

Simulacija semaforizirane urbane prometne mreže korištenjem PTV VISSIM-a te Matlab-a

Miletić, Mladen

Undergraduate thesis / Završni rad

2017

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:119:111962>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2024-04-25**



Repository / Repozitorij:

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



**SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET PROMETNIH ZNANOSTI**

Mladen Miletić

**SIMULACIJA SEMAFORIZIRANE URBANE PROMETNE
MREŽE KORIŠTENJEM PTV VISSIM-A TE MATLAB-A**

ZAVRŠNI RAD

Zagreb, 2017.

Sveučilište u Zagrebu
Fakultet prometnih znanosti

ZAVRŠNI RAD

**SIMULACIJA SEMAFORIZIRANE URBANE PROMETNE
MREŽE KORIŠTENJEM PTV VISSIM-A TE MATLAB-A**

**SIMULATION OF A SIGNALISED URBAN TRAFFIC
NETWORK USING PTV VISSIM AND MATLAB**

Mentor: doc. dr. sc. Edouard Ivanjko

Student: Mladen Miletić
JMBAG: 0119010935

Zagreb, rujan 2017.

Zahvale

Zahvaljujem se svojem mentoru doc. dr. sc. Edouardu Ivanjku na brojnim stručnim savjetima i strpljenju prilikom pisanja ovog rada, te dr. sc. Miroslavu Vujiću za pomoć pri izradi simulacijskog modela. Zahvaljujem kolegi Borni Kapusti na suradnji tijekom studija i za inspiraciju tijekom pisanja ovog rada. Također zahvaljujem svojoj obitelji i djevojci za potporu te razumijevanje tijekom mog studiranja.

Sažetak

Naslov: Simulacija semaforizirane urbane prometne mreže korištenjem PTV VISSIM-a te MATLAB-a

Zbog sve veće prometne potražnje u urbanim sredinama pojavljuje se sve više prometnih problema poput prometnih zagušenja u vrijeme vršnog sata. Implementacijom Inteligentnih Transportnih Sustava (ITS) moguće je neke od tih problema riješiti. Prilikom razvoja takvih sustava potrebna je simulacijska okolina u kojoj se sustav može prilagoditi stvarnim situacijama. U praksi je gotovo ne moguće testirati i razvijati prometne sustave unutar stvarne prometne mreže pa se u tu svrhu mogu koristiti simulacijski alati za simuliranje prometne mreže. U ovom radu je simuliran i analiziran prometni koridor od tri povezana semaforizirana raskrižja u mikrosimulacijskom alatu VISSIM uz korištenje programskog paketa MATLAB za implementaciju algoritma upravljanja raskrižjima. Iz rezultata je vidljivo da se kroz simulaciju urbane prometne mreže mogu razvijati i testirati sustavi adaptivnog upravljanja signalnim planovima semaforiziranog raskrižja.

Ključne riječi: Inteligentni transportni sustavi, simulacije u prometu, urbana prometna mreža, signalni plan.

Abstract

Title: Simulation of a Signalised Urban Traffic Network Using PTV VISSIM and MATLAB

Due to increasing traffic demand in urban areas, more and more traffic problems like traffic congestion during peak hours are appearing. By implementation of Intelligent Transport Systems (ITS) it is possible to solve some of those problems. During development of such systems, a simulation environment is needed which will allow testing of the developed systems in realistic situations. In practice, it is nearly impossible to test and develop traffic systems inside a real traffic network so it is necessary to use simulation tools to simulate the traffic network. In this research, a traffic corridor with three connected signalised intersections is simulated in micro-simulator PTV VISSIM with the use of MATLAB software package for implementation of the control. From the results, it is visible that it is possible to develop and test adaptive control systems for intersections with traffic lights by simulating urban traffic networks.

Keywords: Intelligent transport systems, traffic simulations, urban traffic network, signal program.

Sadržaj

1	Uvod	1
2	Značajke urbanih semaforiziranih prometnih mreža	4
2.1	Osnovni pojmovi prometnog inženjerstva	4
2.1.1	Prometni sustav	4
2.1.2	Poopćeni model prometnog sustava	4
2.1.3	Inteligentni transportni sustavi	6
2.2	Upravljanje prometom u urbanim sredinama	6
3	Mikroskopski simulator PTV VISSIM i programski paket MATLAB	12
3.1	Mikroskopski simulator PTV VISSIM	12
3.2	Programski paket MATLAB	13
3.3	Povezivanje PTV VISSIM-a i MATLAB-a korištenjem COM sučelja	14
4	Pretvorba signalnih planova u NEMA strukturu	17
4.1	NEMA struktura	17
4.2	Algoritam za pretvorbu signalnih planova u NEMA strukturu	18
5	Implementacija simulacijskog okruženja	22
5.1	Varijable za podešavanje simulacijskog okruženja	22
5.2	Algoritam upravljanja simulacijskom mrežom	24
6	Rezultati simulacije	26
6.1	Opis korištenog modela urbane prometne mreže	26
6.1.1	Raskrižje: Ulica kralja Zvonimira - Harambašićeva ulica	27
6.1.2	Raskrižje: Ulica kralja Zvonimira - Šulekova ulica	28
6.1.3	Raskrižje: Ulica kralja Zvonimira - Heinzelova ulica	30
6.2	Prikaz i analiza rezultata simulacije	31
7	Zaključak	40

Literatura	42
Popis slika	43
Popis tablica	44
Popis grafikona	45

1 Uvod

Prometni sustav u svojim počecima nije zahtijevao posebnu regulaciju zbog relativno malog broja prometnih entiteta. Daljnjim industrijskim razvojem i ubrzanom urbanizacijom broj prometnih entiteta se naglo povećao te se pojavljuje potreba za regulacijom prometa i sigurnosnim pravilima. Osnovna regulacijska pravila poput prava prednosti prolaska privremeno rješavaju problem, ali se vrlo brzo primjećuje problem sporednih prometnih tokova, odnosno velikog reda čekanja koji se pojavljuje zbog nemogućnosti prolaska kroz raskrižje. Pojavom semafora kao prve telematičke naprave u cestovnom prometu omogućuje se znatno bolja regulacija prometa. Svako semaforizirano raskrižje ima vlastiti upravljački uređaj s ugrađenom upravljačkom logikom, odnosno signalnim planom koji se ponavlja. Takvi signalni planovi mogu biti fiksni ili adaptivni, gdje fiksni ostaju jednaki bez obzira na prometne uvjete dok se adaptivni prilagođavaju stanju u prometu [1].

Daljnjim razvojem prometa u urbanim sredinama pojavljuju se veliki problemi prometnog zagušenja osobito u području vršnog sata. Klasična rješenja poput povećavanja prometne površine su dostigla svoj vrhunac zbog nemogućnosti širenja prometne infrastrukture u napučenim središtima velikih urbanih sredina [2]. Uslijed toga mnoge urbane sredine su se okrenule razvoju pješačkog, biciklističkog i javnog gradskog prometa (JPG). Zbog zakašnjele reakcije i eksponencijalnog rasta broja osobnih vozila problem prometnog zagušenja u središtima urbanih sredina i dalje nije riješen. Kao potencijalno rješenje problema uvode se inteligentni transportni sustavi (*engl. Intelligent Transport Systems, ITS*) kao nadogradnja postojećeg prometnog sustava. Prema [3] ITS se definira kao holistička, upravljačka i informacijsko-komunikacijska (kibernetika) nadogradnja klasičnoga sustava prometa i transporta kojim se postiže znatno poboljšanje performansi, odvijanje prometa, učinkovitiji transport putnika i roba, poboljšanje sigurnosti u prometu, udobnost i zaštita putnika, manja onečišćenja okoliša, itd.

Razvoj ITS-a kao platforme koja bi objedinjavala mnoge prometne sustave zahtije-

vao je stvaranje normi i taksonomije. Početna ITS taksonomija prema ISO TR 14813-1 iz 1990. godine je definirala podjelu ITS-a na osam funkcionalnih područja, što je 2015. godine prošireno na trinaest funkcionalnih područja [4]. Danas mnogi ITS sustavi obuhvaćaju više od jednog funkcionalnog područja jer iako mogu samostalno raditi, tek kroz međusobnu integraciju podsustava ostvaruju svoj puni potencijal. Međusobna integracija sustava podrazumijeva definirane tokove informacija i pravila koje objedinjuje ITS arhitektura koja pokriva sve tehničke, organizacijske, pravne i poslovne probleme koji se mogu pojaviti prilikom implementacije i integracije novog ITS sustava [5]. Uz definiranu ITS arhitekturu moguća je izrada složenijih ITS sustava objedinjenih u glavni prometni upravljački centar.

Jedan od načina dokazivanja isplativosti izgradnje složenih prometnih upravljačkih sustava je izrada simulacijskih modela nad kojima se može simulirati rad različitih ITS sustava. Simulacijsko okruženje se može koristiti i prilikom početnih stadija razvoja novih ITS sustava mnogo prije puštanja u probni rad u stvarnom prometnom okruženju. U današnje vrijeme simulacijski alati u sebi imaju mogućnost implementacije nekih jednostavnijih ITS sustava, odnosno mogućnost implementacije jednostavnih algoritama za upravljanje prometnim tokovima korištenjem simulacijskih podataka. Složenije algoritme upravljanja poput algoritama s mogućnošću učenja tijekom rada nije moguće implementirati unutar samog simulacijskog alata. Kako bi se to omogućilo mogu se koristiti vanjski programski paketi za implementaciju složenijih upravljačkih algoritama koji zatim upravljaju simulacijom prema dobivenim podacima i parametrima.

Cilj ovog završnog rada je predstaviti problematiku simuliranja urbane cestovne mreže korištenjem simulacijskog alata PTV VISSIM te prikazati mogućnost upravljanja simuliranom mrežom korištenjem programskog paketa MATLAB na primjeru jednostavne prometne mreže. Ovaj rad je sastavljen od sedam poglavlja. U uvodnom poglavlju je iznesena motivacija i struktura rada. U drugom poglavlju su opisane osnovne značajke urbanih semaforiziranih mreža. U trećem poglavlju su opisani korišteni programski alati PTV VISSIM i MATLAB. U četvrtom poglavlju je predstavljen algoritam prilagodbe signalnih planova za implementaciju u MATLAB-u. U petom poglavlju je opisano korišteno simulacijsko okruženje i algoritam upravljanja signalnim plano-

vima iz MATLAB-a. U šestom poglavlju su prikazani rezultati simulacije prilikom upravljanja iz MATLAB-a. U zadnjem poglavlju je iznesen zaključak prema prethodnim poglavljima.

2 Značajke urbanih semaforiziranih prometnih mreža

U ovom poglavlju dan je pregled osnovnih pojmova prometnog inženjerstva, inteligentnih transportnih sustava i cestovne telematike, te će se predstaviti problematika urbanih semaforiziranih mreža i koncepata njihovog upravljanja.

2.1 Osnovni pojmovi prometnog inženjerstva

U svrhu jasnog razumijevanja problematike urbanih semaforiziranih cestovnih mreža, kao i jasne razrade simulacijskog modela potrebno je definirati osnovne pojmove prometnog inženjerstva.

2.1.1 Prometni sustav

Promet možemo definirati kao stohastički sustav i proces čija je svrha obavljanje prijevoza i/ili prijenosa ljudi, roba i informacija u odgovarajućim prometnim entitetima zauzimanjem dijela prometnice prema unaprijed utvrđenim pravilima i protokolima. Problematika nastaje u prijevodu engleskog termina transport kao promet dok promet ima šire značenje jer obuhvaća ne samo transport već i završne procese, prometnu mrežu, sigurnost prometa i informacijske tokove [6].

2.1.2 Poopćeni model prometnog sustava

Poopćeni model prometnog sustava je početna točka za opisivanje strukture i ponašanja bilo kojeg prometnog sustava. Korištenjem poopćenog modela moguće je precizno razlučiti sustav od njegove okoline, te odrediti relevantne veličine za mjerenje. Poopćeni model prometnog sustava čine temeljni podsustavi [6]:

1. Podsustav transportnih entiteta;
2. Podsustav adaptacije transportnih entiteta na prometni entitet;

3. Prometni entiteti;
4. Podsustav upravljanja prometom;
5. Podsustav prometne mreže.

Proces odvijanja prometa se može definirati i kao transformacija prostornih i vremenskih koordinata prometnog entiteta gdje prometni entitet predstavlja svaki entitet prilagođen kretanju određenom prometnicom. Vrijeme putovanja kroz mrežu definira se kao razlika vremenskih koordinata pri početku i kraju putovanja. Na vrijeme putovanja utječu karakteristike prometne mreže, veličina prometnog toka, način upravljanja mrežom te utjecaj incidentnih situacija pa se vrijeme putovanja može izraziti funkcijom navedenih elemenata prema izrazima [7]:

$$t_p = t_{p^B} - t_{p^A}, \quad (1)$$

$$t_p = f(l_{OD}, TM, \varphi, C_i, NM, I_s), \quad (2)$$

gdje je:

t_p - vrijeme putovanja [s];

t_{p^B} - vrijeme dolaska na odredište [s];

t_{p^A} - vrijeme polaska [s];

l_{OD} - udaljenost polazišta i odredišta [m];

TM - topologija mreže;

φ - veličina prometnog toka;

C_i - kapacitet i -tog mrežnog elementa;

NM - način upravljanja mrežom;

I_s - utjecaj incidentnih situacija.

2.1.3 Inteligentni transportni sustavi

U sustavskom smislu ITS se može definirati kao rezultat obavljanja funkcija ITS sustava [7]. S obzirom na to da pogled na sustav vrši sam korisnik, on ujedno vrši i evaluaciju te vrednovanje usluge, pa se iz tog razloga ITS usluge mogu podijeliti prema korisniku u pet glavnih skupina:

1. **Usluge informiranja putnika** - Pružanje relevantnih informacija o prometnom sustavu. Ovu skupinu karakterizira pasivnost i jednosmjernost prema korisniku.
2. **Usluge pomoći vozaču** - Usluge koje izravno pomažu vozaču u vožnji bez komunikacije s ostalim vozilima u prometnoj mreži.
3. **Usluge pomoći vozaču uz suradnju** - Usluge koje izravno pomažu vozaču u vožnji, ali zahtijevaju komunikacijsku vezu s ostalim vozilima ili samom prometnom infrastrukturom.
4. **Usluge vožnje sa suradnjom** - Skupina usluga koje izravno utječu na samu vožnju prema donesenim odlukama na osnovi prikupljenih podataka.
5. **Podsvjesne usluge za vozača** - Usluge koje ne utječu na vožnju ni na odluku vozača već se izvode u pozadini.

2.2 Upravljanje prometom u urbanim sredinama

Upravljanje prometom i operacijama kao jedno od funkcionalnih područja ITS-a u sebi sadrži skup usluga poput nadzora i upravljanja prometom, upravljanje incidentima u prometu, upravljanje potražnjom, upravljanje održavanjem prometne infrastrukture, provođenje regulacije prometa [4]. U urbanim sredinama postoje pet osnovnih koncepata upravljanja semaforiziranim raskrižjima:

1. **Upravljanje izoliranim raskrižjem** - Upravljanje se provodi nad jednim izoliranim raskrižjem bez vođenja računa o susjednim raskrižjima.
2. **Upravljanje raskrižjima na malom prostoru** - Upravljanje se ograničava na dva susjedna raskrižja s relativno malom udaljenosti, ali s prometnim tokom koji ovisi o njima.

3. **Upravljanje arterijalnim koridorima** - Upravljanje se provodi nad strateškim potezima urbane mreže s izraženim prometnim opterećenjem.
4. **Upravljanje zatvorenim mrežama** - Upravljanje se provodi nad dijelom urbane mreže koji se tretira kao izolirana prometna mreža.
5. **Upravljanje širim područjem** - Upravljanje se provodi nad cijelom urbanom mrežom koja se promatra kao cjeloviti prometni sustav s hijerarhijskom podjelom upravljanja.

Za potpuno razumijevanje koncepta upravljanja prometom semaforiziranim raskrižjima potrebno je definirati osnovne pojmove signalnih planova kao što su: Signalni ciklus, faza, signalni pojam, zaštitno međuvrijeme i signalni plan.

Signalni ciklus

Signalni ciklus je vremenski period potreban da se obavi cijela sekvenca izmjene definiranih signalnih faza, odnosno predstavlja trajanje signalnog plana [8]. Prema [9] duljina signalnog ciklusa ovisi o broju faza definiranih na semaforiziranom raskrižju prema tablici 1.

Tablica 1: Ovisnost duljine ciklusa o broju faza [9]

Broj faza	Duljina ciklusa [s]	Napomena
2	(30) 40-70	Minimalne vrijednosti za pješačke prijelaze
3	70-90	Maksimalne vrijednosti se rijetko koriste
4	90-120	Najčešće iznad 100s
5	≥ 110	Peta faza se najčešće ostvaruje skraćivanjem ostalih faza

Korištenjem adaptivnog upravljanja trajanje ciklusa prestaje biti fiksno, već se mijenja u ovisnosti o trenutnim zahtjevima u prometu.

Faza

Faza je dio ciklusa u kojem pojedini prometni tokovi istovremeno imaju slobodan prolaz. Sačinjava ju jedna ili više signalnih grupa [8]. Uz pravilno definiranje faza na raskrižju moguće je smanjiti konflikte između prometnih tokova i time doprinijeti sigurnosti. Uz povećanje broja faza na raskrižju produljuje se i signalni ciklus zbog potrebnog minimalnoga zelenog svjetla za svaku fazu. Faza može sadržavati [7]:

- jedan ili više prometnih tokova;
- jedan ili više tokova kretanja pješaka raskrižjem;
- kombinaciju prometnih i pješačkih tokova.

Signalni pojam

Signalni pojam se definira kao stanje koje signalni objekt odnosno semafor može prikazati. U Republici Hrvatskoj su prema zakonu o sigurnosti prometna na cestama [10] određeni pojmovi: crveno svjetlo, žuto svjetlo, zeleno svjetlo, crveno-žuto svjetlo i treptajuće žuto svjetlo. Crveno-žuto svjetlo upozorava na skori dolazak zelenog svjetla, te je propisano u trajanju od dvije sekunde dok se u posljednje vrijeme pojavljuje tendencija smanjivanja na jednu sekundu [7]. Žutim svjetlom se upozorava na skori dolazak crvenog svjetla, a propisano trajanje se određuje prema maksimalnoj dozvoljenoj brzini na dijelu prometnice pred raskrižje prema tablici 2.

Tablica 2: Trajanje žutog svjetla u ovisnosti o dozvoljenoj brzini [9]

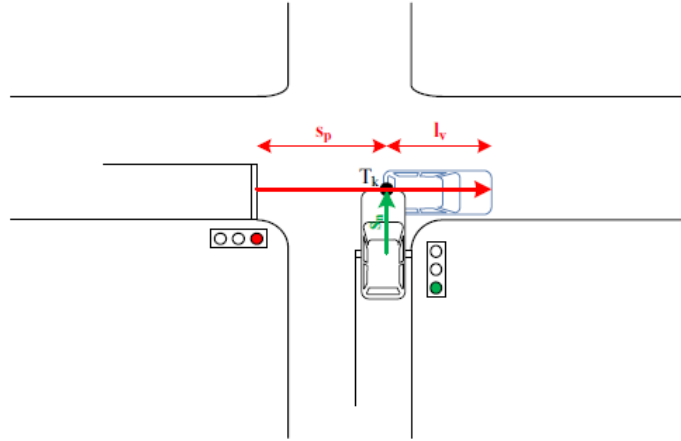
Dozvoljena brzina [km/h]	Trajanje žutog svjetla [s]
50	3
60	4
70	5
> 70	x
x - ovisi o vremenu zaustavljanja pri dozvoljenoj brzini kod naglog kočenja	

Zaštitno međuvrijeme

Zaštitno međuvrijeme je vremenski period između dvije konfliktne signalne grupe koje slijede uzastopno [8] i ovisi o tri vremenske komponente:

1. Provozno vrijeme (t_k) - vrijeme od trenutka kraja zelenog svjetla do početka vremena pražnjenja odnosno ulaska vozila u raskrižje za vrijeme trajanja žutog svjetla ili na početku crvenog svjetla;
2. Vrijeme pražnjenja (t_p) - vrijeme potrebno da vozilo prođe definiranu točku kolizije (T_k) brzinom pražnjenja (v_p);

3. Vrijeme naleta (t_n) - vrijeme potrebno da vozilo kojem se upali zeleno svjetlo prođe put naleta (s_n) određenom brzinom naleta (v_n).



Slika 1: Komponente izračuna zaštitnog međuvremena [7]

Slika 1 prikazuje komponente izračuna zaštitnog međuvremena koje se računa prema izrazu:

$$t_z = t_k + t_p - t_n = t_k + \frac{s_p + l_v}{v_p} - \frac{s_n}{v_n}, \quad (3)$$

gdje je:

t_z - zaštitno međuvrijeme [s];

t_k - provozno vrijeme [s];

t_p - vrijeme pražnjenja [s];

t_n - vrijeme naleta [s];

s_p - put pražnjenja [m];

l_v - duljina vozila [m];

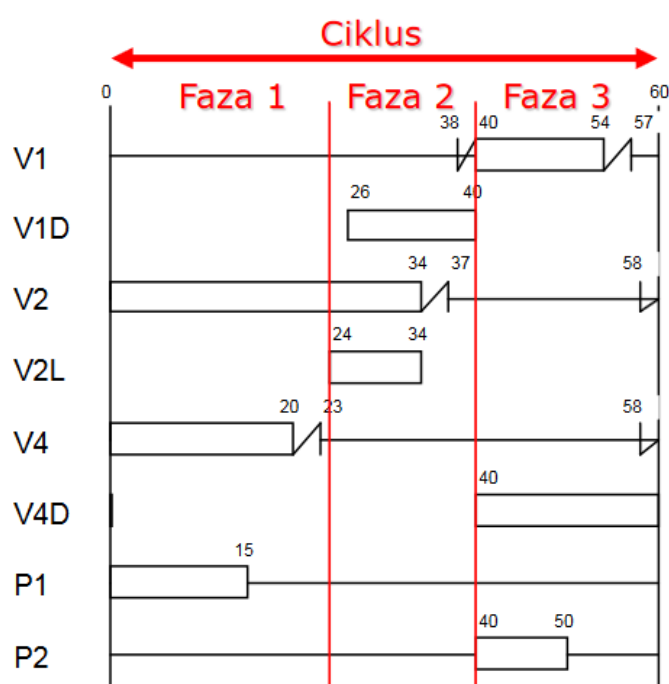
v_p - brzina pražnjenja [m/s];

s_n - put naleta [m];

v_n - brzina naleta [m/s].

Signalni plan

Signalni plan je pregled trajanja svih signalnih pojmova i objedinjuje prethodno opisane pojmove. Na slici 2 je prikazan fiksni signalni plan s označenim osnovnim pojmovima. Pravokutnici na slici predstavljaju zeleno svjetlo, ravne linije crveno svjetlo, a kose predstavljaju žuto odnosno žuto-crveno svjetlo. Na lijevoj strani su popisane signalne grupe koje ovise o signalnom planu. Uz signalni plan se može pridodati parametar *offset* koji predstavlja vremenski odmak signalnog plana zadanog raskrižja u odnosu na neku referentnu vremensku točku [8].



Slika 2: Primjer vremenski fiksnog signalnog plana [11]

Inteligentno upravljanje prometom u urbanim sredinama

Inteligentnim upravljanjem moguće je znatno poboljšati kvalitetu odvijanja prometa u urbanim sredinama, posebice na dijelovima mreže gdje se upravlja semaforiziranim raskrižjima. Upravljanje prometom kao jedno od funkcionalnih područja inteligentnih transportnih sustava određuje razinu usluge (*engl. Level of Service - LoS*) kojom se prometni volumen može poslužiti na određenoj prometnici [7]. Brzina vozila u mreži može se izraziti kao funkcija kapaciteta mrežnih elemenata, prometnog volumena,

upravljanja prometom i vremenskim okvirom promatranja prema izrazu [3]:

$$v_m = f(C_m, PV, MT)_t, \quad (4)$$

gdje je:

v_m - brzina vozila u mreži [m/s];

C_m - operativni kapacitet mrežnih elemenata;

PV - prometni volumen [voz/h];

MT - upravljanje prometom;

t - vremenski okvir promatranja [s].

Osim upravljanja prometnim tokovima, funkcionalno područje upravljanje prometom sadrži i: upravljanje žurnim službama, upravljanje prioritetima javnog prijevoza i putno informiranje [7].

3 Mikroskopski simulator PTV VISSIM i programski paket MATLAB

U ovom poglavlju su opisani programski alati korišteni u svrhu izrade ovog rada, kao i način njihovog povezivanja COM sučeljem.

3.1 Mikroskopski simulator PTV VISSIM

Mikroskopski simulator prometa PTV VISSIM je danas jedan od vodećih programskih alata korištenih za simulaciju cestovne mreže. Pod pojmom mikroskopski se podrazumijeva simuliranje svakog prometnog entiteta zasebno, odnosno svakog automobila, teretnog vozila, tramvaja, bicikla, pješaka i slično. Pruža puno više detalja o prometnim entitetima od makroskopske simulacije koja promet poopćuje i prikazuje kao fluid te za estimaciju stanja koristi mehaniku fluida [12]. Zbog svoje visoke točnosti u obradi podataka kao i velikog broja detalja mikroskopska simulacija unutar PTV VISSIM-a je klasificirana kao model visoke vjernosti [13], [14].

VISSIM omogućuje sučelja za razmjenu podataka s drugim aplikacijama, te je također kroz ista sučelja moguće i preuzeti upravljanje nad simuliranom prometnom mrežom. Iako je moguće predati upravljanje simulacijom drugim aplikacijama postoje tzv. jezgreni moduli koji se ne mogu mijenjati. U VISSIM-u postoji sedam jezgrenih modula [13]:

1. **Modul generiranja slučajnih brojeva:** generira slučajne brojeve za primjenu u raznim metodama koje utječu na tijek simulacije;
2. **Modul atributa vozila i vozača:** definira attribute i karakteristike vozila te vozača koji ulaze u prometnu mrežu;
3. **Modul generiranja vozila:** definira kad i gdje će vozilo ući u prometnu mrežu;

4. **Modul praćenja vozila:** definira kako će vozilo ubrzavati, usporavati i pratiti druga vozila;
5. **Modul mijenjanja prometne trake:** definira kako i kad će vozilo promijeniti prometnu traku;
6. **Modul signalnog uređaja:** upravlja signalnim planovima u prometnoj mreži;
7. **Modul animacije:** prikazuje animaciju vozila u prometnoj mreži. Rad animacijskoga modula prikazan je na slici 3.



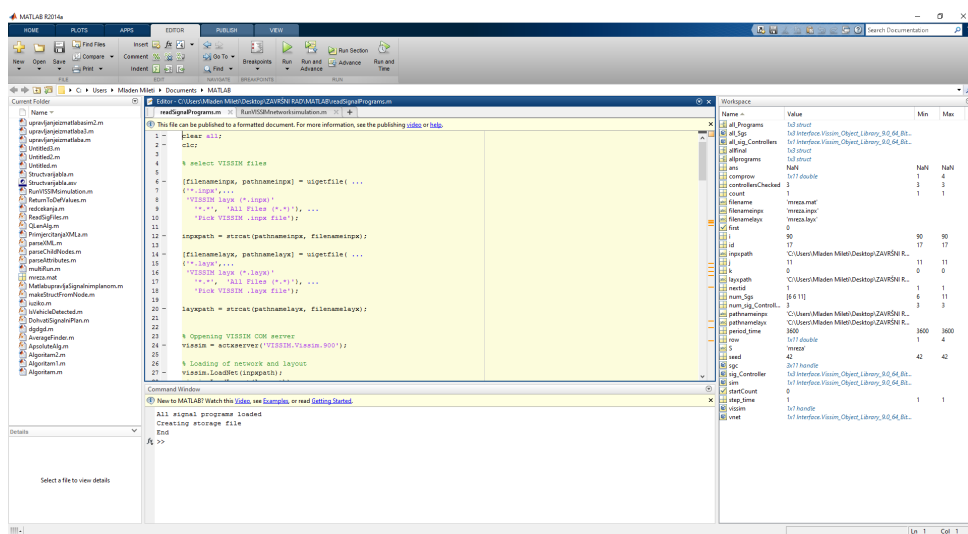
Slika 3: Prikaz rada animacijskoga modula unutar PTV VISSIM-a [2]

Modul praćenja vozila se zasniva na Wiedmannovom psihofizičkom modelu ponašanja vozača kojeg je razvio Rainer Wiedemann 1974. godine na Sveučilištu u Karlsruhe-u koji je izgrađen na temelju ljudskih percepcija i reakcija [2]. Unutar samog VISSIM-a definirana su dva različita modela ponašanja prema Wiedmannu. Model Wiedemann 74 je prilagođen za simulaciju urbanog prometa, dok je Wiedemann 99 prilagođen za korištenje pri simulaciji brzog prometa na autocestama. Navedena dva modela su zasnovana na ljudskim percepcijama i ponašanju, dok ih razlikuju atributi koji ih opisuju. U ovom radu je zbog potrebe simuliranja urbane prometne mreže korišten model Wiedemann 74.

3.2 Programski paket MATLAB

Programski paket MATLAB (*engl. Matrix Laboratory*) prikazan na slici 4 je aplikacija koja omogućuje rješavanje matematičkih problema, izvođenje različitih simulacija veza-

nih uz obradu signala, te upravljanje i identifikaciju sustava. Svoju primjenu uglavnom nalazi u praktičnom inženjerstvu i znanosti, ali je prisutan i u industriji. U svojim počecima je zamišljen kao alat za pomoć rješavanja problema u linearnoj algebri jer se zasniva na matrici s kompleksnim brojevima kao osnovnom tipu podatka. Kroz vlastiti razvoj kao interpretatorski programski jezik visoke razine je postao i odličan alat za rješavanje algebarskih i diferencijalnih jednadžbi te numeričke integracije [2]. Unutar MATLAB-a su ugrađeni mnogi grafički alati kojima se omogućuje jednostavnije definiranje problema kao i vizualizacija rješenja. Za razliku od ostalih programskih jezika poput npr. C[#], C++, Java ili sličnih, MATLAB koristi zapise slične standardnom zapisivanju matematičkih formula pa je iz tog razloga u njemu puno jednostavnije implementirati matematičke funkcije iako je po svojim performansama nešto sporiji [12]. Zajednička poveznica s ostalim višim programskim jezicima je implementiran alat za uređivanje i ispravljanje pogrešaka (*engl. debugging tool*), te objektno orijentirano programiranje [15], [16], [17].



Slika 4: Korisničko sučelje programskog paketa MATLAB

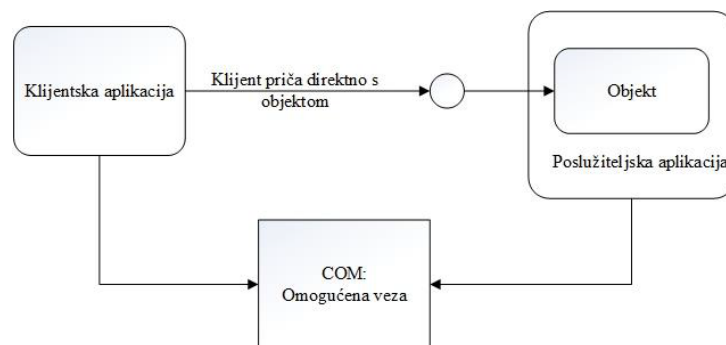
3.3 Povezivanje PTV VISSIM-a i MATLAB-a korištenjem COM sučelja

Komponentni objektni model (*engl. Component Object Model, COM*) je model komunikacijske arhitekture koja omogućuje razmjenu podataka kao i interakciju između dvije

različite računalne aplikacije. COM veza je strogo standardizirana što omogućuje spajanje aplikacija proizvedenih od različitih proizvođača. U svojoj osnovi COM arhitektura omogućuje [18]:

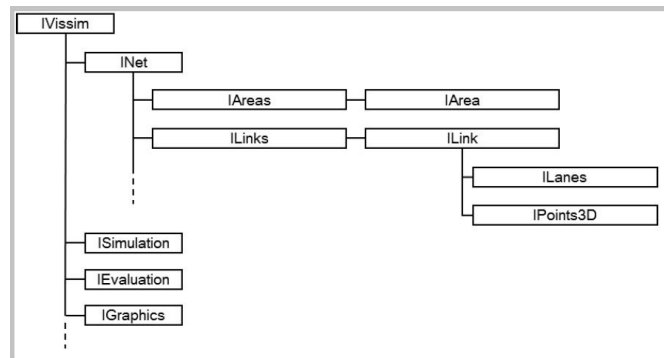
1. Definiranje norme za komunikaciju;
2. Neovisnost o vrsti programskog jezika;
3. Mogućnost rada na različitim platformama;
4. Nadogradivost.

Unutar COM arhitekture razlikujemo klijentsku aplikaciju i poslužiteljsku aplikaciju. COM sučelje omogućuje klijentskoj aplikaciji da se spoji na poslužiteljsku, ali nakon što je veza uspostavljena COM gubi ulogu u daljnjoj komunikaciji, odnosno klijentska aplikacija nastavlja komunicirati izravno s poslužiteljskom, kao što je prikazano na slici 5. Komunikacijska podloga za interakciju aplikacija s operacijskim sustavom i međusobno naziva se sučeljem (*engl. interface*) koje je moguće gledati kao strogo dogovoren ugovor između dviju aplikacija koji daje skup semantički povezanih metoda [19], [20].



Slika 5: COM veza između klijenta i poslužitelja [19]

U ovom radu COM sučeljem su povezane aplikacije VISSIM i MATLAB, gdje MATLAB dobiva ulogu klijentske aplikacije, a VISSIM poslužiteljske. MATLAB korištenjem COM sučelja pristupa objektima unutar VISSIM-a i dobiva mogućnost da im mijenja vrijednosti i time izravno utječe na izvođenje simulacije. Kako bi se uspješno upravljalo objektima potrebno je poznavanje njihove hijerarhije prikazane na slici 6.



Slika 6: VISSIM COM hijerarhija objekata [21]

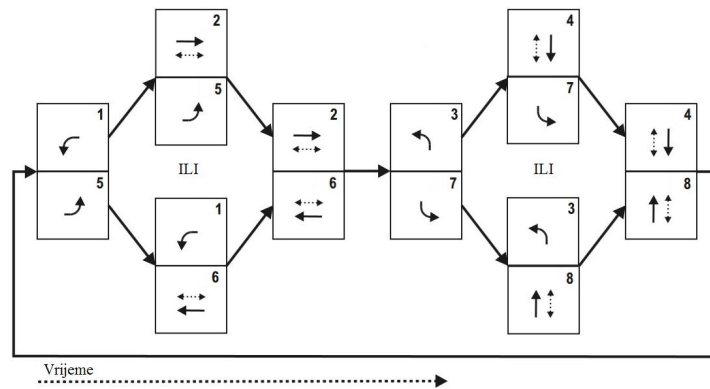
4 Pretvorba signalnih planova u NEMA strukturu

U ovom poglavlju će se ukratko objasniti princip NEMA upravljača i NEMA strukture, te će se prikazati algoritam pretvorbe signalnih planova u NEMA strukturu.

4.1 NEMA struktura

Današnji signalni uređaji koji upravljaju signalnim planovima na semaforiziranim raskrižjima se mogu podijeliti na fiksno programirane i prometno ovisne. Fiksno programirani su jeftiniji i jednostavnije izvedbe za razliku od prometno ovisnih koji imaju mogućnost prilagodbe stanju u prometu te tako doprinijeti smanjenju izgubljenog vremena, povećanju kapaciteta prometnice i sigurnosti u prometu. Suvremeni signalni uređaji sadrže mikroprocesore i uglavnom se kategoriziraju kao NEMA (*engl. National Electric Manufacturers Association*) upravljači ili upravljači tipa 170. Upravljači tipa 170 imaju široku namjenu, ali ne mogu upravljati semaforiziranim raskrižjem bez instalirane programske podrške. Uz programsku podršku upravljači tipa 170 postaju sposobni izvoditi funkcije identične funkcijama NEMA upravljača [2].

Uz korištenje NEMA upravljača i standarda signalni plan se može izvoditi u prstenastoj strukturi gdje je prsten definiran kao slijed signalnih faza koje se izvode u nizu [22]. Na slici 7 je prikazana prstenasta NEMA struktura odnosno vremenski slijed faza označenih brojevima te mogućnost prilagodbe faza prema stanju u prometu. U ovom radu NEMA struktura je korištena kao podloga za izradu strukture upravljanja signalnim planovima. Postojeća NEMA struktura je proširena tako da je svaka faza dodatno podijeljena i vremenski definirana tako da sadrži i podatke o zaštitnom međuvremenu između faza.



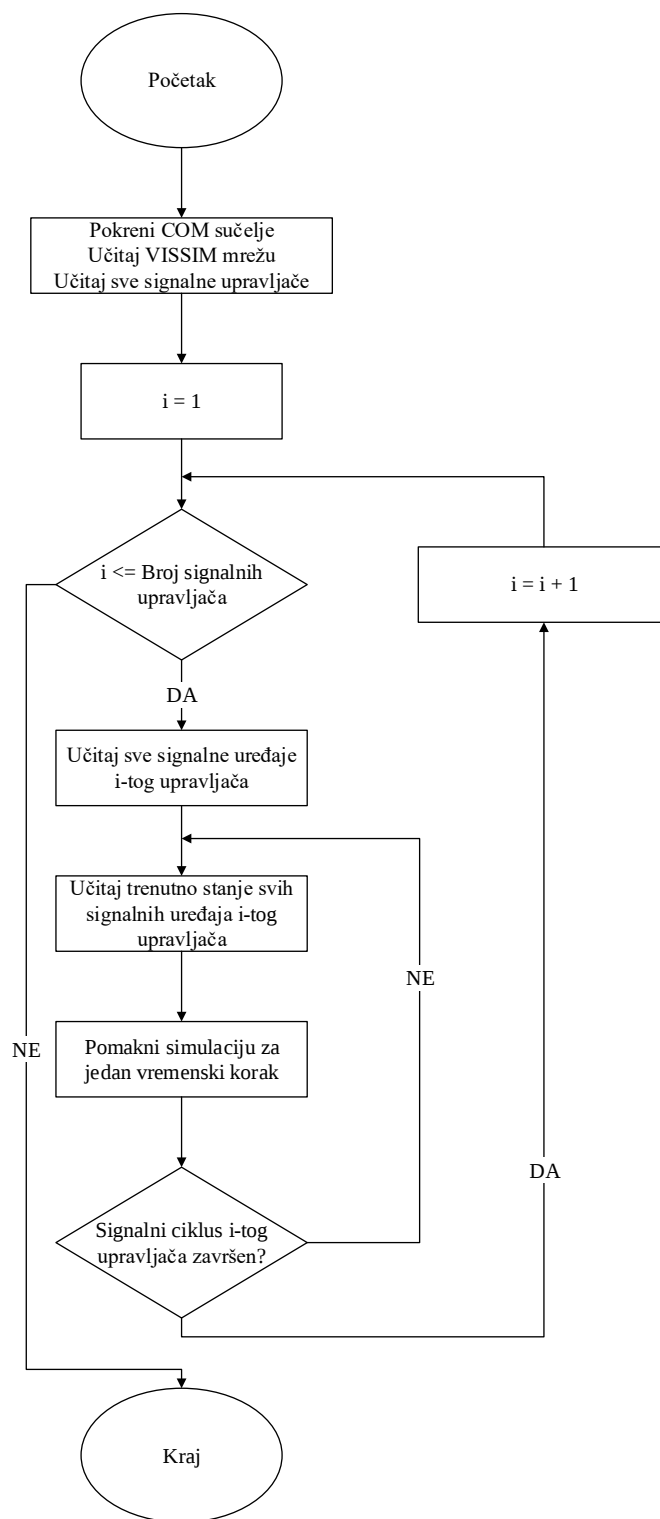
Slika 7: Prikaz dvostruke prstenaste strukture NEMA upravljača [23]

4.2 Algoritam za pretvorbu signalnih planova u NEMA strukturu

Kako bi se moglo upravljati signalnim planovima u VISSIM-u iz MATLAB-a potrebno je signalne planove pretvoriti u NEMA strukturu koju MATLAB može razumjeti. Za čitanje signalnih planova ugrađenih u simulacijski model za VISSIM moguća su dva pristupa:

1. Čitanje VISSIM-ovih ".sig" podataka spremljenih u XML (*engl. EXtensible Markup Language*) formatu;
2. Pokretanje VISSIM simulacije i bilježenje stanja svih signalnih uređaja.

Prvi pristup čitanja VISSIM-ovih podataka ne zahtijeva pokretanje simulacije, ali ne može biti automatizirano zato što iz ".sig" podataka nije vidljivo kojim signalnim uređajima se upravlja pa je potrebno ručno potpomoći proces pretvorbe signalnog plana. Drugi pristup zahtijeva pokretanje simulacije te se kroz pokrenutu simulaciju bilježi stanje svih signalnih uređaja u mreži. Ovim pristupom je pretvorba signalnog plana potpuno automatizirana neovisno o broju signalnih uređaja prisutnih u mreži. Na slici 8 je prikazan dijagram toka jednostavnog algoritma za automatizirano bilježenje stanja signalnih uređaja unutar VISSIM mreže.



Slika 8: Dijagram toka algoritma za automatizirano bilježenje stanja signalnih uređaja

Nakon izvršenja algoritma za svako raskrižje je stvorena matrična varijabla koja u

sebi sadrži signalni plan u proširenoj NEMA strukturi prema izrazu 5:

$$S_k = \begin{bmatrix} id_1 & idn_1 & t_1 & tdef_1 & s_{1,1} & \dots & s_{1,m} \\ id_2 & idn_2 & t_2 & tdef_2 & s_{2,1} & \dots & s_{2,m} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ id_n & idn_n & t_n & tdef_n & s_{n,1} & \dots & s_{n,m} \end{bmatrix}, \quad (5)$$

gdje je:

S - signalni plan u NEMA strukturi;

k - redni broj semaforiziranog raskrižja;

n - broj signalnih faza;

m - broj signalnih uređaja;

id - identifikacijski broj faze;

idn - identifikacijski broj sljedeće faze;

t - trajanje faze [s];

$tdef$ - početno trajanje faze [s];

s - signalni pojam definiran brojem prema tablici 3.

Tablica 3: Stanja signalnog uređaja i njihovi kôdni brojevi [21]

Signalni pojam	Kôdni broj
Crveno	1
Crveno-žuto	2
Zeleno	3
Žuto	4
Ugašeno	5
Ne-određeno	6
Treptajuće žuto	7
Treptajuće crveno	8
Treptajuće zeleno	9
Izmjenjivo crveno i zeleno	10
Zeleno-žuto	11

Signalni plan u proširenoj NEMA strukturi se može izvoditi i bez parametara idn te $tdef$, ali su oni dodani kako bi se omogućilo mijenjanje redoslijeda i trajanja faza

signalnog plana. Dobra je praksa dodati i parametre za ograničavanje maksimalne i/ili minimalne vrijednosti trajanja pojedinih faza.

5 Implementacija simulacijskog okruženja

U ovom poglavlju dan je pregled MATLAB varijabli korištenih za podešavanje i implementaciju simulacijskog okruženja, te je predstavljen jednostavan algoritam upravljanja simulacijskom mrežom prema signalnim planovima u matričnoj NEMA strukturi opisanoj u prethodnom poglavlju.

5.1 Varijable za podešavanje simulacijskog okruženja

Korištenjem COM sučelja omogućeno je upravljanje objektima unutar VISSIM-a kroz varijable u MATLAB-u. Osnovne naredbe za podešavanje VISSIM simulacije su:

- **vissim = actxserver('VISSIM.Vissim.900');** - Naredba stvara varijablu "vissim" koja pristupa okolini VISSIM simulatora. Izvršenje ove naredbe će otvoriti VISSIM aplikaciju.
- **vissim.LoadNet(inpxpath);** - Preko prethodno stvorene varijable "vissim" poziva se funkcija za učitavanje simulacijske mreže koja se nalazi na putanji definiranoj varijablom "inpxpath".
- **vissim.LoadLayout(layxpath);** - Preko varijable "vissim" se poziva funkcija za učitavanje definirane simulacijske okoline na putanji definiranoj varijablom "layxpath".
- **sim = vissim.Simulation;** - Naredba stvara varijablu "sim" koja pristupa objektu simulacije unutar "vissim" varijable poštujući hijerarhiju.
- **vnet = vissim.Net;** - Naredba stvara varijablu "vnet" koja pristupa objektu mreže unutar "vissim" varijable poštujući hijerarhiju.
- **sim.set('AttValue', 'SimPeriod', period_time);** - Naredba postavlja vrijednost atributa "SimPeriod" unutar objekta simulacije na vrijednost zadanu varijablom "period_time". Ovom naredbom se određuje trajanje simulacije.

- **sim.set('AttValue', 'SimRes', step_time);** - Naredba postavlja vrijednost atributa "SimRes" unutar objekta simulacije na vrijednost zadanu varijablom "step_time". Ovom naredbom se određuje rezolucija simulacije.
- **sim.set('AttValue', 'RandSeed', seed);** - Naredba postavlja vrijednost atributa "RandSeed" unutar objekta simulacije na vrijednost zadanu varijablom "seed". Ovom naredbom se određuje sjeme za generiranje slučajnih brojeva tijekom simulacije bitnih za kreiranje brojeva.

Ako se vrijednosti poput trajanja, rezolucije i slučajnog sjemena simulacije ne postave ručno korištenjem prethodno opisanih naredbi simulacija će učitati vrijednosti upisane unutar VISSIM-a. Kako bi se omogućilo upravljanje signalnim planovima potrebno je dohvatiti i postaviti stanje signalnih uređaja unutar simulacije. VISSIM će upravljati signalnim uređajima prema upisanom fiksnom signalnom planu sve do prve izmjene iz MATLAB-a, nakon koje MATLAB dobiva svu kontrolu nad signalnim uređajem. Za pristup signalnim uređajima koriste se naredbe:

- **all_sig_Controllers = vnet.SignalControllers;** - Naredba stvara varijablu "all_sig_Controllers" koja pristupa objektima signalnih upravljača unutar prethodno definirane "vnet" varijable. Za svako semaforizirano raskrižje u mreži će postojati jedan signalni upravljač.
- **sig_Controller(i) = all_sig_Controllers.ItemByKey(i)** - Naredba stvara varijablu i-tog jediničnog signalnog upravljača iz prethodno definirane varijable all_sig_Controllers.
- **all_Sgs(i) = sig_Controller(i).SGs;** - Naredba stvara varijablu "all_Sgs(i)" koja pristupa svim signalnim uređajima unutar i-tog signalnog upravljača.
- **sgc(i,j) = all_Sgs(i).ItemByKey(j);** - Naredba stvara varijablu "sgc(i,j)" koja pristupa j-tom signalnom uređaju i-tog signalnog upravljača.
- **sgc(i,j).get('AttValue', 'State')** - Naredba vraća vrijednost atributa "State" unutar objekta signalnog uređaja.
- **sgc(i,j).set('AttValue', 'State', signal_state);** - Naredba postavlja vrijednost atributa "State" unutar objekta signalnog uređaja na vrijednost zadanu varijablom

signal_state. Vrijednosti varijable signal_state odgovaraju vrijednostima prikazanim u tablici 3 u prethodnom poglavlju.

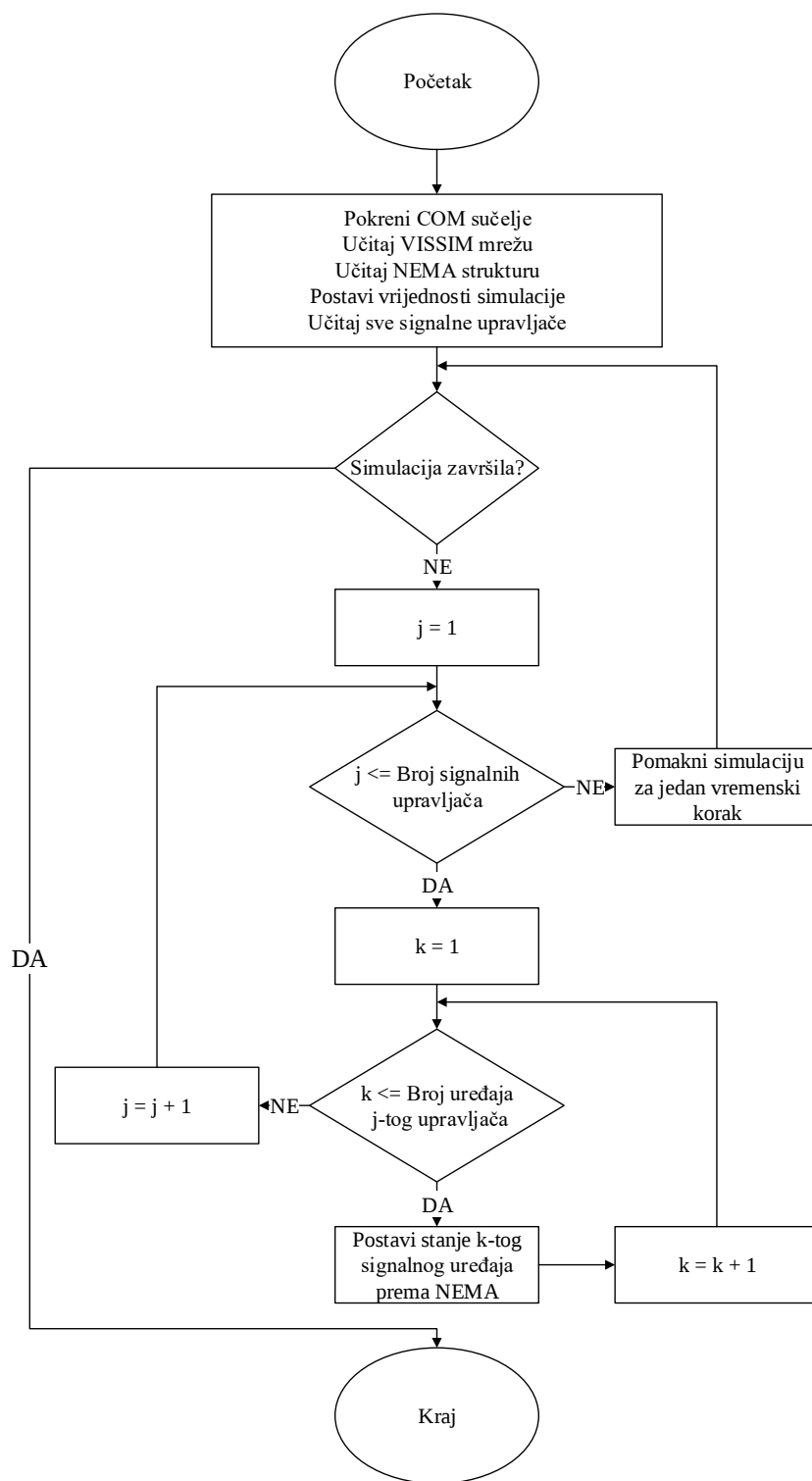
5.2 Algoritam upravljanja simulacijskom mrežom

Uz postojanje matrične NEMA strukture signalnog plana moguće je upravljati signalnim uređajima unutar simulacijske mreže u dva pristupa:

1. VISSIM održava fiksni signalni plan do zahtjeva za promjenu od MATLAB-a. Naknadno je moguć povratak upravljanja VISSIM-u;
2. MATLAB upravlja signalnim planom tijekom cijele simulacije.

Korištenje prvog pristupa rezultira nešto bržim izvođenjem simulacije jer se značajno smanjuje broj naredbi u MATLAB-u dok nije preuzeto upravljanje. Problem ovog pristupa je u otežanom povratku upravljanja VISSIM-u jer će nakon izvedenog upravljanja VISSIM nastaviti izvoditi početni fiksni signalni plan. Drugi pristup iako nešto sporiji u svojem izvođenju omogućuje potpuno upravljanje nad svim signalnim uređajima u bilo kojem trenutku simulacije. Na slici 9 je prikazan dijagram toka algoritma upravljanja simulacijskom mrežom u kojoj MATLAB upravlja signalnim planom tijekom cijele simulacije.

Neovisno o korištenom pristupu MATLAB ima mogućnost mijenjanja signalnog plana prema mjernim podacima dobivenih iz simulacije. Navedeni mjerni podaci mogu biti: red čekanja na raskrižju, broj vozila u mreži, gustoća prometnog toka, prisutnost vozila JGP-a ili žurnih službi itd.



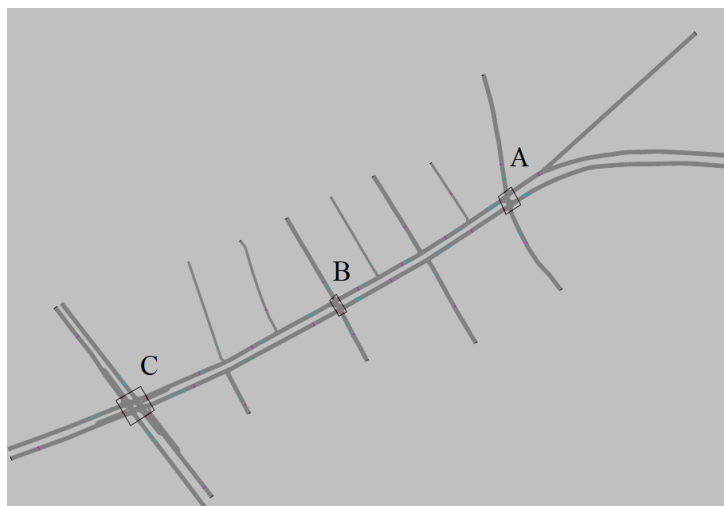
Slika 9: Dijagram toka algoritma za upravljanje signalnim uređajima simulacijske mreže

6 Rezultati simulacije

U ovom poglavlju će se prikazati rezultati rada mikrosimulatora VISSIM i programskog paketa MATLAB na primjeru jednostavne urbane mreže.

6.1 Opis korištenog modela urbane prometne mreže

Za implementaciju i analizu rada mikrosimulatora VISSIM i programskog paketa MATLAB napravljen je model urbane prometne mreže u obliku koridora prikazan na slici 10 koji obuhvaća Ulicu kralja Zvonimira u Zagrebu od raskrižja s Heinzellovom ulicom do raskrižja s Harambašićevom ulicom.



Slika 10: Model urbane prometne mreže u VISSIM-u: A) Raskrižje Ulica kralja Zvonimira - Harambašićeva ulica; B) Raskrižje Ulica kralja Zvonimira - Šulekova ulica; C) Raskrižje Ulica kralja Zvonimira - Heinzellova ulica.

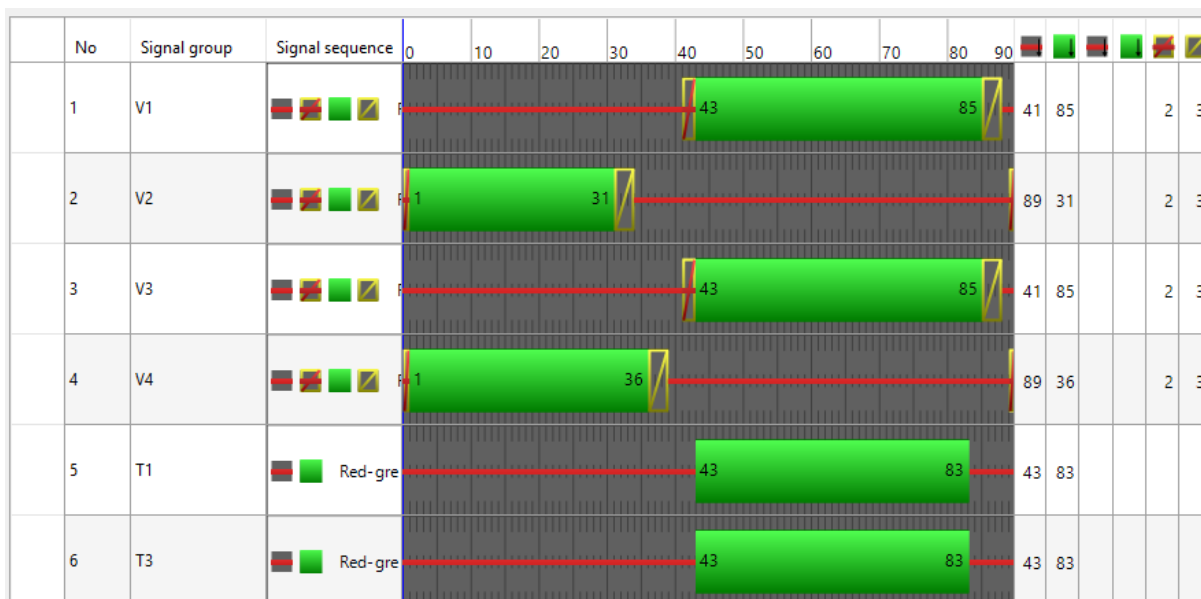
Model se sastoji od tri semaforizirana raskrižja iako se na istom potezu danas nalazi četiri semaforizirana raskrižja. Zbog ne-dostupnosti podataka o signalnom planu raskrižja: "Ulica kralja Zvonimira-Kušlanova ulica" ono je izostavljeno iz modela i tretirano je kao ne-semaforizirano raskrižje. Ostala raskrižja u modelu, kao i podaci o prometnom opterećenju pojedinih prometnica prikazani u tablici 4 su preuzeti iz [7].

Tablica 4: Zadano prometno opterećenje prema podacima iz [7]

Prometno opterećenje [voz/h]			
Prometnica	[voz/h]	Prometnica	[voz/h]
Trg Johna Fitzgeralda Kennedyja - Zapad	720	Šulekova ulica - Jug	220
Trg Johna Fitzgeralda Kennedyja - Sjever	300	Šulekova ulica - Sjever	160
Harambašićeva ulica - Jug	150	Babukićeva ulica - Sjever	33
Harambašićeva ulica - Sjever	220	Rusanova ulica - Jug	42
Smodekova ulica - Sjever	37	Heinzelova ulica - Jug	620
Kušlanova ulica - Jug	60	Heinzelova ulica - Sjever	485
Kušlanova ulica - Sjever	50	Ulica kralja Zvonimira - Zapad	1100

6.1.1 Raskrižje: Ulica kralja Zvonimira - Harambašićeva ulica

Raskrižje Ulica kralja Zvonimira - Harambašićeva ulica je prvo raskrižje pokaznog koridora u smjeru istok-zapad. Glavni prometni tok čini Ulica kralja Zvonimira s dvije prometne trake u oba smjera, dok je sporedni prometni tok Harambašićeva ulica s jednom prometnom trakom u oba smjera. Fiksni signalni plan prikazan je na slici 11, a ciklus traje 90 [s].



Slika 11: Fiksni signalni plan raskrižja: Ulica kralja Zvonimira - Harambašićeva ulica

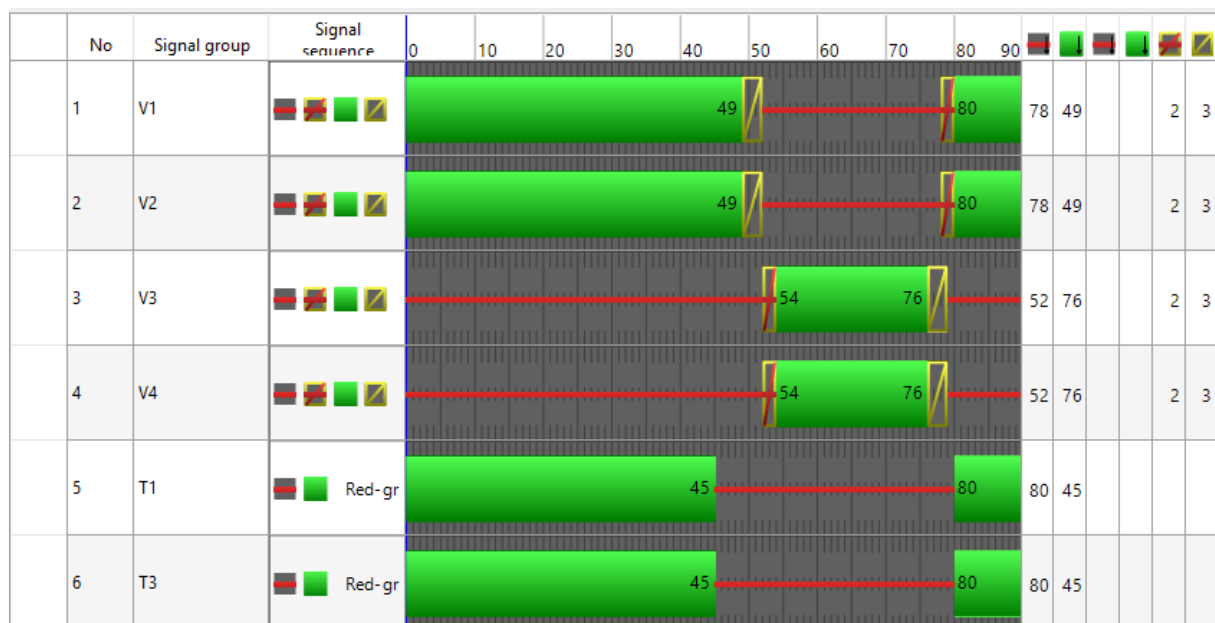
Iz slike 11 je vidljivo da je upravljanje raskrižjem izvedeno u dvije faze. U prvoj fazi su propuštena vozila sporednog prometnog toka, a u drugoj vozila glavnog toka. Nakon

pretvorbe signalnog plana u NEMA strukturu dobivena je matrica:

$$S_1 = \begin{bmatrix} 1 & 2 & 1 & 1 & 1 & 2 & 1 & 2 & 1 & 1 \\ 2 & 3 & 30 & 30 & 1 & 3 & 1 & 3 & 1 & 1 \\ 3 & 4 & 3 & 3 & 1 & 4 & 1 & 3 & 1 & 1 \\ 4 & 5 & 2 & 2 & 1 & 1 & 1 & 3 & 1 & 1 \\ 5 & 6 & 3 & 3 & 1 & 1 & 1 & 4 & 1 & 1 \\ 6 & 7 & 2 & 2 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 7 & 8 & 2 & 2 & 2 & 1 & 2 & 1 & 1 & 1 \\ 8 & 9 & 40 & 40 & 3 & 1 & 3 & 1 & 3 & 3 \\ 9 & 10 & 2 & 2 & 3 & 1 & 3 & 1 & 1 & 1 \\ 10 & 11 & 3 & 3 & 4 & 1 & 4 & 1 & 1 & 1 \\ 11 & 12 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 12 & 1 & 1 & 1 & 1 & 2 & 1 & 2 & 1 & 1 \end{bmatrix}. \quad (6)$$

6.1.2 Raskrižje: Ulica kralja Zvonimira - Šulekova ulica

Raskrižje Ulica kralja Zvonimira - Šulekova ulica je drugo raskrižje pokaznog koridora u smjeru istok-zapad. Glavni prometni tok čini Ulica kralja Zvonimira s dvije prometne trake u oba smjera, dok sporedni tok čini Šulekova ulica s jednom prometnom trakom u oba smjera. Fiksni signalni plan prikazan je na slici 12, a ciklus traje 90 [s].



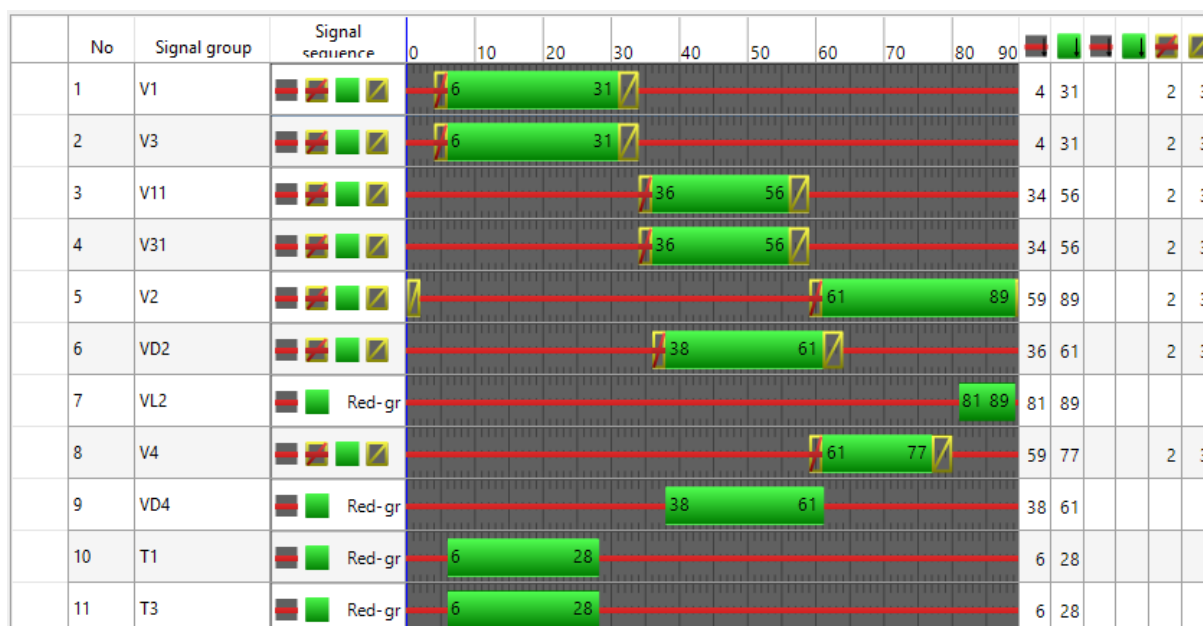
Slika 12: Fiksni signalni plan raskrižja: Ulica kralja Zvonimira - Šulekova ulica

Iz slike 12 je vidljivo da je izvedeno u dvije faze na način sličan kao na prethodnom raskrižju, s jedinom razlikom u trajanju dviju prikazanih faza. Nakon pretvorbe u NEMA strukturu dobivena je matrica:

$$S_2 = \begin{bmatrix} 1 & 2 & 45 & 45 & 3 & 3 & 1 & 1 & 3 & 3 \\ 2 & 3 & 4 & 4 & 3 & 3 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 3 & 4 & 3 & 3 & 4 & 4 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 4 & 5 & 2 & 2 & 1 & 1 & 2 & 2 & 1 & 1 \\ 5 & 6 & 22 & 22 & 1 & 1 & 3 & 3 & 1 & 1 \\ 6 & 7 & 2 & 2 & 1 & 1 & 4 & 4 & 1 & 1 \\ 7 & 8 & 1 & 1 & 2 & 2 & 4 & 4 & 1 & 1 \\ 8 & 9 & 1 & 1 & 2 & 2 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 9 & 1 & 10 & 10 & 3 & 3 & 1 & 1 & 3 & 3 \end{bmatrix} . \quad (7)$$

6.1.3 Raskrižje: Ulica kralja Zvonimira - Heinzlova ulica

Raskrižje Ulica kralja Zvonimira - Heinzlova ulica je posljednje raskrižje pokaznog koridora u smjeru istok-zapad. Glavni prometni tok čini Ulica kralja Zvonimira s dvije prometne trake u oba smjera, dok sporedni tok čini Šulekova ulica s jednom prometnom trakom u oba smjera. Fiksni signalni plan prikazan je na slici 13, a ciklus traje 90 [s].



Slika 13: Fiksni signalni plan raskrižja: Ulica kralja Zvonimira - Heinzlova ulica

Na slici 13 je vidljivo da je ovo raskrižje izvedeno u tri faze:

- 1. Faza - Glavni prometni tok - Ulica kralja Zvonimira;
- 2. Faza - Lijevi skretači u sporedni prometni tok;
- 3. Faza - Sporedni prometni tok - Heinzlova ulica i lijevi skretači u glavni prometni tok.

Pretvorbom u NEMA strukturu dobivena je matrica:

$$S_3 = \begin{bmatrix} 1 & 2 & 2 & 2 & 1 & 1 & 1 & 1 & 4 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 2 & 3 & 2 & 2 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 3 & 4 & 2 & 2 & 2 & 2 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 4 & 5 & 22 & 22 & 3 & 3 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 3 & 3 \\ 5 & 6 & 3 & 3 & 3 & 3 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 6 & 7 & 3 & 3 & 4 & 4 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 7 & 8 & 2 & 2 & 1 & 1 & 2 & 2 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 8 & 9 & 2 & 2 & 1 & 1 & 3 & 3 & 1 & 2 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 9 & 10 & 18 & 18 & 1 & 1 & 3 & 3 & 1 & 3 & 1 & 1 & 3 & 1 & 1 \\ 10 & 11 & 3 & 3 & 1 & 1 & 4 & 4 & 1 & 3 & 1 & 1 & 3 & 1 & 1 \\ 11 & 12 & 2 & 2 & 1 & 1 & 1 & 1 & 2 & 3 & 1 & 2 & 3 & 1 & 1 \\ 12 & 13 & 3 & 3 & 1 & 1 & 1 & 1 & 3 & 4 & 1 & 3 & 1 & 1 & 1 \\ 13 & 14 & 13 & 13 & 1 & 1 & 1 & 1 & 3 & 1 & 1 & 3 & 1 & 1 & 1 \\ 14 & 15 & 3 & 3 & 1 & 1 & 1 & 1 & 3 & 1 & 1 & 4 & 1 & 1 & 1 \\ 15 & 16 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 3 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 16 & 17 & 8 & 8 & 1 & 1 & 1 & 1 & 3 & 1 & 3 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 17 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 4 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \end{bmatrix}. \quad (8)$$

6.2 Prikaz i analiza rezultata simulacije

Kako bi se mogla provesti evaluacija simulacije simulirano je 20 različitih simulacija. Prvih 10 je izvedeno isključivo unutar VISSIM-a, dok je drugih 10 izvedeno spajanjem MATLAB-a i VISSIM-a korištenjem COM sučelja. Sve simulacije traju 3600 [s] odnosno 1 [h]. U simulacijama gdje je korišten MATLAB napravljena je jedna izmjena signalnog plana mjerenjem redova čekanja na svim raskrižjima uz postojanje logičkog uvjeta za izmjenu signalnog plana, dok je vrijeme povećanja, odnosno skraćivanja zadano fiksno. Korištenjem ovog pristupa MATLAB je mjerenjem redova čekanja napravio sljedeće izmjene signalnog plana:

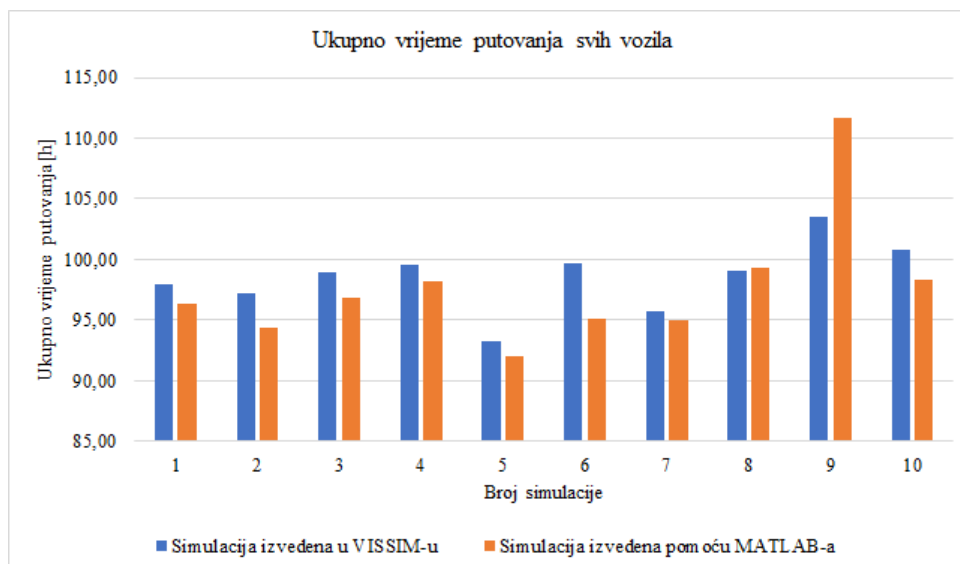
1. Ulica kralja Zvonimira - Harambašićeva ulica: skraćeno trajanje faze sporednog prometnog toka na 25 [s];

2. Ulica kralja Zvonimira - Harambašićeva ulica: produženo trajanje faze glavnog prometnog toka na 45 [s];
3. Ulica kralja Zvonimira - Šulekova ulica: skraćeno trajanje faze sporednog prometnog toka na 17 [s];
4. Ulica kralja Zvonimira - Šulekova ulica: produženo trajanje faze glavnog prometnog toka na 65 [s];
5. Ulica kralja Zvonimira - Heinzlova ulica: skraćeno trajanje faze lijevih skretača u sporedni prometni tok na 13 [s];
6. Ulica kralja Zvonimira - Heinzlova ulica: produženo trajanje faze glavnog prometnog toka na 27 [s];

Važno je napomenuti da navedene izmjene iako prometno ovisne ne predstavljaju u potpunosti adaptivno upravljanje već samo dokazuju mogućnost izmjene postojećih signalnih planova iz MATLAB-a. U svakoj izvedenoj simulaciji mjereni su sljedeći prometni parametri:

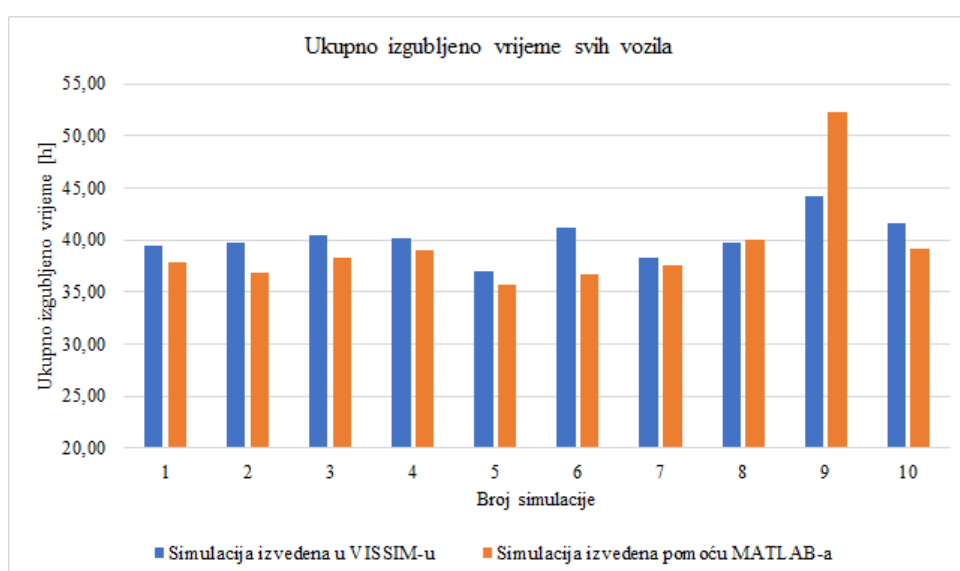
1. Ukupno vrijeme putovanja svih vozila [h];
2. Ukupno izgubljeno vrijeme svih vozila [h];
3. Ukupno vrijeme stajanja svih vozila [h];
4. Ukupan broj zaustavljanja svih vozila;
5. Emisije ugljičnog monoksida (CO) - za svako raskrižje odvojeno [g];
6. Prosječno vrijeme stajanja na raskrižju - za svako raskrižje odvojeno [s].

Na grafikonu 1 prikazani su rezultati ukupnog vremena putovanja svih vozila. Iz grafikona je vidljivo smanjenje ukupnog vremena putovanja u svim simulacijama osim u simulacijama osam i devet. Prosjek ukupnog vremena putovanja u svih deset simulacija izvedenih u VISSIM-u iznosi 98,57 [h], dok prosjek ukupnog vremena putovanja u svih deset simulacija izvedenih u VISSIM-u i MATLAB-u iznosi 97,72 [h]. U postotku je ukupno vrijeme putovanja smanjeno za 0,86%.



Grafikon 1: Ukupno vrijeme putovanja svih vozila

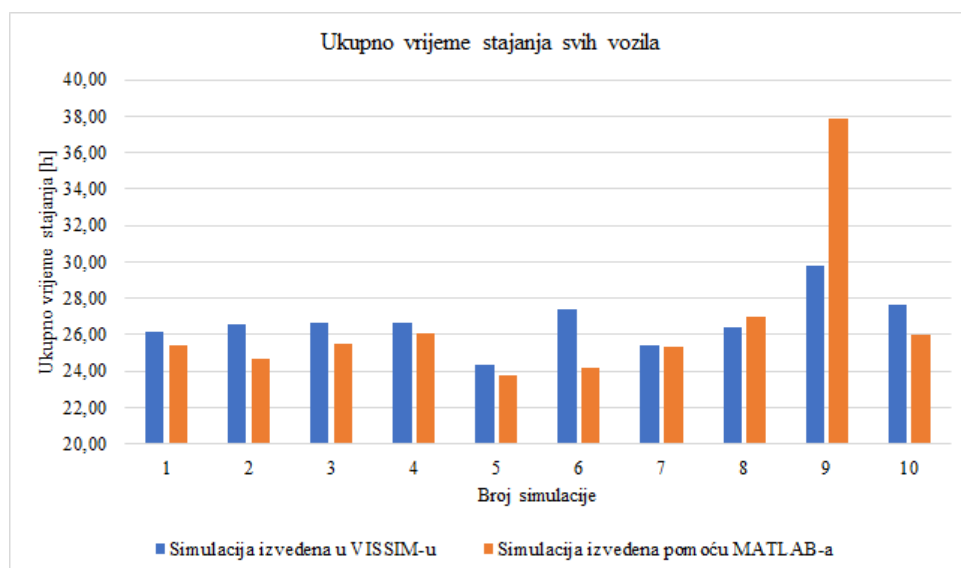
Grafikon 2 prikazuje rezultate ukupnog izgubljenog vremena svih vozila. Vidljivo je smanjenje izgubljenog vremena u svim simulacijama osim u simulacijama osam i devet što je analogno rezultatima ukupnog vremena putovanja. Prosjek ukupnog izgubljenog vremena u simulacijama izvedenih u VISSIM-u iznosi 40,15 [h], dok za simulacije izvedene u VISSIM-u i MATLAB-u iznosi 39,32 [h]. U postotku je ukupno izgubljeno vrijeme smanjeno za 2,07%.



Grafikon 2: Ukupno izgubljeno vrijeme svih vozila

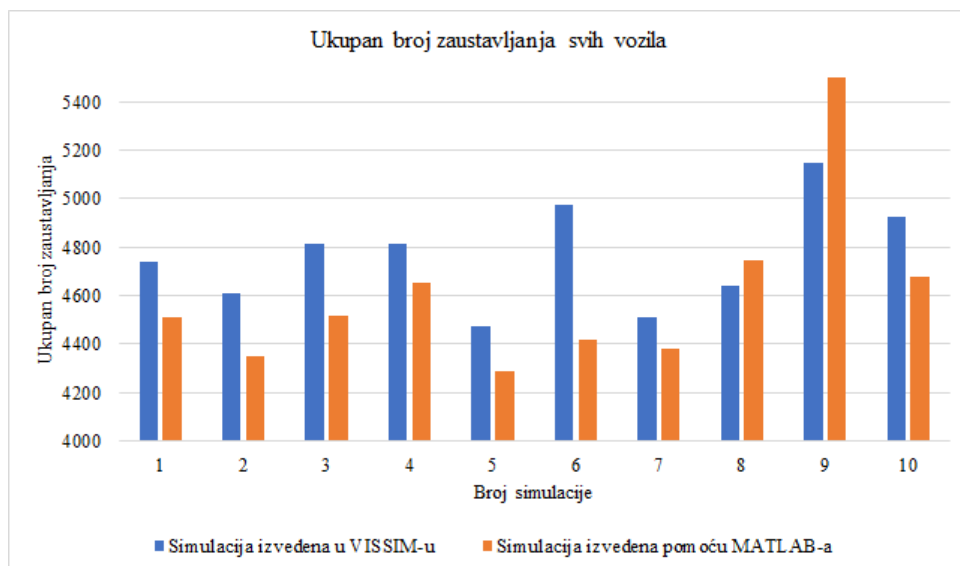
Grafikon 3 prikazuje ukupno vrijeme stajanja svih vozila. Rezultati su analogni re-

zultatima ukupnog vremena putovanja i ukupnog izgubljenog vremena s poboljšanjem u svim simulacijama osim osam i devet. Ukupno vrijeme stajanja svih vozila za simulacije izvedene u VISSIM-u iznosi 26,70 [h], dok za simulacije izvedene u VISSIM-u i MATLAB-u iznosi 26,57 [h]. U postotku ukupno vrijeme stajanja je smanjeno za 0,49%.



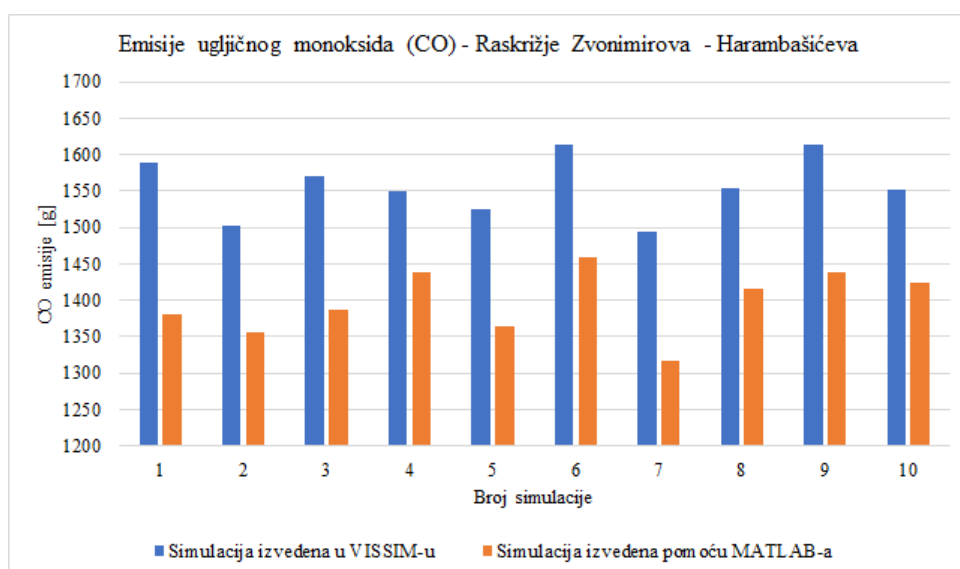
Grafikon 3: Ukupno vrijeme stajanja svih vozila

Grafikon 4 prikazuje ukupan broj zaustavljanja svih vozila koji je također analogan rezultatima mjerenja prethodnih parametara. Ukupan broj zaustavljanja za simulacije izvedene u VISSIM-u iznosi 4765, dok za simulacije izvedene u VISSIM-u i MATLAB-u iznosi 4638. U postotku ukupan broj zaustavljanja je smanjen za 2,67%. Iz dosadašnjih podataka može se zaključiti da poboljšanje nastaje zbog manjeg broja zaustavljanja zbog produljenja faze glavnog prometnog toka na svim raskrižjima. Kako bi se otkrio razlog pogoršanja u simulacijama osam i devet potrebno je analizirati svako raskrižje zasebno.



Grafikon 4: Ukupno broj zaustavljanja svih vozila

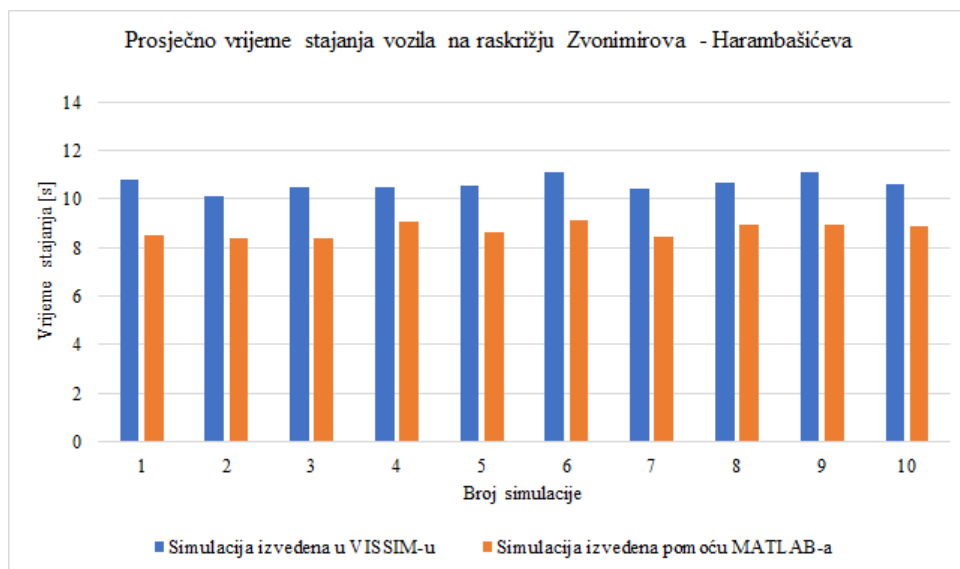
Grafikon 5 prikazuje emisije ugljičnog monoksida za raskrižje: Ulica kralja Zvonimira - Harambašićeva ulica. Primjećuje se poboljšanje u svim simulacijama. Prosječne emisije ugljičnog monoksida za simulacije izvedene u VISSIM-u iznose 1556,17 [g], dok za simulacije izvedene u VISSIM-u i MATLAB-u iznosi 1398,13 [g]. U postotku su emisije ugljičnog monoksida smanjene za 10,16%.



Grafikon 5: Emisije ugljičnog monoksida (CO) na raskrižju Zvonimirova-Harambašićeva

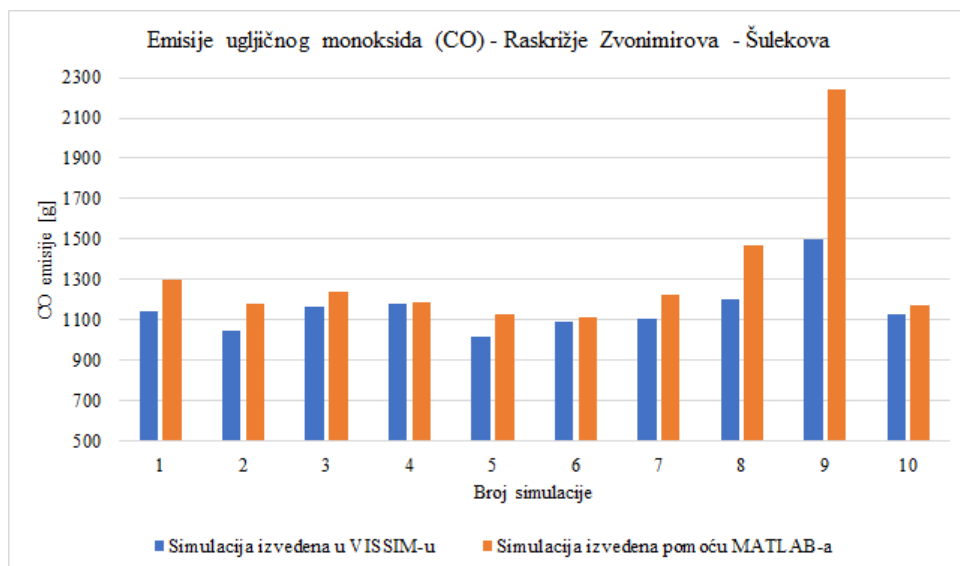
Grafikon 6 prikazuje prosječno vrijeme stajanja vozila na raskrižju: Ulica kralja Zvonimira - Harambašićeva ulica. Rezultat je analogan rezultatima prosječnih emisija

ugličnog monoksida za isto raskrižje, te je primijećeno poboljšanje u svim simulacijama. Prosječno vrijeme stajanja za simulacije izvedene u VISSIM-u iznosi 10,65 [s], dok za simulacije izvedene u VISSIM-u i MATLAB-u iznosi 8,73 [s]. U postotku je vrijeme stajanja na raskrižju smanjeno za 18,03%.



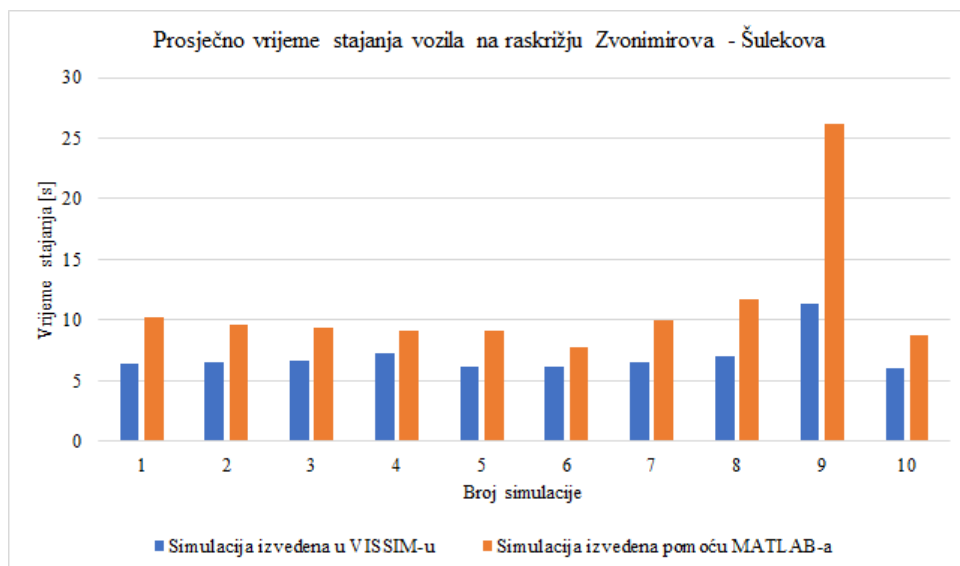
Grafikon 6: Prosječno vrijeme stajanja vozila na raskrižju Zvonimirova-Harambašićeva

Grafikon 7 prikazuje emisije ugljičnog monoksida za raskrižje: Ulica kralja Zvonimira - Šulekova ulica. Iz grafikona je vidljivo pogoršanje u svim simulacijama s najistaknutijim pogoršanjem u simulaciji devet. Prosječne emisije ugljičnog monoksida za simulacije izvedene u VISSIM-u iznose 1157,96 [g], dok za simulacije izvedene u VISSIM-u i MATLAB-u iznose 1325,93 [g]. U postotku su emisije ugljičnog monoksida povećane za 14,51%.



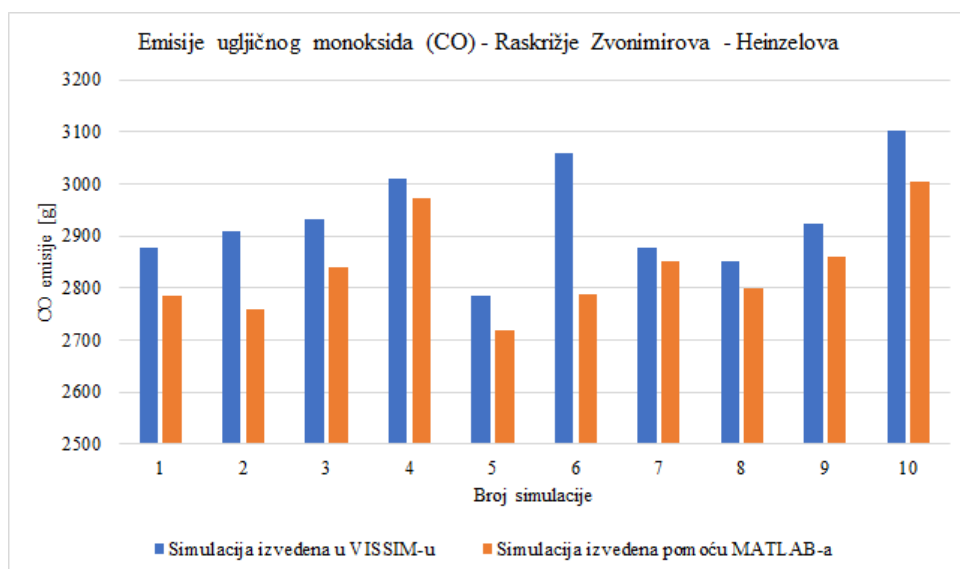
Grafikon 7: Emisije ugljičnog monoksida (CO) na raskrižju Zvonimirova-Šulekova

Grafikon 8 prikazuje prosječno vrijeme stajanja vozila na raskrižju: Ulica kralja Zvonimira - Šulekova ulica. Rezultat je analogan rezultatima emisije ugljičnog monoksida na istom raskrižju. Prosječno vrijeme stajanja za simulacije izvedene u VISSIM-u iznosi 7,01 [s], dok za simulacije izvedene u VISSIM-u i MATLAB-u iznosi 11,18 [s]. U postotku je prosječno vrijeme stajanja povećano za 59,49%. Iz rezultata je vidljivo znatno produljenje stajanja na raskrižju iako je produženo trajanje faze glavnog prometnog toka. Razlog velikog pogoršanja leži u tome što se produljenjem faze glavnog prometnog toka nije omogućio prolazak većem broju vozila zato što prometna potražnja ne zahtijeva toliko produljenje faze. Zbog produljenja faze glavnog prometnog toka na gubitku je faza sporednog toka gdje skraćena faza nije bila dovoljna da se udovolji zahtjevima prometne potražnje sporednog toka. Najveće pogoršanje vidljivo u simulaciji devet se pripisuje zagušenju sporednog toka uslijed dolaska većeg broja vozila sporednim tokom.



Grafikon 8: Prosječno vrijeme stajanja vozila na raskrižju Zvonimirova-Šulekova

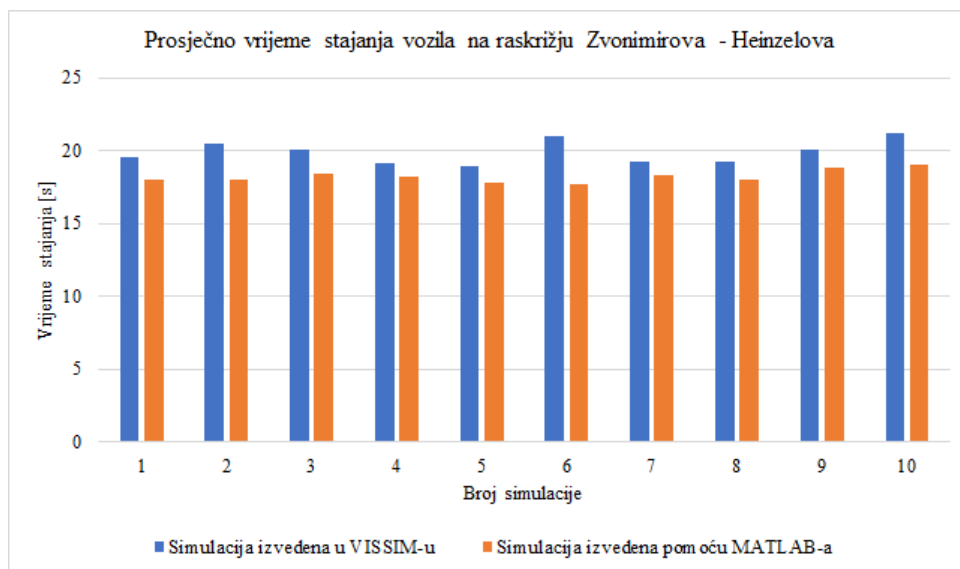
Grafikon 9 prikazuje emisije ugljičnog monoksida za raskrižje: Ulica kralja Zvonimira - Heinzelova ulica. Iz grafikona je vidljivo poboljšanje u svim simulacijama. Prosječne emisije ugljičnog monoksida za simulacije izvedenu u VISSIM-u iznose 2932,18 [g], dok za simulacije izvedene u VISSIM-u i MATLAB-u iznosi 2837,90 [g]. U postotku su emisije ugljičnog monoksida smanjene za 3,22%.



Grafikon 9: Emisije ugljičnog monoksida (CO) na raskrižju Zvonimirova-Heinzelova

Grafikon 10 prikazuje prosječno vrijeme stajanja vozila na raskrižju: Ulica kralja Zvonimira - Heinzelova ulica. Rezultat je analogan rezultatima emisija ugljičnog mo-

noksida za isto raskrižje, te je primijećeno poboljšanje u svim simulacijama. Prosječno vrijeme stajanja za simulacije izvedene u VISSIM-u iznosi 19,88 [s], dok za simulacije izvedene u VISSIM-u i MATLAB-u iznosi 18,22 [s]. U postotku je prosječno vrijeme stajanja smanjeno za 8,35%.



Grafikon 10: Prosječno vrijeme stajanja vozila na raskrižju Zvonimirova-Heinzelova

7 Zaključak

Implementacijom ITS rješenja na području upravljanja prometom urbane mreže moguće je ostvariti korisne učinke u prometu. U ovom radu je u simulacijskom alatu VISSIM izrađen jednostavan prometni koridor od tri povezana semaforizirana raskrižja prema stvarnim podacima o prometnom opterećenju i signalnim planovima. Spajanjem VISSIM-a s programskim paketom MATLAB korištenjem COM sučelja omogućuje se upravljanje signalnim uređajima iz MATLAB sučelja prema izrađenoj matričnoj NEMA strukturi signalnog plana. Nad izrađenim prometnim koridorom je provedena analiza upravljanja mjerenjem relevantnih prometnih parametara. Prema mjerenim podacima o duljini reda čekanja na svim raskrižjima MATLAB vrši izmjene signalnog plana. Nakon izmjene signalnog plana iz MATLAB-a dobiveni rezultati pokazuju relativno malen, ali pozitivan utjecaj izmjena signalnog plana. Nastavak istraživanja vidi se u implementaciji naprednijeg algoritma upravljanja kako bi se moglo postići adaptivno upravljanje signalnim planovima nad cijelim prometnim koridorom, te u integraciji dodatnih sustava iz funkcionalnog područja upravljanje prometom. U tu svrhu se može iskoristiti neizrazita logika ili strojno učenje za što MATLAB već ima ugrađene dodatke.

Literatura

- [1] Kapusta, B., Miletić, M., Ivanjko, E., Vujić, M. Preemptive Traffic Light Control based on Vehicle Tracking and Queue Lengths. Prihvaćeno za prezentaciju na međunarodnoj znanstvenoj konferenciji ELMAR2017.
- [2] Kapusta, B., Miletić, M. Analiza utjecaja adaptivnog upravljanja signalnim planovima semaforiziranog raskrižja na vrijeme putovanja vozila žurnih službi. Rektorova nagrada, Sveučilište u Zagrebu, Zagreb, 2017.
- [3] Bošnjak, I. *Inteligentni transportni sustavi 1*. Sveučilište u Zagrebu, Fakultet prometnih znanosti, Zagreb, 2006.
- [4] ISO norma 4813-1:2015. <https://www.iso.org/standard/57393.html> pristupljeno: srpanj 2017.
- [5] Frame-online. <http://frame-online.eu/> pristupljeno: srpanj 2017.
- [6] Bošnjak, I., Badanjak, D. *Osnove prometnog inženjerstva*. Sveučilište u Zagrebu, Fakultet prometnih znanosti, Zagreb, 2005.
- [7] Vujić, M. Sustav dinamičkih prioriteta za vozila javnog gradskog prijevoza u automatskom upravljanju prometom. Doktorska disertacija, Fakultet Prometnih Znanosti, Sveučilište u Zagrebu, 2013.
- [8] Anžek, M., Divić, A., Lanović, Z. Smjernice za prometnu svjetlosnu signalizaciju na cestama. Ministarstvo pomorstva, prometa i veza, Zagreb, 2001.
- [9] Highway Capacity Manual - HCM2010. Transportation Research Board of the National Academies, 2010.
- [10] Zakon o sigurnost prometa na cestama. Narodne Novine, br. 67., 09.06.2008., čl. 59.
- [11] Lanović, Z. Cestovna telematika - Signalni plan - vježbe. Fakultet prometnih znanosti, Zagreb, 2016.

- [12] Kušić, K. Okruženje za simulaciju sustava za upravljanje promjenjivim ograničenjem brzine na urbanim autocestama zasnovanih na učenju. Diplomski rad, Fakultet prometnih znanosti, Zagreb, 2017.
- [13] Ekeila, W. Dynamic transit signal priority. Master Thesis, University of Sharjah, 2002.
- [14] PTV VISSIM. <http://vision-traffic.ptvgroup.com/en-us/products/ptv-vissim/>, pristupljeno: srpanj 2017.
- [15] Petković, T. *Kratke upute za korištenje MATLAB-a*. Zavod za elektroničke sustave i obradu informacija Fakulteta elektrotehnike i računalstva, Sveučilište u Zagrebu, Zagreb, 2005.
- [16] Brian H. Hahn, Daniel T. Valentine. *Essential MATLAB for Engineers and Scientists third edition*. 2007.
- [17] David Houcque. *Introduction to MATLAB for engineering students*. Northwestern University, 2005.
- [18] Wedin, S. Microsoft's Component Object Model (COM). Department of Computer Engineering, Malardalens Hogskola, 2000.
- [19] Soldo, T. Distribuirano objektno programiranje - COM. predavanja, Visoka škola za informacijske tehnologije, Zagreb, 2016.
- [20] Box, D., Kindel, C., Booch, G. *Essential COM*. 1998.
- [21] Tamás Tettamanti, Márton Tamás Horváth. *A practical manual for Vissim COM programming in Matlab*. Budapest University of Technology and Economics, Dept. for Control of Transportation and Vehicle Systems, 2015.
- [22] Peter Koonce, Lee Rodegerdts, Kevin Lee, Shaun Quayle, Scott Beaird, Cade Braud, Jim Bonneson, Phil Tarnoff, Tom Urbanik. *Traffic Signal Timing Manual*. Federal Highway Administration, Turner-Fairbank Highway Research Center, 6300 Georgetown Pike, 2006.
- [23] *Traffic design manual*. Traffic Operations Division, Traffic Engineering Office, 2016.

Popis slika

1	Komponente izračuna zaštitnog međuvremena [7]	9
2	Primjer vremenski fiksnog signalnog plana [11]	10
3	Prikaz rada animacijskoga modula unutar PTV VISSIM-a [2]	13
4	Korisničko sučelje programskog paketa MATLAB	14
5	COM veza između klijenta i poslužitelja [19]	15
6	VISSIM COM hijerarhija objekata [21]	16
7	Prikaz dvostruke prstenaste strukture NEMA upravljača [23]	18
8	Dijagram toka algoritma za automatizirano bilježenje stanja signalnih uređaja	19
9	Dijagram toka algoritma za upravljanje signalnim uređajima simulacijske mreže	25
10	Model urbane prometne mreže u VISSIM-u: A) Raskrižje Ulica kralja Zvonimira - Harambašićeva ulica; B) Raskrižje Ulica kralja Zvonimira - Šulekova ulica; C) Raskrižje Ulica kralja Zvonimira - Heinzlova ulica.	26
11	Fiksni signalni plan raskrižja: Ulica kralja Zvonimira - Harambašićeva ulica	27
12	Fiksni signalni plan raskrižja: Ulica kralja Zvonimira - Šulekova ulica	29
13	Fiksni signalni plan raskrižja: Ulica kralja Zvonimira - Heinzlova ulica	30

Popis tablica

1	Ovisnost duljine ciklusa o broju faza [9]	7
2	Trajanje žutog svjetla u ovisnosti o dozvoljenoj brzini [9]	8
3	Stanja signalnog uređaja i njihovi kôdni brojevi [21]	20
4	Zadano prometno opterećenje prema podacima iz [7]	27

Popis grafikona

1	Ukupno vrijeme putovanja svih vozila	33
2	Ukupno izgubljeno vrijeme svih vozila	33
3	Ukupno vrijeme stajanja svih vozila	34
4	Ukupno broj zaustavljanja svih vozila	35
5	Emisije ugljičnog monoksida (CO) na raskrižju Zvonimirova-Harambašićeva	35
6	Prosječno vrijeme stajanja vozila na raskrižju Zvonimirova-Harambašićeva	36
7	Emisije ugljičnog monoksida (CO) na raskrižju Zvonimirova-Šulekova .	37
8	Prosječno vrijeme stajanja vozila na raskrižju Zvonimirova-Šulekova . .	38
9	Emisije ugljičnog monoksida (CO) na raskrižju Zvonimirova-Heinzelova	38
10	Prosječno vrijeme stajanja vozila na raskrižju Zvonimirova-Heinzelova .	39



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 semaforizirane urbane prometne mreže korištenjem**

PTV VISSIM-a te MATLAB-a

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

Student/ica:

U Zagrebu, 31.8.2017

(potpis)