

Simulacija upravljanja odljevnim tokovima gradskih autocesta

Pavlinić, Filip Antonio

Undergraduate thesis / Završni rad

2019

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University of Zagreb, Faculty of Transport and Traffic Sciences / Sveučilište u Zagrebu, Fakultet prometnih znanosti**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:119:306706>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2025-02-15**



Repository / Repozitorij:

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



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET PROMETNIH ZNANOSTI

Filip Antonio Pavlinić

**SIMULACIJA UPRAVLJANJA ODLJEVNIM
TOKOVIMA GRADSKIH AUTOCESTA**

ZAVRŠNI RAD

Zagreb, 2019.

Zagreb, 8. travnja 2019.

Zavod: **Zavod za inteligentne transportne sustave**
Predmet: **Automatsko upravljanje u prometu i transportu**

ZAVRŠNI ZADATAK br. 5240

Pristupnik: **Filip Antonio Pavlinić (0135243054)**
Studij: **Inteligentni transportni sustavi i logistika**
Smjer: **Inteligentni transportni sustavi**

Zadatak: **Simulacija upravljanja odljevnim tokovima gradskih autocesta**

Opis zadatka:

Veliki gradovi izgrađuju obilaznice kako bi brže povezali krajeve grada, te smanjili prometna zagušenja koja nastaju unutar samoga grada. Obilaznice se najčešće svode na gradske autoceste s većim brojem prilaznih i odlaznih rampi. Na mjestu spajanja odljevnog toka sa sporednim prometnicama, zbog manjeg kapaciteta u odnosu na glavnu prometnicu, moguć je nastanak zagušenja. Kako bi se održala razina uslužnosti primjenjuje se upravljanje odljevnim prometnim tokom. U radu je potrebno napraviti pregled metoda koje se koriste za upravljanje odljevnim tokovima, izraditi prikladan simulacijskih model, implementirati jednostavan algoritam upravljanja odljevnim tokovima te izvršiti simulaciju korištenjem programskih paketa VISSIM i MATLAB.

Mentor:



izv. prof. dr. sc. Edouard Ivanjko

Predsjednik povjerenstva za
završni ispit:

Sveučilište u Zagrebu
Fakultet prometnih znanosti

ZAVRŠNI RAD

**SIMULACIJA UPRAVLJANJA ODLJEVNIM
TOKOVIMA GRADSKIH AUTOCESTA**

**SIMULATION OF OFF-RAMP CONTROL
ON URBAN MOTORWAYS**

Mentor: izv. prof. dr. sc. Edouard Ivanjko

Student: Filip Antonio Pavlinić

JMBAG: 0135243054

Zagreb, kolovoz 2019.

ZAHVALA

Zahvaljujem se svojem mentoru izv. prof. dr. sc. Edouardu Ivanjku na brojim stručnim savjetima, smjernicama i riječima podrške prilikom pisanja ovog rada, te mag. ing. traff. Krešimiru Kušiću za pomoć pri izradi praktičnog dijela rada. Zahvaljujem kolegici Žani Jakobović na suradnji tijekom pisanja ovog rada, te kolegi Izidoru Oremoviću na pomoći i podršci. Zahvaljujem i tvrtki PTV što mi je omogućila rad u njihovom programskom paketu VISSIM, bez kojeg ovaj rad ne bi bio moguć. Također zahvaljujem svojoj obitelji i djevojci za potporu, strpljenje, te razumijevanje tijekom mojeg studiranja.

SAŽETAK

NASLOV: Simulacija upravljanja odljevnim tokovima gradskih autocesta

Razvoj gradova je neophodan kako bi se zadovoljile sve potrebe njihovih građana i društva općenito. S razvojem gradova, prometnoj mreži grada potrebna su sve bolja rješenja za povezivanje udaljenih dijelova grada. Jedno od tih rješenja su gradske autoceste. One su s ostatkom prometne mreže gradskog područja povezane ulaznim i izlaznim rampama. Za vrijeme vršnog opterećenja, koje nastaje tijekom dnevnih migracija ljudi, dolazi do zagušenja u cijelom prometnom sustavu gradskog područja. S obzirom na to da prostora za proširenje i izgradnju nove prometne infrastrukture često nema, nedostatak kapaciteta moguće je riješiti pametnim upravljanjem. U ovome završnom radu opisane su, analizirane i uspoređene tri metode upravljanja odljevnim tokom gradske autoceste, kojim je važno upravljati da se zagušenja ne prenesu s lokalne gradske prometne mreže na prometnicu visoke propusne moći odnosno gradsku autocestu. Simulacije ovih metoda izvedene su u simulacijskom okruženju programskih paketa PTV VISSIM-a i MATLAB-a. Rezultati simulacija pokazuju da se već primjenom ustaljene prometne signalizacije može ostvariti dobro upravljanje, a još bolje primjenom ALINEA algoritma upravljanja prometnim tokom, te tako riješiti zagušenja prilagodbom prometnoj potražnji u stvarnome vremenu.

KLJUČNE RIJEČI: Gradska autocesta; izlazna rampa; prometni tok; semafori; inteligentni transportni sustavi; ALINEA algoritam; adaptivno upravljanje; simulacije u prometu

SUMMARY

TITLE: Simulation of Off-Ramp Control on Urban Motorways

Urban development is necessary to meet all the needs of their citizens and society in general. With urban development, the city's transport network needs better solutions to connect remote parts of the city. One of these solutions are urban motorways. Urban motorways are connected with the rest of the city's transportation network by on-ramps and off-ramps. During the daily migration of people, specifically at rush hour, congestion is being created in the urban transport network. Given that there is no room to expand or build new transport infrastructure, the lack of capacity can be addressed through adaptive traffic control. In this final paper, three methods of traffic management are described, analyzed and compared so congestions could be prevented from transferring from transport network to urban motorway. Simulations of these methods were performed in the simulation environment of the PTV VISSIM and MATLAB software package. The simulation results show that by using fixed traffic signaling, good traffic management can be achieved. But even better results can be achieved by the ALINEA traffic flow management algorithm, because of its ability to adapt to real-time traffic demands.

KEYWORDS: urban motorway; off-ramp; traffic flow; traffic lights; intelligent transport systems; ALINEA algorithm; adaptive control; traffic simulations

SADRŽAJ

| | |
|---|----|
| 1. Uvod | 1 |
| 2. Opis problema upravljanja prometom na gradskim autocestama..... | 3 |
| 2.1. Gradske autoceste | 3 |
| 2.2. Prometni tok | 5 |
| 2.3. Problemi u prometnom toku | 7 |
| 2.4. Razina uslužnosti..... | 9 |
| 2.5. Odljevni tok gradske autoceste..... | 10 |
| 3. Metode upravljanja odljevnim tokovima gradskih autocesta | 12 |
| 4. Implementirani algoritam upravljanja | 15 |
| 5. Simulacijsko okruženje..... | 18 |
| 5.1. VISSIM..... | 19 |
| 5.2. MATLAB | 20 |
| 5.3. Povezivanje VISSIMA i MATLABA pomoću COM sučelja | 20 |
| 6. Rezultati simulacije | 21 |
| 6.1. Model i postavke | 21 |
| 6.2. Rezultati prve metode – neupravljani prometni tok | 23 |
| 6.3. Rezultati druge metode – upravljanje nepromjenjivom signalizacijom | 28 |
| 6.4. Rezultati treće metode – adaptivno upravljanje semaforima..... | 33 |
| 6.5. Analiza rezultata i usporedba metoda..... | 38 |
| 7. Zaključak | 41 |
| Popis literature..... | 42 |
| Popis slika | 44 |
| Popis tablica | 45 |
| Popis grafikona..... | 46 |

1. Uvod

Ljudska populacija svakim danom raste, zbog čega i gradovi postaju sve veći, te urbanizacija zahvaća sve veća područja. Prometna infrastruktura u gradovima svakim danom sve teže zadovoljava potrebe putnika odnosno korisnika prometne mreže. Potražnja je sve veća, dok prometnice ostaju iste. Na prometnu potražnju najviše utječu dnevne migracije ljudi, a najveći dio toga čine njihov odlazak na posao i povratak vlastitim domovima.

Kao posljedica velike prometne potražnje, koju kapaciteti prometnica ne mogu zadovoljiti, nastaju prometna zagušenja. Ona dovode do vremenskih gubitaka i s time do većeg broja drugih financijskih gubitaka. S obzirom na to da su gradske sredine već uglavnom u potpunost izgrađene, sve teže se pronalazi prostora za proširenja i izgradnju nove prometne infrastrukture. Kako bi se problemi u prometu riješili i neželjene situacije izbjegle, ponekad je dovoljno odabrati optimalan način upravljanja postojećim kapacitetima.

Veliki gradovi za povezivanje udaljenih dijelova grada koriste se gradskim autocestama, čije karakteristike opisuje drugo poglavlje. Vozila koja se kreću gradskom autocestom ili općenito nekom drugom cestovnom prometnicom čine njen prometni tok. On posjeduje brojne parametre, koji su također opisani u drugome poglavlju. Analiza parametara prometnog toka daje jasniju sliku o stanju na pojedinoj prometnici, zbog čega je ključno njihovo poznavanje. Poznavanjem navedenih parametara mogu se odrediti problemi koji nastaju u prometnom toku, opisani u drugome poglavlju, te njihova rješenja. Ne rješavanje problema u prometnom toku i općenito problema na prometnicama dovodi do lošije razine uslužnosti, koja je također opisana u drugome poglavlju.

Kako gradskom autocestom prođe veliki broj vozila svakoga sata, vrlo je bitno da kvaliteta usluge bude visoka. Niska razina uslužnosti na gradskim autocestama dovodi do niže razine uslužnosti na ostalim prometnicama gradske mreže s kojom je ova prometnica povezana putem ulaznih i izlaznih rampi. Na izlaznim rampama prometuje odljevni prometni tok čije su karakteristike opisane drugim poglavljem.

Odljevnim tokom na gradskoj autocesti je moguće upravljati na više načina, neki od njih opisani su u trećem poglavlju. Tri metode upravljanja testirane su u ovome završnom radu. Prva metoda je metoda bez upravljanja, gdje je na raskrižje izlazne rampe i gradske prometnice postavljen samo znak izričite naredbe, koji označava da je gradska prometnica ona s prednošću prolaska. Druga metoda je ostvarena postavljanjem semafora na raskrižje ovih dviju prometnica, koji je podešen tako da prometnim tokovima upravlja ustaljenim signalnim planom. Za upravljanje odljevnim tokovima (engl. ramp metering) mogu se koristiti različiti lokalni algoritmi, a u ovome radu za treći način upravljanja odabran je ALINEA algoritam, ovisan o stanju na prometnicama, to jest prometnim parametrima. Načini upravljanja odljevnim tokom gradske autoceste detaljnije su opisani u četvrtom poglavlju, a njima se nastoje izbjeći zagušenja i prelijevanje prometnog toka nazad na gradsku autocestu.

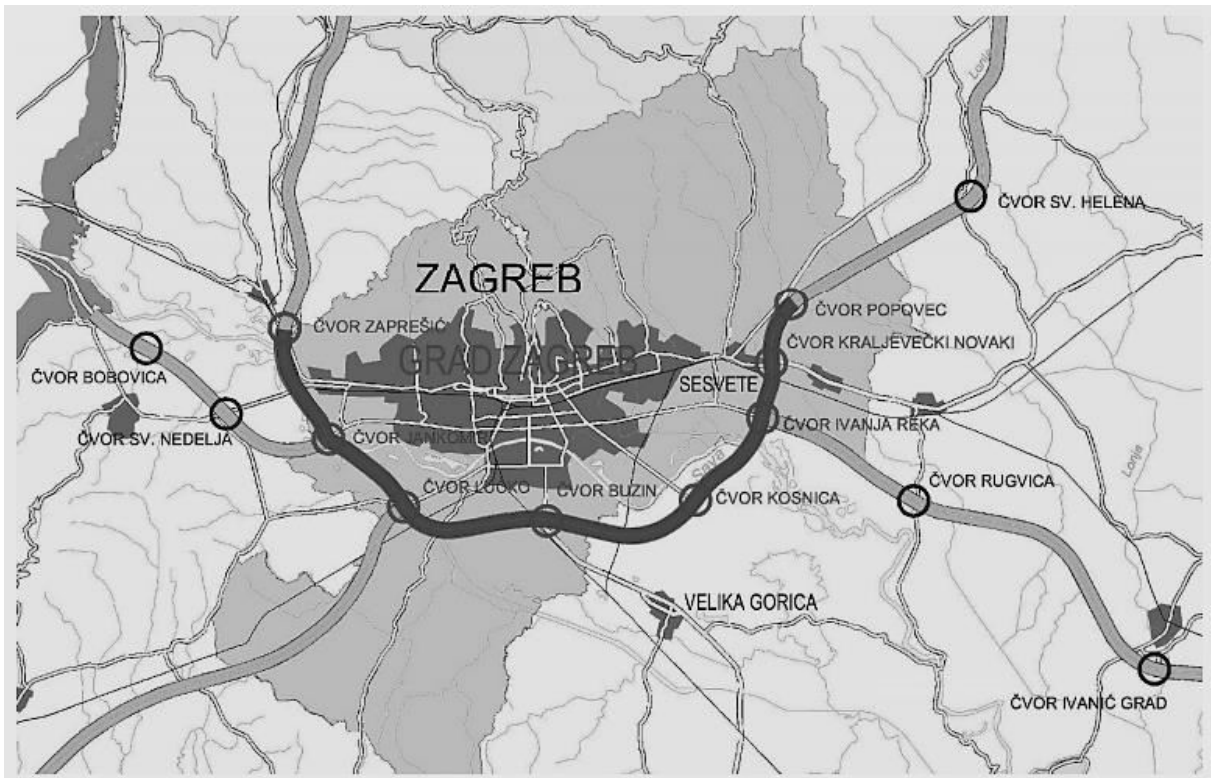
Da bi se odredilo koje je rješenje za upravljanje odljevnim tokom gradske autoceste najbolje, bitno je bilo izraditi simulaciju i prikupiti podatke o prometnim parametrima. Simulacija navedenih načina upravljanja izrađena je u simulacijskom okruženju PTV VISSIM-a i MATLABA, koje je opisano u petom poglavlju. Šesto poglavlje opisuje postavke simulacijskog modela i rezultate simulacije, koje također i analizira. Nakon prikupljanja svih potrebnih podataka, na temelju prethodnih poglavlja rada dan je zaključak u sedmom poglavlju s prijedlozima nastavka rada.

2. Opis problema upravljanja prometom na gradskim autocestama

Gradske autoceste su prometnice koje povezuju udaljene dijelove velike gradske sredine. S obzirom na veličinu gradova i brzinu kojom se šire, predstavljaju najbolje rješenje prelaska s jednog na drugi kraj grada. Ove prometnice karakterizirane su visokom propusnom moći. Nastankom zagušenja na ovim prometnicama dolazi do velikih gubitaka, pa se oni nastoje u svakome slučaju izbjeći. Problemi koji uzrokuju zagušenja mogu biti razni, a uz njih, ovo poglavlje opisuje i sve elemente koji su ključni za ovu vrstu prometnica i optimalno upravljanje njome.

2.1. Gradske autoceste

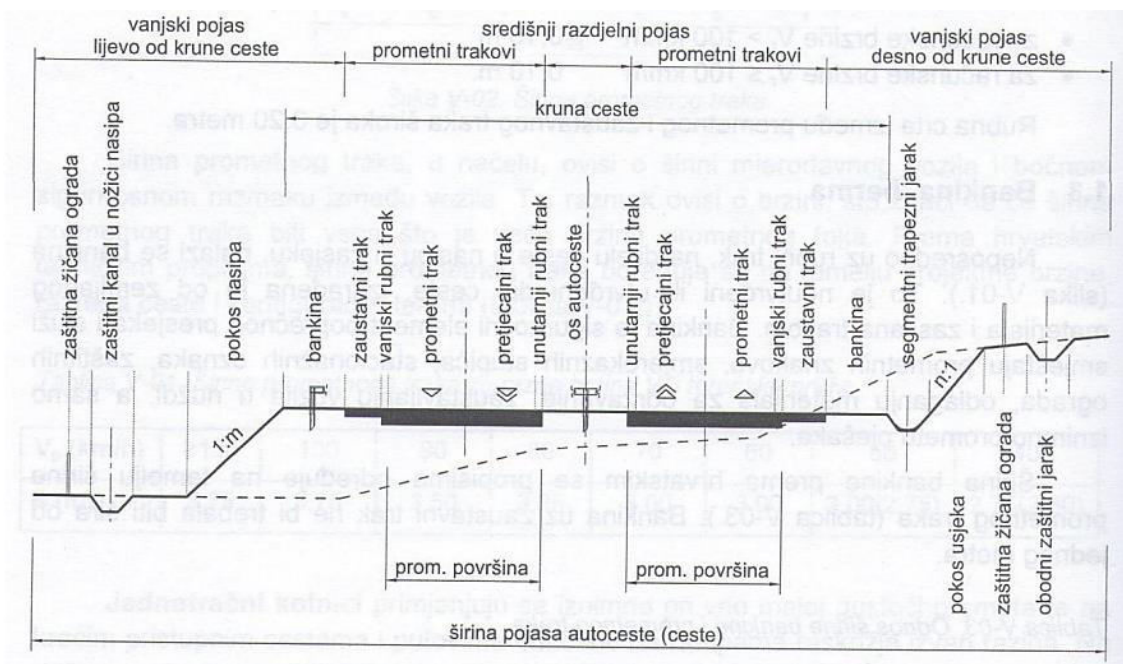
Gradske autoceste razlikuju se od normalne autoceste po tome što imaju puno veći broj ulaznih i izlaznih rampi, postavljenih na manjim međusobnim udaljenostima, nego što je to slučaj kod klasičnih autocesta. Slika 1 prikazuje obilaznicu grada Zagreba, koja daje jasniju predodžbu o tome što je gradska autocesta.



Slika 1: Prikaz zagrebačke obilaznice kao primjer gradske autoceste [1]

Za kretanje ovim djelom autoceste nije potrebno plaćanje cestarine. Kako se ne bi usporavao promet, na ovim dionicama ne postoje naplatne postaje. Gradske autoceste uz kolnički trak posjeduju još i mnoge ulazne i izlazne rampe. Ove dvije vrste rampi povezuju gradsku autocestu s ostalim prometnicama gradske mreže. Putem njih se na gradsku autocestu dovode vozila i odvođe s nje. Gradske autoceste ključni su dio prometne mreže u velikim gradovima, jer rasterećuju ostale gradske prometnice i time smanjuju broj zagušenja koja nastaju i doprinose povećanju propusnosti ostalih prometnica u samome gradu.

Gradska autocesta sastoji se od dvije kolničke trake. Kolnički trakovi su fizički odvojeni radi sigurnosti i zaštite vozila i vozača središnjim razdjelnim pojasom najmanje širine 3 m. Svaki kolnički trak dijeli se na dva ili više prometna traka. Širina svakog prometnog traka prilagođena je brzinama vožnje. Za brzine od 100 km/h širina prometnog traka iznosi 3,5 m, a za brzine veće od 120 km/h širina prometnog traka iznosi 3,75 m. Jedan od prometnih trakova je uvijek pretjecajni trak, dok su ostali namjenjeni vožnji vozila. Uz njih gradska autocesta posjeduje zaustavni trak koji je širine 2,5 m, a služi za zaustavljenje vozila u slučaju nužde. Neposljedno nakon ulazne rampe, na gradskoj autocesti nalazi se traka za ubrzavanje, kojom se vozila uključuju u prometni tok nakon što postignu za to potrebnu brzinu. Prije izlazne rampe nalazi se traka za usporavanje, a njome vozila prilagođavaju svoju brzinu brzini na prometnici na koju se spajaju izlaznom rampom. Slika 2 prikazuje navedene i ostale elemente autoceste, te njihov međusobni odnos [2].



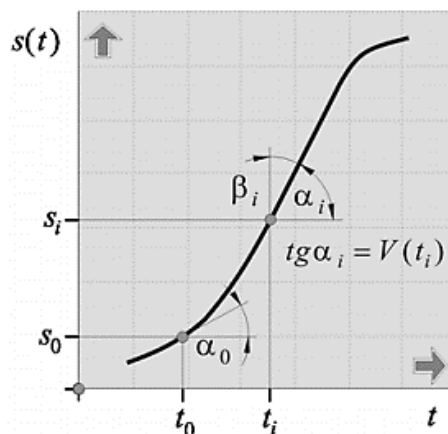
Slika 2: Shematski prikaz elemenata poprečnog presjeka u pojasu autoceste [2]

2.2. Prometni tok

Prometni tok je istodobno kretanje više prometnih entiteta prometnom infrastrukturom, prema određenim zakonitostima. Prometni tok gradskih autocesta je neprekinut, jer one ne sadrže raskrižja u razini i semafore, koja bi dovela do prekida prometnog toka. Može se još reći da je i nehomogen, jer se njime kreću entiteti različitih karakteristika. Također prometni tok gradskih autocesta je dinamičan, jer na različitim dionicama dolazi od promjene smjera, do promjena brzina, zbog prisutnosti većeg broja ulaznih i izlaznih rampi.

Kao što je i ranije navedeno funkcija gradskih autocesta je omogućiti prelazak velikog puta u što manjem vremenu, te rasteretiti okolne prometnice, s obzirom na to da je njihov kapacitet manji od onoga gradskih autocesta. Na taj način prebacivanja prometa s više manjih prometnica s nižim ograničenjima brzine, na veliku prometnicu s mogućnošću vožnje većim brzinama, smanjuje se broj zagušenja unutar grada. Kako je velik dio prometnih entiteta prebačen na jednu prometnicu, vrlo je važno održavati na njoj stabilan prometni tok, te spriječiti da na toj prometnici dođe do zagušenja.

Vozila se kreću određenim putem (s), u određenom vremenu (t), te tako ostvaruju brzinu (v). Ovisnost puta o vremenu prikazana je grafikonom 1, gdje je s_0 početna točka iz koje kreće vozilo, a t_0 početno vrijeme.



Grafikon 1: Prikaz odnosa puta i vremena [3]

Ova ovisnost, puta o vremenu može se još prikazati izrazom 1:

$$s = s(t). \quad (1)$$

Prvom derivacijom ove funkcije dobiva se brzina (v), kako je prikazano izrazom 2, drugom derivacijom ubrzanje (a), kako prikazuje izraz 3, a trećom impuls (k), što je vidljivo izrazom 4. Ove fizikalne veličine su nam uz put (s) i vrijeme (t) ključni parametri za opisivanje kretanja vozila.

$$v = v(t) = \frac{ds}{dt} \quad (2)$$

$$a = a(t) = \frac{dv}{dt} = \frac{d^2s}{dt^2} \quad (3)$$

$$k = k(t) = \frac{da}{dt} = \frac{d^3s}{dt^3} \quad (4)$$

Kako bi se dobro analizirao prometni tok, vrlo je važno analizirati što je bolje moguće svaki njegov pojedini entitet. Iako to računski nije u potpunosti moguće, uporabom raznih osjetila na prometnicama i matematičkih algoritama može se dobiti vjerodostojna predodžba približna stvarnom stanju prometnog toka, na temelju koje je onda moguće vršiti upravljanje. Ako je dobro analiziran i predviđen prometni tok, koji nastaje na određenoj prometnici, u ovom slučaju gradskoj autocesti, može se osigurati da tijekom prvih nekoliko godina uporabe vrlo rijetko dođe do zagušenja na toj prometnici.

Kasnije kada period od prvih godinu dana uporabe prođe, obično zbog urbanizacije, industrijalizacije i povećanja populacije u gradovima, ti početni izračuni ne uspijevaju ostvariti istu razinu kvalitete usluge kao i na početku, jer su potražnja i obujam usluge znatno veći. Tako je kasnije dobra analiza prometnog toka još važnija, jer nam pomaže u upravljanju prometom na određenoj prometnici, te upravljanju samom prometnicom, što omogućuje povećanje njene iskorištenosti, povećanje razine kvalitete usluge i smanjuje potrebu za izgradnjom novih prometnica, u već i ovako preopterećenoj gradskoj mreži.

Kako su ustanovljeni parametri kojima je određeno kretanje vozila, mogu se definirati i parametri prometnog toka [3]:

- protok, q [vozila/h],
- gustoća prometnog toka, k [vozila/km],
- brzina prometnog toka, v [km/h];
- vrijeme putovanja vozila u toku, t [h],
- vremenski i prostorni interval slijeđenja vozila u toku, ht [s/voz] i hp [m/voz],
- prostorne i vremenske praznine između vozila (engl. gap), g [m/voz] i [s/voz].

2.3. Problemi u prometnom toku

Do problema u prometnom toku dolazi najčešće u ranim jutarnjim i kasnim popodnevним dijelovima dana, odnosno tijekom vršnih sati. Tada je povećana potražnja za prometnom uslugom na gradskim autocestama, zbog dnevnih migracija ljudi. Također se problemi mogu pojaviti i nastankom neočekivanih situacija poput raznih nesreća, koje mogu zaustaviti promet određenom prometnicom na nekoliko sati ili raznih meteoroloških uvjeta.

Na stanje na gradskim autocestama uvelike utječu priljevni i odljevni tokovi, s obzirom da bez njih vozila ne bi mogla niti pristići na gradsku autocestu niti je napustiti. Vrlo je važno i da su odljevni tokovi prilagođeni svojom širinom i brojem trakova potražnji za prometnom uslugom. Njihova propusnost i ravnomjerna raspoređenost, bitna je kako bi se promet mogao rasporediti ravnomjerno na sve prometnice i u potpunosti iskoristiti njihov kapacitet.

Ukoliko dođe do problema na izlaznim rampama, može nastupiti zagušenje na gradskoj autocesti kao što prikazuje slika 3. Do toga dolazi ukoliko one nisu moguće za korištenje zbog određenih neprilika, poput prometnih nesreća. Zbog toga su gradske autoceste potpuno zagušene ili se prometuje otežano. U nekim slučajevima zbog određenih interesa putnika, samo jedna dionica gradske autoceste može dostići veću potražnju ili njen određen izlaz, zbog čega dolazi do mogućeg smanjenja brzine prometnog toka na ranijim dijelovima prometnice, a ponekad čak i potpunog zastoja, što znači da ukoliko izlazne rampe nisu upotrebljive, gužva na jednoj dionici može stvoriti gužvu na više dionica. Iz tog razloga je važno kod analize upravljanja ovom prometnicom, sagledati ju kao složen sustav podijeljen u više segmenata od kojih su svi jednako važni za visoku kvalitetu usluge [4].



Slika 3: Prikaz prometnog zagušenja u gradu Los Angeles, SAD [5]

Do ovakvih problema u prometu dolazi iz par glavnih razloga:







- loše su planirani gradovi i loše projektirana gradska prometna mreža, koja nije osmišljena kako bi se prilagođavala porastu i razvijanju grada,
- porast stanovništva u gradu, nastala porastom stope nataliteta ili migracijom,
- loše razvijen javni gradski prijevoz zbog kojeg putnici kao prvi izbor za dnevne migracije odabiru osobno vozilo,
- malo ulaganja u održavanje prometne infrastrukture, upravljačku infrastrukturu, digitalizaciju prometa, primjenu inteligentnih transportnih sustava (ITS), mjerenje i analiziranje u stvarnom vremenu, zbog čega nije moguće pravovremeno otkriti i otkloniti zagušenja, te se nositi s porastom potražnje za prometnom uslugom.

Posljedice gore navedenog su [4]:

- zastoje - uzrokuje gubljenje vremena putnika, što vožnja za većinu već i predstavlja, jer ljudi u većini slučajeva tek kada dođu na mjesto zaposlenja obavljaju neki rad, a na zagušenje se dodatno gleda kao neproduktivno stanje tijekom vožnje, što znači da smanjuje i sveukupnu produktivnost u regiji, koja utječe na ekonomsko stanje, a uz sve navedeno još generira i dodatne troškove,
- kašnjenje - utječe dodatno na smanjenje produktivnosti npr. onemogućavanjem radnika da obavlja svoju funkciju u zadanom radnom vremenu,
- zagađenje okoliša - u gužvama vozila ostvaruju puno veću potrošnju goriva, jer vozila nisu projektirana za rad motora u mjestu, te česta ubrzavanja i kočenja, također uz veću potrošnju goriva veća je i emisija štetnih plinova, te je iz ovog razloga cestovni promet glavni uzrok zagađenja u gradovima,
- prelijevanje prometnog toka - vozači kada se nađu u zagušenju prvom prilikom pokušavaju pronaći izlaz iz tog nepoželjnog stanja, zbog čega se promet prelijeva na okolne prometnice, te tako u povećava promet u sredinama u kojima to nije uobičajeno,
- stres - vozači su zbog navedenog stanja u prometu i svega što im ono donosi podložniji stresu, te samim time dolazi do povećanog rizika od prometne nesreće, a kada se i dogodi nesreća, zbog zagušenja je otežano kretanje vozila hitnih službi, te njihov dolazak do potrebite lokacije.

2.4. Razina uslužnosti

Razina uslužnosti (engl. Level of Service, LoS) predstavlja razinu operativnih uvjeta, odnosno niz karakteristika koje opisuju uvjete vožnje koji se pojavljuju na određenom dijelu prometnice (brzina, vrijeme putovanja, prekidi, sigurnost, udobnost vožnje, cijenu putovanja itd.) [6]. Razina uslužnosti podijeljena je u šest razreda kako prikazuje slika 4, od kojih razred A označava najbolje stanje u prometu i u potpunosti neometan prometni tok, dok razred F označava zagušen prometni tok, koji se kreće smanjenom brzinom, te je razmak među vozilima minimalan, zbog čega je povećana opasnost od nastanka prometne nesreće.

| Razina uslužnosti | Stanje prometnog toka | Operativna brzina (km/h) | Opis stanja |
|-------------------|---|--------------------------|--|
| A |  | 100 | Najviša kvaliteta uslužnosti. Prometni tok neometano teče, s vrlo malo ili bez operativnih ograničenja. NEMA ZAGUŠENJA |
| B |  | 100 | Prometni tok je neometan, s malo manjom operativnom slobodom. NEMA ZAGUŠENJA |
| C |  | 100 | Gustoća prometnog toka postaje uočljiva, a operativni zahvati su ograničeni drugim vozilima. MINIMALNA ZAGUŠENJA |
| D |  | 90 | Brzina i operativni zahvati počinju biti ograničeni povećanjem broja vozila u prometnom toku. MINIMALNA ZAGUŠENJA |
| E |  | 85 | Nestabilan prometni tok. Promjene u brzini su velike i nepredvidljive. MINIMALNA ZAGUŠENJA |
| F |  | < 85 | Nestabilan prometni tok, s kratkim periodima vožnje slijeđenim prisilnim zaustavljanjem. ZNACAJNA ZAGUŠENOST |

Slika 4: Prikaz i opis pojedinih razreda razine uslužnosti na autocestama s više prometnih traka [7]

2.5. Odljevni tok gradske autoceste

Odljevni tok gradske autoceste služi za pražnjenje glavnog prometnog toka, to jest njegovo preusmjeravanje na ostale prometnice. To se pokušava ostvariti što jednostavnijom izvedbom, prilikom koje vozila minimalno gube brzinu, a da prometnica uspijeva zadovoljiti prometnu potražnju i zagađenje okoliša bude minimalno. Na autocestama se odlijevanje prometa u većini slučajeva ostvaruje putem raskrižja izvan razine.

Tipom raskrižja izvan razine, koje prikazuje slika 5, postiže se prostorno razdvajanje konfliktnih stanja, neprekinuti prometni tok, odnosno nezavisno vođenje prometnih tokova u različitim građevinskim razinama. Tako se dobivaju dva bitna učinka, najvišu sigurnost prometa i najveću propusnu moć zbog čega je to ujedno najbolje i najskuplje rješenje. Funkcija odljavnog toka je rastavljanje jednog prometnog toka na više njih. Takvim prelijevanjem prometa važno je upravljati kako bi se pravilno rasporedio prometni tok, te kako ne bi došlo do pretrpavanja kapaciteta bilo koje prometnice tog prometnog toka i oko tog prometnog toka, te time došlo do prometnog zagušenja [8].



Slika 5: Raskrižje izvan razine na primjeru Mostarske petlje, Beograd, Republika Srbija [9]

Odljevni tok na gradskim autocestama tako je karakteriziran [8]:

- propusnom moći - maksimalan broj vozila koji može proći kroz to raskrižje u promatranom vremenskom intervalu u prevladavajućim voznim, kontrolnim i prometnim uvjetima,
- voznim uvjetima - uključuju osnovnu geometriju raskrižja, broj i širinu prometnih trakova, poprečni i uzdužni nagib, ostale prometne trake i slično,
- prometnim uvjetima - uključuju prometno opterećenje na svakoj prometnici na koju se spaja odljevni tok, upravljanje prometnim tokovima, tipove vozila koja prolaze tokom, što utječe na količinu vozila koja se mogu poslužiti itd.,
- karakterističnim prometnim radnjama:
 - isplitanje - dijeljenje prometnih tokova,
 - uplitanje - sjedinjavanje prometnih tokova,
- brojem konfliktnih točaka.

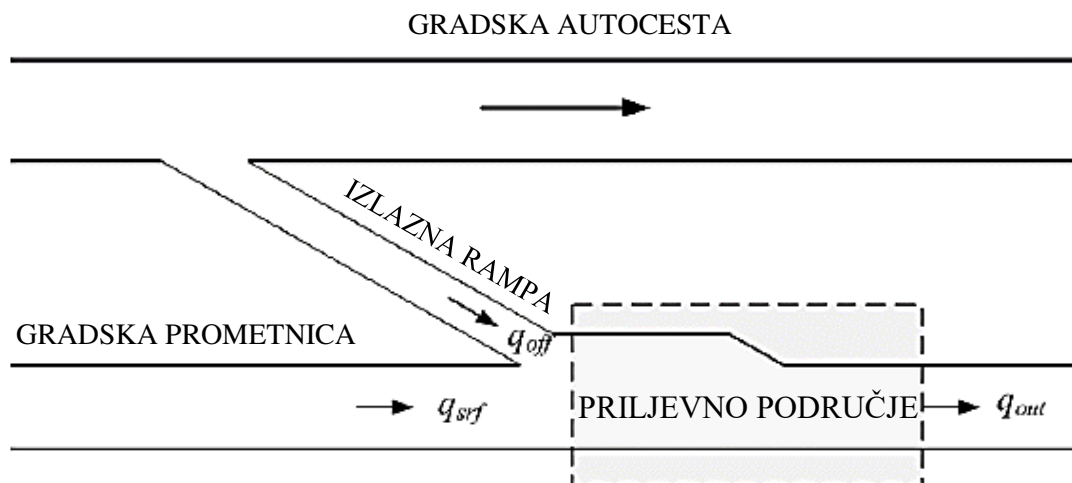
3. Metode upravljanja odljevnim tokovima gradskih autocesta

Upravljanje prometom mora biti adaptivno i prilagođavati se promjenama stanja i uvjeta u prometu, mora održavati sigurnost prometa, visoku razinu uslužnosti i izbjeći moguća zagušenja. Upravljanje prometom provodi se na sljedeće načine [10]:

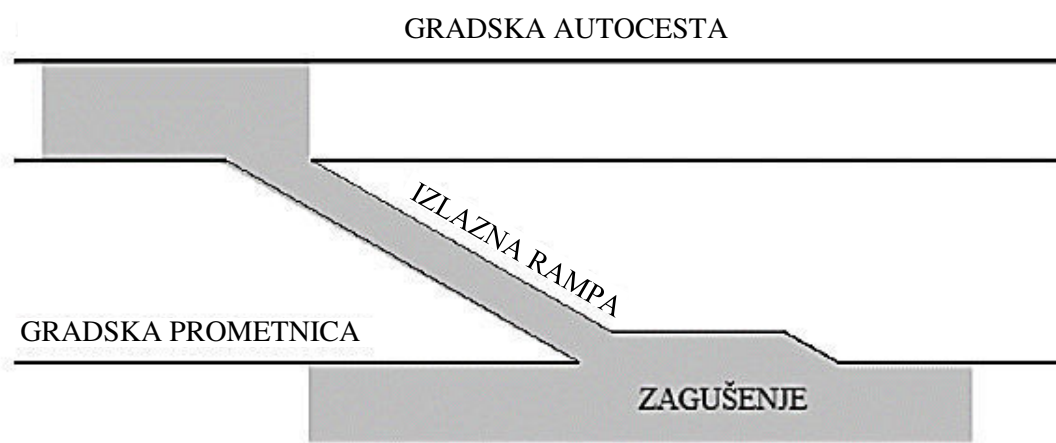
- putem prometne signalizacije - koja usmjerava vozače u izvedbi s kružnim raskrižjima kuda se moraju kretati i kojom najvećom mogućom brzinom, dok u izvedbi raskrižja izvan razine potrebno je prometnim znakovima samo informirati vozača o smjeru u kojem ga vodi određena izlazna rampa,
- školovanjem vozača - kako bi oni znali koristiti se raspoloživom infrastrukturom, te tako ne dovoditi sebe i druge sudionike u promet u nepoželjne situacije,
- informiranjem vozača - informiranjem o stanju na prometnicama, kako bi se oni mogli pripremiti na razne vremenske uvjete, na gužve na određenim prometnicama, te tako ih zaobići korištenjem drugih izlaznih rampi ili prometnica za dolazak do odredišta. Sustav dinamičkog informiranja putnika (engl. Dynamic Route Guidance Information Systems) ovdje se posebno ističe svojom funkcionalnošću. Njime se u slučaju nastanka incidenta i zagušenja na gradskoj autocesti može savjetovati vozačima nizvodno od izlazne rampe napuštanje prometnice, te tako upravljati prometnom potražnjom na izlaznoj rampi;
- GPS sustavom navigacije - koji navodi vozače najboljim mogućim putem do njihovog odredišta, kako bi se izbjeglo njihovo lutanje i iskorištavanje kapaciteta prometnog toka na mjestima na kojima to nije potrebno,
- upravljanje promjenjivim ograničenjem brzine - smanjenje brzine na gradskoj autocesti omogućuje smanjenje potrebnog sigurnosnog razmaka između vozila, što omogućuje gušći prometni tok. Upravljanje ograničenjem brzine vrši se na dijelu autoceste koji se nalazi prije izlazne rampe. Vrši se tako da se prometnim trakovima dodjeljuju različite brzine i namjene. Lijevi prometni trak se označava kao brzi trak, te je namijenjen brzom prolasku vozila, dok je skroz desni trak najsporiji, te je namijenjen za prometovanje vozila koja napuštaju gradsku autocestu prvom dostupnom izlaznom rampom. Desni trak se može još koristiti i za veća i sporija vozila, poput kamiona, kako ona ne bi nepotrebno usporavala ostala vozila na gradskoj autocesti;

- uz navedeno upravljanje na glavnom dijelu prometnog toka gradske autoceste, upravlja se prometom i na sporednim gradskim prometnicama, putem prometne signalizacije, kako bi te gradske prometnice bile raspoložive svojim kapacitetom i kako bi se odlijevanje s gradske autoceste moglo nesmetano odvijati,
- također kako bi se moglo sve navedeno provoditi i upravljati prometnicama, potrebno je poznavati prometni tok, zbog čega je važno redovito prikupljati i obrađivati prometne podatke u stvarnom vremenu.

Upravljanje samo priljevnim tokovima zbog povećanja prometne potražnje nije više dovoljno. Potrebno je upravljati odljevnim tokovima i prometom gradskih prometnica paralelnih s gradskom autocestom. Kako gradske prometnice imaju svoj prometni tok, a prometni tok s gradskih autocesta se odljeva na njih, spajanje ta dva prometna toka može dovesti do zagušenja na gradskoj prometnici. To zagušenje ako postane dovoljno veliko, može se prenijeti preko izlaznih rampi na gradsku autocestu kako prikazuju slike 6 i 7, te ondje stvoriti zagušenje i blokirati promet. Sve dok je suma $[q_{out}]$ gustoće prometnog toka na gradskoj prometnici $[q_{srf}]$ i gustoće odljavnog prometnog toka gradske autoceste $[q_{off}]$ manja od sveukupnog kapaciteta na priljevnom području Q_{op} , neće doći do zagušenja [11].



Slika 6: Prikaz standardne izlazne rampe gradske autoceste [11]



Slika 7: Prikaz prelijevanja zagušenja sa gradske prometnice na gradsku autocestu [11]

4. Implementirani algoritam upravljanja

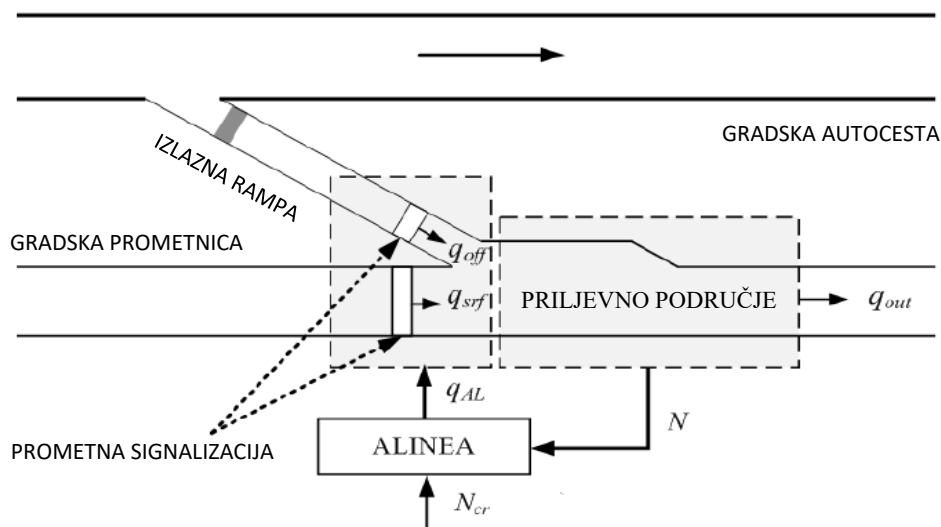
ALINEA je algoritam koji se zasniva na logičkoj strukturi povratne veze. Daje vrlo zadovoljavajuće rezultate prilikom upravljanja priljevnim i odljevnim prometnim tokovima, a implementirana je na prometnicama diljem svijeta [12]. Njegova je izvedba vrlo jednostavna.

Ukratko ALINEA tijekom upravljačkih intervala (T_c) dohvaća podatke o broju vozila (N) na priljevnom području u stvarnome vremenu. Uporabom tih podataka uz poznavanje kapaciteta priljevnog područja, ALINEA određuje koliko još vozila može pristupiti tom području, a da ne dođe do zagušenja (da vrijedi $N \approx N_{cr}$). Prilikom toga se koristi proporcionalno-integracijski (PI) regulator, pa se to može prikazati izrazom 5:

$$q_{AL}(k) = q_{AL}(k-1) - K_p[N(k) - N(k-1)] + K_I[\hat{N} - N(k)], \quad (5)$$

gdje je $k = 1, 2, \dots, n$ diskretan vremenski indeks; $q_{AL}(k)$ upravljani tok koji ulazi u priljevno područje (voz/h), a njime se upravlja u novoodređenom periodu k ; $K_p > 0$ i $K_I > 0$, koji označavaju regulacijske parametre proporcionalnih i integracijskih uvjeta djelovanja, čije su preporučene vrijednosti $K_p = 110$ i $K_I = 80$ [11]; $N(k)$ i $N(k-1)$ označavaju broj vozila na priljevnom području u trenutku $T_c(k)$ i $T_c(k-1)$; \hat{N} označava željeni broj vozila na priljevnom području, a njegova vrijednost može biti postavljena sve do kritične vrijednosti N_{cr} , kako bi se kapacitet prometnice sasvim iskoristio.

Kako prikazuje slika 8, ALINEA tijekom svakog upravljanog intervala uvodi prometni tok veličine q_{AL} , koristeći se izvršnim članovima poput semafora, te upravljani prometni tok raspoređuje ravnomjerno po svim upravljanim prometnicama (gradskim prometnicama i izlaznim rampama gradske autoceste), kako bi se iskoristio puni kapacitet upravljanog područja i izbjegla zagušenost prometnica [11].



Slika 8: Prikaz upravljanja prometom primjenom algoritma ALINEA [11]

Uzimajući u obzir odluke donesene od strane odabranih upravljačkih strategija, konačan prometni tok gradske prometnice $q_{srf}(k)$ i konačan prometni tok izlazne rampe gradske autoceste $q_{off}(k)$ biti će izračunati izrazima 6 i 7:

$$q_{srf}(k) = q_{AL}(k) \times \lambda_{srf} / \lambda_{ukupno}, \quad (6)$$

$$q_{off}(k) = \frac{q_{AL}(k) \times \lambda_{off}}{\lambda_{ukupno}}, \quad (7)$$

gdje λ_{srf} i λ_{off} označavaju broj prometnih traka gradske prometnice i izlazne rampe, dok je λ_{ukupno} sveukupan broj traka kojima se upravlja. Sve dok je vrijednost zauzeća O_{off} manja od granične vrijednosti O_{th} , ukupni prometni tok, suma q_{srf} i q_{off} jednak je ALINEA upravljanoj toku q_{AL} . Kada vrijednost zauzeća O_{off} prijeđe predodređenu graničnu vrijednost O_{th} , tada se povećava broj vozila u priljevnom području kako bi se spriječilo prelijevanje prometnog toka na gradsku autocestu. Povećani broj vozila u odljevnom toku stabilizira se uporabom ALINEA algoritma upravljanja odnosno načina upravljanja kada se zagušenje otkloni, te se održava N što je bliže moguće vrijednosti \hat{N} kako bi iskorištenost kapaciteta prometnice bila maksimalna moguća. Pri tome se algoritam upravljanja izvršava u prikladnom upravljačkom uređaju (obično zasnovan na mikroupravljaču) i koristi stvarnovremena mjerenja prometnih parametara.

Gore izračunatim prometnim tokovima upravlja se primjerenim izvršnim članovima kao što su semafori. Oni su postavljeni na kraju izlazne rampe i gradske prometnice, prije spajanja ovih dvaju prometnica, kako prikazuje slika 8. Postoje različite mogućnosti postavljanja upravljačkih uređaja, pa se tako signalni uređaji mogu postaviti na prolazak jednoga vozila po fazi zelenog svijetla (engl. one-car-per-green) ili više vozila po fazi zelenog svijetla (engl. n-cars-per-green), na provedbu cijelog signalnog ciklusa, na diskretne stope propuštanja vozila, itd. Kod ALINEA upravljanja provodi se politika korištenja cijelog signalnog ciklusa, s obzirom na to da je ovaj način više primjeren prometnoj signalizaciji u gradskim sredinama [11].

Radi lakše implementacije, u ovome radu se primjenjuje modificirani ALINEA algoritam. On funkcionira tako da na izlaznoj rampi i gradskoj prometnici ima postavljene detektore koji očitavaju podatke o gustoći vozila na tim prometnicama. Ovisno o tome na kojoj je prometnici veća gustoća, to jest nalazi se više vozila, upravljački uređaj propušta njen prometni tok da se priključi priljevnom području. Detektori svakih 30 sekundi izvlače ponovno podatke, te upravljački algoritam ponovno odlučuje kojoj će prometnici biti dodijeljeno zeleno svjetlo. Na taj način se oslobađa kapacitet najopterećenije prometnice i prenosi opterećenje na priljevno područje, zbog čega se na priljevnom području ostvaruje maksimalna moguća iskorištenost kapaciteta.

U konačnici za svaki signalni uređaj i njegov signalni ciklus T_c definiran je volumen vozila koji on može propustiti ovisno o duljini trajanja faze zelenog svjetla. Trajanje faze zelenog svjetla na gradskoj prometnici G_{srf} i na izlaznoj rampi G_{off} definirane su izrazima 8 i 9:

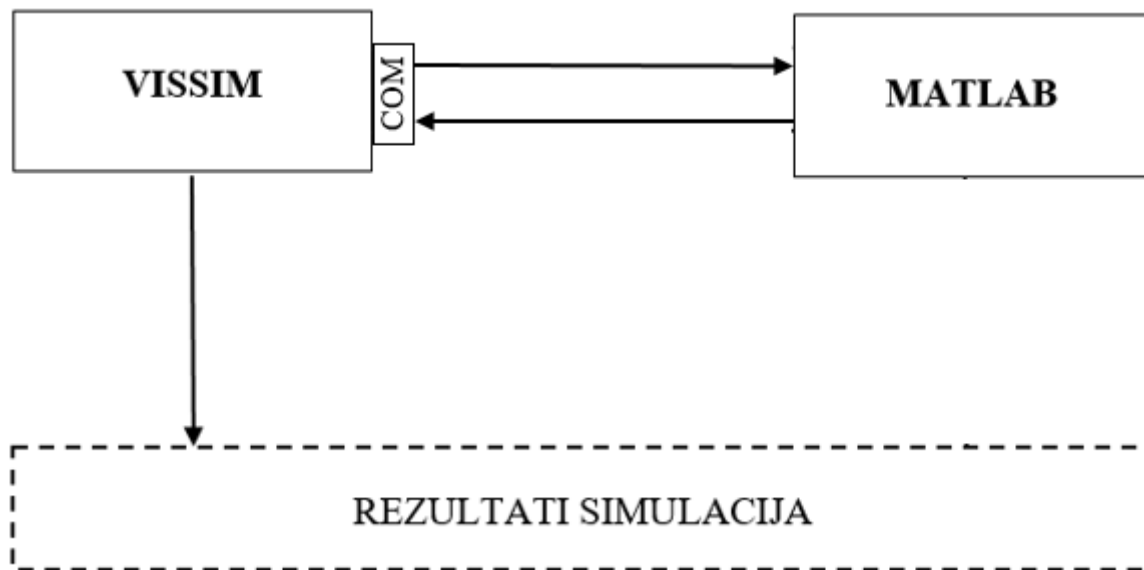
$$G_{srf}(k) = q_{srf}(k) \times \frac{T_c}{S_{srf} \times \lambda_{srf}}, \quad (8)$$

$$G_{off}(k) = q_{off}(k) \times \frac{T_c}{S_{off} \times \lambda_{off}}, \quad (9)$$

gdje su S_{srf} i S_{off} (izraženi u voz/h) volumeni zasićenja (po jednoj liniji) gradske prometnice i izlazne rampe. U konačnici izračunato trajanje faze zelenog svjetla se skraćuje ili produžuje ako prelazi za to predodređene granice $[G_{min}, G_{max}]$ [11].

5. Simulacijsko okruženje

Algoritmi za upravljanje signalnim uređajima na gradskoj prometnici i izlaznoj rampi napravljeni su u programskom paketu MATLAB. Model gradske autoceste, njene izlazne rampe i gradska prometnica izrađeni su u programskom paketu PTV VISSIM. Veza između ta dva programska paketa, potrebna za izračunavanje gustoće prometnih tokova, protoka vozila na pojedinim dijelovima prometnica, brzine vozila i duljine repova čekanja, te adaptivno mijenjanje signalnih planova ostvarena je korištenjem COM sučelja. Na slici 9 prikazan je shematski prikaz primijenjenog simulacijskog okruženja. Nadalje su u ovome poglavlju navedeni programski paketi pobliže su objašnjeni.



Slika 9: Shematski prikaz simulacijskog okruženja

5.1. VISSIM

U prometu postoje tri vrste simulacija:

- Mikroskopske - definiraju elemente prometne mreže do razine samoga vozila te njegovog ponašanja. Putanja i ponašanje vozača zasnovani su na okolnim vozilima. Ove simulacije služe za analizu manjih prometnih mreža;
- Makroskopske - koriste pravila mehanike fluida za modeliranje flote vozila, koriste se za simuliranje većih prometnih mreža;
- Mezoskopske - hibrid mikroskopskih i makroskopskih simulacija.

VISSIM (njem. Verkehr In Städten - SIMulationsmodell) je program tvrtke PTV (njem. Planung Transport Verkehr). On je mikroskopski simulacijski program, a sve simulacije cestovnog prometa ovoga rada odvijaju se u njemu. Zasniva se na Wiedemann-ovom psiho-fizičkom modelu koji opisuje ponašanje vozača u prometu. U VISSIM-u je moguće simulirati sljedeće prometne aspekte:

- semaforizirana i nesemaforizirana raskrižja,
- kružne tokove,
- javni prijevoz (tramvajski, autobusni i željeznički),
- pješake,
- autoceste,
- naplatne postaje itd.

VISSIM nudi mogućnost interakcije s drugim aplikacijama u svrhu razvijanja složenih sustava upravljanja prometom. Tako nije potrebno koristiti postojeće ugrađene programske mehanizme, nego se vezom VISSIM-a i drugih aplikacija mogu napraviti vlastiti sustavi za upravljanje prometom [13]. Neki od njih su:

- sustav za upravljanje promjenjivim ograničenjem brzine [14],
- sustav promjene redoslijeda i duljine trajanja pojedinih signalnih faza na semaforiziranim raskrižjima [13] [15],
- sustav za davanje prioriteta vozilima žurnih službi ili javnog gradskog prijevoza [16] [17],
- adaptivno upravljanje semaforima ovisno o stanju i uvjetima na prometnicama (prometnim parametrima), kao što je i primjer u ovome završnom radu.

5.2. MATLAB

MATLAB (engl. MATrix LABoratory) je program prvobitno izrađen za rješavanje matematičkih problema linearne algebre, a s vremenom je proširen u okolinu za razvijanje i implementaciju algoritama, analizu i vizualizaciju podataka. Uz sve te značajke MATLAB posjeduje i mogućnost interakcije s drugim programima i programskim jezicima. Njegov osnovni tip podataka je matrica s kompleksnim brojevima, pa u usporedbi s drugim programskim jezicima puno je lakše njime rješavati matematičke probleme. Sintaksa MATLAB koda omogućava lakše zapisivanje matematičkih formulacija. U kombinaciji s matricom kao tipom podatka omogućava tako elegantnije računanje za razliku od drugih programskih jezika, onih zasnovanih na manipulaciji skalarnim vrijednostima poput C++-a ili Fortran-a. Zbog toga što MATLAB služi i kao tumač kôda, izvođenje programa je relativno sporo, ali je pogodan za brzo ispitivanje raznih koncepata. U njega ugrađeni alat za uređivanje i ispravljanje pogrešaka (engl. debugging tool) vrlo je učinkovit, pa je zbog toga i samo programiranje učinkovitije. Uz osnovno programsko okruženje postoji i niz programskih alata (engl. toolboxes) koji se mogu koristiti i koji nadograđuju funkcionalne značajke ovoga programa [13].

5.3. Povezivanje VISSIMA i MATLABA pomoću COM sučelja

Komunikacija između VISSIM-a i MATLAB-a u ovome radu ostvarena je uporabom COM (engl. Component Object Model) sučelja. COM je ustvari dio VISSIM-a, točnije sučelje pomoću kojeg on ostvaruje interakciju s drugim klijentima. Kao što je iz imena vidljivo COM sučelje je objektno orijentirano sučelje za programiranje aplikacija. Njegova glavna značajka je mogućnost implementacije objekata neovisno o vrsti programskog jezika. Tako se kreirani objekt može koristiti u različitom programskom okruženju od onoga u kojem je stvoren [18].

U ovome radu ostvaruje se veza VISSIM-a kao poslužitelja s MATLAB-om kao klijentskim programom. Na početku izvođenja MATLAB kôda ostvaruje se veza s prometnim modelom u VISSIM-u i inicijalizira se početno stanje, te nakon toga pokreće simulacija. Tijekom simulacije vrši se konstanta razmjena podataka između ova dva programa, koja se zaustavlja kada VISSIM isporuči podatke za obradu simulacije kao što je prikazano na slici 9.

6. Rezultati simulacije

U ovome poglavlju prikazani su rezultati triju metoda upravljanja prometnim tokom izlazne rampe gradske autoceste i gradske prometnice. Izvođenje ovih metoda izvršeno je na dvofaznom izoliranom raskrižju. Spomenute tri metode dijele se na:

- neupravljanu – nema semafora na raskrižju ovih dvaju prometnica, gradska prometnica definirana je kao cesta s prednošću prolaska, a ne izlaznu rampu je postavljen pripadajući znak izračite naredbe;
- upravljanje ustaljenom signalizacijom – dvije unaprijed definirane faze, svaka sa svojom signalnom grupom, jednom za izlaznu rampu, drugom za gradsku prometnicu;
- adaptivno upravljano signalizacijom – duljina pojedine faze, te faze međusobno se mijenjaju ovisno o prometnim parametrima na spomenute dvije prometnice.

Rezultati simulacije prikazuju prometne parametre za svaku od navedenih metoda, kako bi se jasnije predočila razlika između pojedinih načina upravljanja i analiziralo najbolje rješenje za simuliranu prometnu situaciju.

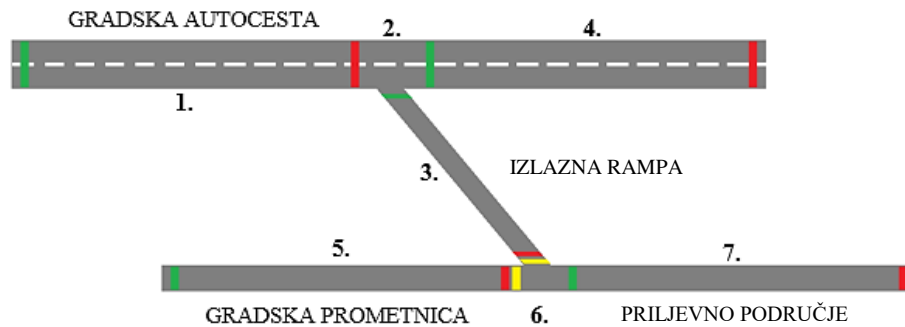
6.1. Model i postavke

Model gradske autoceste, njene izlazne rampe i uz autocestu paralelne, gradske prometnice i priljevnog područja prikazan slikom 10 izrađen je u programu VISSIM. Prema slici 10 ovaj simulacijski model sadrži dvije vrste detektora, one ulazne – označene zelenom bojom i one izlazne – označene crvenom bojom. Prostori između detektora nazivaju se ćelije, a model je podijeljen na sedam ćelija koje su na slici 10 označene rednim brojevima. Za simulaciju su nam bitne ćelije: ona na početku gradske autoceste, ona na izlaznoj rampi, ona na početku gradske prometnice i najbitnija, na njenom kraju, nakon spoja s izlaznom rampom, koja se još naziva priljevno područje. U tablici 1 prikazane su duljine ćelija, koje su bitne za matematičke izračune iz kojih se dobivaju rezultati potrebni za provođenje analize simulacijskog modela.

Tablica 1: Prikaz duljina ćelija simulacijskog modela

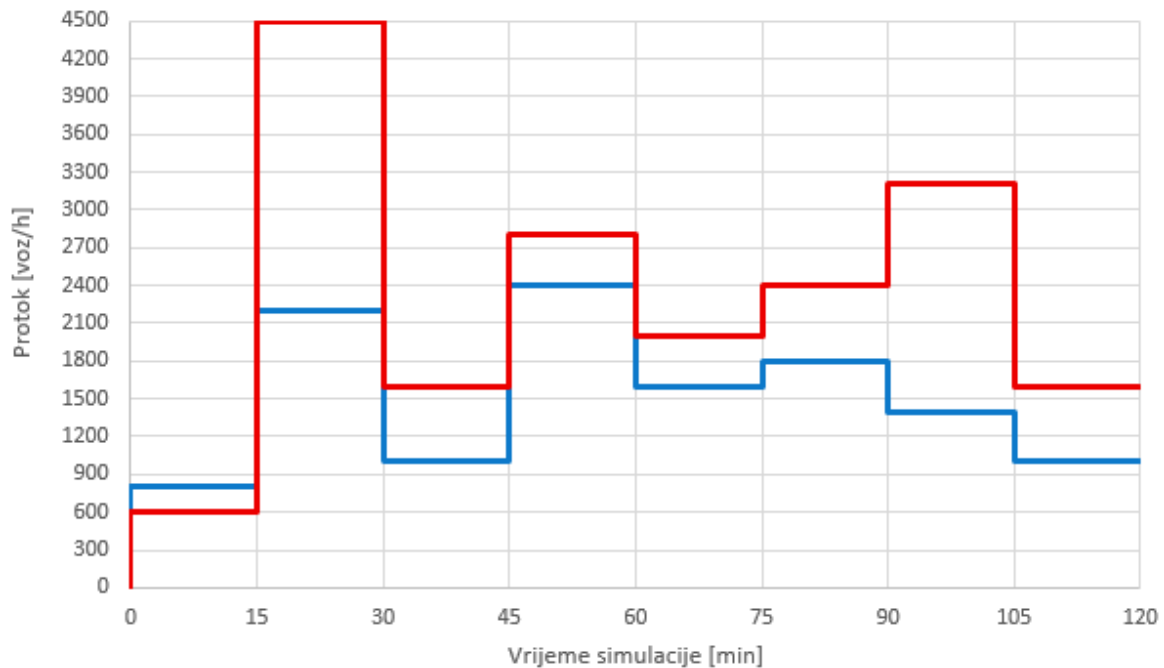
| Broj ćelije | 1. | 2. | 3. | 4. | 5. | 6. | 7. |
|--------------------|-------|-----|-----|-----|-----|----|-----|
| Duljina ćelije [m] | 1.000 | 141 | 300 | 500 | 500 | 40 | 500 |

Uz detektore simulacijski model sadrži i semafore kod metode upravljanja ustaljenom signalizacijom i adaptivnog upravljanja. Semafori su na slici 10 označeni žutom bojom. Kod metode u kojoj se ne vrši upravljanje, razlika je što se na gradskoj prometnici nema semafora, a na izlaznoj rampi se na mjestu semafora nalazi znak izričite naredbe – nailazak na cestu s prednošću prolaza.



Slika 10: Prikaz simulacijskog modela, te raspored detektora i semafora

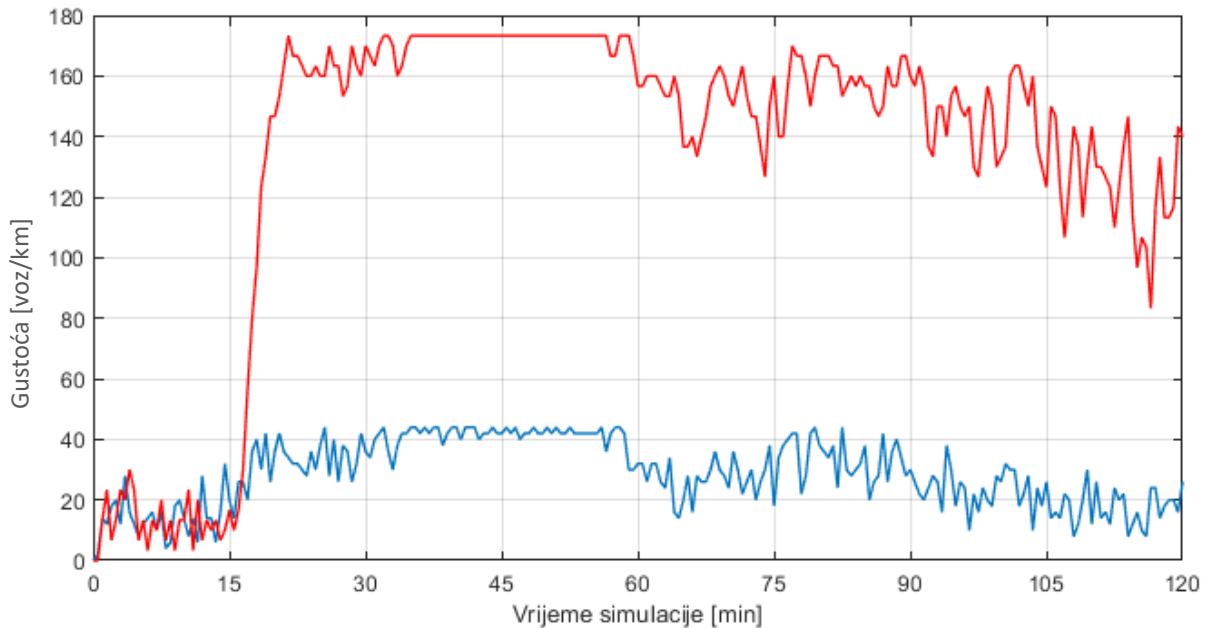
Brzine na prometnicama su različite, ograničenje brzine na gradskoj autocesti je 130 km/h, a ograničenja brzine na izlaznoj rampi i gradskoj prometnici iznose 60 km/h. Volumeni vozila koja ulaze na gradsku autocestu i gradsku prometnicu isti su u sve tri metode, te su postavljeni da budu stohastični, kako bi bili što bliži stvarnome stanju u prometu. S obzirom na to da je vrijeme trajanja simulacije 2 sata, kako bi se što jasnije predočile promjene do kojih dolazi tijekom vršnih sati volumen na prometnicama se mijenja svakih 15 minuta, a njegova raspodjela prikazana je na grafikonu 2.



Grafikon 2: Raspodjela volumena gradske prometnice (plava) i izlazne rampe (crvena) za vrijeme trajanja simulacije

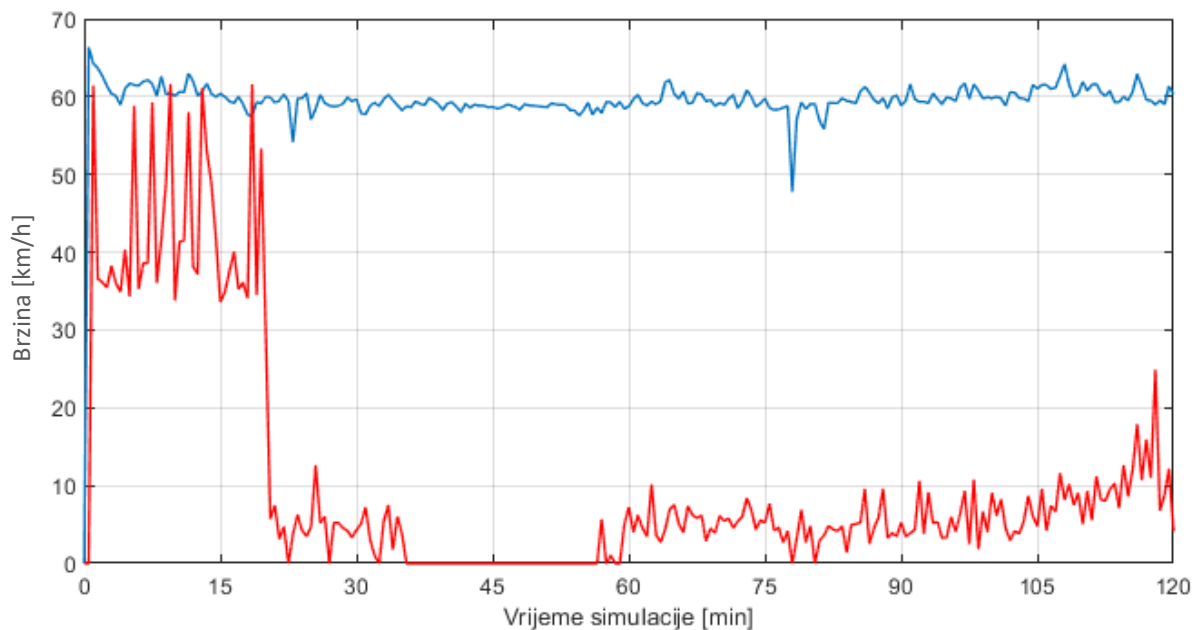
6.2. Rezultati prve metode – neupravljeni prometni tok

Kod prvog slučaja, to jest metode u kojoj se ne upravlja prometom, dokle god je potražnja na priljevnom području, gradskoj prometnici i izlaznoj rampi niska, prometnice su u mogućnosti zadovoljiti je svojim kapacitetom. Međutim takvo stanje zadržava se samo do 15-te minute simulacije. Broj vozila na gradskoj prometnici i izlaznoj rampi tada kao na grafikonu 2 krene rasti, što se vidi i prema gustoći vozila na prometnicama iz grafikona 3.



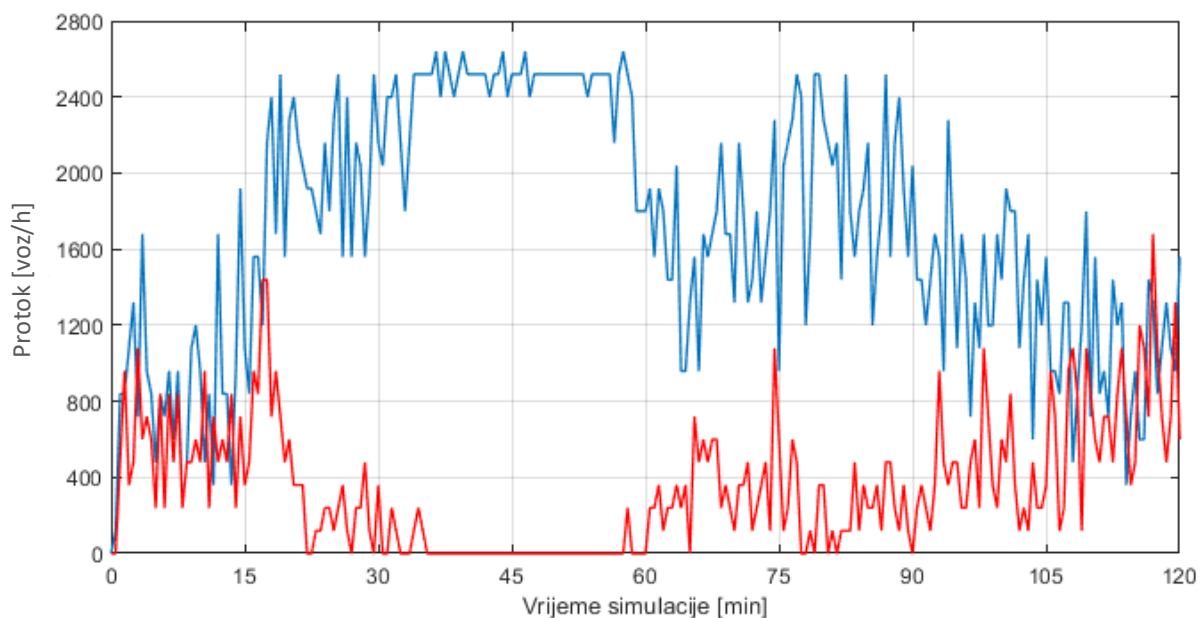
Grafikon 3: Gustoća vozila na gradskoj prometnici (plava) i izlaznoj rampi (crvena)

Pri porastu broja vozila na gradskoj prometnici, s obzirom na to da je ona cesta s prednošću prolaska, ne dolazi do smanjenja brzina, jer sva vozila istoga trenutka budu poslužena, što je vidljivo iz grafikona 4. U istome trenutku brzina na izlaznoj rampi počinje padati kao na grafikonu 4, a vozila se počinju zaustavljati ispred raskrižja jer ne uspijevaju doći na red za posluživanje.



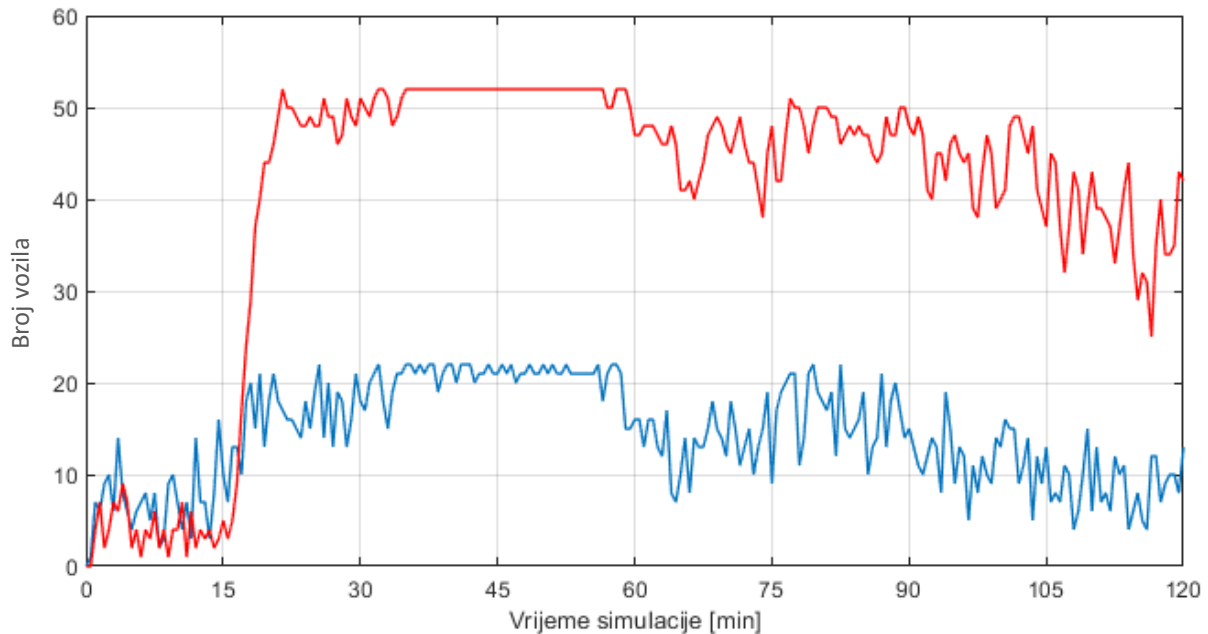
Grafikon 4: Brzina vozila na gradskoj prometnici (plava) i izlaznoj rampi (crvena)

Kako brzina na gradskoj prometnici ostaje ista, a gustoća vozila se povećava, tako broj vozila koja prođu ovom prometnicom, to jest njen protok počinje rasti, kao što je vidljivo iz grafikona 5. S obzirom na to da se na izlaznoj rampi vozila počinju zaustavljati, njena protočnost se naglo smanjuje prema grafikonu 5.



Grafikon 5: Protok vozila na gradskoj prometnici (plava) i izlaznoj rampi (crvena)

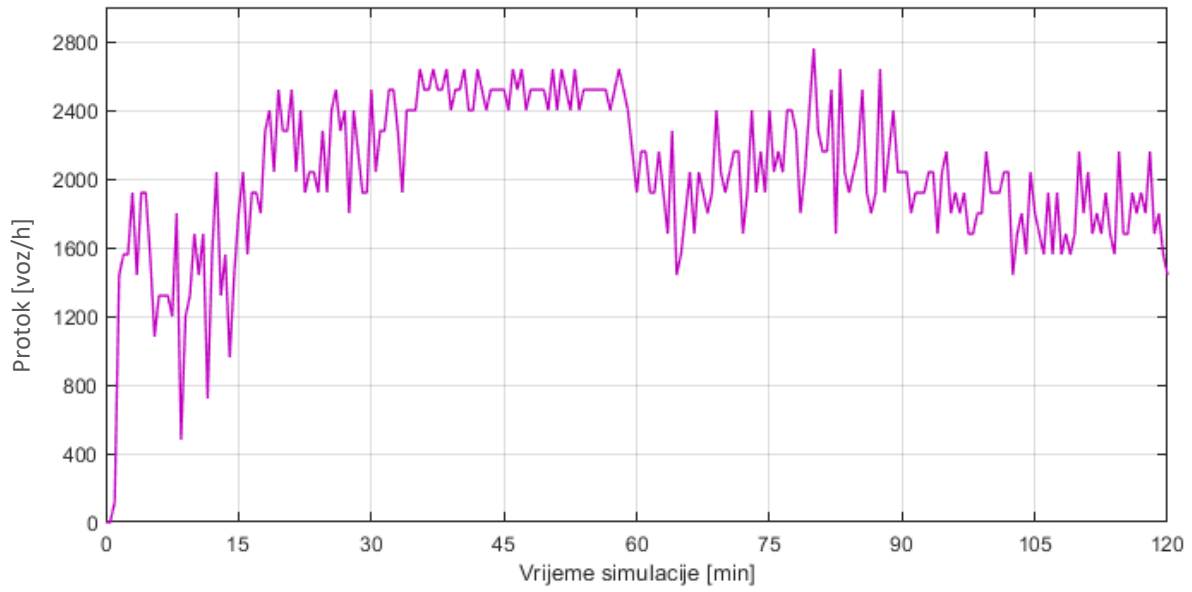
U 20-toj minuti simulacije, grafikon 3 prikazuje već znatni porast gustoće vozila na izlaznoj rampi, te ona raste skoro do 180 vozila po kilometru prometnice. Tolika količina vozila dovodi do nastanka zagušenja na prometnici, te se počinju stvarati repovi čekanja kao što je vidljivo iz grafikona 6.



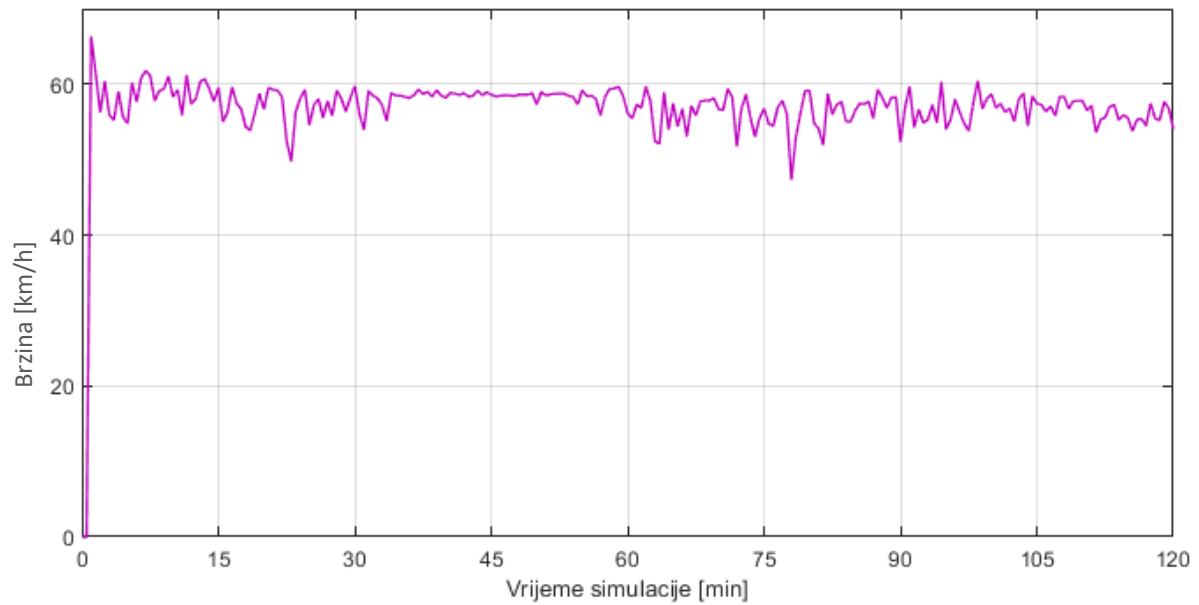
Grafikon 6: Duljina repova čekanja na gradskoj prometnici (plava) i izlaznoj rampi (crvena)

Ovi repovi čekanja dovode do prelijevanja prometnog toka nazad na gradsku autocestu. Kako se izlazna rampa ne uspijeva isprazniti ti repovi čekanja stvaraju zagušenje na gradskoj autocesti tijekom cijelog trajanja vršnog opterećenja, koje traje do 60-te minute simulacije.

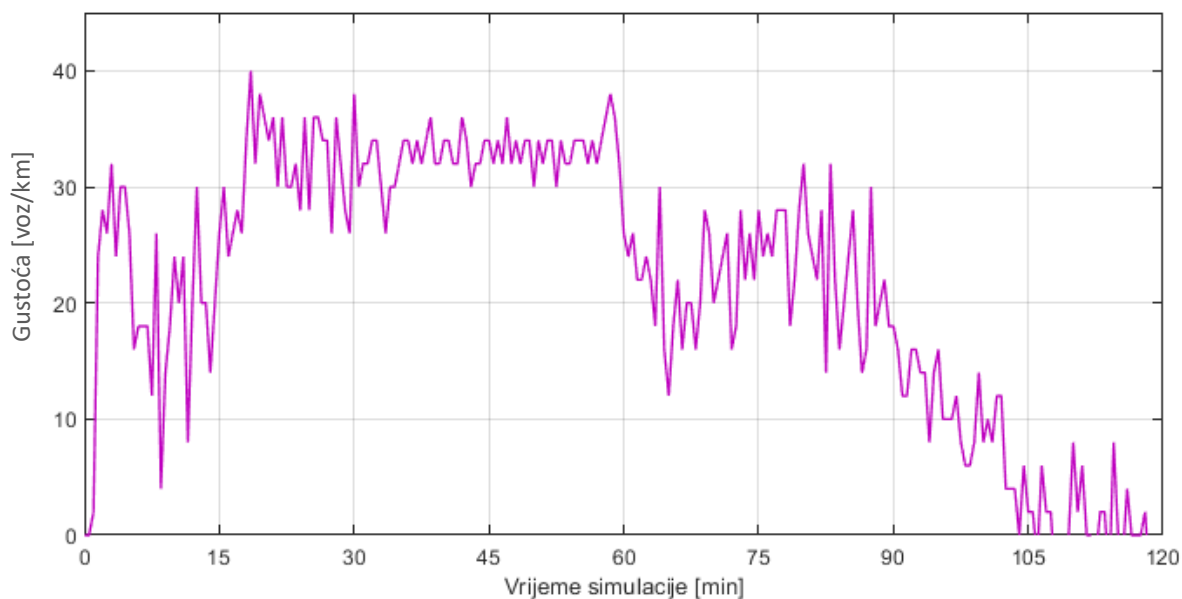
U međuvremenu na gradskoj prometnici nema velikih repova čekanja, brzina se ne smanjuje i protočnost se povećava, zbog čega su na priljevnom području dobiveni rezultati koji daju lažnu sliku o stanju sustava. Rezultati pokazuju kako je protočnost maksimalna koju ta prometnica može doseći, te njome prolazi oko 2.600 vozila po satu prema grafikonu 7. Brzina također ostaje prema grafikonu 8 vrlo blizu uz gornju dopuštenu granicu, a gustoća vozila se kreće oko stabilnih 40 vozila po kilometru prometnice kao na grafikonu 9.



Grafikon 7: Protok vozila na priljevnom području



Grafikon 8: Brzina vozila na priljevnom području



Grafikon 9: Gustoća vozila na priljevnom području

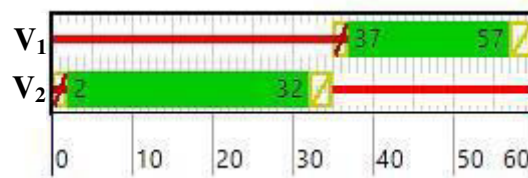
Nakon 60-te minute simulacije prema grafikonu 2 prometna potražnja počinje se smanjivati, a s njome i opterećenje na prometnice. Vozila na izlaznoj rampi napokon uspijevaju doći na red za posluživanje, što uočavamo porastom brzine na grafikonu 4 i smanjenjem repova čekanja na grafikonu 6. Kako se vozila sa izlazne rampe počinju priključivati priljevnom području, počinju se na grafikonu 5 uočavati oscilacije u protočnosti gradske prometnice i izlazne rampe. Kako njihova protočnost tijekom vremena slabije potražnje oscilira, s obzirom da njihova vozila sada izmjenično pristupaju priljevnom području, lagano oscilira i brzina priljevnog područja prema grafikonu 8.

Prema grafikonu 2 u 90-oj minuti ponovno dolazi do kratkotrajnog vršnog opterećenja u trajanju od 15 minuta, koje s obzirom na svoju duljinu u odnosu na prošlo opterećenje ne dovodi do velikih zagušenja. To ukazuje da ova metoda može podnijeti veću potražnju vozila ako ona traje kratko vrijeme.

Pri samome kraju simulacije, tijekom zadnjih 15 minuta protoci gradske prometnice i izlazne rampe se izjednačavaju prema grafikonu 5, a protok vozila na priljevnom području se prema grafikonu 7 smanjuje. Gustoća vozila se smanjuje na svim prometnicama, a s njome i repovi čekanja, što ukazuje na stabilizaciju stanja u prometu.

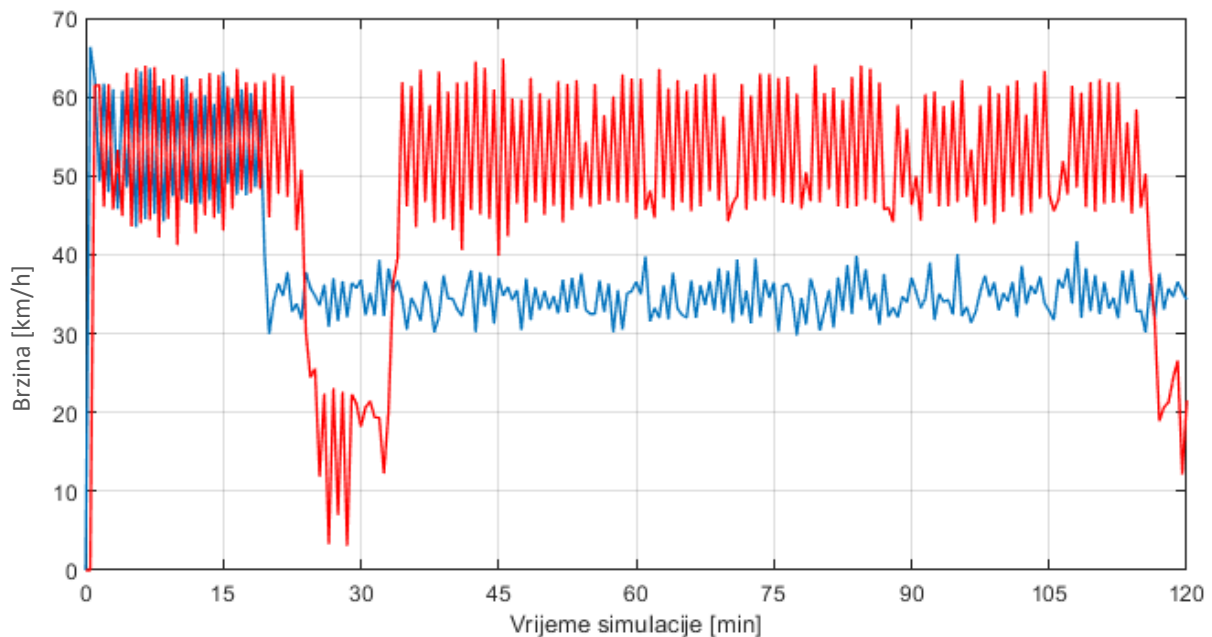
6.3. Rezultati druge metode – upravljanje nepromjenjivom signalizacijom

U drugoj metodi upravljanje se vrši semaforima postavljenim na kraju izlazne rampe i gradske prometnice, prije spajanja ovih dvaju prometnica, kao što prikazuje slika 10. Njihov signalni plan postavljen je na trajanje ciklusa od 60 sekundi, te je podijeljen na dvije signalne grupe prema slici 11. Prva signalna grupa V_1 odnosi se na izlaznu rampu, te je trajanje zelenog svijetla postavljeno na 20 sekundi, nakon kojeg slijedi zaštitno žuto svijetlo u trajanju tri sekunde, crveno svijetlo u trajanju 35 sekundi, te zaštitno crveno-žuto svijetlo u trajanju dvije sekunde. Zaštitno međuvrijeme između dviju signalnih grupa V_1 i V_2 tako iznosi pet sekundi, a ono je prilagođeno kako bi se vozila u pokretu mogla sigurno zaustaviti prije nego li druga vozila krenu. Druga signalna grupa V_2 odnosi se na gradsku prometnicu, a na njoj zeleno svijetlo traje 30 sekundi, zaštitno žuto svijetlo tri sekunde, crveno svijetlo 25 sekundi, te crveno-žuto zaštitno svijetlo dvije sekunde.



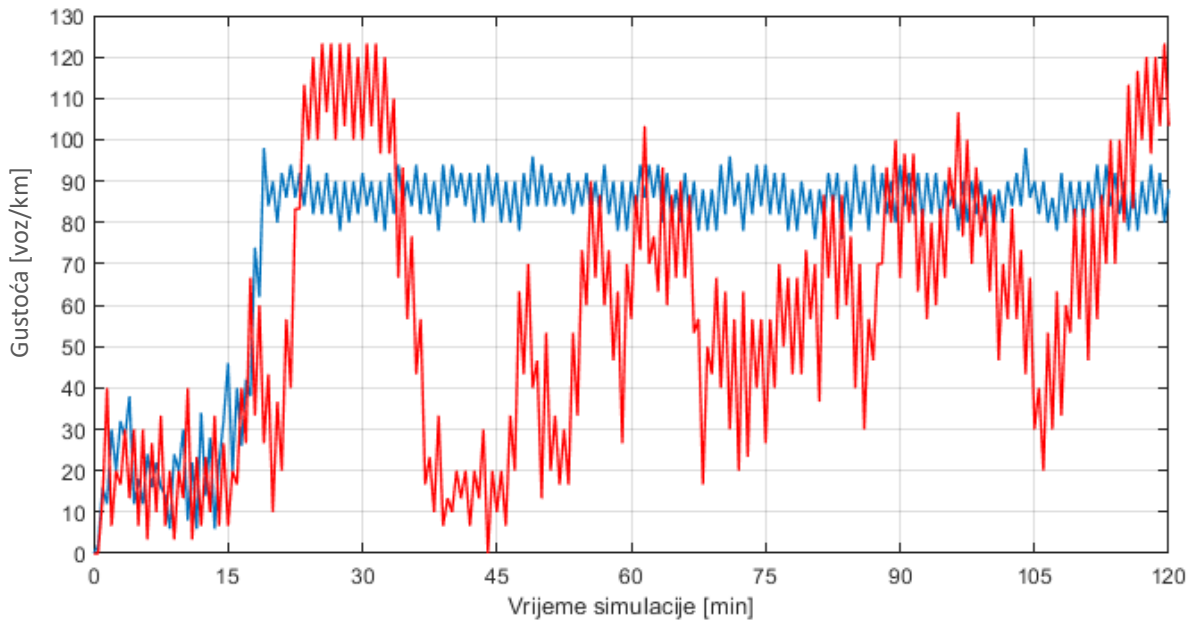
Slika 11: Signalni plan promatranog raskrižja

U prvih 15 minuta simulacije, dok je potražnja još uvijek niska, sva vozila uspijevaju biti poslužena i to ravnomjerno na obje prometnice, što je vidljivo iz grafikona 10 i načina na koji istovremeno osciliraju brzine na prometnicama.



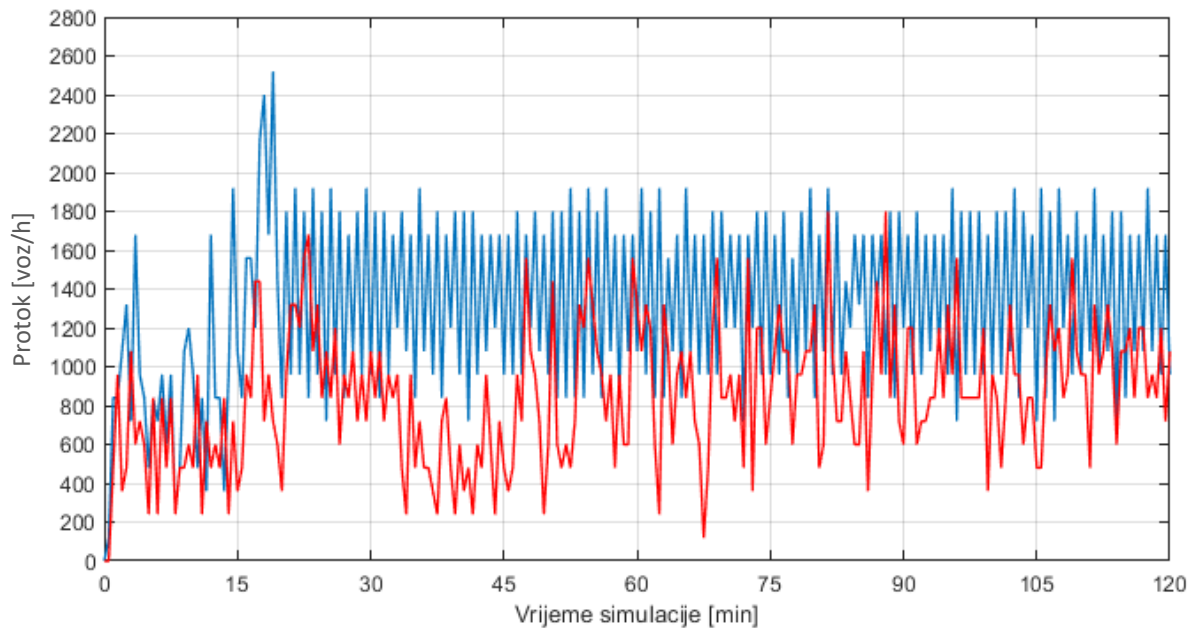
Grafikon 10: Brzina vozila na gradskoj prometnici (plava) i izlaznoj rampi (crvena)

Nakon 15-te minute, prema grafikonu 2 potražnja počinje rasti, te se penje naglo do razine vršnog opterećenja. To je vidljivo iz grafikona 11 i gustoće vozila na prometnicama, koja sve više raste.



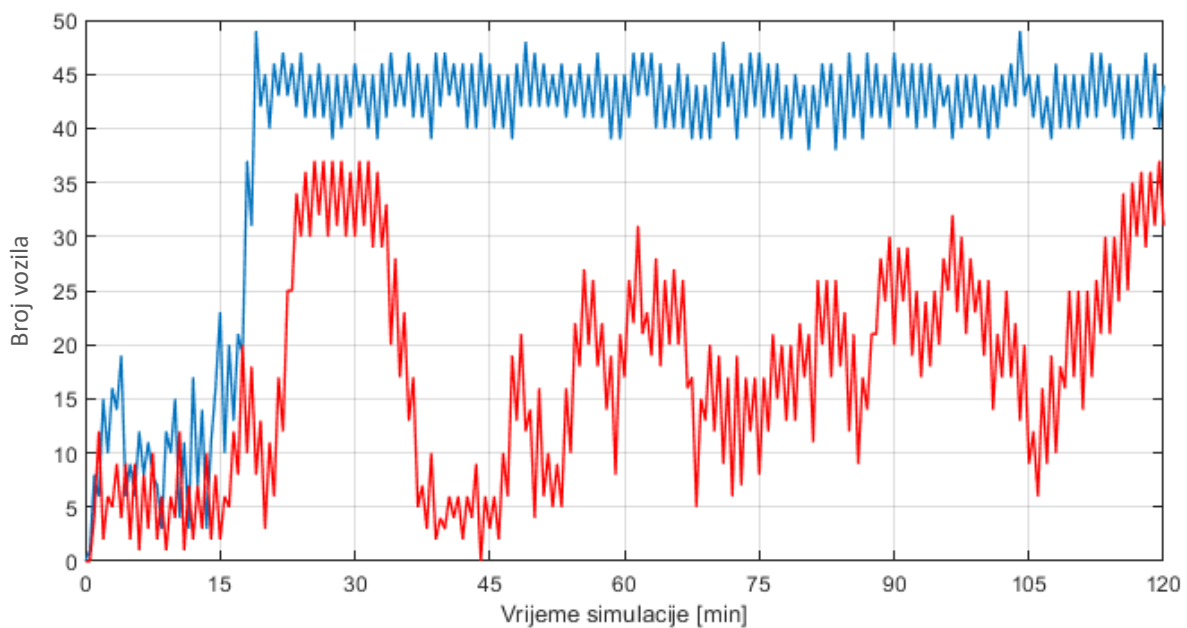
Grafikon 11: Gustoća vozila na gradskoj prometnici (plava) i izlaznoj rampi (crvena)

U 30-toj minuti na izlaznoj rampi gustoća doseže maksimalnu vrijednost, nešto višu od 120 vozila po kilometru. Zbog vršnog opterećenja od 4.500 voz/h brzina vozila već oko 20-te minute počinje padati prema grafikonu 10. Vozila se počinju zaustavljati i protočnost na ovoj prometnici pada prema grafikonu 12. Sa zaustavljanjem vozila na prometnicama i padom protočnosti dolazi do nastanka repova čekanja kako je vidljivo na grafikonu 13. Repovi čekanja na izlaznoj rampi prelijevaju se tijekom vremena vršnog opterećenja, između 20-te i 30-te minute, na gradsku autocestu, što dovodi do nastanka zastoja i zagušenja na ovoj prometnici. Nakon što vršno opterećenje od 4.500 voz/h na izlaznoj rampi prođe, stanje se počinje polako popravljati, te se repovi čekanja smanjuju, a protok povećava. Iako nakon 30-te minute dolazi do stabilizacije stanja na prometnicama, gradska autocesta je još do otprilike 35-te minute zagušena.



Grafikon 12: Protok vozila na gradskoj prometnici (plava) i izlaznoj rampi (crvena)

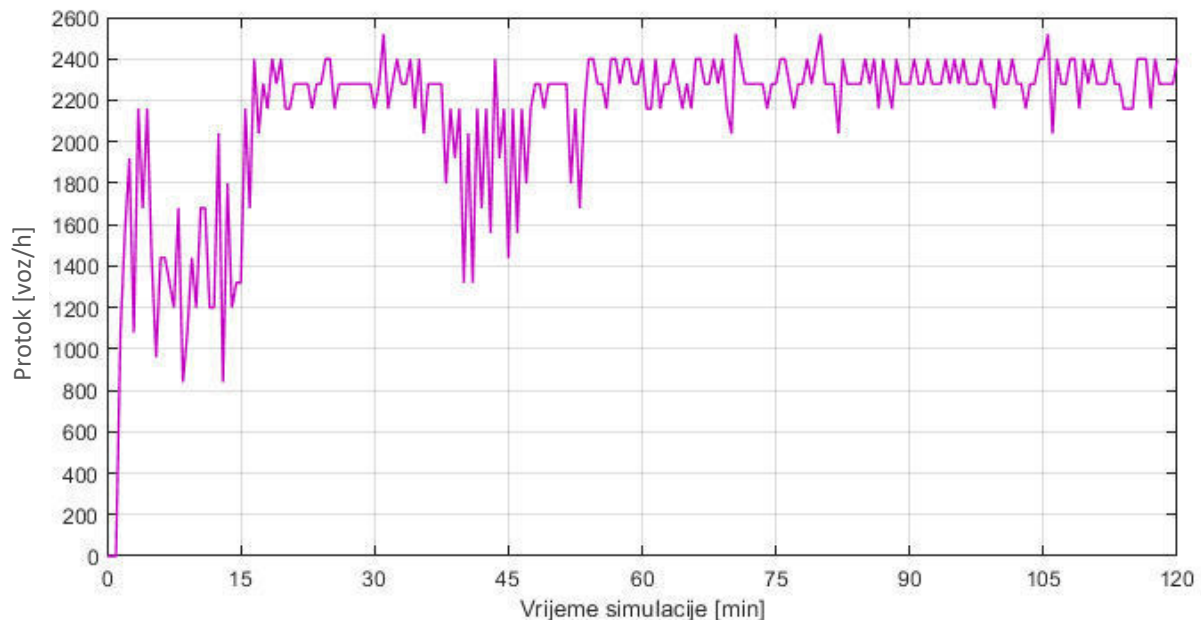
Protok vozila na izlaznoj rampi doseže najnižu vrijednost između 30 i 45 minute, nakon što se kapacitet ove prometnice prepunio, a one se tek kreće prazniti, pa vozila stoje i čekaju da dođu na red za posluživanje. Nakon 45-te minute i što se protočnost povećava, više ne nastaju veliki repovi čekanja koji dovode do prelijevanja na gradsku autocestu, te kapacitet izlazne rampe do 105-te minute uspješno zadovoljava prometnu potražnju. Nakon 105-te minute opterećenje ponovno raste, te volumen od 3.200 vozila uzrokuje ponovno prelijevanje na gradsku autocestu.



Grafikon 13: Duljina repova čekanja na gradskoj prometnici (plava) i izlaznoj rampi (crvena)

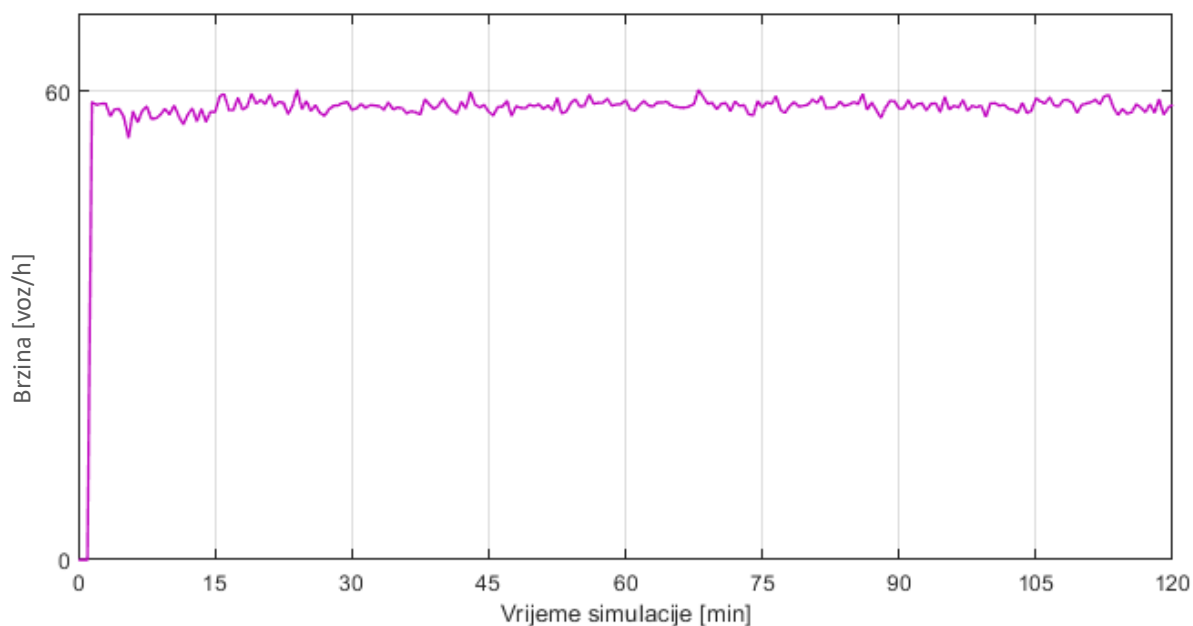
Za razliku od izlazne rampe, zbog kontinuiranog i manjeg opterećenja, stanje na gradskoj prometnici je stabilnije. Na njenim grafovima ne dolazi do nekih značajnih promjena. Prosječna brzina vozila na grafikonu 10 kreće se između 30 i 40 km/h, gustoća vozila na grafikonu 11 kreće se između 75 i 95 voz/km, a repovi čekanja su između 40 i 45 vozila prema grafikonu 13, što karakterizira vožnju u koloni koja traje do završetka simulacije. Protočnost zato i nije baš visoka, maksimalna vrijednost koju doseže nakon 20-te minute je prema grafikonu 12 oko 1.900 voz/h, a pada vrlo nisko, do oko 800 voz/h. To se događa jer s izlaznom rampom dijeli pristup priljevnom području.

Kako se tako odvija upravljanje prometnim tokom, priljevno područje je stalno posluživano velikom količinom vozila, jer dok se jedna prometnica prazni, na drugoj se nakupljaju vozila. Zbog toga se dobiva vrlo visoka protočnost na priljevnom području kao što je vidljivo prema grafikonu 13, između 2.200 i 2.400 voz/h.



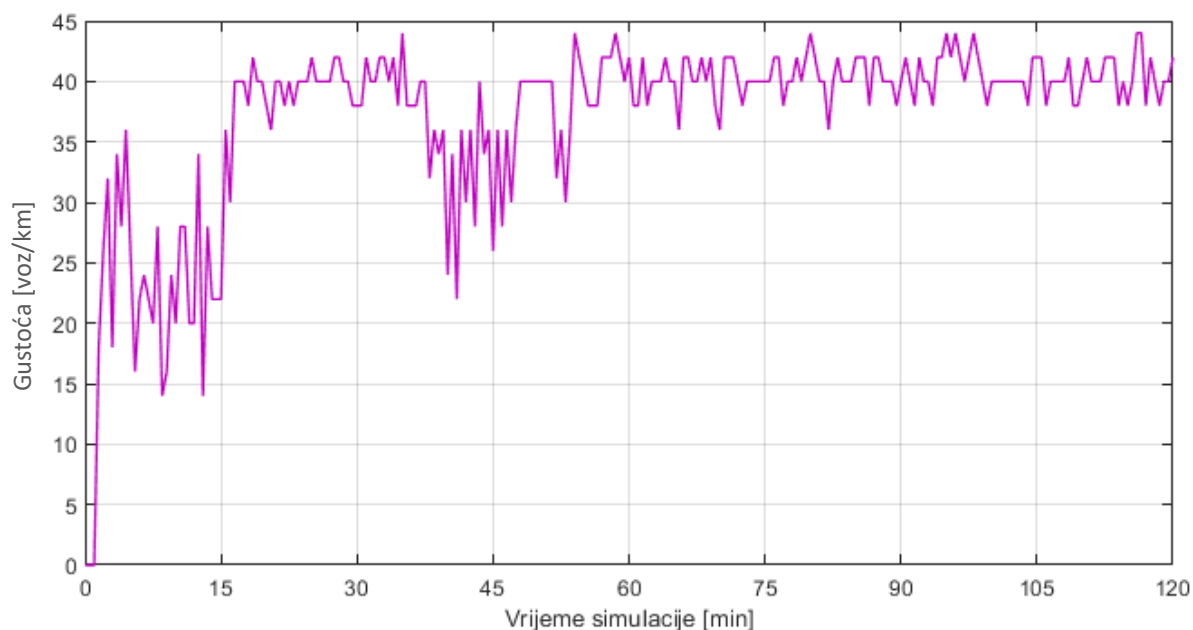
Grafikon 14: Protok vozila na priljevnom području

Brzina vozila je tijekom trajanja cijele simulacije na ovome području blizu ograničenju brzine od 60 km/h, kao što je vidljivo na grafikonu 15. Takvi su rezultati dobiveni jer je sigurnosni razmak između dvaju signalnih grupa mali, te nakon što s jedne prometnice prestanu pristizati vozila, s druge kreću priključivati se prometu.



Grafikon 15: Brzina vozila na priljevnom području

S obzirom na to da ne dolazi do velikih promjena brzine na ovome području, grafikoni gustoće i protoka vozila vrlo su slični. Iako je protočnost vozila na priljevnom području visoka, gustoća vozila zbog visoke brzine prema grafikonu 16 ne dostiže velike brojke.

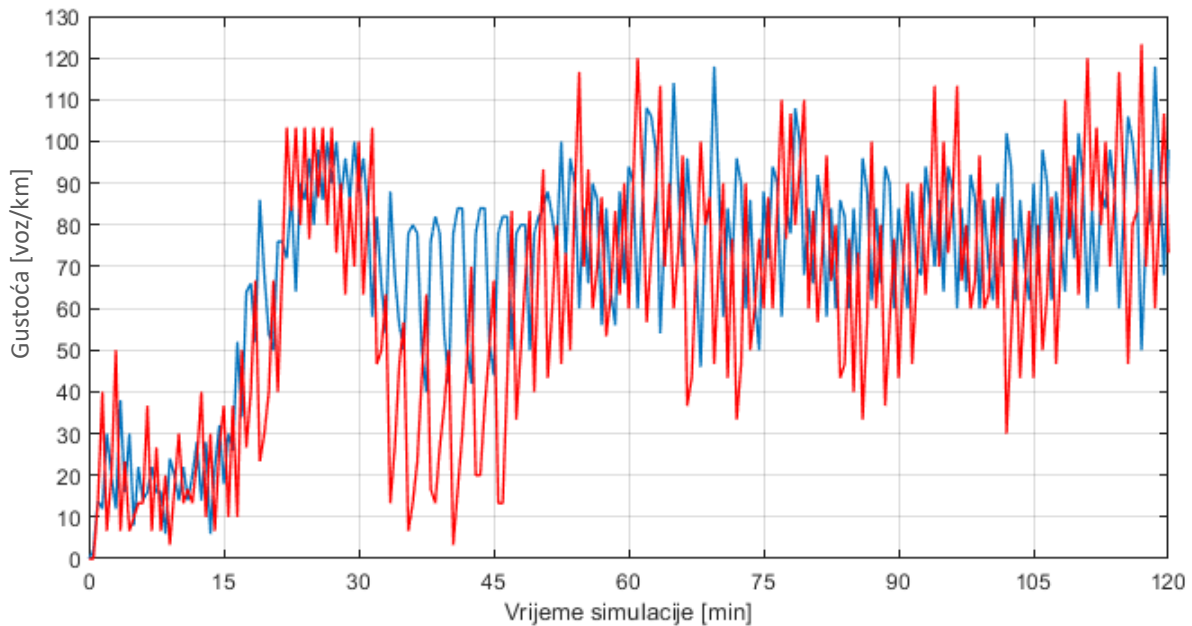


Grafikon 16: Gustoća vozila na priljevnom području

Ova metoda s obzirom na svoje rezultate pokazuje kako uspijeva dobro zadovoljiti prometnu potražnju, osim ako ona ne postiže vrijednosti veće od 3.000 voz/h, jer tada ne dolazi do prelijevanja prometnog toka na gradsku autocestu, što se želi izbjeći u svakoj prometnoj situaciji.

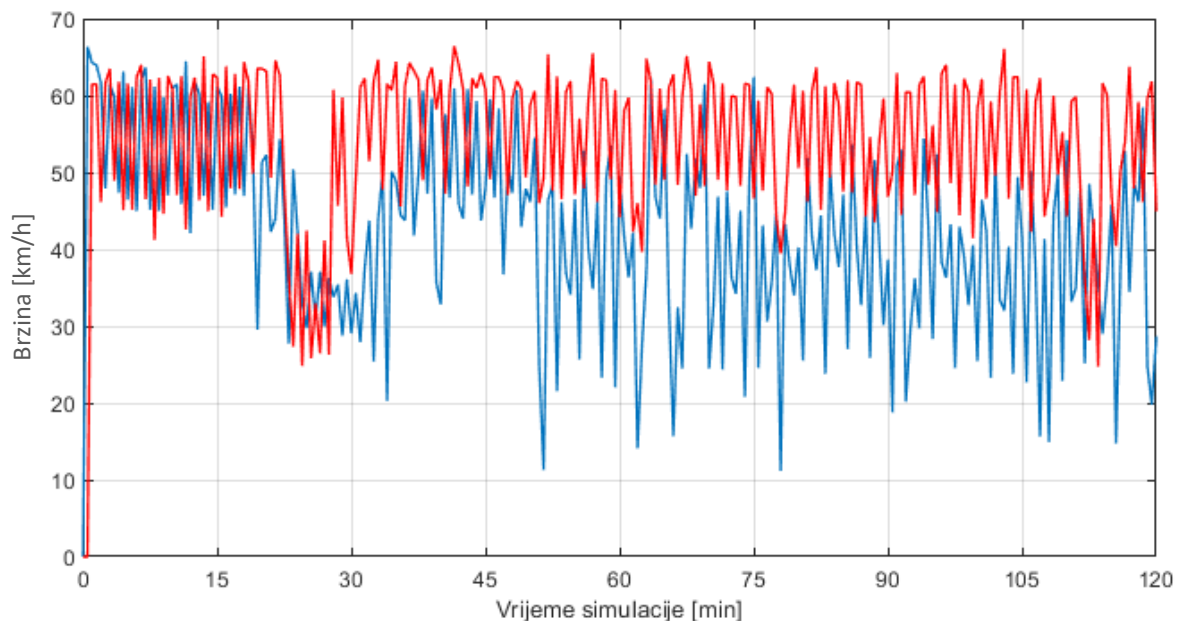
6.4. Rezultati treće metode – adaptivno upravljanje semaforima

U ovoj metodi primjenjuje se ALINEA algoritam za upravljanje prometnom signalizacijom. Algoritam upravlja prometom signalizacijom tako da odlučuje koliko će vozila s koje prometnice pristupiti priljevnom području, produžujući trajanje zelenog svjetla ili dodjeljujući prednost prolaska vozilima druge prometnice. Takvim upravljanjem u stvarnome vremenu ovisno o prometnim parametrima upravlja se prometnim tokom, pa je zato upravljanje i bolje prilagođeno promjenama u potražnji.



Grafikon 17: Gustoća vozila na gradskoj prometnici (plava) i izlaznoj rampi (crvena)

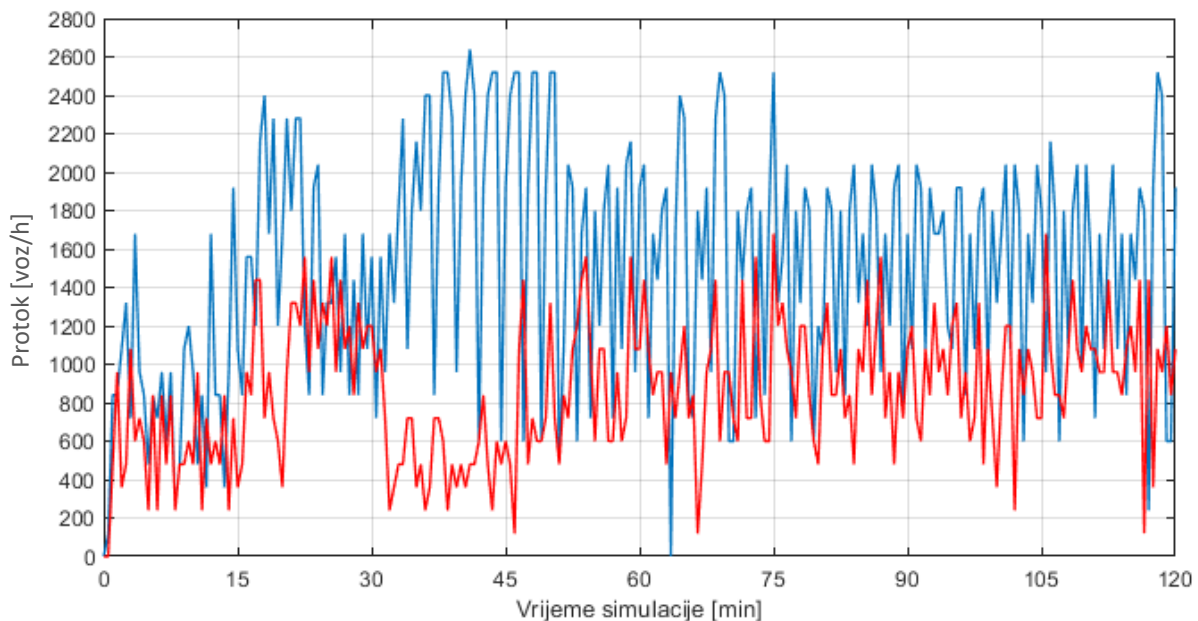
Grafikon 17 prikazuje promjene u gustoći tijekom trajanja simulacije. Kako algoritam upravljanja ovisno o količini vozila na prometnici odlučuje koja vozila će imati pravo priključiti se priljevnom području, grafovi gradske prometnice i priljevnog područja se približno preklapaju. Razlika između njih je uvjetovana time što na izlaznu rampu pristiže veći volumen vozila, pa su oscilacije između minimalne i maksimalne vrijednosti veće. Prema grafikonu gustoće vidljivo je da ova metoda bolje zadovoljava nagle promjene u potražnji, nego što zadovoljava kontinuirano opterećenje. To se vidi time što gustoća vozila po kilometru pri prestanku trajanja vršnog opterećenja brzo pada, što se događa nakon 30-te minute kada volumen vozila, prema grafikonu 2, na izlaznoj rampi padne s 4.500 voz/h na 2.600 voz/h. Sa smanjenjem opterećenja na jednoj prometnici, smanjuje se i gustoća vozila na drugoj prometnici, jer se upravljanje ne bavi više samo opterećenom prometnicom, već se može baviti i drugom prometnicom.



Grafikon 18: Brzina vozila na gradskoj prometnici (plava) i izlaznoj rampi (crvena)

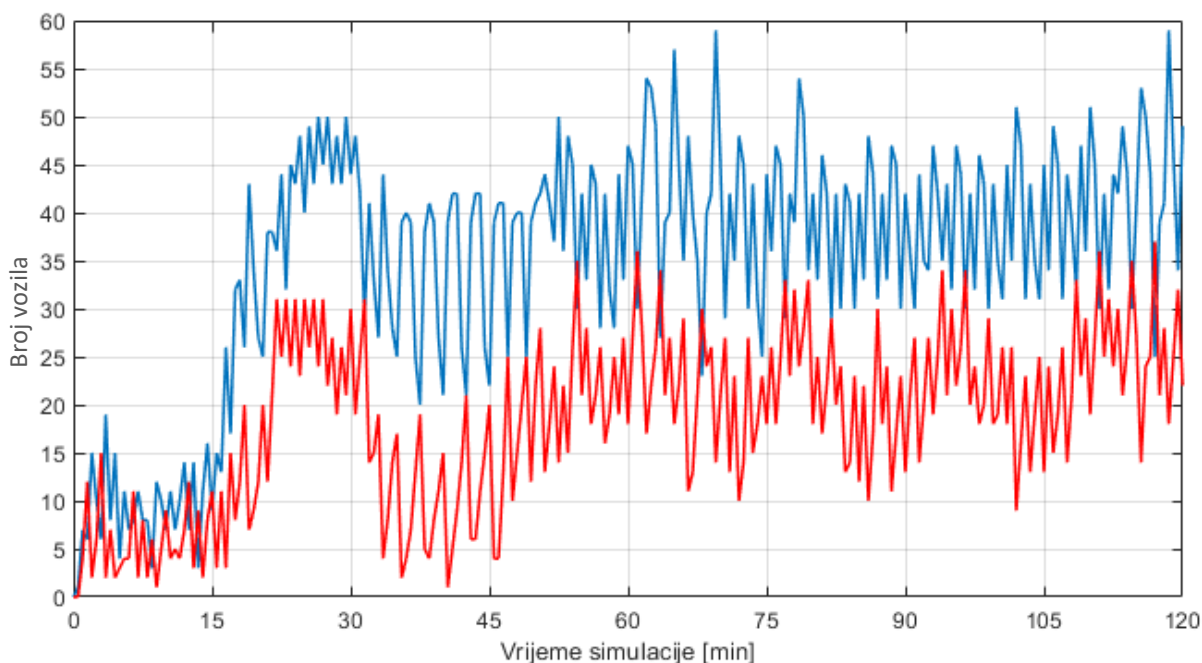
Grafikon 18 prikazuje promjene u brzini za vrijeme trajanja simulacije. Kako je volumen vozila koji pristupa izlaznoj rampi veći, veći dio vremena upravljački algoritam njoj dodjeljuje zeleno svjetlo, pa je prosječna brzina na njoj puno bliža ograničenju brzine od 60 km/h. Izlazna rampa je također kraća od gradske prometnice, pa je vozila brže uspijevaju prijeći i kapacitet se uspijeva brže isprazniti. Oscilacije od 10-ak km/h nastaju većinom prilikom stajanja pred semaforom, kada vozila čekaju na svoj red. Na gradskoj prometnici brzine su puno manje zbog kolona u kojima se vozila kreću, te manje prometne potražnje koju treba zadovoljiti i manje vremena što je potrebno zbog toga da se ostvari zagušenje manje nego na izlaznoj rampi. Na gradskoj prometnici brzina i više oscilira, najveći dio simulacije između 20 i 55 km/h.

Protok vozila na gradskoj prometnici, kao na grafikonu 19, tijekom cijelog vremena simulacije je veći, jer je gustoća u kontinuitetu veća, zbog vožnje u kolonama. Izlazna rampa zbog dužeg vremena potrebnog za prikupljanje podataka, jedan dio vremena biva prazna, to jest vozila budu na većim međusobnim razmacima pri kraju njenog posluživanja, pa je zbog toga protočnost na njoj manja.

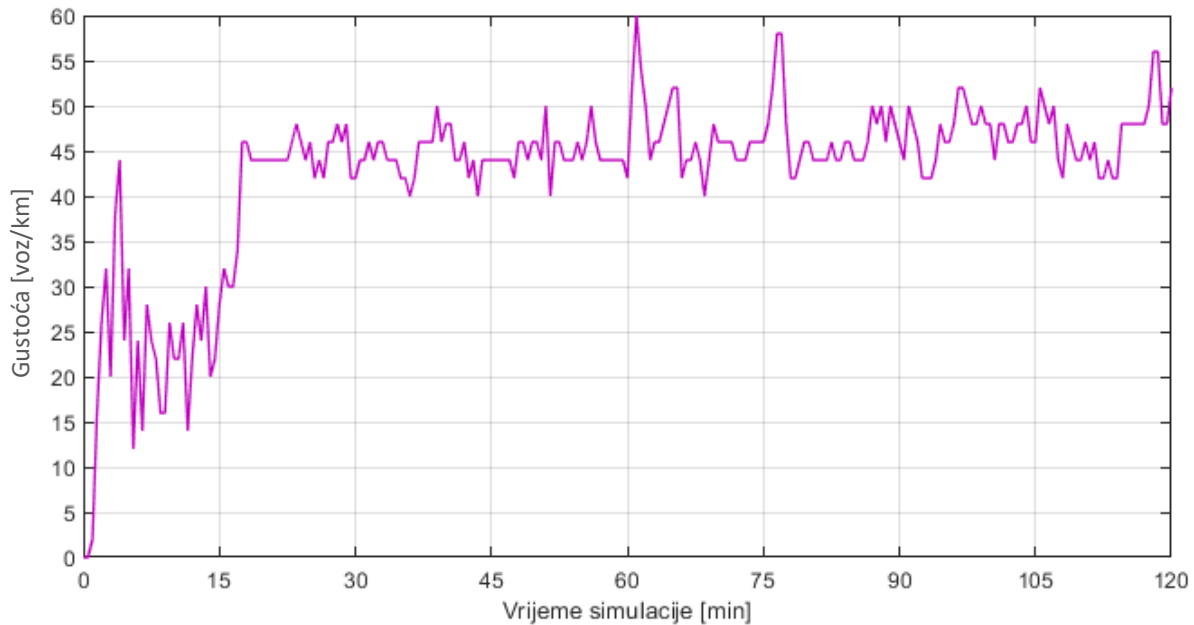


Grafikon 19: Protok vozila na gradskoj prometnici (plava) i izlaznoj rampi (crvena)

Prema grafikonu 20 repovi čekanja na gradskoj prometnici su veći od onih na izlaznoj rampi i samo od 35 do 45 minute su manji od 25 vozila, što potvrđuje kako se vozila kreću u kolonama većim dijelom simulacije. Na izlaznoj rampi repovi čekanja ne prelaze duljinu veću od 35 vozila, no prilikom prelaska broja od 30 vozila dolazi do prelijevanja prometnog toka nazad na gradsku autocestu.



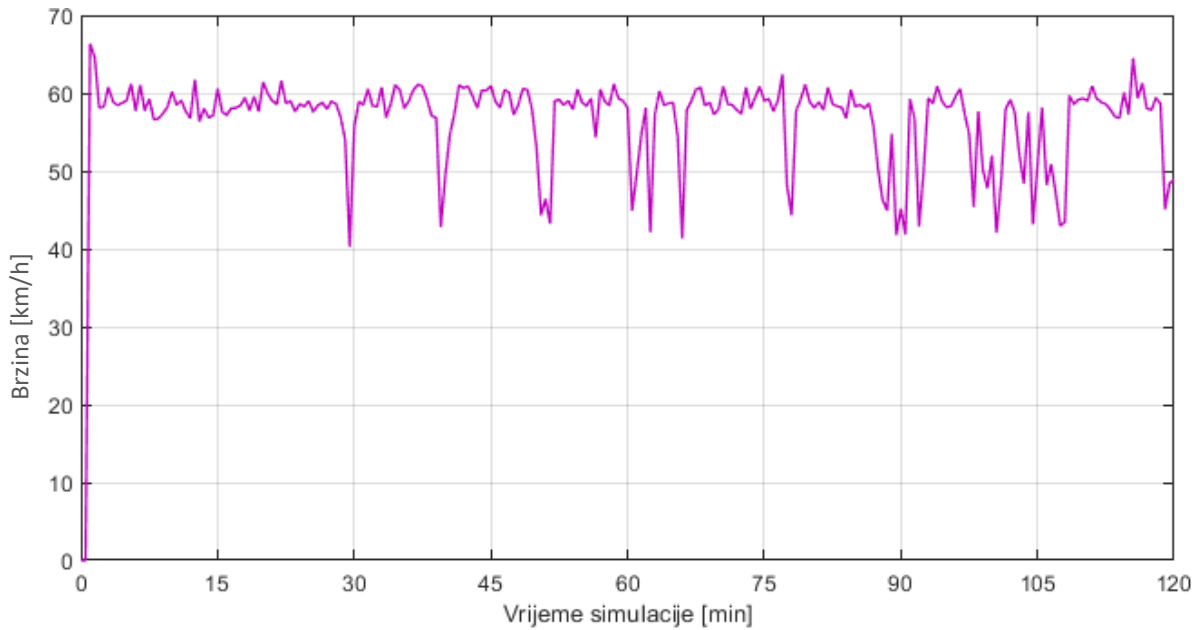
Grafikon 20: Duljina repova čekanja na gradskoj prometnici (plava) i izlaznoj rampi (crvena)



Grafikon 21: Gustoća vozila na priljevnom području

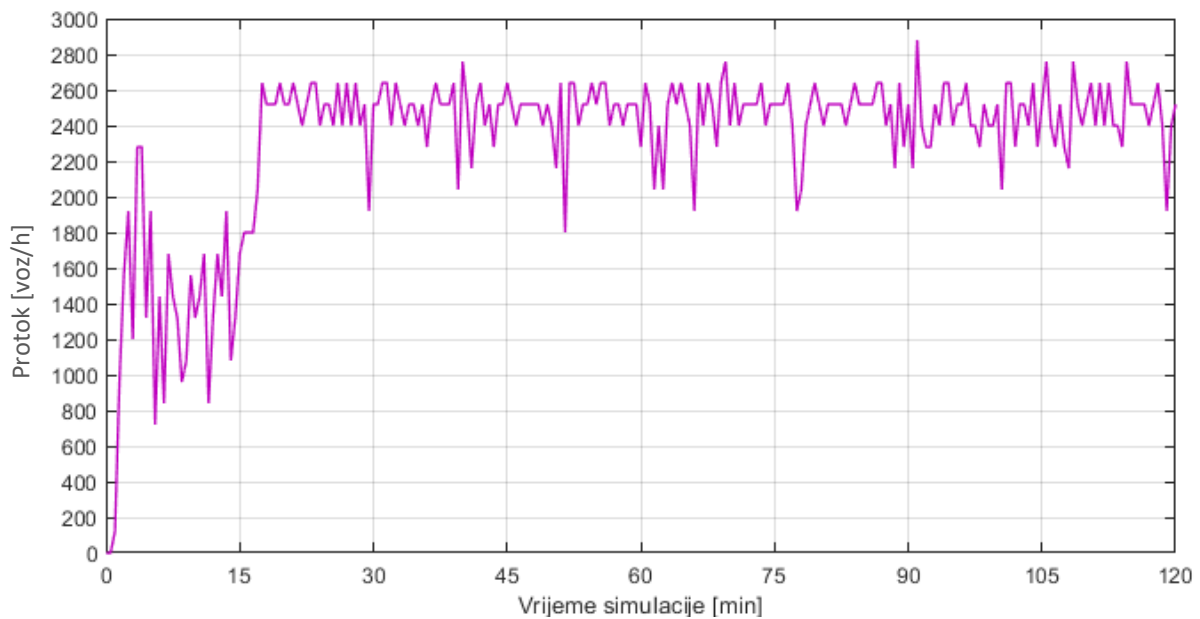
Grafikon 21 prikazuje gustoću vozila na priljevnom području. Gustoća se tijekom većeg dijela simulacije kreće između 40 i 55 voz/km, a maksimalna vrijednost koju doseže je 60 voz/km nakon 60-te minute simulacije. Tada gustoća doseže najveću vrijednost jer volumen vozila prema grafikonu 2 bude velik na obje prometnice, pa se na njima nakupljaju vozila i stvaraju repovi čekanja, zbog kojih su vozila blizu jedno drugome. Kada ta vozila dođu na red za posluživanje, kolonu prenose na priljevno područje i zbog toga gustoća ondje u tom trenutku doseže svoj maksimum.

Na grafikonu 22 vidljive su promjene u brzini na priljevnom području. Brzina priljevnog područja u većini vremena je blizu ograničenju od 60 km/h. Do oscilacija od te vrijednosti dolazi jedino u trenucima kada se na prometnicama stvore velike kolone i repovi čekanja pred semaforima, pa vozila kada se kreću priključivati prometu sporije to čine, zbog malog prostora u odnosu na vozila ispred njih.



Grafikon 22: Brzina vozila na priljevnom području

Kako pokazuje grafikon 23 protok vozila tijekom većeg dijela simulacije kreće se od 2350 do 2650 voz/h. Do odstupanja od tih vrijednosti dolazi kod smanjenja brzine na priljevnom području, pa manje vozila u vremenu uspijeva proći presjekom prometnice.



Grafikon 23: Protok vozila na priljevnom području

Ova metoda ostvaruje veliku protočnost na priljevnom području što je i cilj ALINEA algoritma. Ova metoda bolje se nosi s velikom potražnjom ako je ona prisutna samo na jednoj od prometnica. Pri velikom opterećenju na obiju prometnica, ravnomjerno raspoređenom, ipak dolazi do zagušenja jer metoda ne uspijeva zadovoljiti istovremeno potražnju na obje prometnice, pa se repovi čekanja povećavaju i dolazi do prelijevanja na gradsku autocestu.

6.5. Analiza rezultata i usporedba metoda

Rezultati prve metode pokazuju kako ona ne uspijeva zadovoljiti prometnu potražnju osim ako je ona vrlo niska. Već tijekom 15-te minute na izlaznoj rampi se zbog toga što nije cesta s prednošću prolaska stvaraju repovi čekanja, vidljivi na grafikonu 6, koji dovode do prelijevanja prometnog toka na gradsku autocestu. Ustvari prilikom vršnog opterećenja ova metoda uspijeva poslužiti jedino prometnicu s prednošću prolaska. Zbog toga se nije pokazala kao učinkovita metoda za primjenu na izlaznoj rampi gradske autoceste.

Druga metoda, upravljanja ustaljenim signalnim planom, podijeljenim na dvije signalne grupe prema slici 11 pokazuje puno bolje rezultate od prve metode. Do zagušenja kod ove metode dolazi samo za vrijeme vršnog opterećenja, za čije vrijeme također kao prilikom prve metode dolazi do prelijevanja prometnog toka na gradsku autocestu. Vozila na gradskoj prometnici se od prvog vršnog opterećenja do kraja simulacije kreću u kolonama, s obzirom na to da se stanje u prometu ne uspijeva stabilizirati. Kako se vozila kreću u kolonama, brzine na grafikonu 10 su puno manje od ograničenja brzine, a kako su brzine manje, manje se vozila uspijeva poslužiti, te se na ovoj prometnici stvaraju veliki repovi čekanja prema grafikonu 13. Na priljevnom području je protočnost vozila s grafikona 14 visoka, te većim trajanjem simulacije se mijenja između 2.200 voz/km i 2.400 voz/km. Brzina je na ovome području cijelo vrijeme uz ograničenje brzine od 60 km/h kako je prikazano na grafikonu 15. Vozila ustvari zbog zaštitnog međuvremena prikazanog na slici 11, koje traje pet sekundi, nemaju nikakve smetnje u kretanju, te zato ne dolazi do zastoja. Gustoća se prema grafikonu 16 kreće oko 40-ak voz/km, što označava da je na toj prometnici razina usluge visoka i prometni tok neometano teče bez operativnih ograničenja.

Treća metoda koristi se ALINEA algoritmom za adaptivno upravljanje signalnim uređajima. Ovisno o broju vozila na pojedinoj prometnici tako se dodjeljuje prednost prolaska vozilima koji se nalaze na onoj s većim brojem vozila, kako bi se spriječilo nastajanje zagušenja. Samim time tijekom vršnog opterećenja na izlaznoj rampi sprječava se da se prometni tok prelije na gradsku autocestu. Do toga dolazi jedino ako je na obje prometnice jednako visoko vršno opterećenje, pa kako upravljački algoritam ne uspijeva poslužiti obje prometnice istovremeno, stvaraju se veliki repovi čekanja prikazani grafikonom 20.

Iako je duljina repa čekanja velika, metoda postiže vrlo zadovoljavajuće rezultate protočnosti. Prema grafikonu 23 ona na priljevnom području iznosi najvećim dijelom simulacije između 2.400 voz/h i 2.600 voz/h, pa je tako njena vrijednost najviša među svim metodama. Za to je zaslužna velika brzina na priljevnom području, koja prema grafikonu 22 oscilira od ograničenja od 60 km/h jedino kada gustoće na gradskoj prometnici i izlaznoj rampi, kao na grafikonu 17 budu prevelike, pa se stvaraju kolone, zbog kojih vozila imaju manje prostora za manevar i moraju prilagoditi svoju brzinu vozilima ispred njih. Gustoća vozila na samom priljevnom području tako je nešto veća od one u drugoj metodi i kreće se prema grafikonu 20 između 40 i 50 voz/km, što označava da je razina kvalitete usluge također visoka, osim za vrijeme većih opterećenja na obje prometnice, kada su operativni zahvati vozila ograničeni drugim vozilima i gustoća vozila postaje okom uočljivija. Također je ovime vidljivo da se uspijeva bolje iskoristiti kapacitet prometnica priljevnih područja.

Druga i treća metoda tako su se pokazale kao unaprjeđenje naspram prve metode nad upravljanjem priljevnim tokom gradske autoceste. Zbog prilagodljivosti prometnoj potražnji, treća metoda ostvaruje bolje rezultate od druge što se tiče protočnosti na priljevnom području. Također bolje zadovoljava potražnju obiju prometnica i na njima se ravnomjernije raspoređuje opterećenje. Druga metoda više se fokusira na gradsku prometnicu s obzirom na to da je na njoj trajanje zelenog svijetla 10 sekundi duže, zbog čega se dobivaju stabilniji rezultati na toj prometnici. Međutim za to vrijeme ne uspijeva odgovoriti na promjene u potražnji izlazne rampe i zbog toga na njoj dolazi do nastanka zagušenja i većih prelijevanja na gradsku autocestu nego u trećoj metodi.

Kako bi se jasnije prikazale razlike između vrijednosti, ključne za usporedbu ovih metoda, na kraju ovoga poglavlja dodane su tablice 2 i 3. Njima su prikazane kvantitativni pokazatelji izvedbe, svake od metoda, na priljevnom području i uspoređene prosječne i maksimalne duljine repova čekanja na gradskoj prometnici i izlaznoj rampi.

Tablica 2: Prikaz kvantitativnih pokazatelja izvedbe triju metoda na priljevnom području

| METODA | PROSJEČNA BRZINA [km/h] | PROSJEČNA GUSTOĆA [voz/km] | PROSJEČNI PROTOK VOZILA [voz/h] |
|--------|----------------------------|-------------------------------|------------------------------------|
| I. | 56,80 | 21,40 | 2.021,58 |
| II. | 57,37 | 37,05 | 2.124,15 |
| III. | 56,30 | 42,64 | 2.315,85 |

Tablica 3: Prikaz duljine repova čekanja na pojedinoj prometnici za svaku od metoda

| METODA | NAZIV PROMETNICE | PROSJEČNA DULJINA REPA ČEKANJA [voz] | NAJDUŽI REP ČEKANJA [voz] |
|--------|--------------------|--|---------------------------------|
| I. | Gradska prometnica | 14,37 | 22 |
| | Izlazna rampa | 40,09 | 52 |
| II. | Gradska prometnica | 38,29 | 49 |
| | Izlazna rampa | 17,24 | 37 |
| III. | Gradska prometnica | 34,86 | 59 |
| | Izlazna rampa | 18,37 | 37 |

7. Zaključak

Ovim radom ispitane su tri metode upravljanja odljevnim tokom gradske autoceste. Prva metoda bez upravljanja, kao početno rješenje dala je vrlo loše rezultate i pokazala se kao neupotrebljiva prilikom nastanka vršnog opterećenja. Kako se vozila s izlazne rampe nisu mogla zbog opterećenja na gradskoj prometnici priključiti priljevnom području, prometni tok se počeo prelijevati nazad na gradsku autocestu već u samim počecima simulacije. Ova pojava vrlo je nepoželjna, jer je svrha gradske autoceste ostvarivanje velike protočnosti vozila, a to se ne može ostvariti ako je ona zagušena.

Druga metoda se pokazala kao veliko poboljšanje u odnosu na prvu metodu. U drugoj metodi upravljanje se vrši semaforima s postavljenim ustaljenim signalnim planom. Ciklus signalnog plana traje 60 sekundi, a zaštitno međuvrijeme u trajanju od pet sekundi, između dvaju signalnih grupa osiguralo je visoku brzinu vozila na priljevnom području u razini postavljenog ograničenja. Dobivena gustoća vozila na priljevnom području ukazuje na visoku razinu uslužnosti, jer zagušenja nema, a vozila nemaju nikakvih operativnih ograničenja. Međutim tijekom vršnog opterećenja i kod ove metode dolazi do prelijevanja prometnog toka na gradsku autocestu, jer se ustaljena signalizacija ne može prilagoditi dinamičnim stanjima u prometu.

Treća metoda, ostvarena modifikacijom adaptivnog upravljanja ALINEA algoritma postigla je najbolje rezultate. Protočnost vozila je puno veća od prve metode, a za 200 vozila po satu veća je i od druge metode. Također kako se ovom metodom upravljanja moguće prilagoditi prometnoj potražnji u stvarnome vremenu, potražnja na obje prometnice ravnomjerno je zadovoljena. Prelijevanja uzrokovana zagušenjima, do kojih i kod ove metode dolazi, puno se brže otklanjaju, te je stabilizacija stanja kod vršnog opterećenja puno lakše izvediva.

Moguće poboljšanje kod treće metode ostvarivo je s regulacijom vremena prikupljanja podataka iz sustava, jer je ono u trećoj metodi postavljeno na prikupljanje podataka svakih 30 sekundi. S time bi se ostvarila još bolja prilagodljivost stanju na prometnicama i osigurali još bolji parametri prometnog toka na priljevnom području. Također kod sustava adaptivnog upravljanja je potrebno odrediti optimalne vrijednosti parametara regulatora tako da se budući rad na ovoj temi ogleda i u analizi mogućeg podešavanja parametara implementiranog upravljačkog algoritma ili u primjeni naprednijih metoda strojnog učenja za optimalno upravljanje.

Popis literature

- [1] Kljajić S., Marijan D., Štefančić G., Capacity and Level of Service on the Zagreb Bypass, *Promet – Traffic & Transportation*, 2011; 24(3): 261-267.
- [2] Legac I., *Cestovne prometnice 1.*, Zagreb, 2006.
- [3] Dadić I., Kos G., Ševrović M., *Teorija prometnog toka*, Fakultet prometnih znanosti, Zagreb, 2014.
- [4] Galić I., *Analiza metoda upravljanja priljevnim tokovima urbanih autocesta*, Završni rad, Fakultet prometnih znanosti, Zagreb, 2013.
- [5] Los Angeles Curbed. Preuzeto sa: www.la.curbed.com/2017/9/28/la-traffic-freeway-congestion [Pristupljeno: kolovoz 2019.].
- [6] Autorizirana predavanja iz kolegija: Osnove prometnog inženjerstva. Preuzeto sa: http://www.e-student.fpz.hr/Osnove_prometnog_inzenjerstva/PROMETNI_TOK.pdf [Pristupljeno: kolovoz 2019.].
- [7] Internetske stranice Ministarstva prometa države Kalifornije. Preuzeto sa: www.dot.ca.gov/LOS/multi-lane_highway.jpg [Pristupljeno: kolovoz 2019.].
- [8] Miletić I. A., *Cestovna raskrižja kao element sigurnosti cestovnog prometa*, Završni rad, Fakultet prometnih znanosti, Zagreb, 2016.
- [9] Wikipedia. Preuzeto sa: www.hr.wiki.org/Mostar_petlja [Pristupljeno: kolovoz 2019.].
- [10] Bošnjak I., *Inteligentni transportni sustavi 1*, Fakultet prometnih znanosti, Zagreb, 2006.
- [11] Herrera J.C., Muñoz J.C., Papageorgiou M., Spiliopoulou A., Real-time merging traffic control at congested freeway off-ramp areas, 95th Annual Meeting of Transportation Research Board, 2016.
- [12] Haj-Salem H., Poirier P., Heylliard J., Peynaud J., "ALINEA: a local traffic responsive strategy for ramp metering. Field results on A6 motorway in Paris," ITSC 2001., 2001 IEEE Intelligent Transportation Systems. Proceedings, Oakland, California, 2001., 106-111.
- [13] Oremović I., *Mogućnosti primjene neizrazite logike za određivanje produljenja vremena pojedine faze kod semaforiziranih raskrižja*, Završni rad, Fakultet prometnih znanosti, Zagreb, 2018.
- [14] Korent N., *Usporedba algoritama za upravljanje promjenjivim ograničenjem brzine na urbanim autocestama*, Diplomski rad, Fakultet prometnih znanosti, Zagreb, 2017.

- [15] Vogel A., Oremović I., Šimić R., Ivanjko E., Improving Traffic Light Control by Means of Fuzzy Logic, Proceedings of 60th International Symposium ELMAR-2018 / Muštra M., Grgić M., Zovko-Cihlar B., Vitas D., Faculty of Electrical Engineering and Computing, University of Zagreb, Zagreb, 2018., 51-56.
- [16] Kapusta B., Simulacija prioriternih prolaska vozila žurne službe kroz semaforizirano raskrižje, Završni rad, Fakultet prometnih znanosti, Zagreb, 2017.
- [17] Kapusta B., Miletić M., Ivanjko E., Vujić M., Preemptive Traffic Light Control based on Vehicle Tracking and Queue Lengths, Proceedings of ELMAR-2017 / Muštra M., Vitas D., Zovko-Cihlar B., Faculty of Electrical Engineering and Computing, University of Zagreb, Zagreb, 2017., 11-16.
- [18] Microsoft COM Technical Overview. Preuzeto sa: <https://docs.microsoft.com/en-us/windows/win32/com/com-technical-overview> [Pristupljeno: kolovoz 2019.].

Popis slika

| | |
|--|----|
| Slika 1: Prikaz zagrebačke obilaznice kao primjer gradske autoceste | 3 |
| Slika 2: Shematski prikaz elemenata poprečnog presjeka u pojasu autoceste | 4 |
| Slika 3: Prikaz prometnog zagušenja u gradu Los Angeles, SAD | 7 |
| Slika 4: Prikaz i opis pojedinih razreda razine uslužnosti na autocestama s više prometnih traka | 9 |
| Slika 5: Raskrižje izvan razine na primjeru Mostarske petlje, Beograd, Republika Srbija | 10 |
| Slika 6: Prikaz standardne izlazne rampe gradske autoceste | 14 |
| Slika 7: Prikaz prelijevanja zagušenja sa gradske prometnice na gradsku autocestu | 14 |
| Slika 8: Prikaz upravljanja prometom primjenom algoritma ALINEA | 15 |
| Slika 9: Shematski prikaz simulacijskog okruženja | 18 |
| Slika 10: Prikaz simulacijskog modela, te raspored detektora i semafora | 22 |
| Slika 11: Signalni plan promatranog raskrižja | 28 |

Popis tablica

| | |
|--|----|
| Tablica 1: Prikaz duljina ćelija simulacijskog modela..... | 21 |
| Tablica 2: Prikaz kvantitativnih pokazatelja izvedbe triju metoda na priljevnom području.... | 39 |
| Tablica 3: Prikaz duljine repova čekanja na pojedinoj prometnici za svaku od metoda..... | 40 |

Popis grafikona

| | |
|--|----|
| Grafikon 1: Prikaz odnosa puta i vremena | 5 |
| Grafikon 2: Raspodjela volumena gradske prometnice (plava) i izlazne rampe (crvena) za vrijeme trajanja simulacije | 22 |
| Grafikon 3: Gustoća vozila na gradskoj prometnici (plava) i izlaznoj rampi (crvena)..... | 23 |
| Grafikon 4: Brzina vozila na gradskoj prometnici (plava) i izlaznoj rampi (crvena) | 24 |
| Grafikon 5: Protok vozila na gradskoj prometnici (plava) i izlaznoj rampi (crvena) | 24 |
| Grafikon 6: Duljina repova čekanja na gradskoj prometnici (plava) i izlaznoj rampi (crvena) | 25 |
| Grafikon 7: Protok vozila na priljevnom području | 26 |
| Grafikon 8: Brzina vozila na priljevnom području | 26 |
| Grafikon 9: Gustoća vozila na priljevnom području | 27 |
| Grafikon 10: Brzina vozila na gradskoj prometnici (plava) i izlaznoj rampi (crvena) | 28 |
| Grafikon 11: Gustoća vozila na gradskoj prometnici (plava) i izlaznoj rampi (crvena)..... | 29 |
| Grafikon 12: Protok vozila na gradskoj prometnici (plava) i izlaznoj rampi (crvena) | 30 |
| Grafikon 13: Duljina repova čekanja na gradskoj prometnici (plava) i izlaznoj rampi (crvena) | 30 |
| Grafikon 14: Protok vozila na priljevnom području | 31 |
| Grafikon 15: Brzina vozila na priljevnom području | 32 |
| Grafikon 16: Gustoća vozila na priljevnom području | 32 |
| Grafikon 17: Gustoća vozila na gradskoj prometnici (plava) i izlaznoj rampi (crvena)..... | 33 |
| Grafikon 18: Brzina vozila na gradskoj prometnici (plava) i izlaznoj rampi (crvena) | 34 |
| Grafikon 19: Protok vozila na gradskoj prometnici (plava) i izlaznoj rampi (crvena) | 35 |
| Grafikon 20: Duljina repova čekanja na gradskoj prometnici (plava) i izlaznoj rampi (crvena) | 35 |
| Grafikon 21: Gustoća vozila na priljevnom području | 36 |
| Grafikon 22: Brzina vozila na priljevnom području | 37 |
| Grafikon 23: Protok vozila na priljevnom području | 37 |



Sveučilište u Zagrebu
Fakultet prometnih znanosti
10000 Zagreb
Vukelićeva 4

IZJAVA O AKADEMSKOJ ČESTITOSTI I SUGLASNOST

Izjavljujem i svojim potpisom potvrđujem kako je ovaj _____ završni rad

isključivo rezultat mog vlastitog rada koji se temelji na mojim istraživanjima i oslanja se na objavljenu literaturu što pokazuju korištene bilješke i bibliografija.

Izjavljujem kako nijedan dio rada nije napisan na nedozvoljen način, niti je prepisan iz necitiranog rada, te nijedan dio rada ne krši bilo čija autorska prava.


Izjavljujem također, kako nijedan dio rada nije iskorišten za bilo koji drugi rad u bilo kojoj drugoj visokoškolskoj, znanstvenoj ili obrazovnoj ustanovi.

Svojim potpisom potvrđujem i dajem suglasnost za javnu objavu _____ završnog rada
pod naslovom **Simulacija upravljanja odljevnim tokovima gradskih autocesta**

na internetskim stranicama i repozitoriju Fakulteta prometnih znanosti, Digitalnom akademskom repozitoriju (DAR) pri Nacionalnoj i sveučilišnoj knjižnici u Zagrebu.

U Zagrebu, 2.9.2019

Student/ica:


(potpis)