i naredba je da ta signalna grupa dobije zeleno.
- 2) Drugi uslov je vezan za maksimalnu dužinu reda kod signalne grupe koja čeka pravo prolaska kroz raskrsnicu. Vrednost je definisana i važi da ukoliko je broj vozila na nekom prilazu veći od 15, signalna grupa dobija zeleno. Navedena kritična vrednost jeste fiksna, ali ne može da se odredi trenutak u kom će se nakupiti kritičan broj vozila, pa i ovaj uslov zavisi isključivo od saobraćajne situacije.
- 3) Treći uslov koji zapravo daje dinamiku odlučivanja predstavlja parametar koji definiše kritičnu vrednost broja vozila na prilazu za vreme trajanja zelenog

signalnog pojma (OC). Navedeni parametar ima zadatak da odredi da li na prilazu postoji zahtev koji je poželjan za ostanak u fazi, odnosno da li se signalna grupa prazni željenim intenzitetom. U radu se porede rezultati različitih vrednosti ovog parametra, tako što se polazi od vrednosti za 1 vozilo, i testira se do vrednosti za 10 vozila.

3.1.3 Odabir naredne faze

Odabir faze u koju će se preći realizuje se u delu algoritma koji sledi nakon prethodno navedenih uslova, odnosno ulazi se u deo algoritma nakon ispunjenja prethodnih uslova.

- 1) Prvi upit koji se postavlja jeste da li na prilazima postoje zahtevi, jer ako ne postoje, cilj je da se ostane u postojećoj fazi.
- 2) Drugi upit traži fazu koja čeka više od 110 sekundi, ukoliko takva postoji.
- 3) Treći uslov proverava koja faza ima veće zahteve, odnosno bira se faza kod koje je zbir vozila na prilazima veći.

Raskrslanicom se upravlja u tri faze (Slika. 2), pri čemu je omogućen prelazak između svih faza i prelazak zavisi isključivo od ispunjenosti uslova u algoritmu.

3.2 Model upravljanja svetlosnim signalima pomoću LLM-a

LLM kod upravljanja navedenom hipotetičkom raskrslanicom se u velikoj meri oslanja na algoritam upravljanja svetlosnim signalima zasnovanim na pravilima. Logika rada svetlosnih signala na raskrsnici je u potpunosti ista kao kod prethodno objašnjenog modela. Razlika koja postoji je kod definisanja parametra kritične vrednosti broja vozila na prilazu (OC), kod modela zasnovanog na pravilima ova vrednost je uniformna, a kod LLM modela je ona dinamična i menja se na svakih 600 sekundi u zavisnosti od određene funkcije nagrade. LLM ima zadatak da optimizuje kritične vrednosti broja vozila za svaku fazu u realnom vremenu na osnovu prethodnih iskustava. Na ovaj način i ovaj parametar dobija dinamiku i pokušava da se prilagodi zahtevima. Pseudo kod je prikazan u nastavku gde mogu da se primete radnje i procesi koji se realizuju tokom simulacije.

- 1) *Postavljanje putanje do Vissim modela i definisanje parametara simulacije (Vreme trajanja simulacije, broj pokretanja, maksimalna dužina reda vozila = 15, maksimalna dužina crvenog = 110, početne OC vrednosti i definisanje prelaznih stanja)*
- 2) *AI nagrada za promenu faza (procedura objašnjena tačkom 3.2.1.)*
- 3) *Glavna funkcija koja daje instrukcije za jednu simulaciju*
 - *Postavi parametre simulacije*
 - *Povezivanje sa Data Collection objektima (detektori za prikupljanje podataka o saobraćaju) i definisanje funkcije računanja broja vozila po trakama*
 - *Učitavanje kontrolera i signalnih grupa*
 - *Inicijalno stanje (početna faza, brojač trajnja crvenog vremena, brojač trajanja faze)*
 - *Glavna petlja (funkcioniše po 1 tiku, u ovom slučaju svaki sekund ima 10 tikova)*
 - *Za svaki tik pokreni jedan korak simulacije*

- Svaki 600 sekundi koristi funkciju `get_new_OC_values_gemini` koja poziva LLM da odredi nove OC vrednosti
 - U jednom sekundu pročitaj vrednosti sa Data Collection objekta, izračunaj broj vozila po trakama, proveri minimalno zeleno, proveri vrednosti maksimalnih zelenih vremena. Kada je prelazno stanje izračunaj minimalno zeleno, izračunaj nagradu i zapiši je.
- 4) Funkcija dodeljivanja novih OC vrednosti
- Na svakih 600 sekundi pročitaj prosečne nagrade iz poslednjeg intervala
 - Analiziraj trenutne OC vrednosti i prosečnu nagradu
 - Zatraži nove OC vrednosti (1-10)
 - Ažuriraj OC vrednosti
- 5) Glavna funkcija
- Pokreni Vissim putem COM interfejsa
 - Učitaj `.inpx` i `.layx` mrežu
 - Za svako pokretanje u opsegu definisanog broja pokretanja, pokreni jednu simulaciju
 - Ispiši poruku da su sve simulacije završene

3.2.1 Funkcija nagrade

LLM obračunava nagradu u svakom prelaznom stanju, jedina situacija kada se nagrada ne računa je u slučaju kada je faza u potpunosti ispražnjena, odnosno kada na prilazima koji su se opsluživali za vreme prethodne faze, nema vozila. Izuzetak je napravljen jer parametar kritične vrednosti broja vozila na prilazu nema uticaj, već je situacija prouzrokovana dinamičnim minimalnim zelenim vremenom. Nagrada se računa prema sledećoj formuli:

$$R = 1 - \frac{|V_L - V_W|}{M} \quad (2)$$

R – vrednost nagrade

V_L – broj vozila signalne grupe sa većim brojem zahteva koja gubi zeleno

V_W – broj vozila signalne grupe sa većim brojem zahteva koja dobija zeleno

M – konstanta normalizacije, maksimalan broj vozila koji može da bude u traci ($M=15$)

Primenom funkcije se vrši nagrađivanje na osnovu poređenja zahteva između faze koja gubi i faze koja dobija. Cilj je da razlike između broj vozila na prilazu sa većim brojem zahteva faze koja gubi i broj vozila na prilazu sa većim brojem zahteva faze koja dobija bude što manja. Idealni slučaj kad je razlika jednaka 0, nagrada uzima vrednost 1. Na ovaj način se vrednuje izmena faze, odnosno da li je vrednost kritičnog broja vozila na prilazu dobro definisana.

3.2.2 Logika predlaganja novih vrednosti OC

Na svakih 600 sekundi simulacije donose se nove vrednosti parametra OC. LLM analizira dva parametra u prethodnom periodu, prosečnu vrednost nagrade po fazama i prosečno trajanje zelenog vremena po fazama. Kako nagrada treba da teži vrednosti 1, što je idealna vrednost, cilj LLM-a je da prosečnu nagradu za period približi vrednosti 1. Uticaj na nagradu ima odabir vrednosti parametra OC, ali on može da podbaci ili da prebaci sa odabirom parametra. LLM ima širok spektar vrednosti koje može da izabere u

intervalu od 1 do 10. Kada analizira odluku u prethodnom periodu može da kaže „prosečna vrednost nagrade nije zadovoljavajuća“, ali onda treba da utvrdi da li je odabrao visoku ili nisku vrednost parametra OC. Za analizu vrednosti OC u smislu ispitivanja da li je vrednost prebacila ili podbacila koristi se prosečno vreme trajanja zelenog. Ako je vreme trajanja zelenog duže, a nagrada mala, znači da je podbacio sa odabirom OC vrednosti, suprotan scenario se primenjuje kada je prebacio. Funkcionalna relacija za odabir koju koristi za analizu prethodnog perioda:

$$diff = 1 - AVG(reward) \quad (3)$$

diff – parametar koji određuje koliko prosečna nagrada svake faze odstupa od idealne

AVG(reward) - prosečna nagrada za fazu u prethodnom period od 600 sekundi (period pre postavljanja novih OC vrednosti)

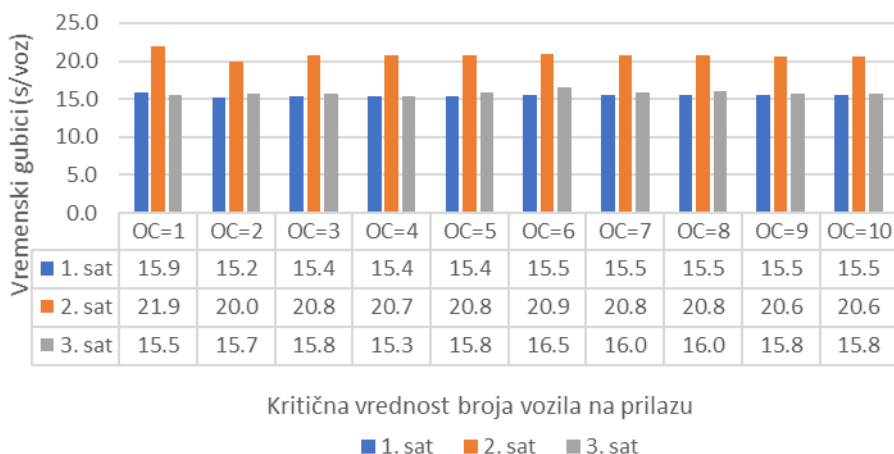
4 DISKUSIJA REZULTATA

Analiza rezultata se sprovodi na osnovu izlaznih podataka simulacije, odnosno prosečnih vremenskih gubitaka po vozilu. Rezultati se diskutuju u dva dela. Prvi deo predstavlja poređenje rezultata simulacije kada su birane uniformne vrednosti kritičnog broja vozila na prilazima. Drugi deo predstavlja poređenje modela zasnovanog na pravilima i upravljanja svetlosnim signalima pomoću LLM modela i analiza donesenih odluka.

4.1 Analiza rezultata upravljanja zasnovanom na pravilima

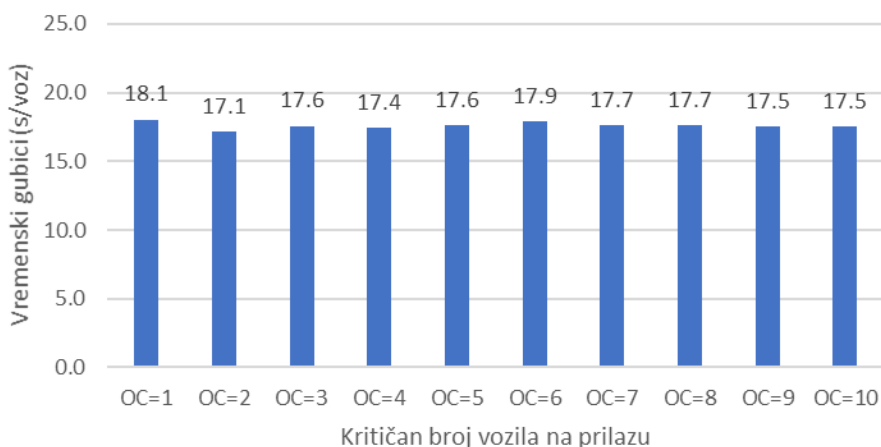
Analiza efikasnosti upravljanja svetlosnim signalima zasnovanom na pravilima, koji koristi parametar kritičan broj vozila na prilazu raskrsnici za optimizaciju procesa pražnjenja reda, diskutuje se na nivou svakog sata simulacije i na nivou celokupne simulacije. Analiza je prikazana narednim grafikonima.

Kako se saobraćajna slika raskrsnice razlikuje po satima, analiza uticaja različitih vrednosti protoka prikazana je na grafikonu 1 . U prvom satu je uočeno da izbor parametra OC=2 ostvaruje najmanje prosečne vremenske gubitke, ali takođe može da se zaključi da primenom parametra OC=[6, 7, 8, 9, 10] ostvaruju identične vrednosti prosečnih vremenskih gubitaka, odnosno parametar više nema uticaj. U drugom satu simulacije kada su zahtevi najveći, prosečni vremenski gubici su najmanji primenom parametra OC=2, dok parametar gubi uticaj odabirom OC=[9,10]. U trećem satu simulacije kada su zahtevi najmanji ali se povećava udeo zahteva na sporednom pravcu, najmanja vrednost prosečnih vremenskih gubitaka se ostvaruje primenom parametra OC=1, takođe parametar gubi uticaj odabirom OC=[9,10].



Grafikon 1: Analiza rezultata simulacije primenom sistema baziranog na pravilima za svaki sat simulacije

Kada je reč prosečnim vremenskim gubicima na nivou simulacije od 3 sata analiza je prikazana Grafikonom 2. Najmanji prosečni vremenski gubici po vozilu se ostvaruju primenom parametra OC=2, dok parametar gubi značajnost odabirom parametra OC=[9,10]. Analizom dijagrama može da se zaključi da na prosečne vremenske gubitke može da se utiče smanjenjem od 2 do 5 %, u zavisnosti od odabira uniformne vrednosti kritičnog broja vozila na prilazu.



Grafikon 2: Analiza rezultata simulacije primenom sistema baziranog na pravilima na nivou simulacije

4.2 Analiza rezultata upravljanja pomoću LLM modela

Kako je kritična vrednost broja vozila na prilazu jedini parametar kojim LLM upravlja i gde predlaže nove vrednosti u zavisnosti od nagrada koje dobija u prethodnom periodu, cilj je da se analiziraju njegove odluke i donesu neki zaključci. LLM tokom jedne simulacije koja traje 11700 sekundi na svakih 600 sekundi donese nove vrednosti parametara OC, što je 20 izmena. Realizovano je 5 simulacija zbog čega je on ukupno realizovao 100 izmena. Tabelom 2. su prikazane njegove odluke tokom simulacije.

Tabela 2: Odluke LLM-a o vrednostima parametra OC za svaku fazu

	Odabrana vrednost kritičnog broja vozila na prilazu od strane LLM-a (broj donetih odluka za 5 simulacija)									
OC parametar	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Faza 1	0	1	1	1	1	1	1	1	2	91
Faza 2	100	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Faza 3	1	2	3	1	1	1	1	2	18	70

Analizom Tabele 2. može se doći do određenih zaključaka:

- Prvi zaključak koji je veoma očigledan i vezan za odabir OC vrednosti za fazu 2. LLM je uvek birao vrednost 1, odnosno postoji razlog zašto ga nije uzimao u obzir. Kako je definisano minimalno zeleno koje je promenljivo i prilagodljivo broju vozila koji se formira tokom crvenog, kada faza dobije zeleno isprazne se sve signalne grupe, a nagrada se ne računa u ovakvim slučajevim jer u ovakvom slučaju OC vrednost nema uticaj već dinamično minimalno zeleno. Iz ovog razloga LLM nema na osnovu čega da donese drugačiju odluku, pa uvek bira vrednost 1.
- Kada je reč o odabiru OC vrednosti za faze 1 i 3 postoji veći broj izmena, LLM predlaže različite vrednosti, ali može da se primeti da najčešće bira visoke vrednosti parametra OC kao što su 9 i 10. Ovakve odluke su povezane sa načinom nagrađivanja, odnosno funkcija nagrade je takva da LLM prepoznaje da za visoke vrednosti parametra OC dobija zadovoljavajuće nagrade, zbog čega on često bira baš takve vrednosti. Takođe je i kod ovih faza primećen veliki broj preskakanja, odnosno, da se red isprazni tokom minimalnog zelenog i da se nagrada ne uzima u obzir.

4.3 Poređenje parametra efikasnosti modela zasnovanog na pravilima sa uniformnom vrednosti OC=2 i LLM modela

Kako je analizirana i odabrana optimalna uniformna vrednost parametra OC=2 u modelu upravljanja koji je zasnovan na pravilima, sada je cilj da se takav vid odlučivanja uporedi sa odlukama koje donosi LLM model. Narednom tabelom i dijagramima su upoređeni prosečni vremenski gubici po signalnim grupama, za svaki sat simulacije. Zelenom bojom su obeležene vrednosti koje imaju manje vremenske gubitke u odnosu na model upravljanja sa kojim se poredi.

Analizom tabele 3. može da se zaključi da jedino signalne grupe V3 i V6 koje pripadaju fazi 2 imaju manje prosečne vremenske gubitke kada LLM odlučuje o kritičnim vrednostima broja vozila na prilazu. Svakako da je ovakav rezultat povezan sa odabirom vrednosti parametra za druge faze. Analiza tabele 2 naglašava da se često biraju visoke vrednost parametra, u tom slučaju vozila koja se opslužuju u drugoj fazi dobijaju ranije zeleno, zbog čega se vremenski gubici smanjuju. U trećem satu simulacije zaključuje se da se ostvaruju manji vremenski gubici primenom LLM-a kod faza 1 i 2. Prilaz 1 ima najveće zahteve u trećem satu simulacije dok ostali prilazi imaju najmanje u poređenju sa prethodnim satima. Primenom parametra OC=2, faza 3 ima lakši uslov za ostanak u fazi nego kada se primenom LLM-a predlažu više vrednosti parametra OC. Kako su zahtevi veći na prilazu 1, a uslov za izlazak iz faze teži primenom parametra OC=2 nego kada LLM bira više vrednosti parametra OC=9 ili 10, duže se ostaje u fazi 3, zbog čega su vremenski

gubici manji primenom parametra OC=2 nego primenom LLM modela. Kada je reč o fazi 1, bolji rezultati se dobijaju primenom LLM modela jer je prelaz u fazu 1 lakši zbog primene viših vrednosti parametra OC, i kraće se ostaje u fazi 3.

Tabela 3: Komparativna analiza prosečnih vremenskih gubitaka primenom modela zasnovanog na pravilima i LLM-a

Faza	Signalna grupa	Prosečni vremenski gubici (s/voz)					
		1. sat		2. sat		3. sat	
		OC=2	LLM	OC=2	LLM	OC=2	LLM
3	V1	18.5	22.2	23.6	29.4	15.2	20.2
1	V2	11.0	11.6	15.3	15.6	13.3	12.2
2	V3	35.1	28.6	42.2	37.3	35.7	33.7
3	V4	18.2	21.9	25.1	29.1	13.5	18.1
1	V5	10.1	11.1	12.9	13.7	12.2	11.3
2	V6	32.4	29.3	40.4	43.5	37.9	37.4
	Raskrsnica	15.2	16.0	20.0	21.2	15.7	16.7

5 ZAKLJUČNA RAZMATRANJA

U radu su prikazani rezultati upravljanja signalisanom raskrsnicom upotrebom dva modela. Poređenjem rezultata može da se zaključi da upotreba LLM-a na način koji je prikazan u radu nije opravdan i da se bolji rezultati ostvaruju primenom modela zasnovanog na pravilima.

Najveći nedostatak primenjenog načina upravljanja gde se koristi LLM predstavlja njegova indirektnost u donošenju odluka. Kako LLM utiče samo na parametar OC za koji je u prvom delu rada dokazano da ne utiče u velikoj meri na prosečne vremenske gubitke, pa ni LLM u ovom slučaju ne može u većoj meri da pokvari ili da poboljša rezultate. S druge strane, ukoliko mu se da veća sloboda, postoji i veći rizik greške, ali se povećava i mogućnost poboljšanja rezultata.

U modelu koji je upotrebljen, koristio se samo actor za donošenje odluka o izmenama prema prethodno prikazanom modelu. Naredna mogućnost bi bila upotreba critic agenta koji se koristi za ocenjivanje donetih odluka actor-a na osnovu čega actor zna da li je pri određenim uslovim doneo dobru ili lošu odluku, pa u budućnosti pri istim ili sličnim uslovima može da zna kakve rezultate mu je slična odluka donela u prošlosti. Unapređenje modela critic agentom je jedna od mogućnosti koja bi mogla da utiče na rezultate simulacije.

Takođe, komplikovanije saobraćajne situacije gde bi LLM analizirao više parametara ili učesnika kao što su pešaci, biciklisti ili javni prevoz, daje više prostora LLM-u za razmišljanje i optimizovanje saobraćajne situacije. Kada je model složeniji, zahteva veće napore za njegove kreiranje, ali u tom slučaju LLM bi dao veće analitičke mogućnosti pa samim tim i bolje rezultate.

Kako primena LLM-a predstavlja jedan od novih alata koji se nudi inženjerima, daljim istraživanjem treba naći način i uslove koji opravdavaju njegovu primenu. Kroz ovaj rad navedeni su neki od predloga za dalje istraživanje koji bi mogli da daju jasniju sliku o načinu na koji treba da se koristi LLM u upravljanju saobraćajnim situacijama.

LITERATURA

- [1] C. Cui, Y. Ma, X. Cao, W. Ye, and Z. Wang, "Receive, Reason, and React: Drive as You Say with Large Language Models in Autonomous Vehicles," Oct. 2023, [Online]. Available: <http://arxiv.org/abs/2310.08034>
- [2] D. Fu et al., "Drive Like a Human: Rethinking Autonomous Driving with Large Language Models," Jul. 2023, [Online]. Available: <http://arxiv.org/abs/2307.07162>
- [3] L. Da et al., "Open-TI: Open Traffic Intelligence with Augmented Language Model," Dec. 2024, doi: 10.1007/s13042-024-02190-8.
- [4] M. Wang, A. Pang, Y. Kan, M.-O. Pun, C. S. Chen, and B. Huang, "LLM-Assisted Light: Leveraging Large Language Model Capabilities for Human-Mimetic Traffic Signal Control in Complex Urban Environments," Jun. 2024, [Online]. Available: <http://arxiv.org/abs/2403.08337>
- [5] A. Jovanović, A. Uzelac, D. Teodorović, and K. Kukić, "TRAFFIC SIGNAL CONTROL AT DISPLACED LEFT-TURN INTERSECTIONS USING AN LLM-BASED ACTOR-CRITIC ALGORITHM," Expert Syst. Appl., vol. 301, Mar. 2026, doi: 10.1016/j.eswa.2025.130555.

SUMMARY

Application of Large Language Models in Signalized Intersection Control

Abstract: This paper presents the development of a real-time traffic signal control model based on the analysis of the critical number of vehicles on an intersection approach (OC) within the PTV Vissim simulation environment. The study consists of two research phases. In the first phase, traffic signal control is performed using a conventional VAP controller without the application of artificial intelligence. In the second phase, the decision-making process is enhanced through the use of a Large Language Model (LLM).

In the baseline model, signal group control is performed based on predefined threshold values for the critical number of vehicles on the intersection approaches (OC). In the extended model, the Large Language Model acts as an agent that analyzes simulation results every 600 seconds and determines new values of the OC parameters, with the aim of optimizing the queue discharge process at the intersection.

The analysis compares traffic signal performance indicators, specifically the time losses associated with each of the applied control strategies. Based on the comparison of time losses, it was concluded that the use of an LLM with the logic presented in this paper is not justified.

Keywords: Traffic signals, Real-time traffic control, Intersections, Simulation.