

**SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET PROMETNIH ZNANOSTI**

*Alan Vogel, Izidor Oremović, Robert Šimić*

**ISTOVREMENO UPRAVLJANJE VREMENOM  
TRAJANJA I REDOSLIJEDOM FAZA SIGNALNOG  
PLANA IZOLIRANOG SEMAFORIZIRANOG  
RASKRIŽJA**

**Zagreb, 2019.**

Ovaj rad izrađen je u Zavodu za inteligentne transportne sustave Fakulteta prometnih znanosti u Zagrebu pod vodstvom izv. prof. dr. sc. Edouarda Ivanjka i predan je na natječaj za dodjelu Rektorove nagrade u akademskoj godini 2018/2019.

# Sadržaj

<b>1</b>	<b>Uvod</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>Pristupi upravljanju signalnim planovima semaforiziranih raskrižja</b>	<b>3</b>
2.1	Značajke prometnih tokova upravljanih semaforiziranim raskrižjima . . . . .	4
2.2	Upravljanje primjenom ustaljenih signalnih planova . . . . .	8
2.3	Prometno ovisno upravljanje . . . . .	8
2.4	Adaptacija signalnih planova . . . . .	9
<b>3</b>	<b>Primjena neizrazite logike u upravljanju signalnim planovima</b>	<b>12</b>
3.1	Osnovne neizrazite logike . . . . .	12
3.2	Pregled postojećih neizrazitih sustava za upravljanje signalnim planovima .	15
<b>4</b>	<b>Implementacija istovremenog upravljanja vremenom trajanja i redosljedom faza signalnog plana</b>	<b>18</b>
4.1	Sustav odlučivanja za promjenu vremena trajanja faza . . . . .	19
4.2	Sustav odlučivanja za promjenu redosljeda faza . . . . .	22
4.3	Sustav odlučivanja za promjenu vremena trajanja i redosljeda faza . . . . .	25
<b>5</b>	<b>Simulacijski rezultati</b>	<b>27</b>
5.1	Simulacijsko okruženje . . . . .	27
5.1.1	Veza MATLAB-VISSIM i značajke bitne za implementaciju/simulaciju sustava upravljanja prometom . . . . .	28
5.1.2	Neizrazita logika unutar programskog paketa MATLAB . . . . .	29
5.2	Prometni model i scenariji . . . . .	33
5.3	Analiza dobivenih rezultata . . . . .	34
5.3.1	Mjereni parametri prometne potražnje . . . . .	35
5.3.2	Rezultati sustava za promjenu vremena trajanja faza . . . . .	36
5.3.3	Rezultati sustava za promjenu redosljeda faza . . . . .	39
5.3.4	Rezultati sustava za promjenu vremena trajanja i redosljeda faza .	43

5.3.5	Usporedba pojedinih sustava upravljanja . . . . .	51
<b>6</b>	<b>Zaključak</b>	<b>54</b>
	Zahvale	55
	Literatura	57
	Popis slika	59
	Popis tablica	60
	Popis grafikona	62
	Sažetak	63
	Abstract	64

# 1 Uvod

U današnje vrijeme zbog gospodarske i ekonomske situacije dolazi do promjena u migraciji stanovništva. S obzirom na to da ljudi odlaze sa ruralnih područja u urbana dolazi do porasta broja stanovnika u gradovima, a time i prometne potražnje na gradskim prometnicama. Posljedično tome, u gradovima nastaju prometna zagušenja koje stvaraju repove čekanja, povećane emisije štetnih plinova te povećanu potrošnju goriva i nesigurnosti na gradskim prometnicama.

S obzirom na porast prometne potražnje na gradskim prometnicama, dolazi do potrebe primjene novih tehnologija i tehnoloških rješenja u sklopu inteligentnih transportnih sustava (ITS). Ona se primjenjuju u svrhu rješavanja prometnih problema kao što su prometna zagušenja, informiranje putnika, upravljanje incidentnim situacijama itd. U urbanim sredinama često se pojavljuje nemogućnost proširenja prometnica dodavanjem novih prometnih traka zbog objekata koji se nalaze na površinama u blizini. Upravo zbog takvih problema ITS pruža široki spektar rješenja te se u današnje vrijeme sve više primjenjuje "build+ITS" model. Ta paradigma osim gradnje ili proširivanja prometnica nudi nova tehnološka rješenja koja kao rezultat pružaju bolje performanse i jeftinija dugoročna rješenja navedenih prometnih problema.

Na ukupni promet u Europskoj uniji (EU) otpada 12% emisija ugljičnog dioksida CO<sub>2</sub> koji je ujedno i glavni krivac za stvaranje stakleničkih plinova. S obzirom da u Europskoj uniji emisija stakleničkih plinova (ESP) na svjetskoj razini iznosi 10%, izrađen je model „Europa 2020“ kojim su definirani ciljevi da se do 2020 godine ESP smanji za 20% na način da svaka država članica mora doprinijeti sprječavanju porasta globalne temperature za preko 2°C prema svojim mogućnostima. U 2016. godini na razini EU, ESP je smanjena za 22% u odnosu na 1990. godinu, što predstavlja ostvarenje cilja Europa 2020 prije samoga roka. S obzirom na ostvarene rezultate predviđanja su da će ESP biti smanjena za 40% do 2030. u odnosu na 1990. godinu [1, 2].

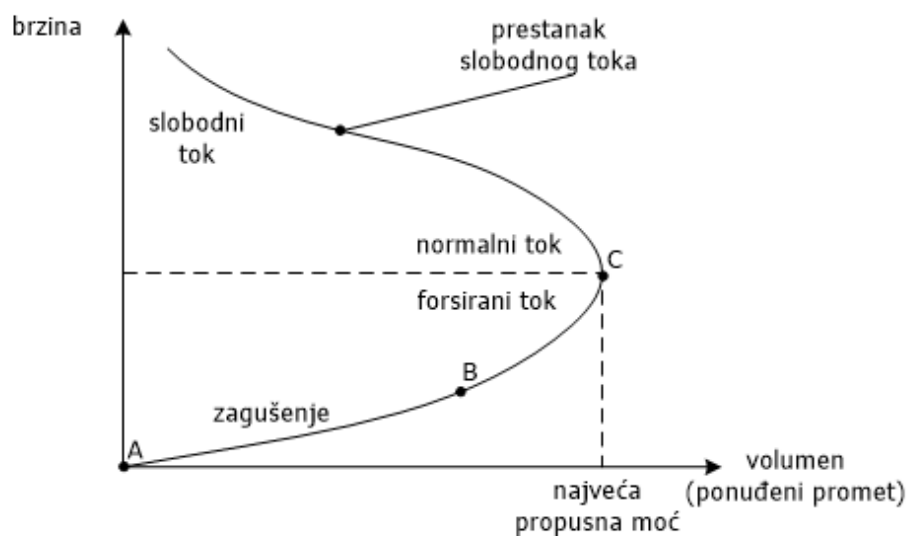
Cilj ovoga rada je dati rješenje za prometne probleme koji nastaju na semaforiziranom raskrižju uslijed promjenjive prometne potražnje. Za potrebe ovoga rada implementirana su tri sustava za upravljanje signalnim planovima semaforiziranog raskrižja. To su sustavi

za promjenu trajanja signalnih faza, za promjenu redoslijeda signalnih faza i njihova kombinacija. Implementirani sustavi su zasnovani na neizrazitoj logici za ocjenjivanje prometnih uvjeta na raskrižju. Ocjena stanja raskrižja, odnosno hitnost pojedine faze zatim se koristi za određivanje redoslijeda signalnih faza u ciklusu te njihovo trajanje. Testirani su na modelu izoliranog raskrižja koji je izrađen pomoću mikroskopskog prometnog simulacijskog alata PTV VISSIM, dok je za implementaciju sustava korišten programski paket MATLAB.

Ovaj rad je podijeljen na 6 poglavlja. U prvome poglavlju definirani su prometni problemi koji se danas pojavljuju na gradskim prometnicama. Također su u njemu dani kratki prijedlozi za rješavanje određenih prometnih problema primjenom "build+ITS" modela te je definiran cilj ovoga rada. U drugom poglavlju objašnjeni su pristupi upravljanju signalnim planovima semaforiziranih raskrižja. Definirani su prometni tokovi te parametri potrebni za analizu prometnog toka, a također su objašnjeni i sustavi upravljanja semaforiziranim raskrižjima. U trećem poglavlju definiran je koncept neizrazite logike te mogućnosti njene primjene u upravljanju prometom. Četvrto poglavlje prikazuje implementirane upravljačke sustave koji su izrađeni za potrebe ovoga rada. U petom poglavlju je objašnjeno simulacijsko okruženje kao i prometni model koji je izrađen u svrhu ovoga rada te su prikazani dobiveni rezultati. U šestom poglavlju dan je zaključak i osvrt na dobivene rezultate u ovom radu.

## 2 Pristupi upravljanju signalnim planovima semaforiziranih raskrižja

Kao što je navedeno u uvodu, u današnje vrijeme se stvaraju problemi na gradskim prometnicama kao što su povećana prometna potražnja i pad operativnog kapaciteta. Razlog tome je nemogućnost povećanja kapaciteta dodatnim proširenjem gradskih cesta novim prometnim trakama zbog nedostatka prostora. Rješenje se stoga nalazi u nadogradnji prometnog sustava u okviru ITS-a za upravljanje i nadzor prometa. Prometna zagušenja nastaju kada je odnos između kapaciteta i prometnog volumena takav da dolazi do smanjenja brzine vozila, a nekad i do potpunog zastoja kako je prikazano na slici 1.



Slika 1: Odnos prometnog volumena i operativnog kapaciteta [3]

Prometna zagušenja se mogu podijeliti na ponavljajuća i neponavljajuća. Ponavljajuća prometna zagušenja su ona koja se ponavljaju svakoga dana za vrijeme vršnog sata. Vršni sat predstavlja vremenski period (jutarnji i večernji) kada ljudi odlaze, odnosno dolaze sa svojih svakodnevnih aktivnosti kući. Time na određenim gradskim cestama raste prometna potražnja te se stvaraju prometna zagušenja. Takva zagušenja su predvidljiva. Neponavljajuća prometna zagušenja su nepredvidljiva jer nastaju za vrijeme izvanrednih

situacija kao što su prometne nezgode, radovi na cestama te kulturna i sportska događanja, zbog čega ih je puno teže rješavati.

## 2.1 Značajke prometnih tokova upravljanih semaforiziranim raskrižjima

Prometni tok se može definirati kao istovremeno kretanje više vozila na putu u određenom poretku [3]. Semaforizirana raskrižja predstavljaju križanje minimalno dva prometna toka. Vozila se propuštaju kroz raskrižje izmjenom signalnih faza koje se izrađuju na način da dolazi do što manje konfliktnih točaka, koje se definiraju kao točke presijecanja prometnih tokova. Njihovim smanjenjem dolazi do povećanja propusne moći raskrižja, što označava korelaciju tih dviju veličina [4]. Za analizu prometnog toka koriste se iduće značajke:

- Protok vozila  $q$  [voz/h];
- Gustoća prometnog toka  $g$  [voz/km];
- Brzina prometnog toka  $v$  [km/h];
- Vrijeme putovanja vozila u toku  $t_t$  [min];
- Jedinično vrijeme putovanja vozila u toku  $t_j$  [min];
- Vremenski interval slijeđenja vozila u toku  $t_h$  [s];
- Razmak slijeđenja vozila u toku  $s_h$  [m].

Protok se definira kao veličina koja označava broj vozila koji je prošao kroz promatrani presjek prometnice u jedinici vremena. Protok vozila značajno opisuje stanje na prometnici jer se pomoću njega može izraziti količina prometne potražnje, odnosno broj korisnika koji želi upotrijebiti dio prometnice u određenom vremenu. Mjerna jedinica protoka je najčešće [voz/h], no protok može biti izražen i u manjim vremenskim intervalima. S gledišta realnih prometnih tokova, ovisno o načinu promatranja u odnosu na prostor razlikuje se protok vozila na presjeku ceste i protok vozila na dijelu ceste. U prvom načinu promatranja protok se promatra kao broj vozila koji je prošao zamišljenim presjekom u jedinici



vremena, dok se kod drugog načina promatranja upotrebljava aritmetička sredina više protoka na dijelu prometne dionice. S obzirom na gustoću i brzinu prometnog toka, protok se računa na idući način:

$$q = g \cdot V, \quad (1)$$

gdje je:

$q$  - protok vozila;

$g$  - gustoća prometnog toka;

$V$  - brzina prometnog toka.

Dok se u odnosu na vremenski interval slijeđenja vozila, koji predstavlja vrijeme između prolaska dva uzastopna vozila kroz zamišljeni presjek, računa na slijedeći način:

$$q = \frac{3600}{t_h}, \quad (2)$$

gdje je:

$q$  - protok vozila;

$t_h$  - vremenski interval slijeđenja vozila u toku.

Uz mogućnost dobivanja protoka izravnim mjerenjem na raskrižju, potrebno je poznavati i propusnu moć raskrižja. Propusna moć (kapacitet) je maksimalna veličina prometnog toka koji može prijeći prometnu površinu u određenom vremenu uz zadane tehnološke čimbenike [5]. Ti su prometno-tehnološki čimbenici u vidu raskrižja: trajanje ciklusa, trajanje zelenog signalnog pojma (u fazi prolaska promatranog prometnog traka) i zasićeni tok prometne trake. Zasićeni tok predstavlja veličinu prometnog toka koji može proći kroz zamišljeni presjek uz idealne tehnološke čimbenike, odnosno u slučaju raskrižja uz konstantno pravo prolaska (100% vremena bi bio uključen zeleni signalni pojam). Izračun zasićenog toka se zasniva na osnovnom (idealnom) zasićenom toku, ispravku te vrijednosti s faktorima utjecaja širine voznih trakova, teretnih vozila, uzdužnog nagiba privoza, broja trakova u promatranjoj grupi itd. Izračun propusne moći se vrši na slijedeći način:

$$Q = \frac{g}{C} \cdot S, \quad (3)$$

gdje je:

$Q$  - propusna moć prometnih traka;

$g$  - trajanje zelenog signalnog pojma;

$C$  - trajanje ciklusa;

$S$  - zasićeni tok.

Postavljajući u omjer količinu prometnog toka i zasićeni tok dobiva se stupanj zasićenja. Ta varijabla govori o iskorištenju promatranog prometnog traka. Stupanj zasićenja se dobiva na slijedeći način:

$$x = \frac{q}{Q}, \quad (4)$$

gdje je:

$x$  - stupanj zasićenja;

$q$  - protok vozila;

$Q$  - propusna moć.

Nadalje, iduća bitna značajka prometnog toka je gustoća. Pod gustoćom prometnog toka podrazumijeva se broj vozila na jedinici duljine prometnice po prometnoj traci te po smjerovima za jednosmjerne prometnice, odnosno u oba smjera za dvosmjerne prometnice [3]. Mjerna jedinica je  $[voz/km]$ . Gustoća prometnog toka se računa prema slijedećem izrazu:

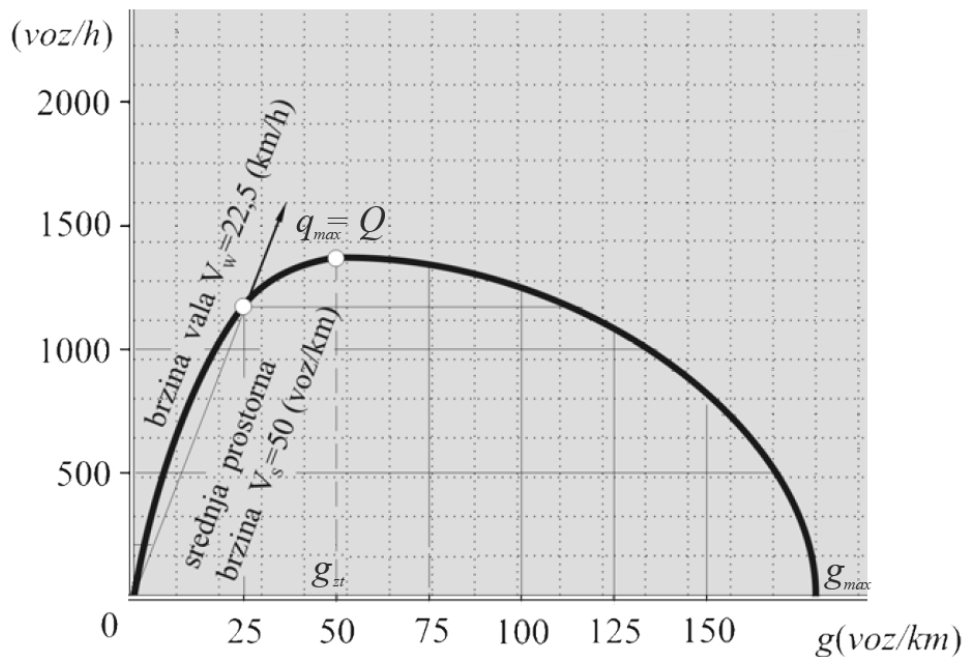
$$g = \frac{N}{s}, \quad (5)$$

gdje je:

$g$  - gustoća prometnog toka;

$N$  - broj vozila na promatranom odsjeku ceste;

$s$  - duljina promatranog odsječka.



Slika 2: Model "tok-gustoća" [3]

Povezivanjem protoka i gustoće dobiva se model "tok-gustoća" kao osnovni dijagram prometa (prikazan na slici 2). Taj parabolični model se zasniva na Greenshield-ovom linearnom modelu "brzina-gustoća" koji je označio početak razvoja znanstvene discipline teorije prometnog toka. Na grafikonu tog modela postoji niz značajnih točaka. Točka gustoće zasićenog toka ( $g_{zt}$ ) predstavlja gustoću prometnog toka koja odvaja lijevu od desne strane grafikona. Počevši od ishodišta do točke gustoće zasićenog toka, protok vozila raste sve dok ne postigne svoj maksimum u točki zasićenog toka nakon pada prema točki maksimalne gustoće ( $g_{max}$ ).

Na grafikonu modela "tok-gustoća" na slici 2, moguće je raspoznati razinu uslužnosti u određenom trenutku. Razina uslužnosti predstavlja razinu operativnih uvjeta, odnosno niz karakteristika koje opisuju uvjete vožnje koji se pojavljuju na određenom potezu ceste (brzina, vrijeme putovanja, prekidi, sigurnost, udobnost vožnje, cijena korištenja i dr.). Prikazuje se skalom zadovoljstva korisnika prometnicom sa slovima od **A** (slobodan tok) do **F** (prisilan tok) [6].

## 2.2 Upravljanje primjenom ustaljenih signalnih planova

Kada je riječ o uporabi u cestovnom prometu te općenitoj rasprostranjenosti, ustaljeni sustavi prometnog upravljanja još uvijek daleko prednjače u odnosu na adaptivne. Razlog tome jest njihova lakša tehnička izvedba, održavanje te relativno niska cijena u odnosu na naprednije sustave. Upravljanje ustaljenim signalnim planom podrazumijeva unaprijed definirane signalne cikluse te slijed njihovog izvođenja tokom nekog perioda (uobičajeno dana). Za potrebe implementiranja ustaljenog signalnog plana potrebno je izračunati duljinu trajanja ciklusa i broj faza koji se mijenjaju prema unaprijed utvrđenom vremenu. Za implementaciju su potrebni podaci o prometnom opterećenju koji se prikupljaju brojanjem vozila za vrijeme vršnog sata. Često semaforski uređaji podržavaju više signalnih planova, što omogućuje različito upravljanje prometom kroz dan u zadanim intervalima. Osim toga, raskrižja upravljana ustaljenim signalnim planovima mogu biti koordinirana na način da tvore zeleni val.

Primjena detektora pri vremenski ustaljenom upravljanju pojedinačnim raskrižjem svodi se na privremeno prikupljanje podataka o volumenu prometa na glavnim i sporednim prometnim pravcima, i to prije izvedbe prometnog programa. Za tu ulogu pogodni su detektori koji se mogu premještati s jedne lokacije na drugu. Za stvaranje kvalitetnijih signalnih planova i njihova vremenskog slijeda, potrebni su polazišno-odredišni (P-O) podaci [7].

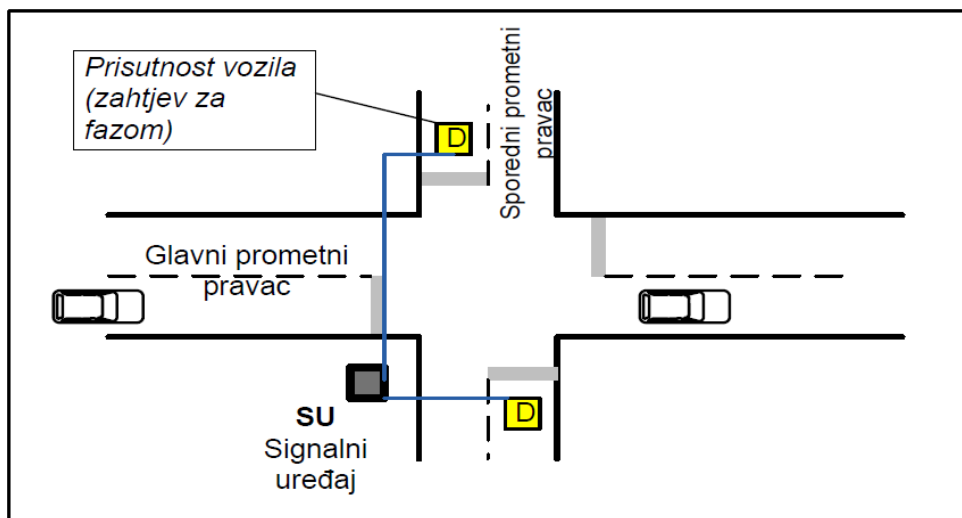
## 2.3 Prometno ovisno upravljanje

Kada se govori o prometno ovisnom upravljanju tada se radi o izmjeni signalnih planova promjenjivog trajanja i strukture ovisno o zahtjevima sudionika u prometu [8]. Za potrebe prometno ovisnog upravljanja potrebno je implementirati neku vrstu detektora na raskrižju. Primjena detektora koji se koriste u današnje vrijeme je vrlo široka. Od očitavanja meteoroloških uvjeta, identifikacije vozila, prepoznavanja registracijskih pločica, pa sve do mjerenja parametara prometnog toka.

Za vrijeme rada prometno ovisnog upravljanja semaforiziranog raskrižja koristi se algoritam upravljanja koji kao ulazne varijable prima prometne parametre. Na taj način se signalni plan prilagođava prometnoj potražnji, odnosno opterećenju. Promet se dinamički

mijenja ovisno o potrebama stanovnika pa upravo zbog toga ovaj način upravljanja bolje iskorištava prometnice na kojima se pokušava smanjiti opterećenje i povećati kapacitet prometnice.

Postojanje detekcijskih zona samo na sporednim prilazima pogodno je u slučaju kada je volumen prometa na sporednim prometnicama manji od 20% volumena na glavnoj prometnici. U tom slučaju glavni smjer prometnog toka koji nije pokriven detekcijskim zonama ima stalno pravo prolaza. Sporedni tokovi dobivaju pravo prolaza samo na zahtjev, odnosno kada je detektirano vozilo na sporednoj prometnici koje zahtjeva pravo prolaza kao što je prikazano na slici 3 [7].

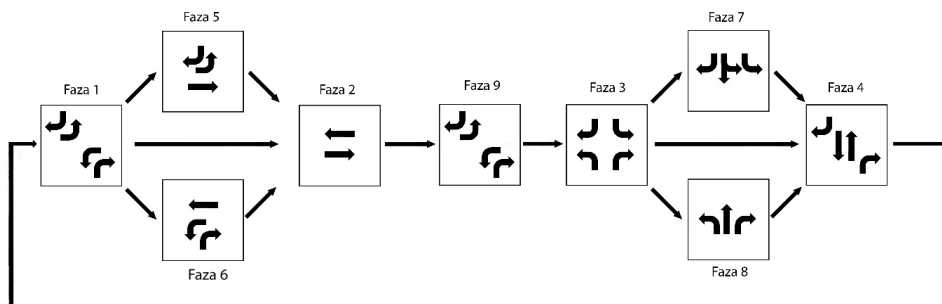


Slika 3: Položaj detekcijskih zona kod prometno ovisnog upravljanja semaforiziranim raskrižjem [7]

## 2.4 Adaptacija signalnih planova

Primjena ustaljenih upravljačkih sustava zadovoljavala je potrebe prometne potražnje u prošlosti kada je ona bila manja. S obzirom na povećanje broja osobnih vozila na gradskim prometnicama koje ostaju relativno jednakih dimenzija, došlo je do potrebe za modernizacijom sustava upravljanja semaforiziranim raskrižjima. Kako je utvrđeno da ustaljeni signalni planovi ne daju idealne rezultate tijekom rada prometnog sustava, u sklopu ovog rada korišten je sustav adaptivnog upravljanja signalnim planom. Kako je već opisano, pri radu ustaljenog signalnog plana duljina ciklusa i faza te redosljed faza su nepromjenjivi, što ne odgovara stohastičkoj prirodi cestovnog prometnog sustava.

Sustav adaptivnog upravljanja korišten u svrhu ovog rada koristi signalni plan prilagođen prometnoj potražnji, što se jednim dijelom postiže uporabom prilagođene inačice strukture NEMA za izmjenu signalnih faza. Naziv NEMA (engl. The National Electrical Manufacturers Association) potječe od imena organizacije koja broji više od 300 tvrtki koje djeluju na području izrade elektroničke opreme. U kontekstu prometnog upravljanja, struktura NEMA se odnosi na fleksibilniji način odabiranja signalnih faza u usporedbi s ustaljenim načinom upravljanja. Način na koji se struktura NEMA implementira u sam rad signalnog plana ovisi prvenstveno o prometnoj potražnji promatranog raskrižja. Privozi raskrižja se dijele na glavne i sporedne, glavni privozi su karakterizirani većom prometnom potražnjom, a sporedni nižom. Nakon što su određene važnosti pojedinih privoza, potrebno je izraditi signalne faze koje će u obzir uzeti međusobnu konkurentnost pojedinih prometnih traka te potrebno trajanje pojedinih faza po uzoru na ustaljeni signalni plan.



Slika 4: Primjer prilagođene strukture NEMA [9]

Na slici 4 prikazan je primjer prilagođene strukture NEMA kakva se koristi u svrhu adaptivnog upravljanja. Za razliku od ustaljenog signalnog plana koji je izveden pomoću nepromjenjivog broja signalnih faza koje se izvode tijekom svakog ciklusa, adaptivni signalni plan sadrži i neobavezne signalne faze. Razlika između obaveznih i neobaveznih signalnih faza unutar adaptivnog sustava jest ta što se za razliku od obaveznih, neobavezne signalne faze ne moraju izvoditi tijekom ciklusa te ovise striktno o prometnoj potražnji i odzivu adaptivnog sustava na ulazne parametre prikupljene tijekom rada sustava. Struktura signalnih faza izrađuje se po uzoru na ustaljeni signalni plan, nakon čega se dodjeljuju neobavezne signalne faze kako bi se udovoljilo uvjetima prometne potražnje. Pri tome neobavezne signalne faze predstavljaju točke odluke vezano za promjenu redoslijeda izvođenja pojedinih faza.

Osim promjenom redoslijeda propuštanja prometnih tokova, adaptivno se djeluje i na samo trajanje signalnih faza. Kao što je rečeno, kod ustaljenih su signalnih planova vremena trajanja faza uvijek jednaka te se na promjenu prometne potražnje kroz dan odgovara kombinacijom više signalnih planova. Iz mjerenja trenutnih prometnih parametara proizlazi mogućnost promjene trajanja zelenog signalnog pojma odabrane faze, tako da bi se neke skratile u korist drugih koje bi se produžile. Sama promjena trajanja može se vršiti za vrijeme faze, neposredno prije njenog početka ili neposredno prije početka ciklusa. Ovisno o izvedbi sustava za izmjenu signalnih faza, ciklusi signalnih faza i njihova trajanja mogu se računati za određene vremenske intervale nakon čega bi se ponovno računali. U ovom radu je odabran pristup računanja trajanja faza neposredno prije njihovog početka, što je detaljnije objašnjeno u pripadnom poglavlju.

## 3 Primjena neizrazite logike u upravljanju signalnim planovima

Neizrazita logika u upravljanju tehničkim sustavima se pojavila 1980-ih godina. Za to doba je posebno važan neizraziti sustav za upravljanje ubrzanjem i kočenjem vlakova podzemne željeznice u Japanu u gradu Sendaiju. Sustavi koji koriste neizrazitu logiku danas su u širokoj primjeni te ih je moguće pronaći u uređajima koji su u svakidašnjoj uporabi, kao što su perilice za rublje, automatski tlakomjeri, fotoaparati i dr. Neizrazita logika omogućuje uporabu mikro upravljačkih računala za izvođenje funkcija korištenih u mnogo tehnološki naprednijim uređajima, čime se znatno smanjuju troškovi izrade upravljačkih uređaja, dok se kvaliteta upravljanja povećava.

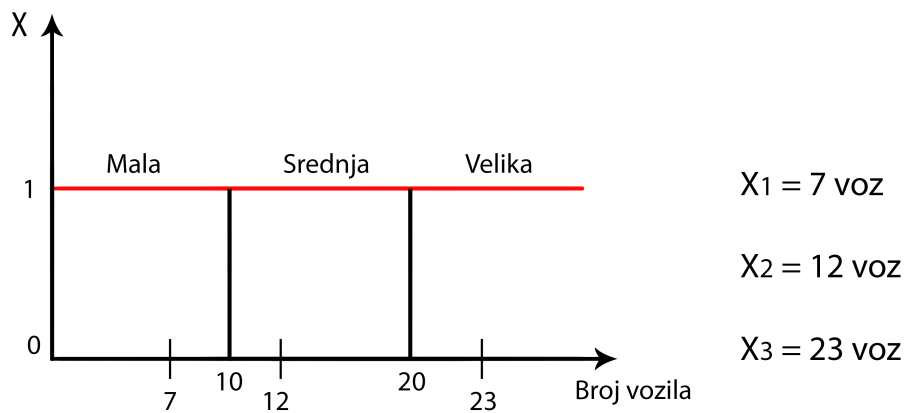
### 3.1 Osnovne neizrazite logike

Neizrazita logika (engl. fuzzy logic) može se promatrati kao proširenje binarne logike (slika 5 i tablica 1) na način da se područje rješenja promatra u intervalu između 0 i 1. Ova razlika omogućuje uspostavljanje upravljanja s puno većom preciznošću čime je moguće dobiti "glade" prijelaze između pojedinih vrijednosti. Efikasnost korištenja neizrazite logike je sadržana u samom načinu na koji su prikazani dijelovi sustava za vrijeme njegove izrade. To se odnosi na pružanje mogućnosti stručnjaku koji izrađuje neizraziti sustav da uz sam prikaz brojevnih parametara te rezultata ima uvid i u jezičnu (simboličku) reprezentaciju istih rezultata. Na ovaj način izrada neizrazitih sustava daje bolji pregled mogućih rješenja te potencijalno olakšava pronalaženje grešaka. Kako bi se dizajnirao upravljački sustav koji koristi neizrazitu logiku, potrebno je definirati sljedeće parametre:

- Ulazne i izlazne varijable;
- Funkcije pripadnosti pojedinih ulaznih i izlaznih varijabli;
- Pravila odlučivanja neizrazite logike;



- Težine pravila neizrazite logike.



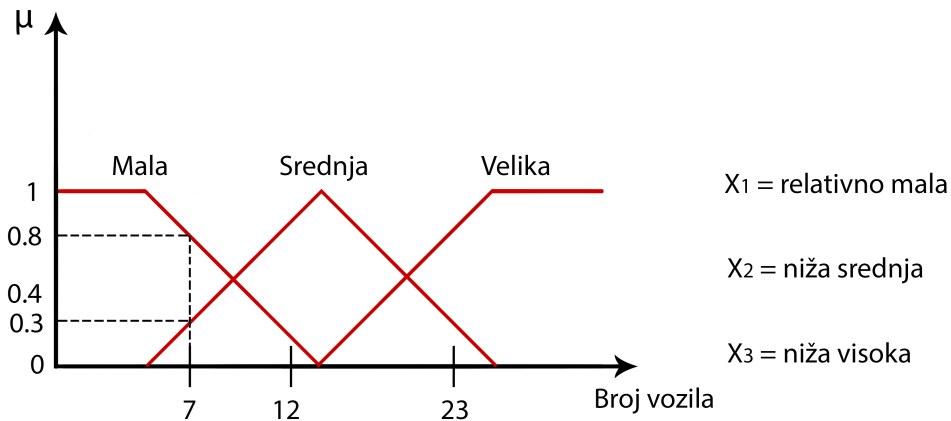
Slika 5: Prikaz binarne logike [10]

Tablica 1: PRIMJER STANJA BINARNE LOGIKE [10]

	<i>NISKA</i>	<i>SREDNJA</i>	<i>VISOKA</i>
7 vozila	1	0	0
12 vozila	0	1	0
23 vozila	0	0	1

Varijable sustava odlučivanja neizrazite logike se ovisno o svojoj funkciji dijele na ulazne i izlazne. Ulazne varijable su one koje sustav koristi za obradu kako bi stvorio adekvatne izlazne varijable. Broj korištenih varijabli unutar sustava neizrazite logike vrlo je kontekstualan, što znači da je potrebno uzeti u obzir svrhu za koju se sam sustav koristi.

Područja utjecaja neizrazite logike najbolje se mogu opisati funkcijama pripadnosti (slika 6). Pomoću funkcija pripadnosti se definira veza između pojedinih ulaznih i izlaznih neizrazitih varijabli te pripadnih izrazitih vrijednosti. Izgled funkcija pripadnosti također je određen samom namjenom sustava te opisuje stupanj pripadnosti određenoj unaprijed definiranoj simboličkoj varijabli (npr. za temperaturu: vruće, hladno, itd.), kako je prikazano u tablici 2. To znači da je svaka varijabla sustava neizrazite logike opisana s nekoliko funkcija pripadnosti, a veći broj funkcija pripadnosti pridonosi povećanju preciznosti sustava. Pomicanje funkcija pripadnosti po osi apscisa mijenja omjer djelovanja funkcija, a posljedično tome i odražavanje ulaznih varijabli na izlazne. Neke od najčešće korištenih vrsta funkcija pripadnosti su Gauss-ova, trapezoidna, trokutasta i eksponencijalna.



Slika 6: Prikaz neizrazite logike [10]

Tablica 2: PRIMJER STANJA NEIZRAZITE LOGIKE [10]

	<i>MALA</i>	<i>SREDNJA</i>	<i>VELIKA</i>
7 vozila	0,8	0,3	0
12 vozila	0,2	0,8	0
23 vozila	0	0,3	0,9

Osim varijabli ulaza i izlaza te funkcija pripadnosti, sastavni dio sustava neizrazitog zaključivanja su i unaprijed definirana pravila neizrazite logike (tablica 3). Pravila se sastoje od uzročnog (obrada ulaznih varijabli pojedinog pravila) i posljedičnog dijela (zaključka ili akcije). Sam broj pravila neposredno je ovisan o broju ulaznih i izlaznih varijabli i funkcija pripadnosti, budući da je broj pravila jednak broju funkcija pripadnosti na potenciju broja ulaza. Pravila neizrazite logike opisuju način na koji izlazne varijable ovise o kombinaciji stanja ulaznih varijabli. Pri dizajniranju sustava bitno je opisati ponašanje svih varijabli pri čemu bi ih idealno bilo koristiti što manje, s obzirom na to da složenost neizrazitog sustava odlučivanja raste proporcionalno s brojem varijabli. Time potreba za resursima izračuna unutar sustava neizrazitog zaključivanja raste, što za efikasan rad nije idealno te može negativno utjecati na efektivnost dizajniranja sustava.

Nakon što su sve ulazne i izlazne varijable definirane i funkcije pripadnosti namještene da odgovaraju zadaći sustava, moguće je svakom pojedinom pravilu dodijeliti pripadnu težinu. U slučaju da se koriste težine za sva pravila neizrazite logike, moguće je odrediti jačinu djelovanja pojedinog pravila naprema svim ostalim što je tipično izražavaju u postocima.

Specifičnost neizrazite logike očituje se u prevođenju numeričkih vrijednosti u jezični

Tablica 3: PRIMJER NEIZRAZITIH PRAVILA U UPRAVLJANJU SUSTAVOM VENTILACIJE

	<i>Temperatura</i>		<i>Vlaga</i>		<i>Tlak</i>		<i>Jačina</i>
<i>ako</i>	<i>NISKA</i>	<i>i</i>	<i>NISKA</i>	<i>i</i>	<i>NIZAK</i>	<i>onda</i>	<i>SLABO</i>
<i>ako</i>	<i>NISKA</i>	<i>i</i>	<i>SREDNJA</i>	<i>i</i>	<i>SREDNJI</i>	<i>onda</i>	<i>SREDNJE</i>
<i>ako</i>	<i>SREDNJA</i>	<i>i</i>	<i>SREDNJA</i>	<i>i</i>	<i>SREDNJI</i>	<i>onda</i>	<i>JAKO</i>
<i>ako</i>	<i>VISOKA</i>	<i>i</i>	<i>VISOKA</i>	<i>i</i>	<i>SREDNJI</i>	<i>onda</i>	<i>VRLO JAKO</i>

(simbolički) prikaz, što se postiže procesom zvanim "fuzifikacija". Suprotno tome, proces pod nazivom "defuzifikacija" opisuje obratni proces pri kojem se jezične vrijednosti vraćaju natrag u brojevni oblik kako bi bila moguća daljnja evaluacija.

Postoje dva alternativna načina kojima se donekle može nadomjestiti funkcionalnost neizrazite logike. Prvi od načina uključuje konstruiranje matematičkog modela (formule) koja izražava izlaznu varijablu kao funkciju više ulaza. Takav pristup daje mogućnost točnog opisa procesa za koji se matematička formula koristi, no formule vrlo brzo postanu složene te je stvarnovremensko izvođenje vrlo ograničeno kapacitetom računala koje se koristi za izračun. Drugi način izvođenja sličnog rješenja bio bi izrada tablice koja pokriva sve moguće kombinacije ulaza s izlazima sustava. Ovakav izračun obuhvaća sva moguća rješenja, no u slučaju većeg broja varijabli tablice poprimaju velike dimenzije te brzo postanu nespretni za korištenje i održavanje.

U svrhu ovog rada je za obradu prikupljenih simulacijskih podataka o stanju na izoliranom semaforiziranom raskrižju korištena neizrazita logika. Glavni razlog korištenja neizrazite logike unutar adaptivnog sustava upravljanja semaforiziranim raskrižjima jest dobivanje stvarnovremenskih podataka koji mogu poslužiti za izračun produljenja ili skraćivanja određenih signalnih faza, kao i promjenu redoslijeda istih. Na taj je način moguće sustav podrediti potrebama prometne potražnje koju postavlja promatrano semaforizirano raskrižje.

### 3.2 Pregled postojećih neizrazitih sustava za upravljanje signalnim planovima

Prva istraživanja korištenja neizrazite logike u klasičnom prometnom sustavu nastala su vrlo brzo u godinama nakon što je Lotfi A. Zadeh formulirao teoriju neizrazitih skupova

(engl. Fuzzy Set Theory). Zadeh je predložio korištenje funkcija pripadnosti kako bi se izradili modeli koji upotrebljavaju neizrazite skupove brojeva. 1975. godine Ebrahim Mamdani predložio je korištenje novog neizrazitog regulatora u svrhu upravljanja složenim tehničkim procesima koji je danas postao najširi u primjeni. Posebnost Mamdanijevog neizrazitog regulatora očituje se u korištenju jezično izraženih pravila prethodno prikupljenih od strane stručnjaka te je prvi put došao u uporabu kako bi se upotpunilo upravljanje parnog stroja i kotlova za proizvodnju pare korištenjem spomenutog pristupa [11]. S obzirom da se Mamdanijev neizraziti sustav neposredno veže na Zadehovu primjenu funkcija pripadnosti, svakom od izlaza korištenih pravila neizrazitog sustava dodijeljena je jedna funkcija pripadnosti koja opisuje težinu pojedinog "jezičnog izraza". Nakon što su definirana sva pravila i prikupljene vrijednosti ulaznih varijabli, izlazne vrijednosti uzročnog dijela pojedinog pravila pokazuju "preklapanje" ulaznih funkcija pripadnosti. To rezultira promjenom prikaza izlazne funkcije pripadnosti pojedinog pravila zaključivanja. U ovom radu je također korišten Mamdanijev neizraziti regulator za izradu sustava upravljanja izoliranim semaforiziranim raskrižjem [12].

Takagi-Sugeno-Kang neizraziti regulator vrlo je sličan Mamdanijevom regulatoru uz najveću razliku što izlazne varijable ne rade na principu "preklapanja" funkcija pripadnosti, nego se koriste konstante pomnožene s akumuliranim pojedinačnim vrijednostima ulaznih varijabli [12]. Mamdani i Papis su označili početak primjene novog neizrazitog regulatora 1977. godine implementirajući neizraziti sustav odlučivanja o trajanju signalnih faza.

U kontekstu cestovnog prometa, znanstveni rad [13] predstavio je način upravljanja mrežom semaforiziranih raskrižja uporabom nekoliko istovremeno korištenih neizrazitih sustava odlučivanja. Tu je primijenjeno kooperativno upravljanje, odnosno upravljanje sa više semaforiziranih raskrižja. Neizraziti sustavi odlučivanja korišteni u radu [13] su upravljali odabirom iduće signalne faze te trajanjem zelenog signalnog pojma. Korištene ulazne varijable bile su broj vozila između detektora, vrijeme crvenog signalnog pojma te s obzirom da se radi o kooperativnom upravljanju - varijable proteklog vremena i broja vozila tijekom izmjene vozila između raskrižja. Iako se ovaj rad ne bavi temom kooperativnog upravljanja, način na koji je potrebno neizrazite sustave odlučivanja implementirati unutar sustava adaptivnog upravljanja izoliranim semaforiziranim raskrižjem i dalje se može djelomično slijediti primjer iz rada [13].

U radu [14] također je izrađen sustav s neizrazitim sustavima upravljanja za produljenje

zelenog signalnog pojma i odabir signalnih faza. Pri odabiru signalnih faza dodijeljene su težine neizrazitim pravilima na osnovu vremena čekanja vozila za vrijeme crvenog signalnog pojma te broja vozila u repu čekanja. Kao ulazne varijable korištene su srednja vrijednost repa čekanja unutar prometne trake te duljina crvenog signalnog pojma na pripadnoj prometnoj traci. Produljenje zelenog signalnog pojma djeluje na način da se uspoređuje trenutna aktivna faza s preostalim neaktivnim fazama. Na osnovu toga određuje se u kojem će se trenutku prekinuti trenutna faza, dok se u slučaju zadovoljavanja svih uvjeta nad neaktivnim fazama produljuje trenutna aktivna faza. Ulazne varijable korištene u ovom neizrazitom sustavu upravljanja su srednja vrijednost duljina repa čekanja na prometnim trakama neaktivne faze koja je sljedeći potencijalni kandidat za zeleni signalni pojam, srednja vrijednost duljine repa čekanja na prometnim trakama trenutno aktivne faze te varijabla učestalosti pojavljivanja vozila na prometnoj traci trenutno aktivne faze. Kao izlaz ovog upravljača korištene su dvije moguće vrijednosti: trenutno aktivna faza se prekida ili se produljuje ako su zadovoljeni pripadni uvjeti.

Navedene su studije pružile podlogu za izradu neizrazitog sustava upravljanja predstavljenog unutar ovog rada, kako je i opisano u poglavljima koja slijede u nastavku.

## 4 Implementacija istovremenog upravljanja vremenom trajanja i redoslijedom faza signalnog plana

Sustav upravljanja izoliranim semaforiziranim raskrižjem izrađen u sklopu ovog rada sastoji se od dva dijela. Korišteni su sustavi za adaptivnu promjenu trajanja signalnih faza i za izmjenu redoslijeda istih te su opisani u poglavljima koja slijede. Oba kao podlogu koriste neizrazitu logiku u svrhu optimizacije upravljanja signalnim planom izoliranog semaforiziranog raskrižja. Predloženi neizraziti sustavi su izvedeni u programskom paketu MATLAB koristeći modul "Fuzzy Logic Toolbox" kao podlogu, a koji je zasnovan na Mamdanijevom modelu neizrazitog regulatora.

Kao što je već navedeno, potreba za adaptivnim upravljanjem javlja se iz razloga što ustaljeno upravljanje prometom nema mogućnost efektivnog upravljanja u svakoj mogućoj prometnoj situaciji. Prilikom ustaljenog upravljanja prometom, postavljene su vrijednosti trajanja i parametri redoslijeda izmjene faza unutar signalnog plana pojedinih raskrižja. Pri tomu te vrijednosti nisu promjenjive za vrijeme trajanja rada sustava. Primjena neizrazite logike omogućuje dinamičku promjenu sustava u stvarnom vremenu. To se odnosi podjednako na trajanje pojedinih faza, kao i na njihov poredak unutar ciklusa te je potrebno dobro isplanirati moguće prometne scenarije koji se mogu pojaviti prilikom rada takvog sustava.

Pri dizajniranju navedenog adaptivnog sustava zasnovanog na neizrazitoj logici potrebno je uzeti u obzir samu veličinu raskrižja. To uključuje dimenzije prometnice, prometnu potražnju, broj faza i duljinu ciklusa, s obzirom da je potrebno iskoristiti svaku posebnost promatranog raskrižja kako bi adaptivni sustav dao rezultate bolje od ustaljenog. Kako je glavni cilj sustava zasnovanih na upravljanju neizrazitom logikom da se skrate repovi čekanja, poveća propusnost prometnica te općenito umanja mogućnost zagušenja, bitno je prepoznati na kakvoj vrsti raskrižja sustav upravljanja s određenim skupom definiranih pravila daje najbolje rezultate.

U slučaju kada postoje samo dvije faze unutar signalnog plana, neizrazita logika za promjenu redoslijeda faza nema učinka. Tada samo promjena duljine trajanja faza ima učinak na smanjenje duljine repova čekanja. Ako se promatra raskrižje čiji signalni plan sadrži tri ili više faza, sustav upravljanja zadužen za promjenu redoslijeda faza pokazuje učinke svojeg djelovanja te je moguće vidjeti poboljšanja u odnosu na ustaljeni signalni plan [9].

Glavni i sporedni privozi međusobno se razlikuju po količini prometne potražnje, što neposredno utječe na način na koji se dizajnira sustav upravljanja zasnovan na neizrazitoj logici. Zbog niže prometne potražnje sporedni će privozi teže doseći visoku razinu hitnosti od glavnih privoza. To znači da će glavni privozi u svojim funkcijama pripadnosti te pridruženim pravilima imati unaprijed određenu prednost. To obilježje glavnih privoza ne očituje se samo u sprječavanju zagušenja, nego također u propuštanju glavnog prometnog toka po potrebi. Slučaj kada je ovo svojstvo primjenjivo događa se kada su priljevni i odljevni tokovi glavnog privoza visoki, što označava dobar trenutak za propuštanje velike količine vozila podešavanjem varijable hitnosti na najvišu vrijednost. Iz istog razloga, poželjno je u takvoj situaciji produljiti trajanje faze glavnih privoza upravo zbog opisanog slučaja. Na taj način se vrši regulacija zagušenja na glavnim privozima. Važno je također napomenuti kako se zbog manje prometne potražnje sporedni privozi ne bi trebali zanemariti, kako oni sami ne bi prouzročili zagušenje. Do te situacije može doći prekomjernim produljenjem trajanja faze glavnog privoza u kombinaciji sa skraćivanjem trajanja faze sporednog privoza. Također uzastopno preskakanje dodatnih faza sporednih tokova u korist što bržem povratku na faze glavnog toka može prouzročiti isti efekt.

U poglavljima koja slijede nalazi se opis sustava za promjenu trajanja i izmjenu signalnih faza. Potrebno je napomenuti da su oba sustava najprije izrađeni odvojeno te kako sada tvore jednu cjelinu ne bi li se maksimizirala njihova primjena u svrhu adaptivnog upravljanja semaforiziranim raskrižjem.

## **4.1 Sustav odlučivanja za promjenu vremena trajanja faza**

Kod upravljanja semaforiziranim raskrižjima postoji samo mali broj faktora podložnih promjeni u svrhu prilagodbe signalnog plana. Uz mijenjanje redoslijeda signalnih faza,

kao što je opisano u tekstu niže, moguće je mijenjati i trajanje pojedinih signalnih faza. Promjena vremena trajanja signalne faze odnosi se na skraćivanje i produljivanje trajanja zelenog svijetla u odnosu na neku referentnu vrijednost unutar definiranih granica. Donja i gornja granica vremena trajanja zelenog signalnog pojma su definirane oduzimanjem, odnosno zbrajanjem odabranoga postotka referentnog trajanja zelenog signalnog pojma tom istom trajanju. U ovom radu je korištena metoda odlučivanja na početku faze predložena u dosadašnjim istraživanjima autora ovog rada [15, 16].

Za uspješno stvarnovremeno određivanje duljine trajanja zelenog signalnog pojma potrebno je analizirati trenutnu prometnu situaciju na raskrižju. Prometni parametri koji se mogu koristiti za ocjenu iskorištenja raskrižja su: duljina repova čekanja, stupanj zasićenja, volumen vozila koja prolaze kroz raskrižje, intervali slijeđenja i razmaci slijeđenja. U izvedbi sustava odlučivanja za promjenu vremena trajanja faza u ovome radu su korišteni idući parametri:

1. Duljina repa čekanja;
2. Priljevni tok vozila (stupanj zasićenja);
3. Odljevni tok vozila (stupanj zasićenja).

Na temelju prethodno navedenih parametara neizraziti sustav odlučivanja donosi odluku da li i za koliko skratiti odnosno produljiti trajanje pojedinog zelenog signalnog pojma. Pojednostavljeni prikaz ovog koncepta je prikazan na slici 7. Da bi donio tu odluku, sustav evaluira zadana neizrazita pravila. Dio neizrazitih pravila sustava odlučivanja za sporedne tokove dan je u tablici 4.



Slika 7: Pojednostavljen prikaz promjene trajanja zelenog signalnog pojma [16]

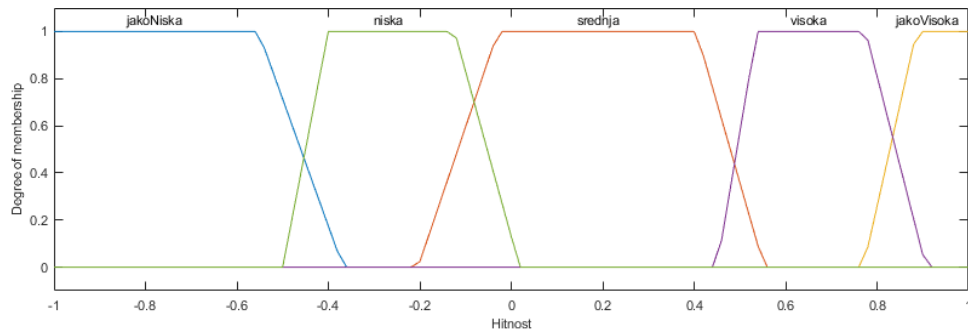
Na slikama 8 i 9 su prikazane funkcije pripadnosti varijable "hitnost" sustava odlučivanja za glavne i sporedne tokove. Sustav je konstruiran tako da kao izlaznu varijablu daje ocjenu *hitnosti* promjene trajanja faze. Ta ocjena se nalazi u rasponu vrijednosti između  $-1$  i  $1$ , gdje vrijednost  $-1$  označava da je trajanje zelenog signalnog pojma potrebno



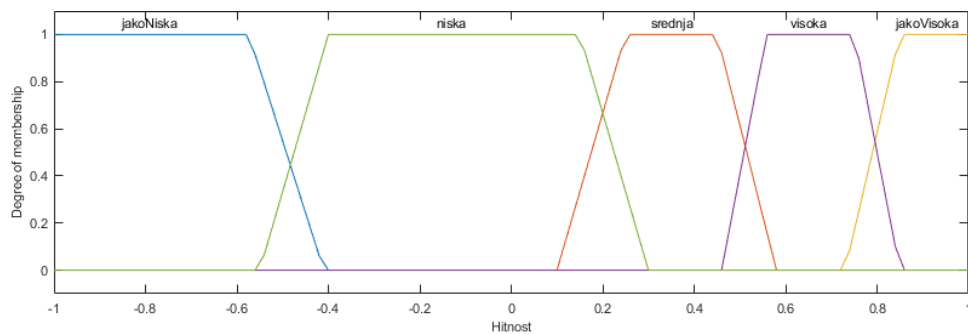
Tablica 4: IZVADAK NEIZRAZITIH PRAVILA 33.-48.

	Rep čekanja		Priljevni tok		Odljevni tok		Hitnost
<i>ako</i>	<i>VISOK</i>	<i>i</i>	<i>NIZAK</i>	<i>i</i>	<i>NIZAK</i>	<i>onda</i>	<i>SREDNJA</i>
<i>ako</i>	<i>VISOK</i>	<i>i</i>	<i>NIZAK</i>	<i>i</i>	<i>SREDNJI</i>	<i>onda</i>	<i>SREDNJA</i>
<i>ako</i>	<i>VISOK</i>	<i>i</i>	<i>NIZAK</i>	<i>i</i>	<i>VISOK</i>	<i>onda</i>	<i>SREDNJA</i>
<i>ako</i>	<i>VISOK</i>	<i>i</i>	<i>NIZAK</i>	<i>i</i>	<i>JAKO VISOK</i>	<i>onda</i>	<i>SREDNJA</i>
<i>ako</i>	<i>VISOK</i>	<i>i</i>	<i>SREDNJI</i>	<i>i</i>	<i>NIZAK</i>	<i>onda</i>	<i>VISOKA</i>
<i>ako</i>	<i>VISOK</i>	<i>i</i>	<i>SREDNJI</i>	<i>i</i>	<i>SREDNJI</i>	<i>onda</i>	<i>VISOKA</i>
<i>ako</i>	<i>VISOK</i>	<i>i</i>	<i>SREDNJI</i>	<i>i</i>	<i>VISOK</i>	<i>onda</i>	<i>SREDNJA</i>
<i>ako</i>	<i>VISOK</i>	<i>i</i>	<i>SREDNJI</i>	<i>i</i>	<i>JAKO VISOK</i>	<i>onda</i>	<i>SREDNJA</i>
<i>ako</i>	<i>VISOK</i>	<i>i</i>	<i>VISOK</i>	<i>i</i>	<i>NIZAK</i>	<i>onda</i>	<i>JAKO VISOKA</i>
<i>ako</i>	<i>VISOK</i>	<i>i</i>	<i>VISOK</i>	<i>i</i>	<i>SREDNJI</i>	<i>onda</i>	<i>JAKO VISOKA</i>
<i>ako</i>	<i>VISOK</i>	<i>i</i>	<i>VISOK</i>	<i>i</i>	<i>VISOK</i>	<i>onda</i>	<i>VISOKA</i>
<i>ako</i>	<i>VISOK</i>	<i>i</i>	<i>VISOK</i>	<i>i</i>	<i>JAKO VISOK</i>	<i>onda</i>	<i>VISOKA</i>
<i>ako</i>	<i>VISOK</i>	<i>i</i>	<i>JAKO VISOK</i>	<i>i</i>	<i>NIZAK</i>	<i>onda</i>	<i>JAKO VISOKA</i>
<i>ako</i>	<i>VISOK</i>	<i>i</i>	<i>JAKO VISOK</i>	<i>i</i>	<i>SREDNJI</i>	<i>onda</i>	<i>JAKO VISOKA</i>
<i>ako</i>	<i>VISOK</i>	<i>i</i>	<i>JAKO VISOK</i>	<i>i</i>	<i>VISOK</i>	<i>onda</i>	<i>VISOKA</i>
<i>ako</i>	<i>VISOK</i>	<i>i</i>	<i>JAKO VISOK</i>	<i>i</i>	<i>JAKO VISOK</i>	<i>onda</i>	<i>VISOKA</i>

smanjiti na najkraće dopušteno vrijeme, odnosno vrijednost 1 označava da je trajanje zelenog signalnog pojma potrebno produljiti na najduže dopušteno vrijeme. Srednja vrijednost ocjene hitnosti iznosi 0 te se u tom slučaju trajanje zelenog signalnog pojma ne mijenja, već ostaje na početnoj, referentnoj vrijednosti. U slučaju da se vrijednosti nalaze između  $-1$  i  $0$  te između  $0$  i  $1$ , vrijeme trajanja zelenog signalnog pojma se mijenja sukladno postotku te vrijednosti. Na primjer, ako referentno trajanje zelenog signalnog pojma faze iznosi 30 sekundi, a donja i gornja granica vremena trajanja su određene kao 30% trajanja referentnog trajanja, odnosno 9 sekundi, tada najkraće trajanje zelenog signalnog pojma iznosi 21 (za vrijednost *hitnosti*  $-1$ ) što je na slici 7 naznačeno sa  $T_{zmin}$ , a najduže 39 (za vrijednost *hitnosti*  $1$ ) sekundi što je na slici naznačeno sa  $T_{zmax}$ . Postotak referentnog trajanja izražava se *Koeficijentom Promjene Trajanja* (KPT) koji u ovom primjeru iznosi 0,30. U slučaju da se vrijednost *hitnosti* nalazi između  $-1$  i  $1$  tada će se za taj postotak promijeniti trajanje, kao na primjer za slučaj vrijednosti *hitnosti* 0,5 trajanje zelenog signalnog pojma će se produžiti za 50% od vrijednosti 9 sekundi (što je na slici 7 naznačeno s  $\Delta T$ ) te će zeleni pojam trajati 34,5 sekunde.



Slika 8: Funkcije pripadnosti varijable hitnost kod neizrazitog sustava odlučivanja za glavne tokove



Slika 9: Funkcije pripadnosti varijable hitnost neizrazitog sustava kod odlučivanja za sporedne tokove

Kako bi se izračunala hitnost pojedine signalne faze, potrebno je izračunati hitnost pripadne prometne trake koja se nalazi unutar te faze. U fazi se može nalaziti više prometnih traka različitih važnosti, budući da sustav razlikuje prometne trake koje pripadaju glavnom, odnosno one koje pripadaju sporednom prometnom toku. Sustav odlučivanja je takav da daje prednost trakama glavnog toka, gdje se očekuju veći prometni volumeni vozila kako bi se smanjili ukupni negativni utjecaji prometnog zagušenja.

Nadalje, hitnost signalne faze se računa uzimajući srednju vrijednost svih hitnosti prometnih traka promatrane faze. Koristeći hitnost moguće je izračunati ukupno trajanje faze kao što je opisano u primjeru ranije. Kako bi se što bolje odgovorilo na izazove trenutne prometne situacije, trajanje faze se računa neposredno prije njenog početka.

## 4.2 Sustav odlučivanja za promjenu redoslijeda faza

Suprotno korištenju unaprijed određenog redoslijeda faza unutar ustaljenog signalnog plana, korišteni sustav adaptivnog upravljanja za izmjenu faza omogućuje promjenu

signalnih faza u stvarnom vremenu. Sustav prepoznaje prometnu potražnju na temelju postavljenih detektora na površini prometnice te sukladno tome izračunava hitnost promjene redoslijeda za pojedinu signalnu fazu.

Za izračun izlazne varijable hitnosti, kao ulazne varijable sustava za promjenu redoslijeda signalnih faza koriste se sljedeće:

1. Duljina repa čekanja;
2. Trajanje crvenog signalnog pojma;
3. Priljevni tok vozila (stupanj zasićenja);
4. Odljevni tok vozila (stupanj zasićenja).

Kako bi se mogla predvidjeti svaka moguća situacija pri kojoj bi izmjena signalnih faza bila potrebna, izrađena su pravila neizrazite logike posebno za sami sustav izmjene signalnih faza. Neka od navedenih pravila neizrazitog sustava upravljanja moguće je pregledati u tablici 5.

Na temelju kombinacije vrijednosti navedenih ulaznih varijabli te aktivnih pravila, hitnost postaje veća ili manja. Izračun ukupne hitnosti faze vrši se tako da se zbroje hitnosti svih prometnih traka koje se nalaze unutar promatrane faze, nakon čega se ta vrijednost podijeli s brojem traka uključenih u izračun, kako prikazuje sljedeći izraz:

$$H_f = \frac{\sum_{i=1}^n H_{t,i}}{n}; \quad (6)$$

gdje je:

$H_f$  - ukupna hitnost signalne faze;

$H_{t,i}$  - hitnost pojedine prometne trake;

$i$  - indeks trake;

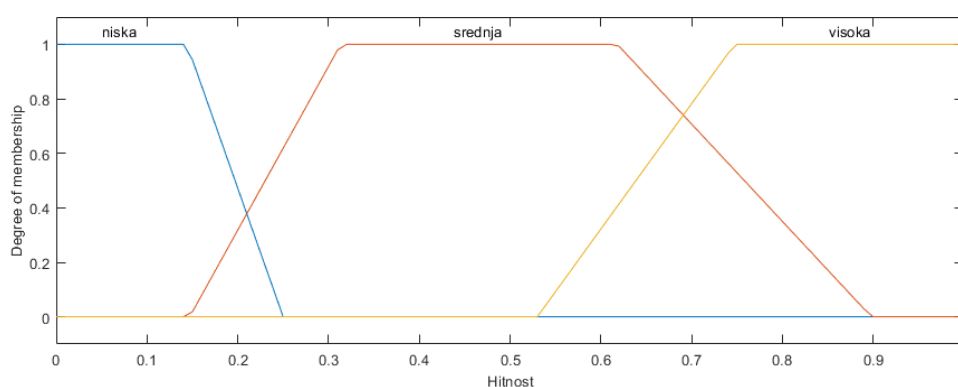
$n$  - ukupni broj prometnih traka unutar signalne faze.

Osim navedenih pravila i samog izračuna hitnosti, funkcije pripadnosti također uvelike pridonose načinu na koji djeluje sam sustav upravljanja. Funkcije pripadnosti izlazne

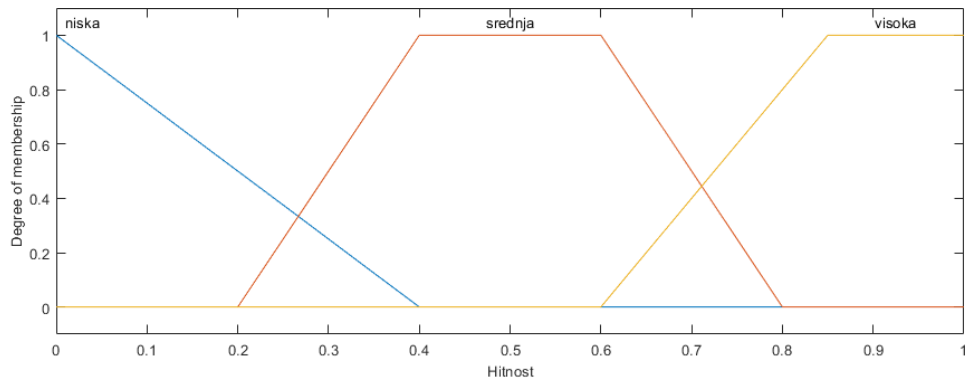
Tablica 5: IZVADAK NEIZRAZITIH PRAVILA 23.-38.

	Rep čekanja		Trajanje crvenog		Priljevni tok		Odljevni tok		Hitnost
<i>ako</i>	<i>NIZAK</i>	<i>i</i>	<i>DUGO</i>	<i>i</i>	<i>SREDNJI</i>	<i>i</i>	<i>SREDNJI</i>	<i>onda</i>	<i>NISKA</i>
<i>ako</i>	<i>NIZAK</i>	<i>i</i>	<i>DUGO</i>	<i>i</i>	<i>SREDNJI</i>	<i>i</i>	<i>VISOK</i>	<i>onda</i>	<i>NISKA</i>
<i>ako</i>	<i>NIZAK</i>	<i>i</i>	<i>DUGO</i>	<i>i</i>	<i>VISOK</i>	<i>i</i>	<i>NIZAK</i>	<i>onda</i>	<i>SREDNJA</i>
<i>ako</i>	<i>NIZAK</i>	<i>i</i>	<i>DUGO</i>	<i>i</i>	<i>VISOK</i>	<i>i</i>	<i>SREDNJI</i>	<i>onda</i>	<i>SREDNJA</i>
<i>ako</i>	<i>NIZAK</i>	<i>i</i>	<i>DUGO</i>	<i>i</i>	<i>VISOK</i>	<i>i</i>	<i>VISOK</i>	<i>onda</i>	<i>VISOKA</i>
<i>ako</i>	<i>SREDNJI</i>	<i>i</i>	<i>KRATKO</i>	<i>i</i>	<i>NIZAK</i>	<i>i</i>	<i>NIZAK</i>	<i>onda</i>	<i>NISKA</i>
<i>ako</i>	<i>SREDNJI</i>	<i>i</i>	<i>KRATKO</i>	<i>i</i>	<i>NIZAK</i>	<i>i</i>	<i>SREDNJI</i>	<i>onda</i>	<i>NISKA</i>
<i>ako</i>	<i>SREDNJI</i>	<i>i</i>	<i>KRATKO</i>	<i>i</i>	<i>NIZAK</i>	<i>i</i>	<i>VISOK</i>	<i>onda</i>	<i>NISKA</i>
<i>ako</i>	<i>SREDNJI</i>	<i>i</i>	<i>KRATKO</i>	<i>i</i>	<i>NIZAK</i>	<i>i</i>	<i>NIZAK</i>	<i>onda</i>	<i>SREDNJA</i>
<i>ako</i>	<i>SREDNJI</i>	<i>i</i>	<i>KRATKO</i>	<i>i</i>	<i>SREDNJI</i>	<i>i</i>	<i>SREDNJI</i>	<i>onda</i>	<i>NISKA</i>
<i>ako</i>	<i>SREDNJI</i>	<i>i</i>	<i>KRATKO</i>	<i>i</i>	<i>SREDNJI</i>	<i>i</i>	<i>VISOK</i>	<i>onda</i>	<i>SREDNJA</i>
<i>ako</i>	<i>SREDNJI</i>	<i>i</i>	<i>KRATKO</i>	<i>i</i>	<i>VISOK</i>	<i>i</i>	<i>NIZAK</i>	<i>onda</i>	<i>SREDNJA</i>
<i>ako</i>	<i>SREDNJI</i>	<i>i</i>	<i>KRATKO</i>	<i>i</i>	<i>VISOK</i>	<i>i</i>	<i>SREDNJI</i>	<i>onda</i>	<i>SREDNJA</i>
<i>ako</i>	<i>SREDNJI</i>	<i>i</i>	<i>KRATKO</i>	<i>i</i>	<i>VISOK</i>	<i>i</i>	<i>VISOK</i>	<i>onda</i>	<i>SREDNJA</i>
<i>ako</i>	<i>SREDNJI</i>	<i>i</i>	<i>SREDNJE</i>	<i>i</i>	<i>NIZAK</i>	<i>i</i>	<i>NIZAK</i>	<i>onda</i>	<i>NISKA</i>
<i>ako</i>	<i>SREDNJI</i>	<i>i</i>	<i>SREDNJE</i>	<i>i</i>	<i>NIZAK</i>	<i>i</i>	<i>SREDNJI</i>	<i>onda</i>	<i>NISKA</i>

varijable hitnosti prikazane su na slikama 10 i 11, gdje su uočljive razlike između svojstava funkcija pripadnosti glavnih i sporednih privoza.



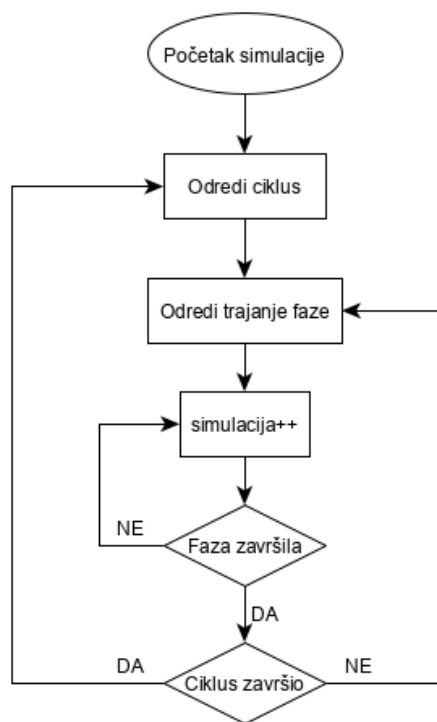
Slika 10: Funkcije pripadnosti varijable hitnosti neizrazitog sustava odlučivanja za glavne tokove



Slika 11: Funkcije pripadnosti varijable hitnosti neizrazitog sustava odlučivanja za sporedne tokove

### 4.3 Sustav odlučivanja za promjenu vremena trajanja i redoslijeda faza

Osim izdvojenog korištenja sustava za promjenu vremena trajanja ili promjenu redoslijeda signalnih faza, moguće ih je i upariti. Takav način rada dopušta potpuno adaptivno upravljanje signalnim planom raskrižja. Na slici 12 je shematski prikazan implementiran algoritam adaptivnog upravljanja signalnim planom. Na početku simulacije odmah se pokreće sustav za promjenu redoslijeda faza te nastaje prvi ciklus. Prije početka prve faze u ciklusu pokreće se sustav za promjenu trajanja koji prilagođava vrijeme trajanja te faze. Nakon što završi trenutna faza, ispituje se da li je završio i ciklus. Ako nije, prelazi se na iduću fazu u ciklusu i računa se njeno vrijeme trajanja. U slučaju da je završio ciklus, ponovno se pokreće sustav za promjenu redoslijeda faza te se pokreće izvršavanje novog ciklusa. Algoritam se ponavlja sve dok ne istekne vrijeme trajanja simulacije.



Slika 12: Shema rada sustava za promjenu vremena trajanja i redosljeda faza

## 5 Simulacijski rezultati

Implementacija prethodno opisanih sustava upravljanja prometom izvedena je koristeći mikroskopski simulator prometa PTV VISSIM i programsko okruženje MATLAB te odgovarajuće pripadne module. Navedene aplikacije su povezane primjenom COM sučelja kako bi se moglo adaptivno i stvarnovremeno upravljati raskrižjem. Implementirane inačice neizrazitog upravljanja su u ovom poglavlju podvrgnute ispitivanju nad implementiranim prometnim modelom izoliranog raskrižja te je provedena analiza dobivenih rezultata.

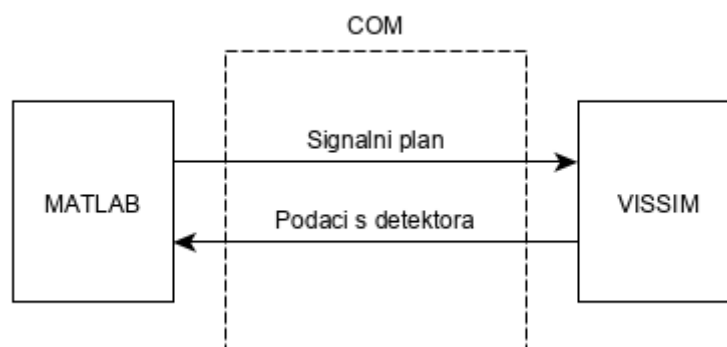
### 5.1 Simulacijsko okruženje

Osim što su važna stavka kod projektiranja novih prometnica, simulatori prometa su od velike važnosti kod provođenja ispitivanja prije implementacije sustava inteligentnog upravljanja prometom. Simulacijski program VISSIM spada u vrstu mikroskopskih simulatora cestovne mreže. Naime, postoje tri vrste prometnih modela: mikroskopski, makroskopski i mezoskopski. Mikroskopski prometni modeli se koriste za modeliranje izoliranih prometnih raskrižja, manjih prometnih mreža i dionica autocesta. Posebnost mikroskopskih modela je diskretno promatranje svakog prometnog entiteta, iz čega proizlazi mogućnost vrlo preciznog modeliranja i simuliranja stvarne prometne situacije uz uvjet kvalitetnih ulaznih podataka, kao što su ponašanje vozača, količina, tip i rute vozila u prometnoj mreži. Osnova takvih modela je psihofizički model slijedenja koji opisuje ponašanje vozila u prometnoj mreži. Za razliku od mikroskopskih, makroskopski modeli se koriste za modeliranje većih prometnih mreža, odnosno gradova, regija i država. Njihov princip rada zasniva se na teoriji fluida u kombinaciji s teorijom prometnih tokovima što omogućuje modeliranje zahtjevnijih (većih) prometnih mreža bez potrebe za praćenjem pojedinačnih vozila, nego cijelog kumulativnog prometnog toka. Mezoskopski modeli su spona između prethodno opisanih vrsta modela. Prometni simulator VISSIM se zasniva na Wiedemann modelu slijedenja vozila koji povezuje reakciju virtualnog vozača s brzinom vozila i udaljenošću od vozila ispred trenutno razmatranoga. Prilikom simulacije je pomoću VISSIM-a moguće simulirati i javni gradski prijevoz te kretanje pješaka.

MATLAB je programska okolina razvijena specifično za inženjere i znanstvenike. Središte MATLAB-a je njegov vlastiti skriptni programski jezik kojemu je osnovni tip podataka matrica odakle i dolazi naziv jezika (engl. MATrixLABoratory). Jezik je interpreterskog tipa te je jednostavne i razumljive sintakse. U sklopu njegove programske okoline nalaze se alati za analizu i vizualizaciju podataka, pregršt dodatnih aplikacija (engl. Apps) te moduli (engl. toolboxes) kao što su: alati za sistemsko inženjerstvo, optimizaciju, razvijanje neizrazite logike, neuronskih mreža i mnogi drugi. Praktičnost MATLAB programske okoline zasniva se na modularnosti tih aplikacija koje se kroz radni prostor (engl. Workspace) mogu ispreplitati s njegovim skriptnim jezikom.

### 5.1.1 Veza MATLAB-VISSIM i značajke bitne za implementaciju/simulaciju sustava upravljanja prometom

Testiranje opisanog adaptivnog upravljanja prometnim modelom moguće je napraviti korištenjem VISSIM-ove mogućnosti promjene parametara simulacije izvan VISSIM okruženja preko COM sučelja. Korištenjem COM sučelja [17], moguće je povezati VISSIM koji sudjeluje kao aplikacija poslužitelj s MATLAB-om koji preuzima ulogu aplikacije klijent. Ta veza omogućuje razmjenu podataka između dvije aplikacije, odnosno omogućuje MATLAB-u pristup gotovo svim aspektima simulacije. Na taj način je u ovom radu omogućeno preuzimanje mjerenja o stanju prometa iz simuliranog prometnog modela te obrada tih podataka i naposljetku povratno upravljanje signalnim planom. Prikaz tokova razmjene podataka nalazi se na slici 13.



Slika 13: Shematski prikaz razmjene podataka između MATLAB-a i VISSIM-a

Sve simulacije u radu su bile u trajanju od 4500 sekundi (1 sat i 15 minuta). Prvih 900 sekundi (15 minuta) simulacije je iskorišteno za zagrijavanje prometne mreže i računanje



početnih vrijednosti sustava upravljanja. Sukladno tome, u rezultatima su analizirane samo vrijednosti nakon zagrijavanja prometne mreže. Svi prometni podaci se iz simulacije dobivaju putem detektora koji su postavljeni kao induktivne petlje na prometne trake. Podaci se preuzimaju svake simulacijske sekunde. Iz vrijednosti priljevnih i odljevnih tokova se računaju stupnjevi zasićenja po metodologiji prikazanoj u drugom poglavlju te se te vrijednosti predaju neizrazitom sustavu zaključivanja. Kao što je rečeno za taj izračun je potrebna i propusna moć trake čiji je izračun također opisan. Sve varijable za te izračune su poznate iz simulacije osim vrijednosti zasićenog toka koju je potrebno zadati. Kao srednja mjera po prijedlogu iz [18, 19] odabrana je količina od 1750 [voz/h]. Nadalje uzeta vrijednost Koeficijenta Promjene Trajanja iznosi 0,30 što se pokazalo kao dobra mjera prilikom testiranja i umjeravanja sustava.

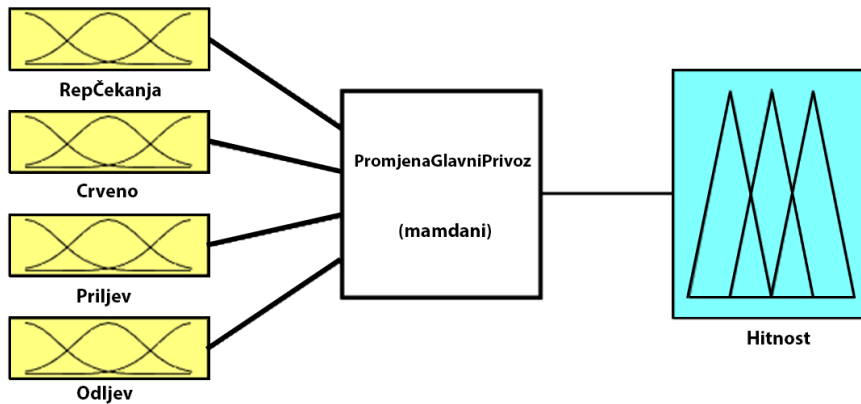
### 5.1.2 Neizrazita logika unutar programskog paketa MATLAB

Programsko okruženje MATLAB nudi sve alate potrebne za implementaciju sustava adaptivnog upravljanja primjenom neizrazite logike. Kako bi dijelovi koji sačinjavaju sustav pogonjen neizrazitom logikom bili dostupni unutar jednog programskog okruženja, koristi se alat "Fuzzy Logic Toolbox" unutar MATLAB-a. Navedeni alat dopušta pristup i prilagodbu svih dijelova sustava odlučivanja zasnovanih na neizrazitoj logici opisanih u trećem poglavlju te se cijelom sustavu neizrazite logike pristupa preko grafičkog sučelja Fuzzy Logic Toolbox-a koji prikazuje:

1. Ulazne i izlazne varijable sustava (slika 14);
2. Funkcije pripadnosti pojedinih varijabli (slika 15);
3. Sučelje za kreiranje i promjenu pravila neizrazite logike (slika 16);
4. Sučelje za pregled ovisnosti izlaznih varijabli o ulazima za svako pojedino pravilo (slika 17);
5. Sučelje za vizualizaciju dvodimenzionalnih (slika 18) i trodimenzionalnih (slika 19) grafikona međusobne ovisnosti ulaznih i izlaznih varijabli.

Sučelje za ulazne i izlazne varijable daje uvid u općeniti broj varijabli, kao i mogućnost njihovog dodavanja te brisanja po želji. Na slici 14 prikazan je primjer korištenja 4 ulaznih

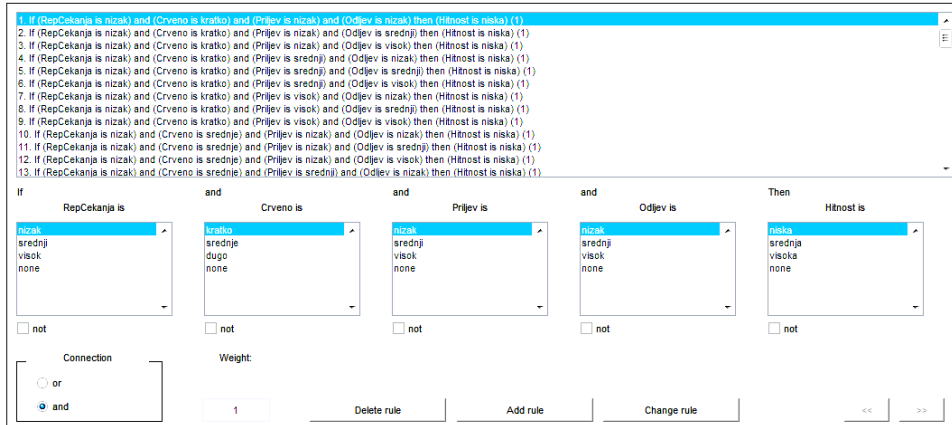
i jedne izlazne varijable korištenih za promjenu redoslijeda faza unutar sustava adaptivnog upravljanja signalnog plana.



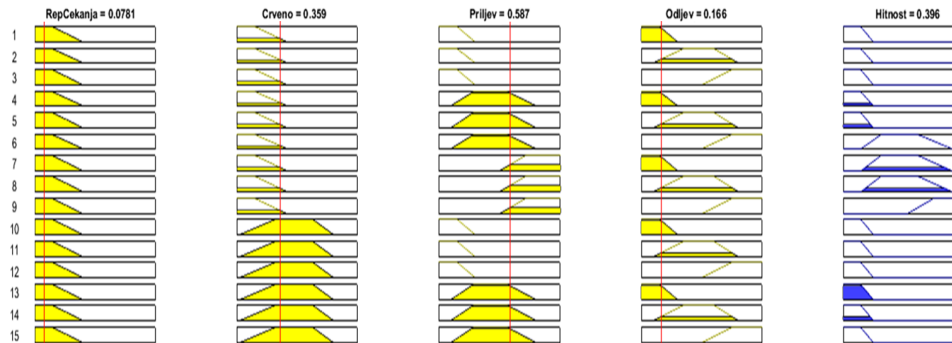
Slika 14: Ulazne i izlazne varijable u programskom okruženju MATLAB



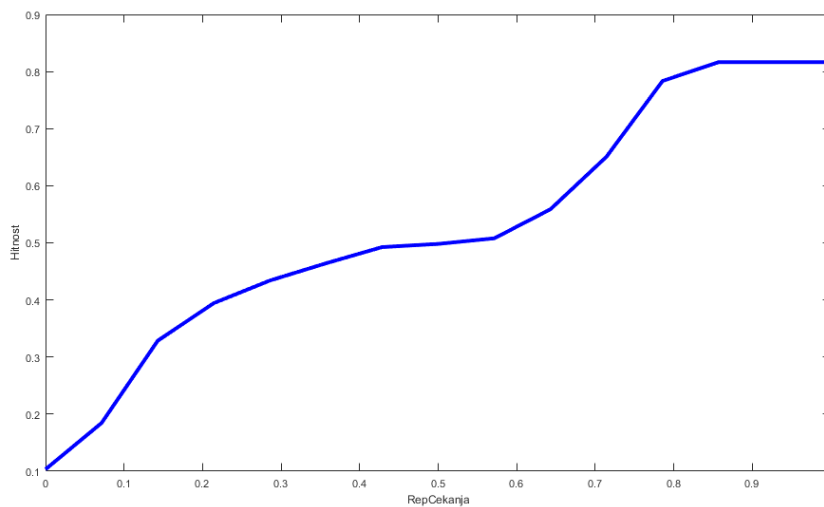
Slika 15: Primjer sučelja za kreiranje funkcija pripadnosti unutar programskog paketa MATLAB



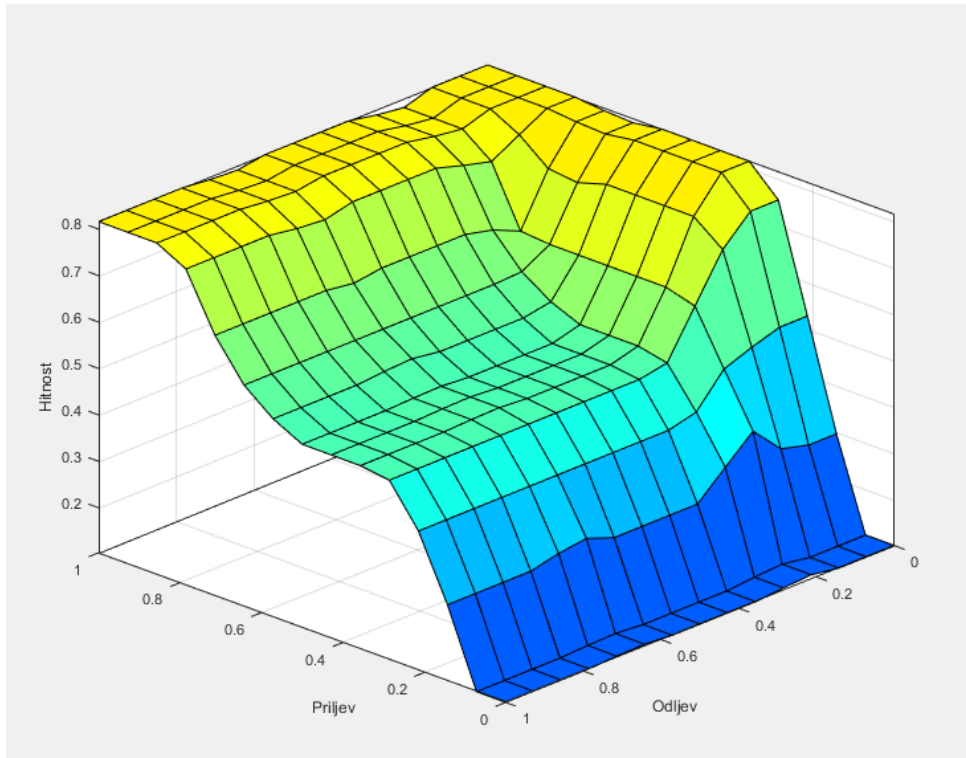
Slika 16: Sučelje za pregled i kreiranje pravila neizrazite logike u programskom okruženju MATLAB



Slika 17: Sučelje za pregled i kreiranje pravila neizrazite logike u programskom okruženju MATLAB



Slika 18: Prikaz ovisnosti izlaza hitnosti o ulazu vezanog za duljinu repa čekanja



Slika 19: Prikaz trodimenzionalnih grafikona ovisnosti izlaza o ulazima

Funkcije pripadnosti također imaju dodijeljeno grafičko sučelje koje daje mogućnost određivanja opsega njihovog djelovanja unutar svake pojedine ulazne i izlazne varijable. Na slici 15 moguće je vidjeti 3 funkcije pripadnosti koje opisuju svako od tri stanja izlazne varijable hitnosti unutar glavnih privoza sustava za promjenu redosljeda faza.

Fuzzy Logic Toolbox daje mogućnost dodavanja pravila neizrazite logike po volji, kao i brisanje istih. Navedeno je moguće vidjeti na slici 16. Osim mogućnosti pregleda svih pravila odjednom, moguće je pratiti i postavljati težine pojedinih pravila. Težine se kreću u rasponu od "0" do "1", te su namještene na "1" ukoliko korisnik ne definira drukčije.

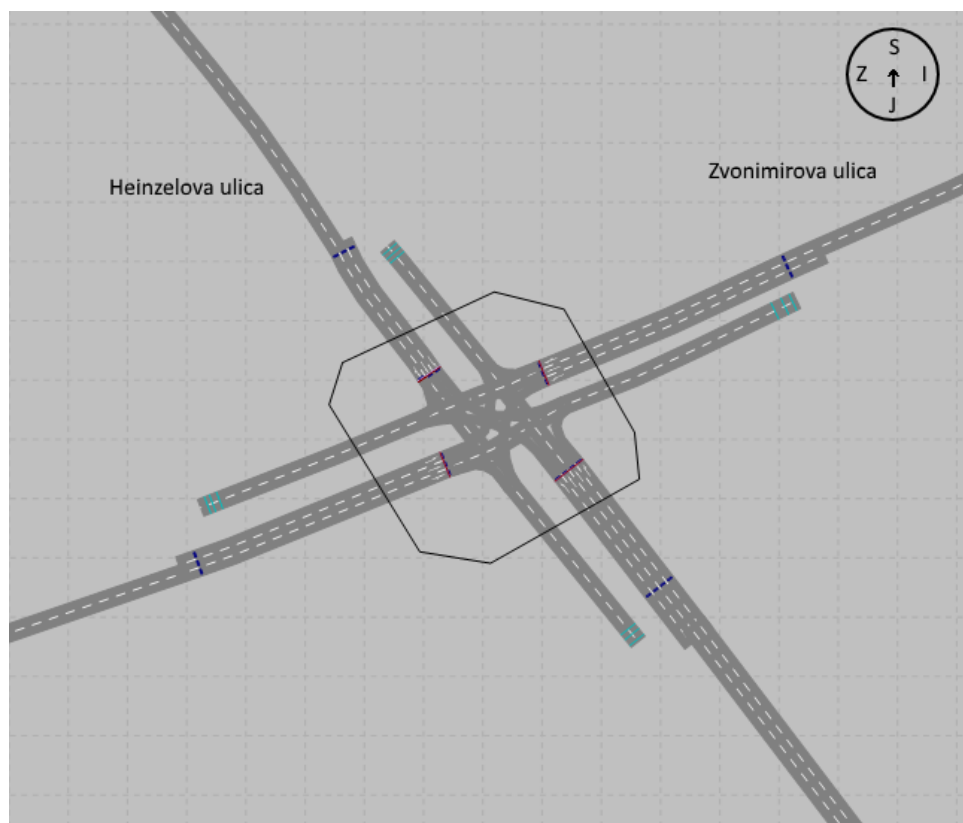
Sučelje na slici 17 daje uvid u stupanj zahvaćenosti izlaznih varijabli kombinacijom određenom vrijednostima ulaznih varijabli. Ovdje je moguće namjestiti te kombinirati proizvoljne vrijednosti svih ulaznih varijabli kako bi se utvrdilo na koji se način izabrane vrijednosti odražavaju na izlazne varijable. Ovim korakom dizajniranja neizrazitog sustava upravljanja moguće je utvrditi postoji li određeno pravilo koje nema nikakav učinak ili suprotno tome, ima li prevelik učinak na izlazne vrijednosti. U tom slučaju potrebno je ponovno namjestiti funkcije pripadnosti kako bi se dobio željeni učinak.

Naposljetku se koristi grafičko sučelje za prikaz dvodimenzionalnih i trodimenzionalnih grafikona. Dvodimenzionalni grafikoni daju uvid u ovisnosti pojedinih izlaznih varijabli o

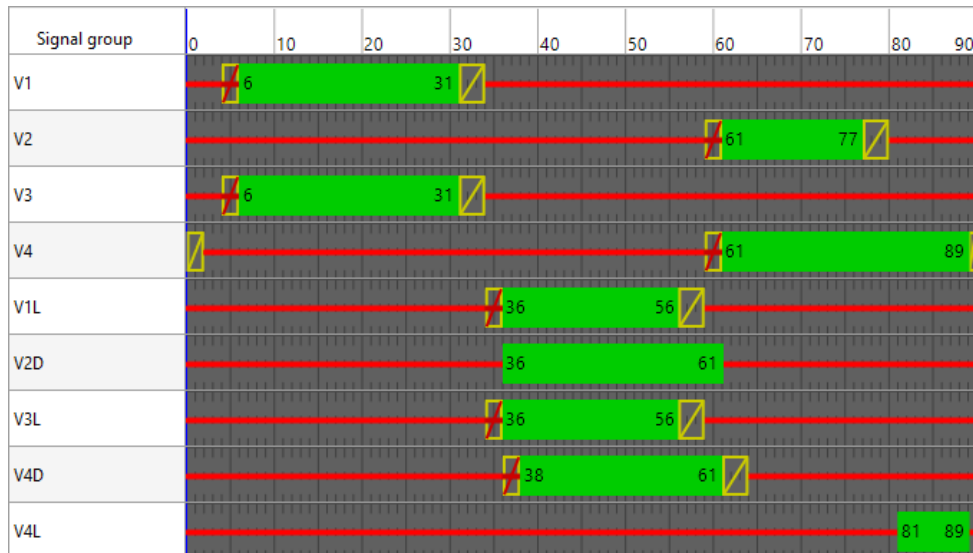
ulaznima (slika 18), dok trodimenzionalni grafikoni prikazuju ovisnost odabranog izlaza o dva odabrana ulaza (slika 19).

## 5.2 Prometni model i scenariji

Kako bi korišteni sustav adaptivnog upravljanja mogao biti evaluiran, korišteno je semaforizirano raskrižje Zvonimirova - Heinzelova ulica u gradu Zagrebu. Promatrano raskrižje se nalazi na istočnom djelu grada Zagreba. Model raskrižja je prikazan na slici 20. Glavni prometni tok na raskrižju je karakteriziran kretanjama istok-zapad i zapad-istok, a sporedni tok kretanja sjever-jug i jug-sjever. Na slici 21 je prikazan ustaljeni signalni plan za upravljanje tim raskrižjem. Sastoji se od tri faze i devet signalnih grupa. Za samu provjeru funkcionalnosti adaptivnog sustava te testiranje u određenim situacijama, napravljene su simulacije za tri različita scenarija prometne potražnje. Iznosi prometne potražnje za pojedinačne privoze po scenarijima su dani u tablici 6. Prvi simulirani scenarij odnosi se na prometnu potražnju ustaljenog signalnog plana, drugi scenarij označava prometnu potražnju uvećanu za 40% od ustaljenog signalnog plana, dok treći scenarij označava simuliranje prometne potražnje umanjene za 40%.



Slika 20: Prikaz modela raskrižja Zvonimirova - Heinzelova ulica u VISSIM-u



Slika 21: Ustaljeni signalni plan raskrižja Zvonimirova-Heinzlova

Tablica 6: PROMETNA POTRAŽNJA SVAKOG SCENARIJA

Scenarij	Prometna potražnja [voz/h]			
	Privoz			
	Istočni	Sjeverni	Zapadni	Južni
1	1136	291	660	372
2	1892	485	1100	620
3	2649	679	1540	868

### 5.3 Analiza dobivenih rezultata

U sklopu procesa optimizacije pravila neizrazitog sustava zaključivanja za upravljanje semaforiziranog raskrižja Heinzlova-Zvonimirova je bilo potrebno umjeravati određene parametre unutar samih pravila te djelovanja neizrazite logike. U nastavku su navedeni koraci koji su bili izvršeni kako bi se optimizirao sustav adaptivnog semaforiziranog raskrižja. Različite promjene parametara utjecale su na određene scenarije prometne potražnje.

Za početak bile su izvršene promjene samih prometnih parametara, od kojih je prva bila promjena koeficijentata trajanja signalnih faza, čime je dobiveno poboljšanje zapadnih privoza za 10%, dok je na južnim privozima dobiveno pogoršanje od 10%. Druga promjena uključivala je ispravak računanja prometnog kapaciteta pojedinih privoza te je

pogodovala smanjenju maksimalnog repa čekanja na zapadnom privozu pri simuliranju srednje prometne potražnje za 50%.

Prilikom druge promjene namještene su težine pravila neizrazite logike u korist glavnih privoza za 20%, iz čega je proizašlo poboljšanje od 10% na zapadnom privozu pri simuliranju scenarija srednje prometne potražnje. Pravila su unutar neizrazitog upravljača ovim promjenama dovedena do ravnoteže rada s obzirom na glavne i sporedne privoze. Taj je efekt najbolje vidljiv u daljnjem namještanju pravila neizrazite logike u korist glavnih privoza za 50%, čime je dobiveno općenito pogoršanje za otprilike 5% u gotovo cijelom adaptivnom sustavu u svim simuliranim scenarijima prometne potražnje.

Potom su izvedene promjene unutar samog signalnog plana, što u prvom slučaju podrazumijeva zamjenu 2. i 3. signalne faze. Ovom izmjenom zabilježeno je veliko poboljšanje od čak 140% na zapadnim privozima u scenariju srednje prometne potražnje te poboljšanje od 40% na zapadnim privozima kod niske prometne potražnje. Druga izmjena unutar signalnog plana uključivala je potpuno izbacivanje neobaveznih signalnih faza 6 i 7, čime su postignuta manja poboljšanja od kojih je najuočljivije ono od 10% pri simuliranju niske prometne potražnje.

### 5.3.1 Mjereni parametri prometne potražnje

Kada se radi o važnosti parametara na osnovu kojih se određuje kvaliteta adaptivnog upravljanja signalnim planom korišteni su idući parametri: srednja duljina repa čekanja, najdulji rep čekanja i broj stajanja na raskrižju. Dok su srednja i maksimalna duljina repa čekanja zanimljivi parametri za analizu propusnosti raskrižja, broj stajanja daje uvid u samu vožnju. Manji broj stajanja označava ergonomski ugodniju vožnju, smanjenje emisija ispušnih plinova i buke, povećanje sigurnosti i smanjenje potrošnje goriva [7]. U analizi rezultata su ova 3 parametra podijeljena prema privozima na kojima su bili mjereni te su razvrstani prema scenarijima prometne potražnje. Ono na što treba posebno obratiti pozornost pri interpretaciji dobivenih rezultata jest usporedba između ustaljenog signalnog plana i adaptivnog upravljanja pri mjerenju spomenutih parametara. Vrijednostima navedenim u nastavku pridružene su oznake pojedinih privoza "Z", "J", "I", "S", ovisno na kojoj se strani svijeta promatrani privoz nalazi. Navedena tri parametra za analizu kvalitete upravljanja raskrižjem su označena kako slijedi:

1. QL - srednja duljina repa čekanja na određenom privozu;

2. QLM - najveća duljina repa čekanja na određenom privozu;
3. QS - broj stajanja na raskrižju.

### 5.3.2 Rezultati sustava za promjenu vremena trajanja faza

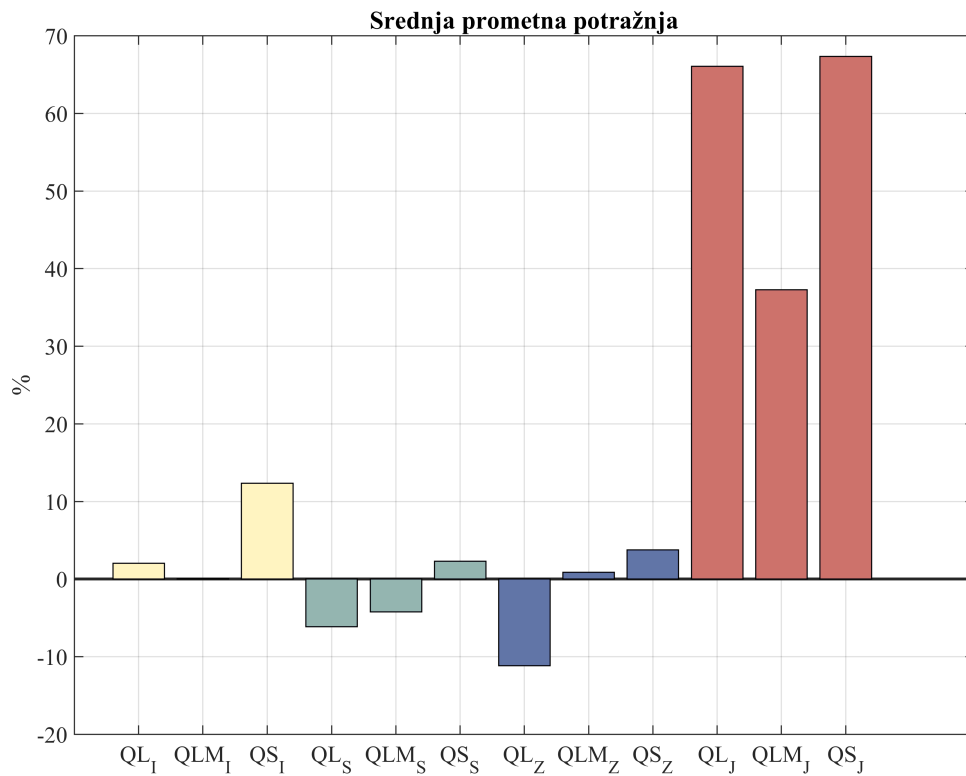
Rezultati samostalnog rada adaptivnog sustava za promjenu trajanje faze dani su na grafikonima 1, 2 i 3. Na ovim i nadolazećim grafikonima su mjereni podaci prikazani kao omjer poboljšanja odnosno pogoršanja djelovanja adaptivnog upravljanja naspram ustaljenog upravljanja. Nadalje, pozitivna vrijednost na grafikonu označava za koliko je posto adaptivno upravljanje bolje djelovalo, a negativna vrijednost za koliko je posto lošije djelovalo na promatrani parametar. Željeno djelovanje sustava je da minimizira repove čekanja i broj stajanja, tako da što je adaptivni sustav više umanjio te parametre, to će postotak na nadolazećim grafikonima biti veći i pozitivan. Odnosno ako je primjerice došlo duljih repova čekanja kod adaptivnog upravljanja u odnosu na ustaljeno upravljanje, tada je postotak biti negativan.

U scenariju srednje prometne potražnje je došlo do veoma značajnog poboljšanja broja stanja na južnom privozu kao što je prikazano na grafikonu 1. Kod adaptivnog upravljanja vremenom trajanja pojedine faze je došlo do poboljšanja od 66% kod prosječne duljine repa čekanja, 37,3% kod najduljeg repa čekanja i 67,4% kod broja stajanja. Također značajno poboljšanje je vidljivo na istočnom privozu sa poboljšanjem od 13,4% u odnosu na ustaljeno upravljanje kod broja zaustavljanja vozila. Kod zapadnog privoza je došlo do pogoršanja prosječne duljine repa čekanja za 11,2%.

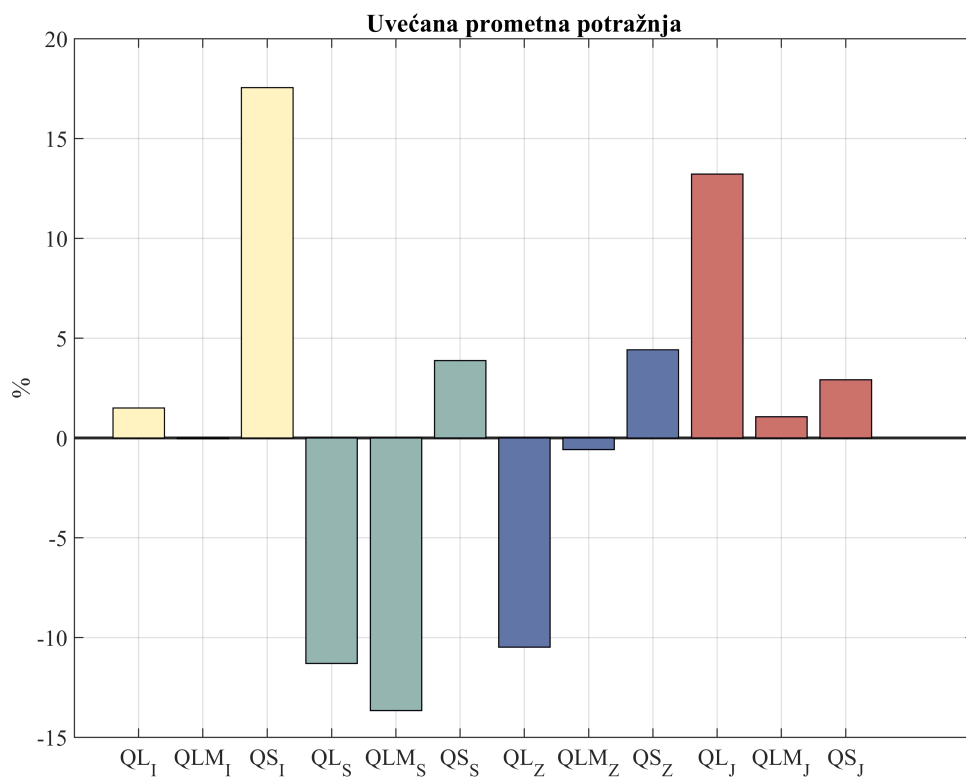
Grafikon 2 prikazuje poboljšanje stanja na južnom privozu i u scenariju uvećane prometne potražnje. Postignuto je značajno poboljšanje kod parametra prosječne duljine repova čekanja u iznosu od 13,2% te blago poboljšanje kod druga dva mjerena parametra. Od ostalih značajnijih promjena može se izdvojiti poboljšanje broja stajanja na istočnom privozu u iznosu od 15,6% te pogoršanje prosječne i maksimalne duljine repa čekanja na sjevernom privozu (11,3% i 13,6%) kao i na zapadnom privozu no u manjoj mjeri (10,5% i 0,5%).

Grafikon 3 prikazuje rezultate mjerenih parametara za scenarij umanjene prometne potražnje. Na istočnom privozu se vidi poboljšanje kod svih promatranih parametara u odnosu na ustaljeno upravljanje. Prosječni rep čekanja je smanjen za 5,1%, maksimalni rep čekanja za 7,3% te broj stajanja za 3,1%. Na južnom privozu je također vidljivo

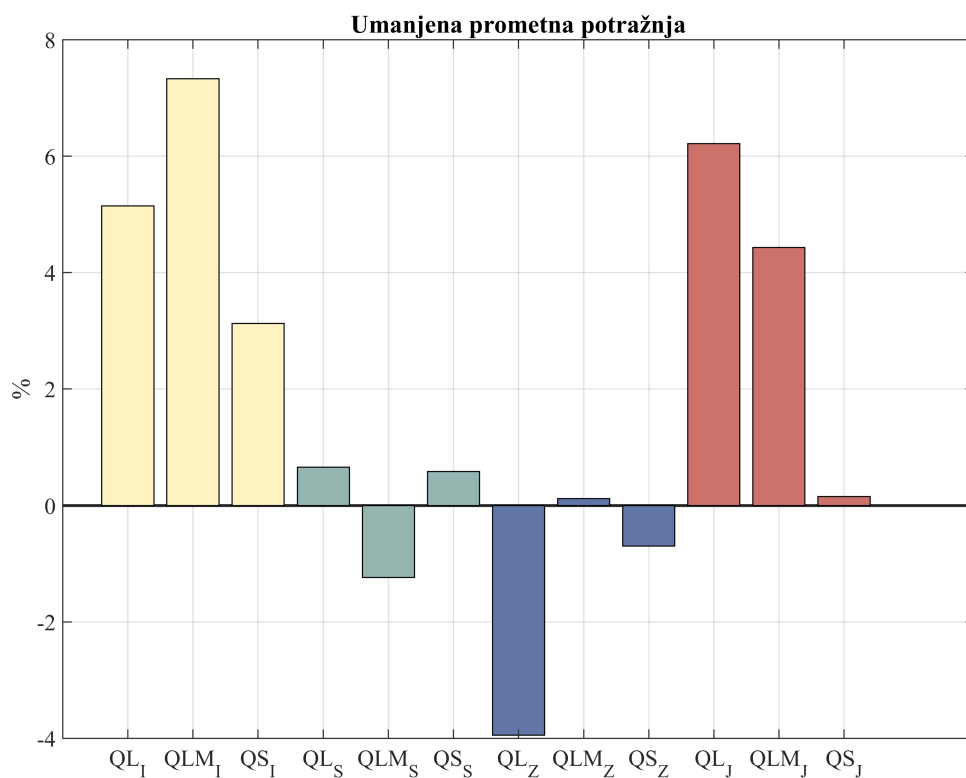




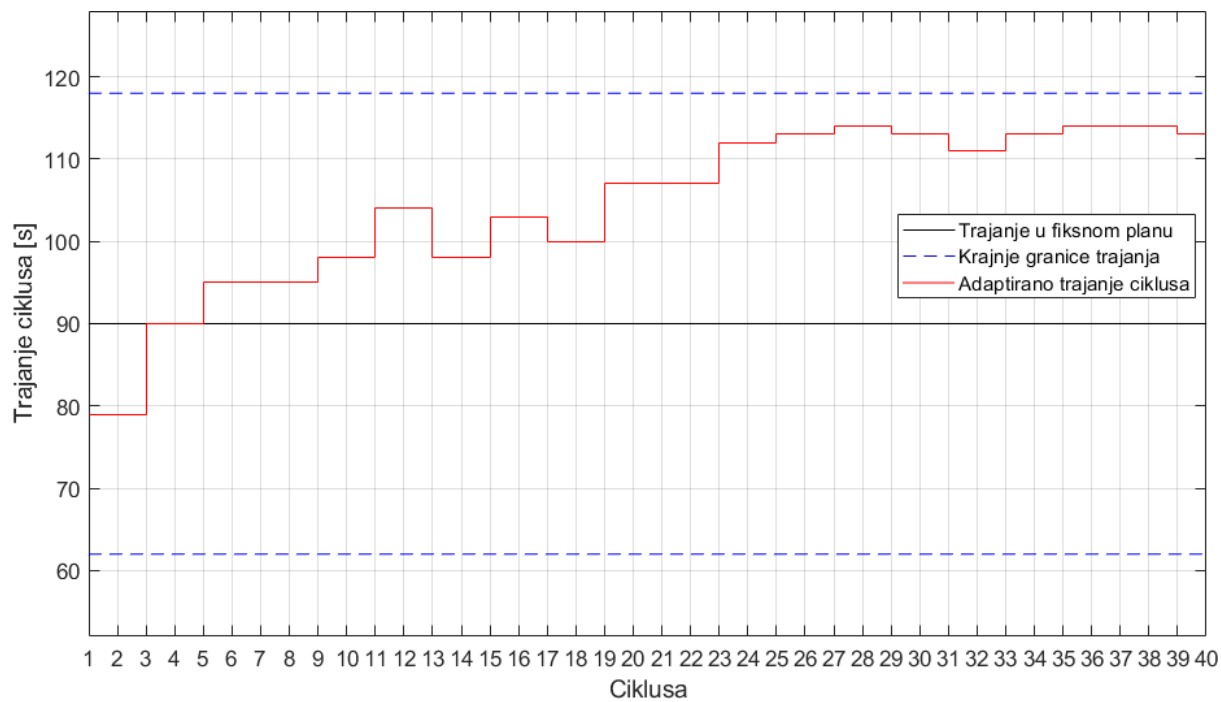
Grafikon 1: Prikaz rezultata sustava za promjenu trajanja faza srednje prometne potražnje



Grafikon 2: Prikaz rezultata sustava za promjenu trajanja faza uvećane prometne potražnje



Grafikon 3: Prikaz rezultata sustava za promjenu trajanja faza umanjene prometne potražnje



Slika 22: Trajanja ciklusa u scenariju uvećane prometne potražnje

pozitivno djelovanje sustava upravljanja te poboljšanje kod svih mjerenih parametara. Pri tome je kod sjevernog privoza došlo do smanjenja prosječne duljine repa čekanja i broja stajanja i došlo je do vrlo blagog porasta najveće duljine repa čekanja u iznosu od 1,2%.

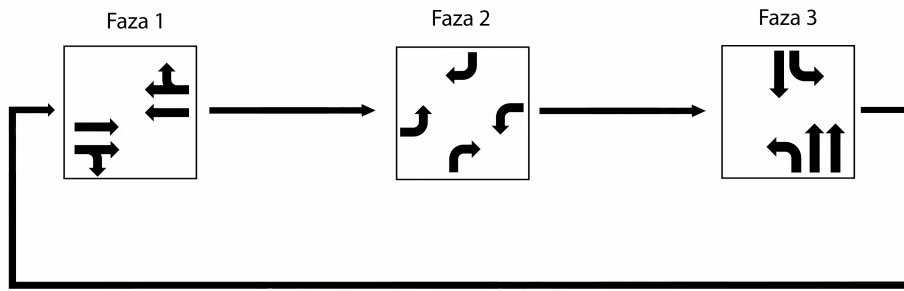
Osim prethodno opisanih mjerenih parametara, na slici 22 prikazana je i promjena trajanja ciklusa tijekom simulacije scenarija uvećane prometne potražnje. Odabran prikaz trajanja ciklusa je iz četvrte simulacije po redu od njih deset. Plavim isprekidanim crtama su označene donja (62 [s]) i gornja (118 [s]) granica trajanja ciklusa. Ravna crna linija pokazuje trajanje ciklusa u ustaljenom signalnom planu (90 [s]), a crvena linija pokazuje uzastopno trajanje ciklusa kroz simulaciju. Prosječno trajanje ciklusa iznosilo je 106 [s] što je za 16 sekundi duže od trajanja ciklusa u ustaljenom signalnom planu.

### 5.3.3 Rezultati sustava za promjenu redoslijeda faza

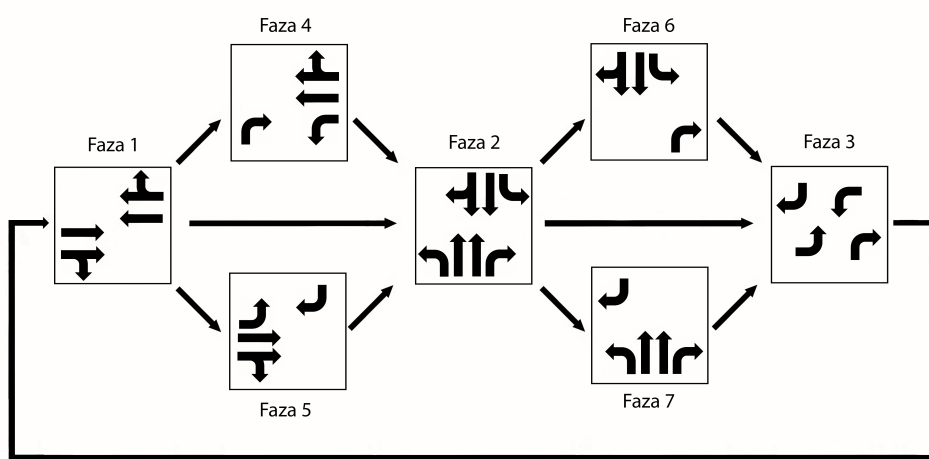
Osim korištenja sustava za promjenu trajanja signalnih faza, samostalno je testiran i sustav adaptivnog upravljanja za promjenu redoslijeda signalnih faza. U nastavku na slici 23 prikazan je ustaljeni signalni plan simuliranog raskrižja na temelju kojeg je izrađena prilagođena struktura NEMA korištena u ovom radu (slika 24). Adaptivni signalni plan korišten u svrhu ovog rada izveden je na način da su signalne faze podijeljene u već spomenute kategorije obaveznih i neobaveznih faza. U sklopu korištenog adaptivnog signalnog plana, obavezne faze predstavljene su na slici 24 brojevima 1, 2 i 3, dok su neobavezne faze označene brojevima 4, 5, 6 i 7. Uvjet izmjene signalnih faza ovisi o prometnoj potražnji te kombinaciji parametara odnosno ulaznih varijabli neizrazitih sustava upravljanja.

Pogoršanja i poboljšanja rada adaptivnog sustava za izmjenu signalnih faza u odnosu na ustaljeni signalni plan moguće je vidjeti na sljedećim prikazima. Grafikoni su podijeljeni prema scenarijima simulirane prometne potražnje na srednju (grafikon 5), uvećanu (grafikon 6) i umanjenu (grafikon 7) te prikazuju podjelu po privozima. Osim rezultata usporedbe adaptivnog upravljanja s ustaljenim, prikazana je i izmjena signalnih faza adaptivnog sustava upravljanja izrađenog posebno za tu uporabu na grafikonu 4. Moguće je vidjeti kako ne postoji ustaljeni red po kojem se signalne faze izmjenjuju, nego adaptivni sustav za izmjenu signalnih faza na osnovu prikupljenih podataka o prometnoj potražnji prilagođava rad signalnog plana. Također je moguće primijetiti često pojavljivanje četvrte faze, neobavezne faze za zapadne privoze. Takav rad sustava je i očekivan s obzirom na

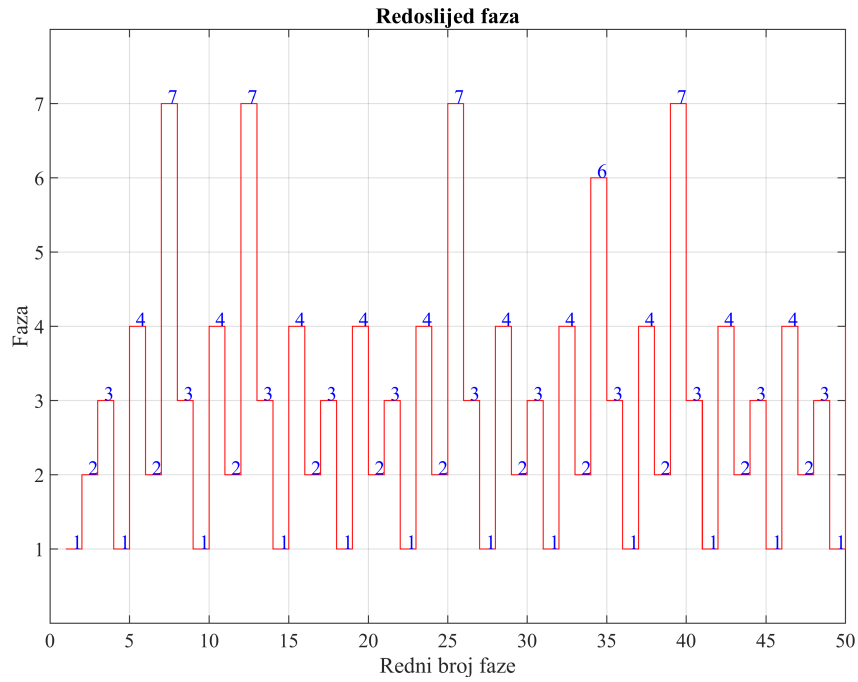
neproporcionalnu količinu prometne potražnje na zapadnom privozu.



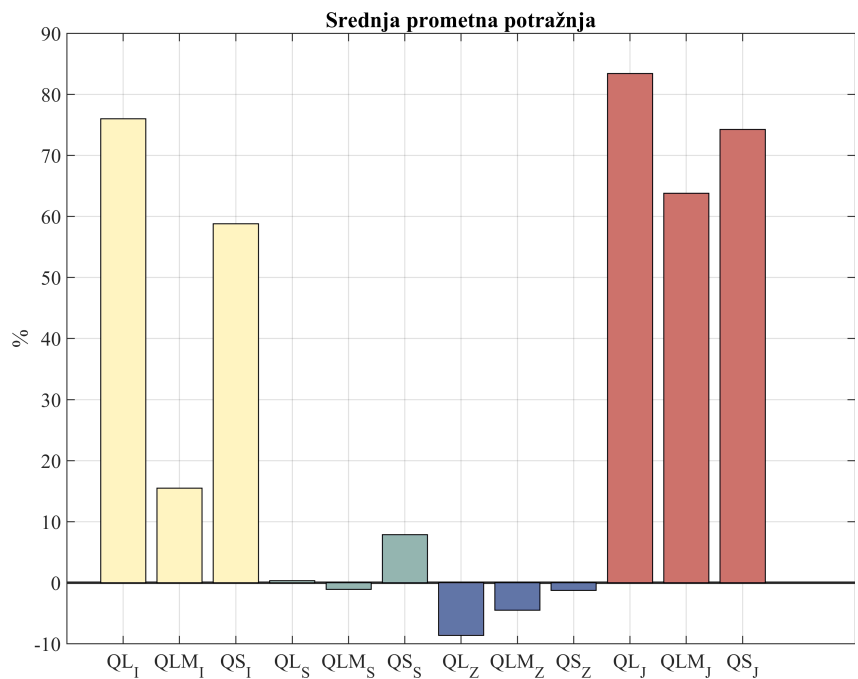
Slika 23: Faze ustaljenog signalnog plana za raskrižje Zvonimirova - Heinzelova



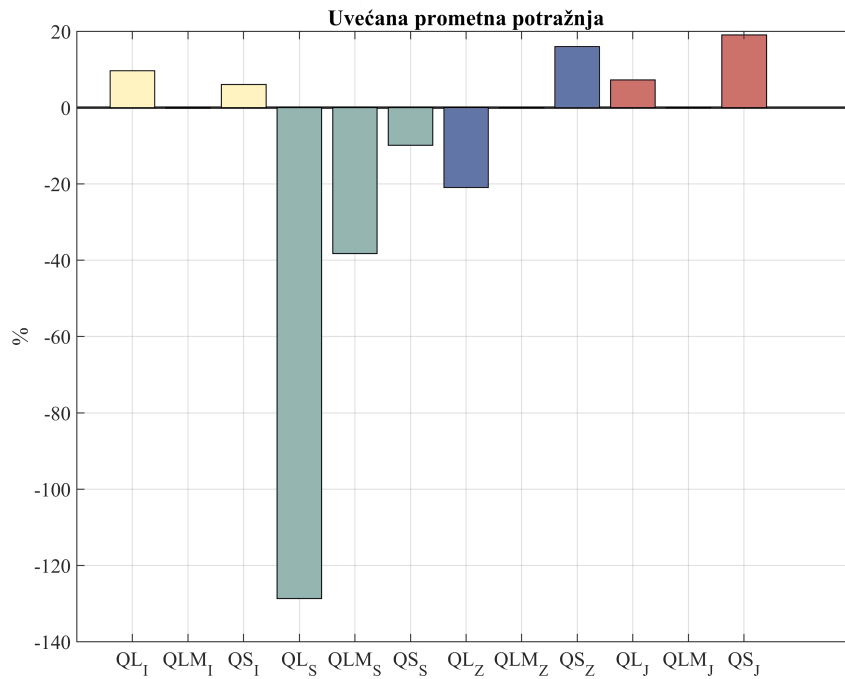
Slika 24: Prilagođena struktura NEMA korištena u svrhu adaptivnog upravljanja za raskrižje Zvonimirova - Heinzelova



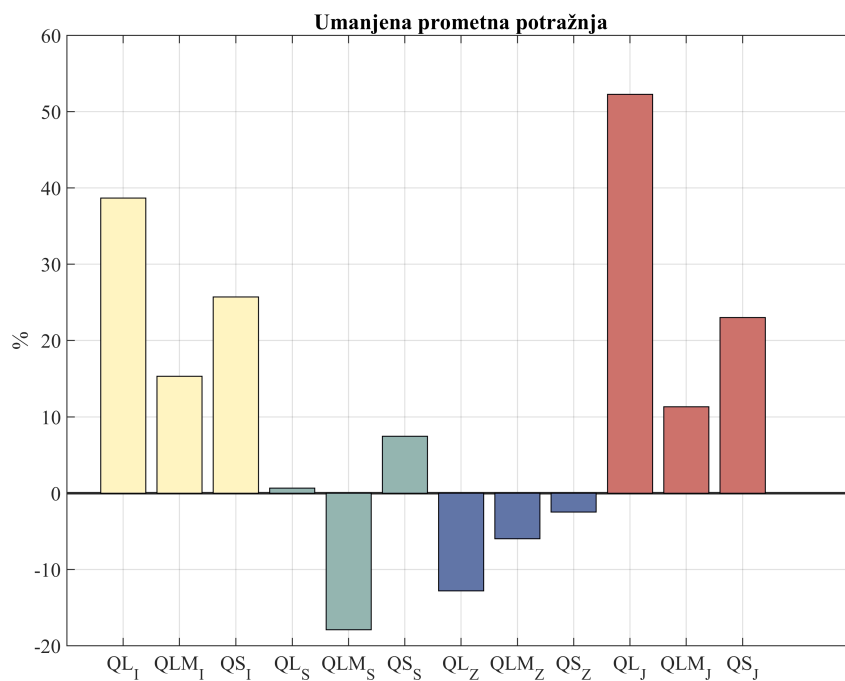
Grafikon 4: Prikaz izmjene faza tijekom simulacije adaptivnog sustava upravljanja za promjenu redoslijeda signalnih faza scenarija srednje prometne potražnje



Grafikon 5: Prikaz rezultata sustava za promjenu redoslijeda signalnih faza srednje prometne potražnje



Grafikon 6: Prikaz rezultata sustava za promjenu redoslijeda signalnih faza uvećane prometne potražnje



Grafikon 7: Prikaz rezultata sustava za promjenu redoslijeda signalnih faza umanjene prometne potražnje

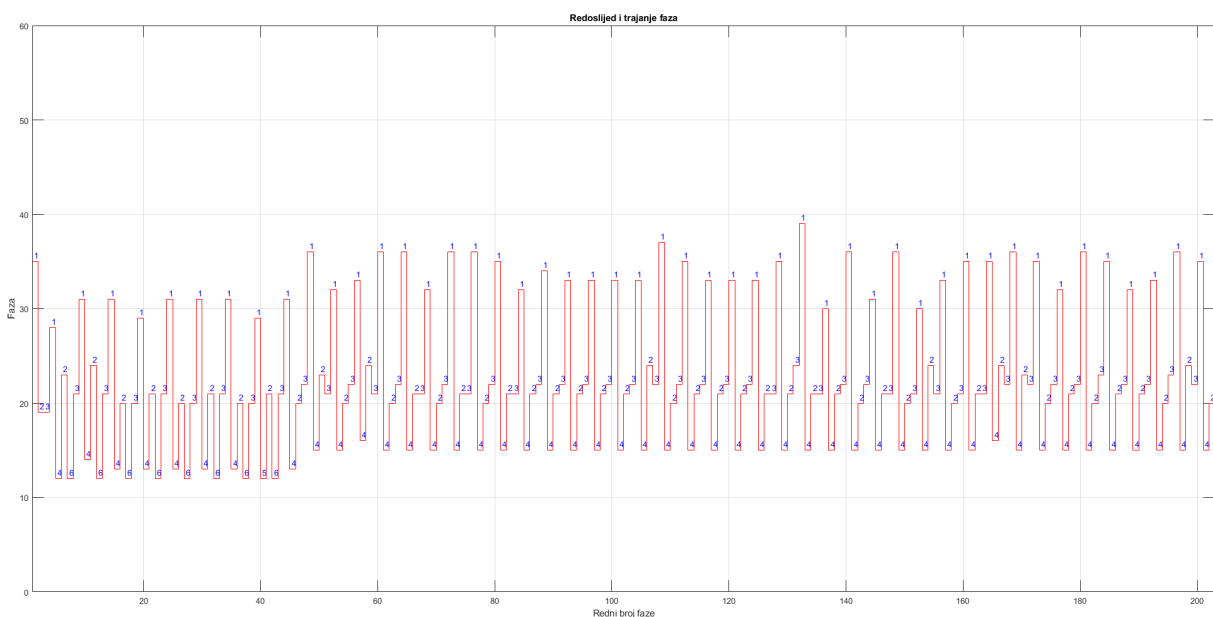
### 5.3.4 Rezultati sustava za promjenu vremena trajanja i redosljeda faza

U nastavku su prikazani rezultati simulacija dobiveni zajedničkim korištenjem sustava za promjenu vremena trajanja i redosljeda faza. Na grafikonima 8, 9 i 10 je prikazan redosljed izmjena faza te njihovo trajanje. Crvena linija označava trajanje faze, a plavi broj iznad njenog horizontalnog dijela predstavlja odabranu fazu. Rezultati simulacije su dani po pojedinačnim privozima za pojedine parametre kroz sva tri scenarija prometne potražnje na grafikonima od 11 do 22. Osim toga prikazani su i ukupni rezultati pojedinačnih scenarija na grafikonima 23, 24 i 25.

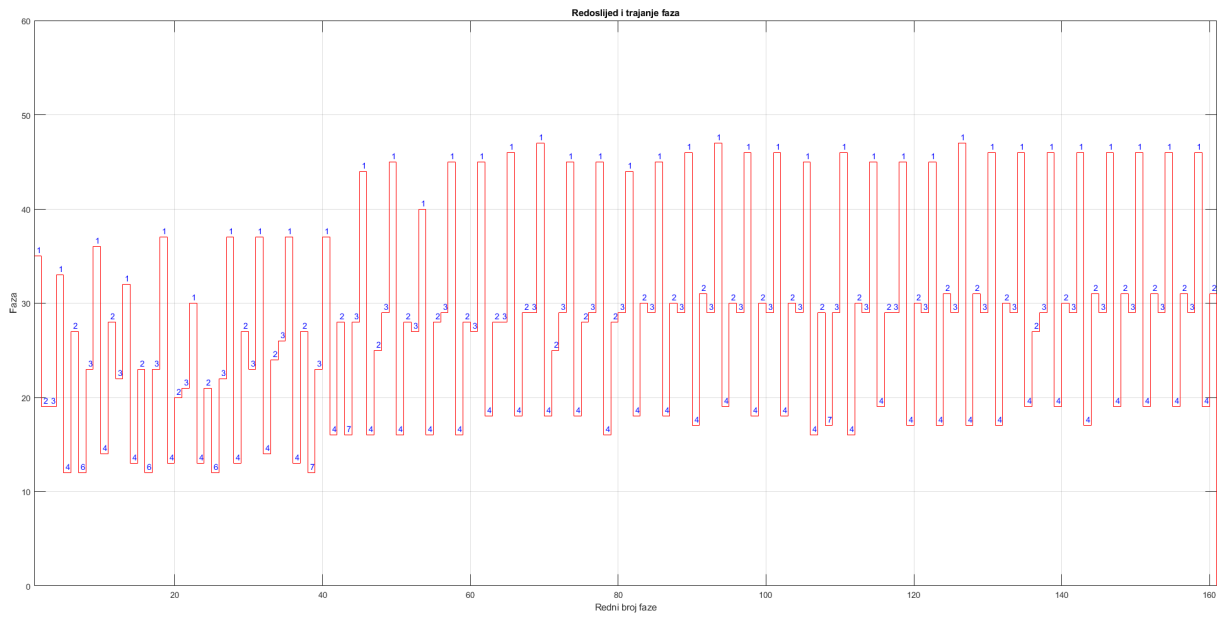
Pokazalo se kako zapadni privoz dobiva najveće pogoršanje uslijed rada primijenjenog adaptivnog sustava upravljanja signalnim planom, dok su ostali privozi dobili relativno zadovoljavajuće rezultate u smislu poboljšanja. To ne iznenađuje s obzirom na neproporcionalno veliku prometnu potražnju na tom privozu.

Srednja duljina repa čekanja je sljedeći mjereni parametar koji se pokazao važnim za usporedbu unutar rezultata, što slijedi u narednih nekoliko prikaza (grafikoni 11, 12, 13 i 14). U nastavku slijede prikazi mjerenja najduljeg repa čekanja za pojedine privoze te njihova međusobna usporedba (grafikoni 15, 16, 17 i 14).

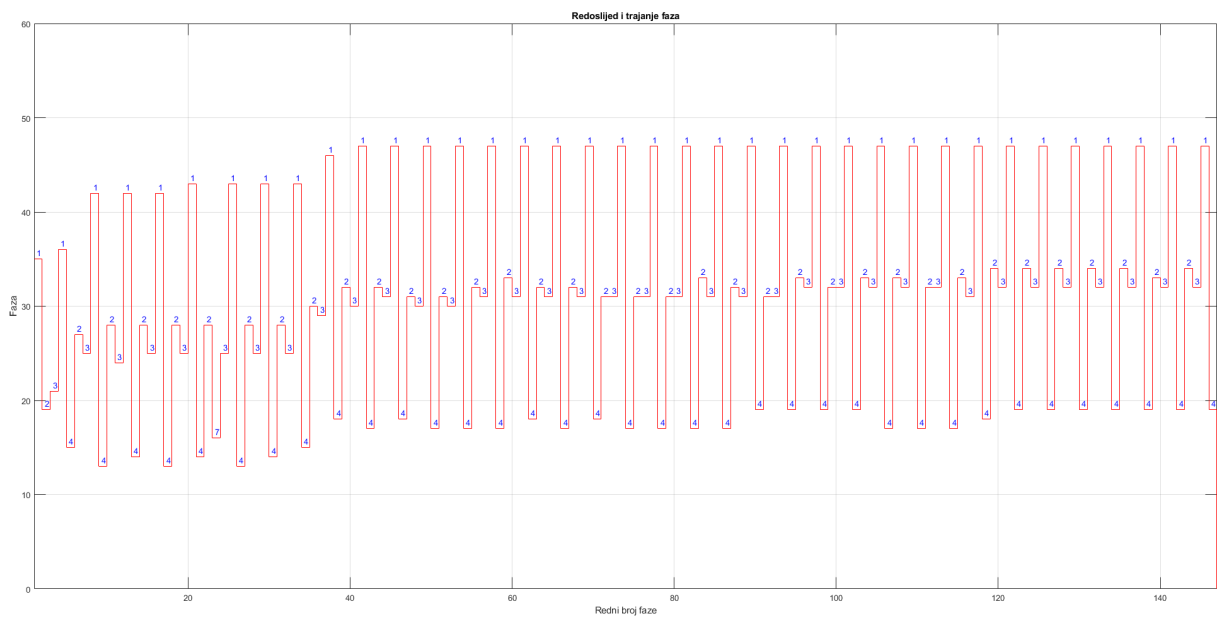
Naposljetku, potrebno je još obratiti pozornost na mjerenje broja stajanja po pojedinim privozima (grafikoni 19, 20, 21, i 22).



Grafikon 8: Prikaz promjene duljine trajanja faze i njihovog redosljeda - Scenarij 1

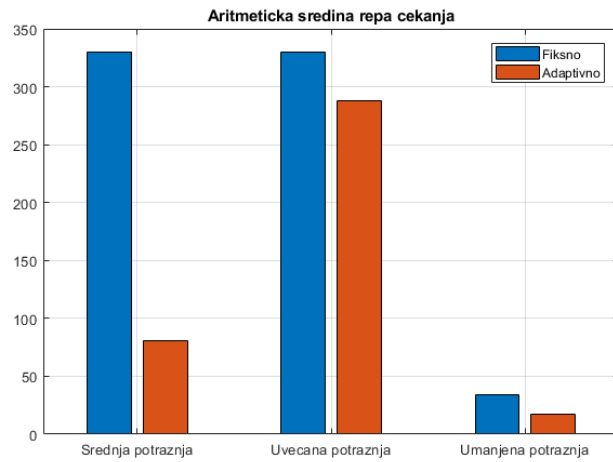


Grafikon 9: Prikaz promjene duljine trajanja faze i njihovog redoslijeda - Scenarij 2

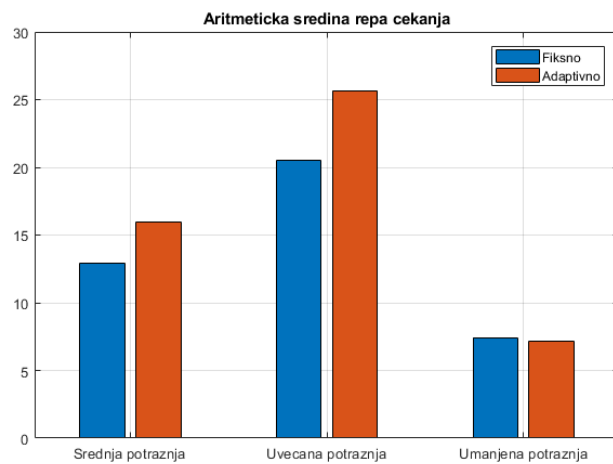


Grafikon 10: Prikaz promjene duljine trajanja faze i njihovog redoslijeda - Scenarij 3

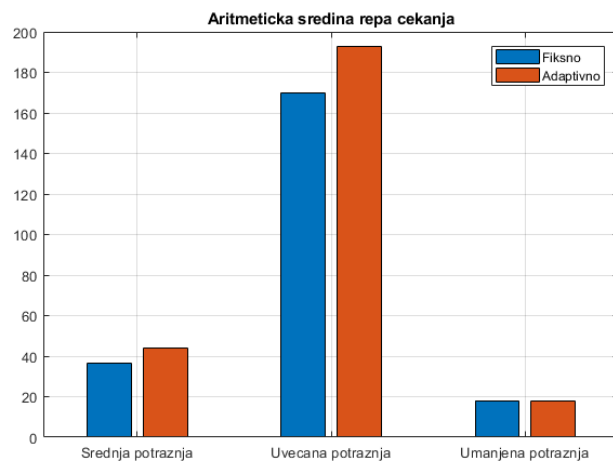




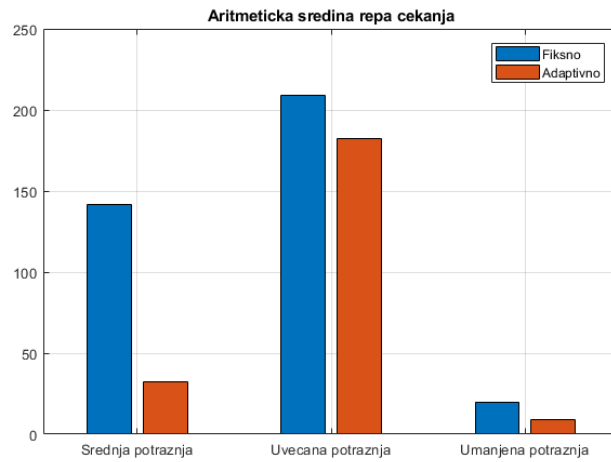
Grafikon 11: Prikaz rezultata srednjeg repa čekanja istočnog privoza



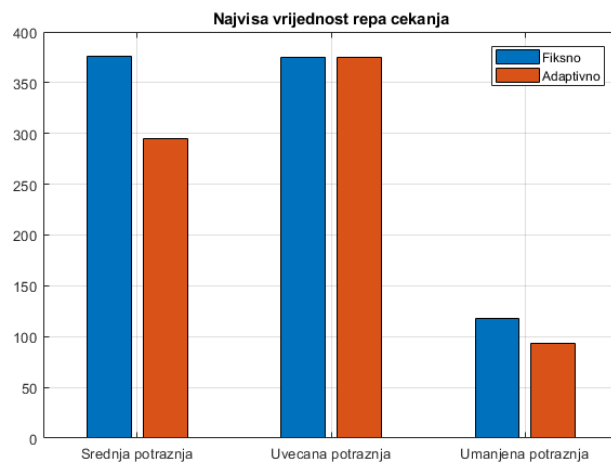
Grafikon 12: Prikaz rezultata srednjeg repa čekanja sjevernog privoza



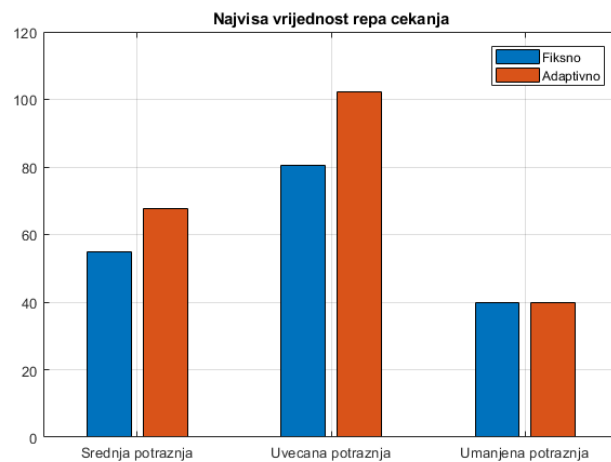
Grafikon 13: Prikaz rezultata srednjeg repa čekanja zapadnog privoza



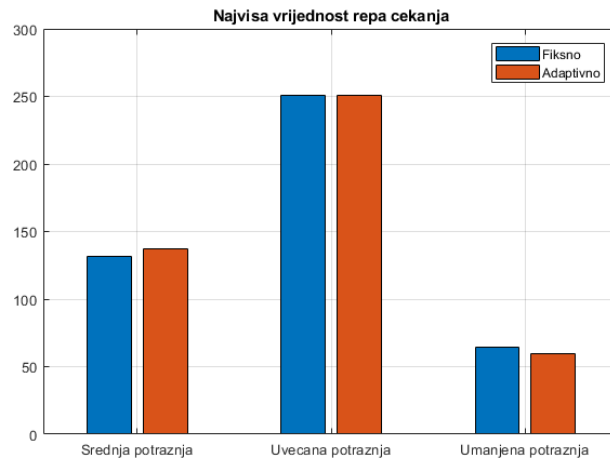
Grafikon 14: Prikaz rezultata srednjeg repa čekanja južnog privoza



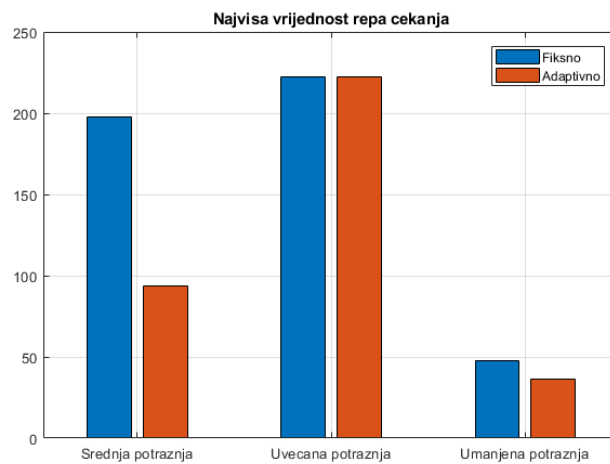
Grafikon 15: Prikaz rezultata najduljeg repa čekanja istočnog privoza



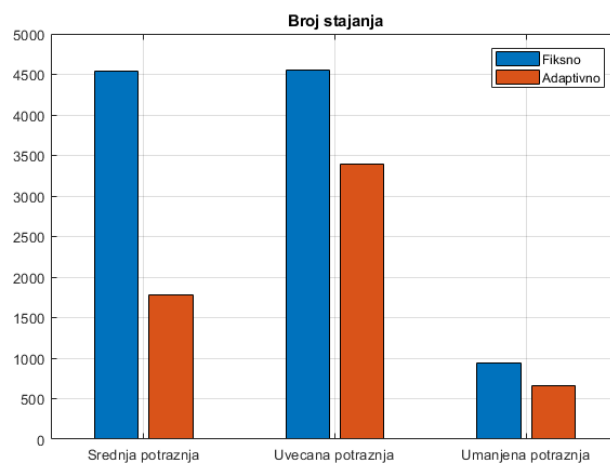
Grafikon 16: Prikaz rezultata najduljeg repa čekanja sjevernog privoza



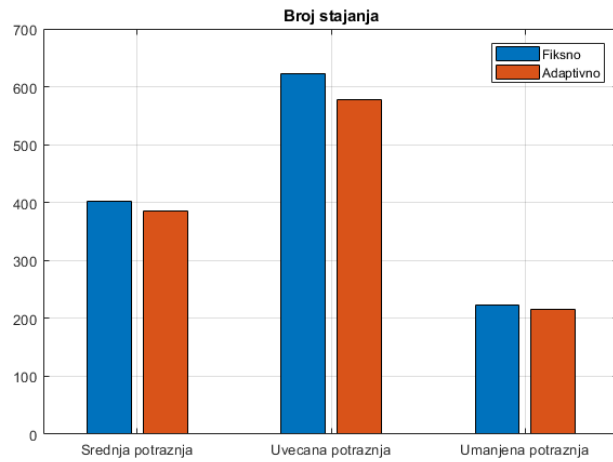
Grafikon 17: Prikaz rezultata najduljeg repa čekanja zapadnog privoza



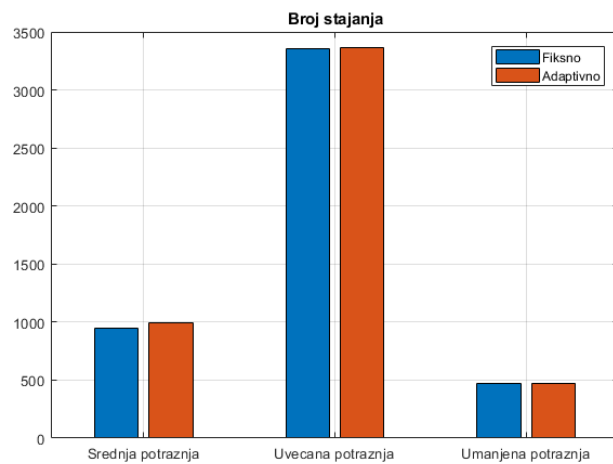
Grafikon 18: Prikaz rezultata najduljeg repa čekanja južnog privoza



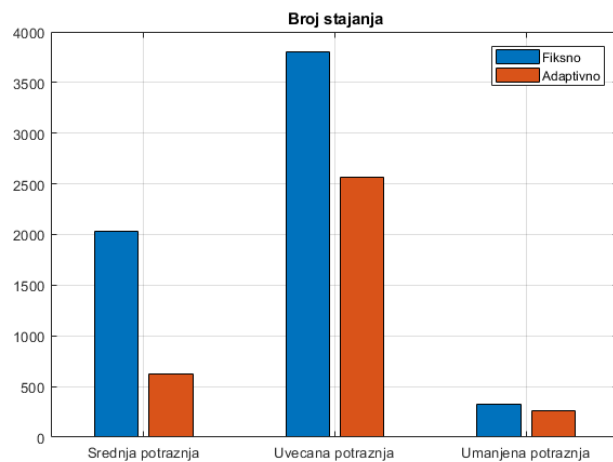
Grafikon 19: Prikaz rezultata broja stajanja na istočnom privozu



Grafikon 20: Prikaz rezultata broja stajanja na sjevernom privozu



Grafikon 21: Prikaz rezultata broja stajanja na zapadnom privozu

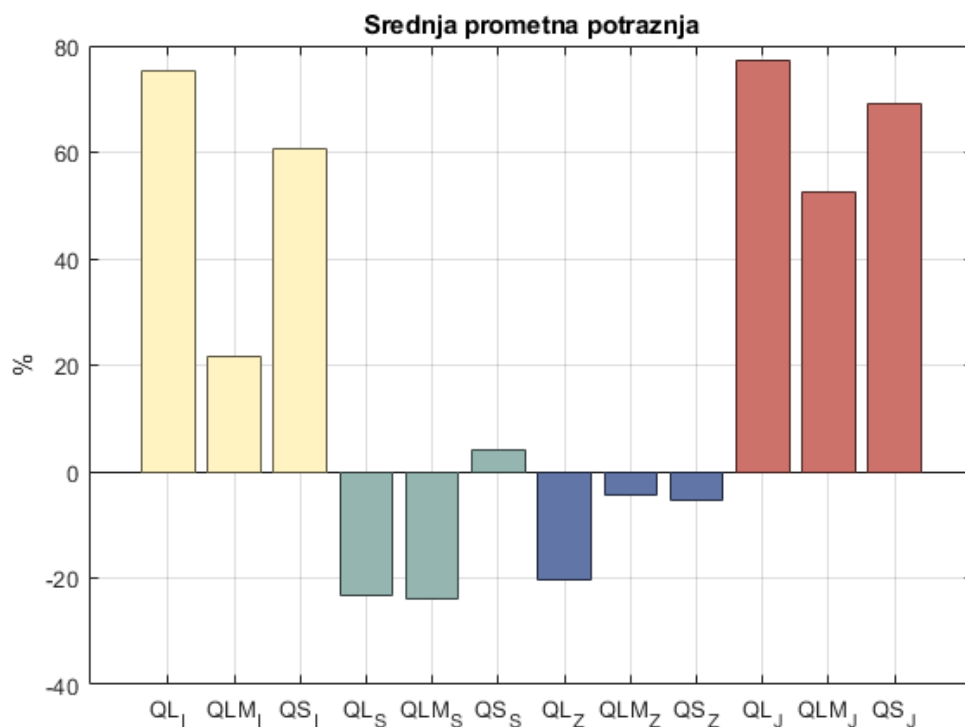


Grafikon 22: Prikaz rezultata broja stajanja na južnom privozu

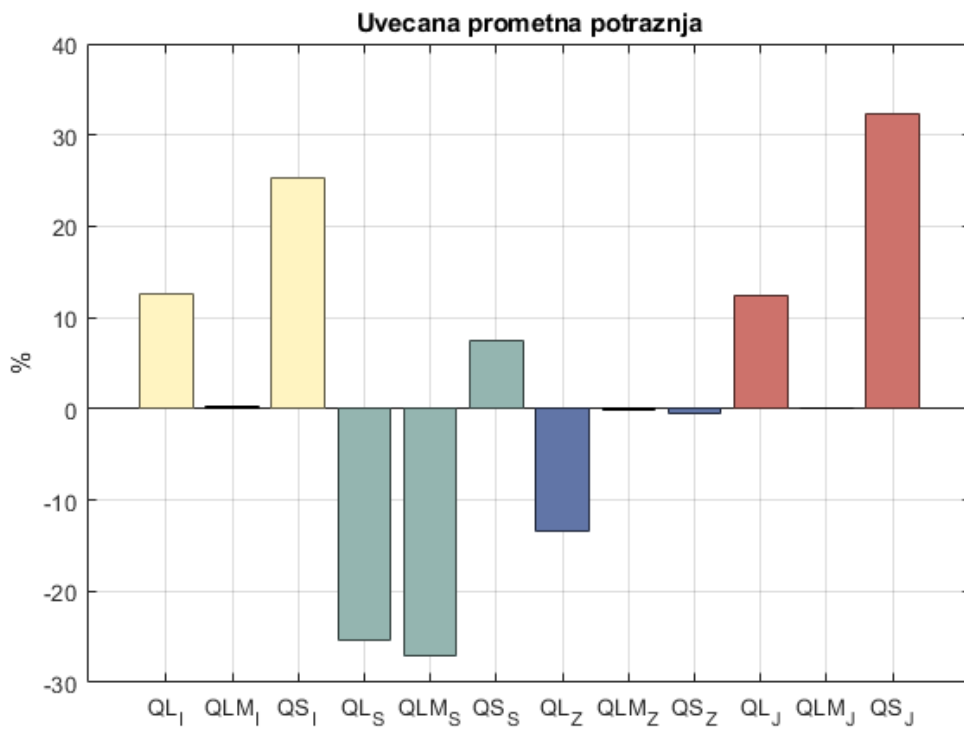
Grafikon 23 prikazuje simuliranu prometnu potražnju mjerenu u vršnom satu, zbog čega je najmjerodavnija što se tiče realnosti simuliranih scenarija.

Pri simuliranju uvećane prometne potražnje, uvjeti same simulacije ostaju nepromijenjeni osim što prometna potražnja porasta za 40%. Već je prethodno spomenuto kako su podaci simulacija srednje prometne potražnje izmjereni u vršnom satu te kako je povećanje prometne potražnje uvećano za 40% preveliko. Iz tog je razloga potrebno napomenuti kako rezultati simulacija koji slijede nisu namijenjeni kako bi prikazivali moguću realnu situaciju, nego kako bi se testirale granice izrađenog adaptivnog sustava upravljanja pri uvećanoj prometnoj potražnji. Upravo u ovom dijelu rezultati pokazuju (grafikon 24) koji je odziv adaptivnog sustava na neproporcionalno veliku prometnu potražnju, što je najbolje vidljivo na rezultatima zapadnog privoza.

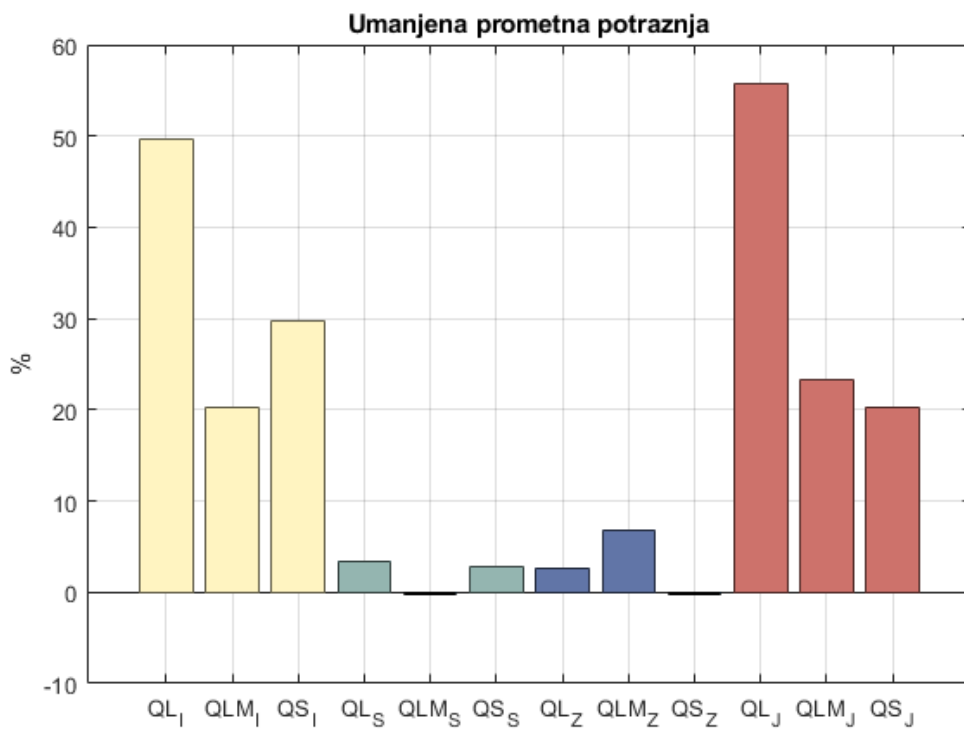
Jednako kao i pri simuliranju uvećane prometne potražnje, umanjena prometna potražnja slijedi sve uvjete srednje prometne potražnje, koja je u ovom scenariju umanjena za 40%. Za razliku od uvećane prometne potražnje, ovaj je scenarij puno bliži realnim očekivanjima u određenim satima odvijanja prometa na simuliranom semaforiziranom raskrižju. Iz tog je razloga pri simuliranju umanjene prometne potražnje neproporcionalnost zapadnog privoza naprema ostalim privozima znatno smanjena (grafikon 25).



Grafikon 23: Prikaz rezultata simuliranog scenarija srednje prometne potražnje



Grafikon 24: Prikaz rezultata simuliranog scenarija uvećane prometne potražnje



Grafikon 25: Prikaz rezultata simuliranog scenarija umanjene prometne potražnje

### 5.3.5 Usporedba pojedinih sustava upravljanja

U tablicama od 7 do 15 su sažeti rezultati svih izvršenih simulacija u sklopu ovog rada. Svaki od testiranih sustava upravljanja je znatno pridonio skraćanju repova čekanja, najduljih repova čekanja i broja stajanja na istočnom i južnom privozu. Pod cijenu tih poboljšanja je došlo pogoršanje tih parametara na sjevernim i zapadnim privozima. Ta pogoršanja su značajnije izražena kada su odvojeno korišteni predloženi sustavi upravljanja, no kada su upareni u sustav za istovremenu promjenu trajanja i redoslijeda faza, ta su pogoršanja umanjena.

Nadalje kako bi se taj odnos pogoršanja pojedinih privoza, a poboljšanje drugih bolje prikazao, moguće je proučiti vrijednosti iz tablice 13. Rad sustava za promjenu trajanja i redoslijeda faza signalnog plana korišten u simulaciji srednje prometne potražnje dao je doprinos smanjenju prosječne duljine redova čekanja na istočnom privozu za gotovo 250 metra, što je poboljšanje od 75,4% u odnosu na upravljanje primjenom ustaljenog signalnog plana. U istom slučaju je najveće pogoršanje zapaženo kod sjevernog privoza u iznosu od 23,1%, a očitovalo se produljenjem prosječnih repova čekanja za samo 3 metra. Iz tog razloga je potrebno obratiti više pažnje na izmjerene vrijednosti, a ne samo na njihove odnose u smislu pogoršanja ili poboljšanja.

Uparivanje oba predložena sustava upravljanja posebno se korisno pokazalo kod simulacije uvećane prometne potražnje. U tome je slučaju došlo do značajne degradacije rada sustava za promjenu trajanja faza. Korištenjem samo sustava za promjenu redoslijeda faza je došlo do pogoršanja u iznosu od 128% kod prosječne duljine repova čekanja na sjevernom privozu. No kada su sustavi upareni, to pogoršanje je smanjeno na 25% te je postignuto bolje djelovanje i na drugim privozima.

Osim duljine repova čekanja, važno je osvrnuti se i na djelovanje sustava po pitanju broja stajanja vozila. Za sva tri ispitana sustava upravljanja gotovo su uvijek dobivena poboljšanja, odnosno smanjen je broj zaustavljanja vozila na raskrižju. To je najznačajnije vidljivo u tablici 14 gdje je kod južnog privoza došlo do 1229 manje stajanja korištenjem adaptivnog upravljanja. Smanjivanje broja stajanja kao što je dosad napomenuto najvažnije je zbog udobnosti vožnje te utjecaja na potrošnju goriva i emisije štetnih plinova. Predloženi sustav za promjenu trajanja i redoslijeda faza osim što umanjuje zagušenja, pridonosi i ugodnijoj vožnji.

Tablica 7: REZULTATI SCENARIJA SREDNJE PROMETNE POTRAŽNJE SUSTAVA ZA PROMJENU TRAJANJA FAZA

Mjera	Istok			Sjever			Zapad			Jug		
	Ustaljeno upravljanje	Adaptivno upravljanje		Ustaljeno upravljanje	Adaptivno upravljanje		Ustaljeno upravljanje	Adaptivno upravljanje		Ustaljeno upravljanje	Adaptivno upravljanje	
		Vrijednost	Smanjenje [%]		Vrijednost	Smanjenje [%]		Vrijednost	Smanjenje [%]		Vrijednost	Smanjenje [%]
QL [m]	330,3	323,6	2	13	13,8	-6,1	36,6	40,6	-11	141,4	48	66
QLM [m]	376	375,7	0	54,8	57,1	-4,2	131,4	130,2	0,8	197,5	123,8	37,3
QS	4539,4	3778,9	12,3	401,7	392,5	2,3	947,9	912,3	3,8	2032	663,4	67,4

Tablica 8: REZULTATI SCENARIJA UVEĆANE PROMETNE POTRAŽNJE SUSTAVA ZA PROMJENU TRAJANJA FAZA

Mjera	Istok			Sjever			Zapad			Jug		
	Ustaljeno upravljanje	Adaptivno upravljanje		Ustaljeno upravljanje	Adaptivno upravljanje		Ustaljeno upravljanje	Adaptivno upravljanje		Ustaljeno upravljanje	Adaptivno upravljanje	
		Vrijednost	Smanjenje [%]		Vrijednost	Smanjenje [%]		Vrijednost	Smanjenje [%]		Vrijednost	Smanjenje [%]
QL [m]	329,8	324,8	1,5	20,5	22,8	-11,3	169,9	187,7	-10,5	208,7	181,1	13,2
QLM [m]	375,3	375,4	0	80,3	91,3	-13,6	250,5	251,9	-0,6	222,2	219,9	1
QS	4552,3	3753,2	17,5	623,1	598,9	3,8	3351,7	3203,6	4,4	3799,1	3688,6	3

Tablica 9: REZULTATI SCENARIJA UMANJENE PROMETNE POTRAŽNJE SUSTAVA ZA PROMJENU TRAJANJA FAZA

Mjera	Istok			Sjever			Zapad			Jug		
	Ustaljeno upravljanje	Adaptivno upravljanje		Ustaljeno upravljanje	Adaptivno upravljanje		Ustaljeno upravljanje	Adaptivno upravljanje		Ustaljeno upravljanje	Adaptivno upravljanje	
		Vrijednost	Smanjenje [%]		Vrijednost	Smanjenje [%]		Vrijednost	Smanjenje [%]		Vrijednost	Smanjenje [%]
QL [m]	34	32,3	5,1	7,4	7,3	0	18	18,7	-3,9	19,9	18,7	6,2
QLM [m]	117,4	108,8	7,3	39,8	40,3	-1,2	64	63,9	0,1	47,7	45,6	4,4
QS	934,4	913,9	3,1	222,6	221,3	0	473,8	477,1	-0,7	330	329,5	0,1

Tablica 10: REZULTATI SCENARIJA SREDNJE PROMETNE POTRAŽNJE UPRAVLJAČKOG SUSTAVA ZA PROMJENU REDOSLIJEDA FAZA

Mjera	Istok			Sjever			Zapad			Jug		
	Ustaljeno upravljanje	Adaptivno upravljanje		Ustaljeno upravljanje	Adaptivno upravljanje		Ustaljeno upravljanje	Adaptivno upravljanje		Ustaljeno upravljanje	Adaptivno upravljanje	
		Vrijednost	Smanjenje [%]		Vrijednost	Smanjenje [%]		Vrijednost	Smanjenje [%]		Vrijednost	Smanjenje [%]
QL [m]	330,3	79,3	76	13	12,9	0,3	36,6	39,7	-8,6	141,4	23,5	83,4
QLM [m]	376	317,8	15,4	54,8	55,3	-1	131,4	137,3	-4,5	197,5	71,5	63,8
QS	4539,4	1869,5	58,8	401,7	370,1	7,8	947,9	959,9	-1,2	2032	522,7	74,3



Tablica 11: REZULTATI SCENARIJA UVEĆANE PROMETNE POTRAŽNJE UPRAVLJAČKOG SUSTAVA ZA PROMJENU REDOSLIJEDA FAZA

Mjera	Istok			Sjever			Zapad			Jug		
	Ustaljeno upravljanje	Adaptivno upravljanje		Ustaljeno upravljanje	Adaptivno upravljanje		Ustaljeno upravljanje	Adaptivno upravljanje		Ustaljeno upravljanje	Adaptivno upravljanje	
		Vrijednost	Smanjenje [%]		Vrijednost	Smanjenje [%]		Vrijednost	Smanjenje [%]		Vrijednost	Smanjenje [%]
QL [m]	329,8	297,9	9,7	20,5	46,9	-128,7	169,9	205,3	-20,8	208,7	193,5	7,2
QLM [m]	375,3	375,6	0	80,3	111,1	-38,3	250,5	250,6	0	222,2	222,3	0
QS	4552,3	4275	6	623,1	684,4	-9,8	3351,7	2815,7	15,9	3799,1	3074,1	19

Tablica 12: REZULTATI SCENARIJA UMANJENE PROMETNE POTRAŽNJE UPRAVLJAČKOG SUSTAVA ZA PROMJENU REDOSLIJEDA FAZA

Mjera	Istok			Sjever			Zapad			Jug		
	Ustaljeno upravljanje	Adaptivno upravljanje		Ustaljeno upravljanje	Adaptivno upravljanje		Ustaljeno upravljanje	Adaptivno upravljanje		Ustaljeno upravljanje	Adaptivno upravljanje	
		Vrijednost	Smanjenje [%]		Vrijednost	Smanjenje [%]		Vrijednost	Smanjenje [%]		Vrijednost	Smanjenje [%]
QL [m]	34	20,9	38,7	7,4	7,3	0,6	18	20,4	-12,8	19,9	9,5	52,3
QLM [m]	117,4	99,4	15,3	39,8	46,9	-17,9	64	67,9	-5,9	47,7	42,3	11,3
QS	934,4	700,8	25,7	222,6	206	7,5	473,8	485,5	-2,5	330	254,1	23

Tablica 13: REZULTATI SCENARIJA SREDNJE PROMETNE POTRAŽNJE UPRAVLJAČKOG SUSTAVA ZA ISTOVREMENU PROMJENU TRAJANJA I REDOSLIJEDA FAZA

Mjera	Istok			Sjever			Zapad			Jug		
	Ustaljeno upravljanje	Adaptivno upravljanje		Ustaljeno upravljanje	Adaptivno upravljanje		Ustaljeno upravljanje	Adaptivno upravljanje		Ustaljeno upravljanje	Adaptivno upravljanje	
		Vrijednost	Smanjenje [%]		Vrijednost	Smanjenje [%]		Vrijednost	Smanjenje [%]		Vrijednost	Smanjenje [%]
QL [m]	330,3	81,1	75,4	13	16	-23,1	36,6	44	-20,2	141,4	32,3	77,2
QLM [m]	376	294,6	21,6	54,8	67,8	-23,9	131,4	137,2	-4,5	197,5	93,8	52,5
QS	4539,4	1780,9	60,8	401,7	385,4	4	947,9	997,3	-5,2	2032	625,9	69,2

Tablica 14: REZULTATI SCENARIJA UVEĆANE PROMETNE POTRAŽNJE UPRAVLJAČKOG SUSTAVA ZA ISTOVREMENU PROMJENU TRAJANJA I REDOSLIJEDA FAZA

Mjera	Istok			Sjever			Zapad			Jug		
	Ustaljeno upravljanje	Adaptivno upravljanje		Ustaljeno upravljanje	Adaptivno upravljanje		Ustaljeno upravljanje	Adaptivno upravljanje		Ustaljeno upravljanje	Adaptivno upravljanje	
		Vrijednost	Smanjenje [%]		Vrijednost	Smanjenje [%]		Vrijednost	Smanjenje [%]		Vrijednost	Smanjenje [%]
QL [m]	329,8	288,1	12,7	20,5	25,7	-25,3	169,9	192,6	-13,4	208,7	182,6	12,5
QLM [m]	375,3	374,4	0	80,3	102,1	-27,1	250,5	250,9	-0,2	222,2	222,1	0
QS	4552,3	3399,7	25,3	623,1	577,1	7,4	3351,7	3368,8	-0,5	3799,1	2570,4	32,3

Tablica 15: REZULTATI SCENARIJA UMANJENE PROMETNE POTRAŽNJE UPRAVLJAČKOG SUSTAVA ZA ISTOVREMENU PROMJENU TRAJANJA I REDOSLIJEDA FAZA

Mjera	Istok			Sjever			Zapad			Jug		
	Ustaljeno upravljanje	Adaptivno upravljanje		Ustaljeno upravljanje	Adaptivno upravljanje		Ustaljeno upravljanje	Adaptivno upravljanje		Ustaljeno upravljanje	Adaptivno upravljanje	
		Vrijednost	Smanjenje [%]		Vrijednost	Smanjenje [%]		Vrijednost	Smanjenje [%]		Vrijednost	Smanjenje [%]
QL [m]	34	17,1	49,7	7,4	7,2	3,5	18	17,6	2,6	19,9	8,8	55,8
QLM [m]	117,4	93,8	20,2	39,8	39,9	-0,2	64	59,8	6,7	47,7	36,6	23,2
QS	934,4	663,4	29,7	222,6	216,2	2,9	473,8	474,8	-0,2	330	263,1	20,3

## 6 Zaključak

Zahvaljujući suvremenoj tehnologiji i razvoju umjetne inteligencije, mnogi prometni sustavi mogu biti optimizirani primjenom metoda inteligentnog upravljanja prometnim sustavom. U svrhu modernizacije sustava upravljanja prometom kod semaforiziranih raskrižja, koriste se razni alati iz područja umjetne inteligencije kao što su neizrazita logika, genetski algoritmi, neuronske mreže, računalni vid ili njihova kombinacija. Korištenjem navedenih alata moguće je rješavati složene probleme unutar prometnog sustava koji nastaju zbog široke primjene ustaljenih signalnih planova.

Primjena neizrazite logike u upravljanju prometom znatno pridonosi optimizaciji rada semaforiziranog raskrižja. Mogućnost prikupljanja i obrađivanja prometnih parametara u stvarnom vremenu te donošenja odluka o radu sustava na osnovi rezultata povećava efikasnost semaforiziranih raskrižja. Za potrebe ovog rada su izrađena tri sustava adaptivnog upravljanja signalnim planom. Izrađen je sustav za promjenu trajanja signalne faze, sustav za promjenu redoslijeda signalnih faza te treći sustav koji ih objedinjuje. Simulacije predloženih metoda upravljanja izvršene su na modelu izoliranog semaforiziranog raskrižja s tri različita scenarija prometne potražnje. Analiza je pokazala pozitivno djelovanje svih predloženih sustava s naglaskom na sustav za promjenu istovremenog trajanja i redoslijeda faza. Na ovaj je način demonstrirana mogućnost efektivnijeg iskorištavanja operativnog kapaciteta već postojeće prometne infrastrukture primjenom suvremenih metoda upravljanja prometom.

U sklopu nastavka istraživanja, predviđa se u implementacija naprednih metoda za podešavanje neizrazitih pravila i funkcija pripadnosti kako bi se pronašao optimum za sve simulirane scenarije prometne potražnje. Za tu vrstu optimizacije se predlaže korištenje neuronskih mreža, odnosno genetskog algoritma u kombinaciji s neizrazitom logikom i drugim metodama optimizacije iz domene umjetne inteligencije.

# Zahvale

Zahvaljujemo našem mentoru izv. prof. dr. sc Edouardu Ivanjku na pruženoj prilici, trudu te brojnim stručnim savjetima i pomoći pri izradi ovoga rada. Također se želimo zahvaliti našim obiteljima, prijateljima i ostalim kolegama koji su nas podupirali pri izradi ovoga rada.

# Literatura

- [1] Golubić J. Promet i okoliš. Fakultet prometnih znanosti, Zagreb, 1999.
- [2] Greenhouse gas emission statistics - emission inventories. Preuzeto s: [https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/pdfscache/1180.pdf?fbclid=IwAR3iIy\\_9rJNSgPi5v\\_PR1kGolxiFZUpeo70jV1-UrLPqLgALuvIySbKlGMA](https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/pdfscache/1180.pdf?fbclid=IwAR3iIy_9rJNSgPi5v_PR1kGolxiFZUpeo70jV1-UrLPqLgALuvIySbKlGMA) [Pristupljeno: travanj 2019.].
- [3] Ševrović M., Kos G., Dadić I. Teorija prometnog toka. Fakultet Prometnih Znanosti, Zagreb, 2014.
- [4] Legac I. Raskrižja javnih cesta - cestovne prometnice II. Fakultet prometnih znanosti, Zagreb, 2008.
- [5] Lanović Z. "Cestovna telematika - Zasićeni tok i propusna moć", predavanja. Fakultet prometnih znanosti, Zagreb, 2017.
- [6] Bošnjak I., Badanjak D. Osnove prometnog inženjerstva. Fakultet prometnih znanosti, Zagreb, 2005.
- [7] Jelušić N. "Telematička sučelja, nastavna skripta. Fakultet prometnih znanosti, Zagreb, 2017.
- [8] Lanović Z. "Cestovna telematika - Prometno ovisno upravljanje", predavanja. Fakultet prometnih znanosti, Zagreb, 2017.
- [9] Šimić R. Mogućnosti primjene neizrazite logike za određivanje redoslijeda faza kod semaforiziranih raskrižja. Završni rad, Fakultet prometnih znanosti, Zagreb, 2018.
- [10] Gold H. "Umjetna inteligencija - Neizrazita logika - skupovi", predavanja. Fakultet prometnih znanosti, Zagreb, 2008-2019.
- [11] Mamdani set. Preuzeto s: <https://www.mathworks.com/help/fuzzy/what-is-mamdani-type-fuzzy-inference.html> [Pristupljeno: veljača 2019.].

- [12] FIS: An example of mamdani inference system. Preuzeto s: <http://www.cs.princeton.edu/courses/archive/fall107/cos436/HIDDEN/Knapp/fuzzy004.htm> [Pristupljeno: veljača 2019.].
- [13] Jee-Hyong Lee, Hyung Lee-Kwang. Distributed and cooperative fuzzy controllers for traffic intersections group. *IEEE TRANSACTIONS ON SYSTEMS, MAN, AND CYBERNETICS—PART C: APPLICATIONS AND REVIEWS*, 29, 1999.
- [14] Hamed Homaei, S. R. Hejazi, Seyed Ali Mohamad Dehghan. A new traffic light controller using fuzzy logic for a full single junction involving emergency vehicle preemption. *Journal of Uncertain Systems*, 9:49–61, 2015.
- [15] Vogel A, Oremović I, Šimić R, Ivanjko E. Improving Traffic Light Control by Means of Fuzzy Logic. Proceedings of 60<sup>th</sup> International Symposium ELMAR-2018, Special session Intelligent Transport Systems, Zadar, Croatia, 2018.
- [16] Oremović I. Mogućnosti primjene neizrazite logike za određivanje produljenja vremena pojedine faze kod semaforiziranih raskrižja. Završni rad, Fakultet prometnih znanosti, Zagreb, 2018.
- [17] Microsoft COM Technical Overview. Preuzeto s: <https://docs.microsoft.com/en-us/windows/desktop/com/com-technical-overview> [Pristupljeno: veljača 2019.].
- [18] Highway Capacity Manual - HCM2016. Transportation Research Board of the National Academies, 2016.
- [19] Čelar N, Stanković S, Kajalić J. *Osnove upravljanja svetlosnim signalima*. Univerzitet u Beogradu, Saobraćajni fakultet, Beograd, 2018.

# Popis slika

1	Odnos prometnog volumena i operativnog kapaciteta [3] . . . . .	3
2	Model "tok-gustoća" [3] . . . . .	7
3	Položaj detekcijskih zona kod prometno ovisnog upravljanja semaforiziranim raskrižjem [7] . . . . .	9
4	Primjer prilagođene strukture NEMA [9] . . . . .	10
5	Prikaz binarne logike [10] . . . . .	13
6	Prikaz neizrazite logike [10] . . . . .	14
7	Pojednostavljen prikaz promjene trajanja zelenog signalnog pojma [16] . .	20
8	Funkcije pripadnosti varijable hitnost kod neizrazitog sustava odlučivanja za glavne tokove . . . . .	22
9	Funkcije pripadnosti varijable hitnost neizrazitog sustava kod odlučivanja za sporedne tokove . . . . .	22
10	Funkcije pripadnosti varijable hitnosti neizrazitog sustava odlučivanja za glavne tokove . . . . .	24
11	Funkcije pripadnosti varijable hitnosti neizrazitog sustava odlučivanja za sporedne tokove . . . . .	25
12	Shema rada sustava za promjenu vremena trajanja i redoslijeda faza . . . .	26
13	Shematski prikaz razmjene podatka između MATLAB-a i VISSIM-a . . . .	28
14	Ulazne i izlazne varijable u programskom okruženju MATLAB . . . . .	30
15	Primjer sučelja za kreiranje funkcija pripadnosti unutar programskog paketa MATLAB . . . . .	30
16	Sučelje za pregled i kreiranje pravila neizrazite logike u programskom okruženju MATLAB . . . . .	31
17	Sučelje za pregled i kreiranje pravila neizrazite logike u programskom okruženju MATLAB . . . . .	31
18	Prikaz ovisnosti izlaza hitnosti o ulazu vezanog za duljinu repa čekanja . .	31
19	Prikaz trodimenzionalnih grafikona ovisnosti izlaza o ulazima . . . . .	32
20	Prikaz modela raskrižja Zvonimirova - Heinzelova ulica u VISSIM-u . . . .	33

21	Ustaljeni signalni plan raskrižja Zvonimirova-Heinzelova . . . . .	34
22	Trajanja ciklusa u scenariju uvećane prometne potražnje . . . . .	38
23	Faze ustaljenog signalnog plana za raskrižje Zvonimirova - Heinzelova . . .	40
24	Prilagođena struktura NEMA korištena u svrhu adaptivnog upravljanja za raskrižje Zvonimirova - Heinzelova . . . . .	40

# Popis tablica

1	PRIMJER STANJA BINARNE LOGIKE [10] . . . . .	13
2	PRIMJER STANJA NEIZRAZITE LOGIKE [10] . . . . .	14
3	PRIMJER NEIZRAZITIH PRAVILA U UPRAVLJANJU SUSTAVOM VENTILACIJE	15
4	IZVADAK NEIZRAZITIH PRAVILA 33.-48. . . . .	21
5	IZVADAK NEIZRAZITIH PRAVILA 23.-38. . . . .	24
6	PROMETNA POTRAŽNJA SVAKOG SCENARIJA . . . . .	34
7	REZULTATI SCENARIJA SREDNJE PROMETNE POTRAŽNJE SUSTAVA ZA PROMJENU TRAJANJA FAZA . . . . .	52
8	REZULTATI SCENARIJA UVEĆANE PROMETNE POTRAŽNJE SUSTAVA ZA PROMJENU TRAJANJA FAZA . . . . .	52
9	REZULTATI SCENARIJA UMANJENE PROMETNE POTRAŽNJE SUSTAVA ZA PROMJENU TRAJANJA FAZA . . . . .	52
10	REZULTATI SCENARIJA SREDNJE PROMETNE POTRAŽNJE UPRAVLJAČKOG SUSTAVA ZA PROMJENU REDOSLIJEDA FAZA . . . . .	52
11	REZULTATI SCENARIJA UVEĆANE PROMETNE POTRAŽNJE UPRAVLJAČKOG SUSTAVA ZA PROMJENU REDOSLIJEDA FAZA . . . . .	53
12	REZULTATI SCENARIJA UMANJENE PROMETNE POTRAŽNJE UPRAVLJAČ- KOG SUSTAVA ZA PROMJENU REDOSLIJEDA FAZA . . . . .	53
13	REZULTATI SCENARIJA SREDNJE PROMETNE POTRAŽNJE UPRAVLJAČKOG SUSTAVA ZA ISTOVREMENU PROMJENU TRAJANJA I REDOSLIJEDA FAZA .	53
14	REZULTATI SCENARIJA UVEĆANE PROMETNE POTRAŽNJE UPRAVLJAČKOG SUSTAVA ZA ISTOVREMENU PROMJENU TRAJANJA I REDOSLIJEDA FAZA .	53
15	REZULTATI SCENARIJA UMANJENE PROMETNE POTRAŽNJE UPRAVLJAČ- KOG SUSTAVA ZA ISTOVREMENU PROMJENU TRAJANJA I REDOSLIJEDA FAZA . . . . .	53



# Popis grafikona

1	Prikaz rezultata sustava za promjenu trajanja faza srednje prometne potražnje	37
2	Prikaz rezultata sustava za promjenu trajanja faza uvećane prometne potražnje	37
3	Prikaz rezultata sustava za promjenu trajanja faza umanjene prometne potražnje . . . . .	38
4	Prikaz izmjene faza tijekom simulacije adaptivnog sustava upravljanja za promjenu redoslijeda signalnih faza scenarija srednje prometne potražnje .	41
5	Prikaz rezultata sustava za promjenu redoslijeda signalnih faza srednje prometne potražnje . . . . .	41
6	Prikaz rezultata sustava za promjenu redoslijeda signalnih faza uvećane prometne potražnje . . . . .	42
7	Prikaz rezultata sustava za promjenu redoslijeda signalnih faza umanjene prometne potražnje . . . . .	42
8	Prikaz promjene duljine trajanja faze i njihovog redoslijeda - Scenarij 1 . .	43
9	Prikaz promjene duljine trajanja faze i njihovog redoslijeda - Scenarij 2 . .	44
10	Prikaz promjene duljine trajanja faze i njihovog redoslijeda - Scenarij 3 . .	44
11	Prikaz rezultata srednjeg repa čekanja istočnog privoza . . . . .	45
12	Prikaz rezultata srednjeg repa čekanja sjevernog privoza . . . . .	45
13	Prikaz rezultata srednjeg repa čekanja zapadnog privoza . . . . .	45
14	Prikaz rezultata srednjeg repa čekanja južnog privoza . . . . .	46
15	Prikaz rezultata najduljeg repa čekanja istočnog privoza . . . . .	46
16	Prikaz rezultata najduljeg repa čekanja sjevernog privoza . . . . .	46
17	Prikaz rezultata najduljeg repa čekanja zapadnog privoza . . . . .	47
18	Prikaz rezultata najduljeg repa čekanja južnog privoza . . . . .	47
19	Prikaz rezultata broja stajanja na istočnom privozu . . . . .	47
20	Prikaz rezultata broja stajanja na sjevernom privozu . . . . .	48
21	Prikaz rezultata broja stajanja na zapadnom privozu . . . . .	48
22	Prikaz rezultata broja stajanja na južnom privozu . . . . .	48
23	Prikaz rezultata simuliranog scenarija srednje prometne potražnje . . . . .	49

24	Prikaz rezultata simuliranog scenarija uvećane prometne potražnje . . . . .	50
25	Prikaz rezultata simuliranog scenarija umanjene prometne potražnje . . . . .	50

# Sažetak

**Autori:** Alan Vogel, Izidor Oremović, Robert Šimić

**Naslov:** Istovremeno upravljanje vremenom trajanja i redoslijedom faza signalnog plana izoliranog semaforiziranog raskrižja

Nemogućnost ustaljenih sustava upravljanja korištenih na semaforiziranim raskrižjima da odgovore odzivu na povećanje prometne potražnje povećava mogućnost nastanka prometnog zagušenja te posljedica koje ono donosi. Rješenje u sklopu ovog rada dolazi iz područja inteligentnih transportnih sustava (ITS) u obliku istovremene promjene vremena trajanja i redoslijeda pojedinih signalnih faza. U ovom radu opisane su tri metode adaptivnog načina upravljanja zasnovane na primjeni neizrazitoj logici za određivanje hitnosti pojedine faze. Prva korištena metoda odnosi se na promjenu trajanja signalnih faza, dok druga metoda koristi adaptivni sustav upravljanja za stvarnovremensku promjenu redoslijeda signalnih faza. Obje metode su objedinjene u trećoj korištenoj metodi koja podrazumijeva istovremenu uporabu promjene vremena trajanja i redoslijeda signalnih faza tijekom izvođenja simulacije prometne potražnje. Kako bi se izvršila provjera kvalitete izrađenih sustava upravljanja, korištena su tri simulirana scenarija prometne potražnje za izolirano semaforizirano raskrižje Zvonimirove i Heinzelove ulice. Originalni ustaljeni signalni plan navedenog raskrižja je trofazni i pretvoren je u adaptivni signalni plan korištenjem gore navedenih neizrazitih sustava upravljanja. Model raskrižja je izrađen u mikroskopskom simulatoru VISSIM, a sustav upravljanja je implementiran u programskoj okolini MATLAB. Dobiveni simulacijski rezultati pojedinačnih metoda za promjenu trajanja i redoslijeda signalnih faza pokazuju znatno poboljšanje u odnosu na ustaljeni signalni plan. Pri tome se objedinjavanjem obje metode u istovremeno upravljanje vremenom trajanja i redoslijedom faza signalnog plana mogu dodatno smanjiti duljine repova čekanja i broj stajanja te povećati kvalitetu upravljanja raskrižjem.

**Ključne riječi:** Inteligentni transportni sustavi; adaptivno upravljanje; promjenjivo trajanje faze; redoslijed faza; neizrazita logika

# Abstract

**Authors:** Alan Vogel, Izidor Oremović, Robert Šimić

**Title:** Simultaneous control of phase duration and sequence of an isolated signalized intersection

The inability of the fixed-time control systems used at the signalized intersections to respond to the increase in traffic demand increases the possibility of traffic congestion and its consequences. The solution within this work comes from the field of Intelligent Transport Systems (ITS) in the form of simultaneous control of phase duration and sequence. In this work, three methods of adaptive control based on fuzzy logic have been designed in order to determine the urgency of a particular phase. The first method is designed to change the duration of a particular signal phase, while the second method is designed to change the phase sequence. Both methods are combined in the third-used method, which implies simultaneous use of the change of phase duration and sequence during simulation of traffic demand. Three simulated traffic demand scenarios for the isolated, signalized intersection of Zvonimirova-Heinzlova streets were used to evaluate the quality control of the designed control systems. The original fixed signal program of the mentioned intersection consists of three phases and is converted into an adaptive signal program using the above-mentioned fuzzy control systems. The intersection model was created in the VISSIM microscopic simulator, and the control system is implemented in the MATLAB programming environment. The resulting simulation results of individual methods for changing the duration and sequence of signal phases show a significant improvement compared to the fixed signal program. Combining both methods by changing simultaneously the phase duration and sequence of the signal program can further reduce queue lengths and the number of vehicle stops, and thereby increase the quality of intersection control.

**Keywords:** Intelligent transport systems; adaptive control; variable phase duration; phase sequence; fuzzy logic