

# Adaptivno upravljanje izoliranim semaforiziranim raskrižjem primjenom neizrazite logike

---

Vogel, Alan

Master's thesis / Diplomski rad

2020

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

*Permanent link / Trajna poveznica:* <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:119:585771>

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

*Download date / Datum preuzimanja:* **2025-02-10**



*Repository / Repozitorij:*

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



**SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET PROMETNIH ZNANOSTI**

**ALAN VOGEL**

**ADAPTIVNO UPRAVLJANJE IZOLIRANIM  
SEMAFORIZIRANIM RASKRIŽJEM PRIMJENOM  
NEIZRAZITE LOGIKE**

**DIPLOMSKI RAD**

**Zagreb, 2020.**

Zagreb, 2. travnja 2020.

Zavod: **Zavod za inteligentne transportne sustave**  
Predmet: **Umjetna inteligencija**

## DIPLOMSKI ZADATAK br. 5614

Pristupnik: **Alan Vogel (0135237989)**  
Studij: **Inteligentni transportni sustavi i logistika**  
Smjer: **Inteligentni transportni sustavi**

Zadatak: **Adaptivno upravljanje izoliranim semaforiziranim raskrižjem primjenom neizrazite logike**

### Opis zadatka:

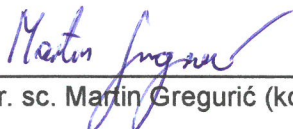
Radi povećanja propusnosti semaforiziranih raskrižja koristi se adaptivno upravljanje signalnim planovima. Pri tome se može mijenjati redosljed i duljina trajanja faza ovisno o prometnom opterećenju. Za ispravan odabir odgovarajućeg upravljačkog algoritma potrebna je njegova simulacijska provjera. U radu je potrebno opisati problem adaptivnog upravljanja signalnim planovima kod semaforiziranih raskrižja, napraviti odgovarajuće simulacijsko okruženje te napraviti simulaciju algoritma za upravljanje redosljedom i duljinom trajanja faza primjenom neizrazite logike. Također ispitati mogućnosti optimizacije pravila sustava neizrazitog zaključivanja.

Mentor:



---

izv. prof. dr. sc. Edouard Ivanjko



---

dr. sc. Martin Gregurić (komentor)

Predsjednik povjerenstva za  
diplomski ispit:

---

Sveučilište u Zagrebu  
Fakultet prometnih znanosti

**DIPLOMSKI RAD**

**ADAPTIVNO UPRAVLJANJE IZOLIRANIM  
SEMAFORIZIRANIM RASKRIŽJEM PRIMJENOM  
NEIZRAZITE LOGIKE**

**ADAPTIVE CONTROL OF ISOLATED SIGNALIZED  
INTERSECTIONS USING FUZZY LOGIC**

Mentor: izv. prof. dr. sc. Edouard Ivanjko  
Komentor: dr. sc. Martin Gregurić

Student: ALAN VOGEL  
JMBAG: 0135237989

Zagreb, rujan 2020.

# Zahvale

Zahvaljujem se svome mentoru izv. prof. dr. sc. Edouardu Ivanjku na potpori i brojnim savjetima te suradnji tijekom moga studija. Zahvaljujem se kolegi Mladenu Miletiću mag. ing. traff. na potpori, savjetima i pomoći oko izrade modela u ovome diplomskom radu, te kolegama Izidoru Oremoviću mag. ing. traff. i Robertu Šimiću bacc. ing. traff. na podršci i suradnji koja je dovela do ovoga rada. Također, zahvaljujem se svojoj majci na pruženoj potpori i strpljenju tijekom moga studija.

# Sažetak

**Naslov:** Adaptivno upravljanje izoliranim semaforiziranim raskrižjem primjenom neizrazite logike

Cestovni promet se dinamički mijenja ovisno o vremenu, a to se najbolje može uočiti tijekom vršnog sata. U današnje vrijeme dolazi do promjena gradskih zona ovisno o gradnji ili obnovi starih objekata i migraciji stanovništva koje sve više dolazi živjeti u gradovima u potrazi za boljim prilika. Radi porasta potražnje korištenja transportnih usluga na gradskim cestama dolazi do sve većih problema prometnih zagušenja. Iz tog razloga potrebna su nova rješenja u vidu smanjivanja prometnih zagušenja, onečišćenja okoliša i poboljšanja postojeće prometne infrastrukture s obzirom na to da se gradske ulice više ne mogu proširiti. Iz tih razloga ciljevi ovoga rada su izrada algoritma za adaptivno upravljanje semaforiziranog raskrižja u cilju smanjenja duljine repa čekanja i broja zaustavljanja vozila na gradskim raskrižjima. Napravljeni algoritam ima četiri metode upravljanja i testiran je koristeći realne prikupljene podatke o broju vozila (prometna potražnja) na raskrižju, te je ispitano djelovanje algoritma u uvjetima gdje je prometna potražnja povećana, odnosno smanjena za 40%. Za potrebe ispitivanja algoritma upravljanja semaforiziranog raskrižja izrađen je model raskrižja primjenom mikroskopskog simulatora PTV VISSIM u kojemu se vršila simulacija. Algoritam je izrađen unutar programskog jezika Python preko kojeg su se pokretale simulacije i algoritmi, te se preko COM veze Python-VISSIM upravljalo semaforiziranim raskrižjem.

**Ključne riječi:** Inteligentni transportni sustavi, semaforizirano raskrižje, signalni plan, genetski algoritam, neizrazita logika, smanjenje repova čekanja.

# Abstract

**Title:** Adaptive control of isolated signalized intersections using fuzzy logic

Road traffic changes dynamically during some periods, and it can be specially noticed during peak hours. Nowadays, there can be changes in urban zones depending on the new construction or renovation of old facilities and the increased migration of the population coming to live in cities in search of better opportunities. Due to this problem of increasing traffic congestion on the city streets appears with the growing demand for transport services. For this reason, new solutions are needed for reducing traffic congestion, environmental pollution, and improving the existing transport infrastructure, given that the city streets can no longer be expanded. For these reasons, this thesis aims to present an adaptive traffic light controller to reduce the queue length and number of stop vehicles for traffic intersections. The algorithm has four types of control and was evaluated using real traffic data such as the number of vehicles (traffic demand), and the algorithm was tested on the different conditions where traffic demand was increased or decreased by 40% of the original traffic demand. An adaptive traffic signal controller was tested using a model of the isolated intersection in the microscopic simulator PTV VISSIM. The algorithm of an adaptive traffic light controller was created in the Python programming language, which was used for running and testing our simulations and four types of algorithms through the COM connection Python-VISSIM.

**Keywords:** Intelligent Transportation System, signalized intersection, signal program, genetic algorithm, fuzzy logic, reducing queue length

# Sadržaj

<b>1. Uvod</b>	<b>1</b>
<b>2. Vrste upravljanja signalnim planovima semaforiziranih raskrižja</b>	<b>4</b>
2.1. Ustaljeno upravljanje signalnim planovima . . . . .	5
2.2. Adaptivno upravljanje signalnim planovima . . . . .	5
2.2.1. Promjena trajanja faze . . . . .	6
2.2.2. Promjena redoslijeda faze . . . . .	7
<b>3. Primjena neizrazite logike u upravljanju signalnim planovima</b>	<b>9</b>
3.1. Izraziti i neizraziti skupovi . . . . .	9
3.2. Pravila neizrazite logike . . . . .	11
<b>4. Implementacija adaptacije signalnog plana primjenom neizrazite logike</b>	<b>13</b>
4.1. PTF sustav upravljanja . . . . .	15
4.2. PRF sustav upravljanja . . . . .	16
4.3. PTIRF sustav upravljanja . . . . .	16
<b>5. Optimizacija pravila sustava neizrazitog zaključivanja</b>	<b>20</b>
5.1. Genetski algoritam . . . . .	21
5.1.1. Selekcija . . . . .	21
5.1.2. Križanje . . . . .	23
5.1.3. Mutacija . . . . .	24
5.2. Optimiziranje pravila . . . . .	24
5.3. Optimiziranje funkcija pripadnosti . . . . .	25
<b>6. Simulacijski rezultati</b>	<b>27</b>
6.1. Simulacijsko okruženje . . . . .	27
6.2. Prometni model . . . . .	28
6.3. Analiza simulacijskih rezultata . . . . .	28



<b>7. Zaključak</b>	<b>36</b>
<b>Popis literature</b>	<b>38</b>
<b>Popis ilustracija</b>	<b>40</b>
<b>Popis tablica</b>	<b>41</b>
<b>Popis grafikona</b>	<b>42</b>

# 1. Uvod

U današnje vrijeme javlja se sve veća potreba za razvojem i primjenom novih tehnologija upravljanja prometnim sustavima uslijed velike potražnje za transportnim uslugama. Razlozi za razvoj i primjenu novih tehnologija leži u tome što trenutna prometna infrastruktura nema mogućnosti prilagođavanja u određenim prometnim situacija što dovodi do velikih gužvi u gradskoj prometnoj mreži. Kako je promet dinamičko promjenjivo okruženje dolazi do naglih promjena prometne potražnje, a kako uslijed povećanja prometna potražnja postaje veća nego kapacitet prometnica dolazi do velikih zagušenja. Prometna zagušenja stvaraju negativne posljedice za gradsku okolinu kao što su repovi čekanja vozila, onečišćenje okoliša, veći broj zaustavljanja vozila, smanjenje sigurnosti na prometnicama, trošak goriva itd. S obzirom na to da se u današnje vrijeme postojeća prometna infrastruktura teško može proširiti na više traka za prihvat vozila preostaje kao rješenje razvoj suvremenih tehnologija u vidu inteligentnog upravljanja prometom kako bi se riješili prometni problemi. Najviše prometnih problema nastaje kod klasičnih semaforiziranih raskrižja za upravljanje tokovima vozila koji koriste ustaljeni signalni plan. Iz tog se razloga koriste sustavi inteligentnog upravljanja prometa kod upravljanja semaforiziranim raskrižjima u vidu skraćivanja repova čekanja i boljeg protoka vozila u gradskim prometnicama primjenom adaptivnih signalnih planova. Takvi sustavi upravljanja prometom su razvijeni u sklopu Inteligentnih transportnih sustava (ITS) koji nudi široku primjenu, usluge i rješenja u svrhu poboljšanja sigurnosti u prometu razvojem inteligentnog upravljanja prometom i transportom.

Prema [1] ITS je upravljačka i informacijska-komunikacijska nadogradnja klasičnoga prometnog i transportno-logističkog sustava s bitnim poboljšanjima za mrežne operatore, davatelje usluga, korisnike i društvo u cjelini. Današnja klasična raskrižja koriste fiksne signalne planove (ustaljeno upravljanje signalnim planovima) za upravljanje prometom na semaforiziranim raskrižjima koja nisu prilagodljiva u situacijama naglih promjena prometne potražnje. Zbog toga se u sklopu ITS-a traži rješenje u obliku inteligentnog upravljanja semaforiziranim raskrižjima kao što su adaptivni sustavi upravljanja. U vidu rješavanja prometnih zagušenja kod semaforiziranih raskrižja koriste se određeni ITS sustavi upravljanja prometa kao što je adaptivno upravljanje prometom. Adaptivno upravljanje prometom može obuhvatiti jedno izolirano raskrižje ili više njih

(takvi sustavi se najčešće nazivaju kooperativno upravljanje semaforiziranim raskrižjima) u cilju poboljšanja performansi samog raskrižja. Adaptivni sustavi upravljanja omogućuju prikupljanje prometnih podataka za trenutnu prometnu situaciju u okolini, te njeno prilagođavanje trenutnim prometnim potrebama za postizanje maksimalnih performansi kao što su povećani protok vozila, smanjenje repa čekanja vozila na privozima, smanjenje gubitaka vremena čekanja i zaustavljanja, te povećanje same sigurnosti na prometnicama. Adaptivni sustavi upravljanja omogućuju razne načine upravljanja na raskrižjima kao što su promjena redoslijeda propuštanja vozila i promjenu vremena trajanja zelenoga pojma odnosno produljenje propuštanja vozila. Takvi načini upravljanja se uspješno prilagođavaju trenutnim potrebama na prometnim raskrižjima i daju jako dobre rezultate i rješenja prometnih problema.

Cilj ovoga diplomskog rada je izrada adaptivnog algoritma za upravljanje semaforiziranim raskrižjima koji na temelju ulaznih prometnih podataka preko sustava neizrazite logike rješava prometne probleme repova čekanja i broja zaustavljanja vozila na raskrižjima. Za potrebe ovoga rada izrađen je model izoliranog raskrižja Zvonimirova-Heinzelova u mikroskopskom simulacijskom alatu PTV VISSIM preko kojeg je ispitan rad algoritma adaptivnog upravljanja. Algoritam je izrađen u programskom jeziku Python-u preko kojeg se vršilo pokretanje, ispitivanje i upravljanje semaforiziranog raskrižja. Razvijeni su četiri metode upravljanja raskrižjima:

1. Promjena trajanja signalnog pojma (PTF),
2. Promjena redoslijeda faza (PRF),
3. Kombinacija (1. i 2. metoda upravljanja) (PTIRF),
4. Kombinacija s optimiziranim pravilima (PTIRF<sub>p</sub>).

Ovaj diplomski rad podijeljen je u sedam poglavlja. U drugom poglavlju opisane su vrste upravljanja signalnim planovima semaforiziranih raskrižja. Objašnjene su vrste te razine ustaljenog i adaptivnog upravljanja signalnim planovima, kao i prednosti te nedostaci kod upravljanja semaforiziranog raskrižja. U trećem poglavlju opisana je primjena neizrazite logike kod upravljanja raskrižja, njene prednosti kod razvoja adaptivnog algoritama. Također prikazane su ulazne i izlazne funkcije pripadnosti neizrazite logike koja korištene za izradu i ispitivanje algoritma. U četvrtom poglavlju objašnjena je implementacija adaptacija signalnog plana primjenom neizrazite logike. U petom poglavlju objašnjen je postupak izrade optimizacije pravila neizrazitog zaključivanja. Za potrebe optimizacije objašnjeni su postupci optimizacije

pravila neizrazite logike (koja je izrađena za potrebe rada) i funkcija pripadnosti kao daljnja nadoknada. U šestom poglavlju dani su simulacijski rezultati koji opisuju rad algoritma i dana je usporedba rezultata za svaku metodu upravljanja semaforiziranog raskrižja. U sedmom poglavlju dan je zaključak na cjelokupan rad, te su predloženi daljnji postupci za nastavak daljnjeg razvoja algoritma i njegovim mogućnostima u poboljšanju s ciljem postizanja boljih rezultata rada kod upravljanja semaforiziranim raskrižjima.

## **2. Vrste upravljanja signalnim planovima semaforiziranih raskrižja**

Kada govorimo o vrstama upravljanja signalnim planovima na semaforiziranim raskrižjima onda govorimo o ustaljenom (fiksnom) upravljanju, adaptivnom upravljanju i kooperativnom upravljanju. Ustaljeno upravljanje sastoji se od signalnog plana koji izmjenjuje definirane signalne faze unutar ciklusa nakon čega se ponavlja. Signalni plan adaptivnog upravljanja ima mogućnost prilagođavanja trenutnoj prometnoj situaciji, pa se signalne faze prilagođavaju po potrebama. Kooperativno upravljanje signalnim planovima je slično adaptivnom upravljanju, uz razliku što u odnosu na adaptivno upravljanje uključuje više semaforiziranih raskrižja, pa ih se može koristiti kao rješenje prometnih problema na duž cijele prometne mreži u gradu. Osim vrsta upravljanja signalnim planovima također postoje i razine upravljanje s obzirom na veličinu prometne mreže. Prema [2] razine i vrste upravljačkih sustava koji upravljaju prometnim mrežama su:

1. Potpuno adaptivni sustavi,
2. Lokalni prometno ovisni sustavi,
3. Sustavi generiranja ustaljenih signalnih planova,
4. Sustavi odabira prethodno definiranih signalnih planova,
5. Ustaljeni (fiksni) signalni planovi.

Svaka od ovih razina upravljačkih sustava predstavlja određenu mjeru autonomnog upravljanja signalnim planovima koja se kreće od razine najmanje razine autonomnosti upravljanja (ustaljeni signalni plan), pa sve do maksimalne razine autonomnosti upravljanja (potpuno adaptivni sustavi). Upravljački sustavi postižu određene razine usluge LoS (engl. Level of Service) koji održavaju korisnički pregled na performanse funkcioniranja sustava gdje korisnik vidi i osjeća ukupnu kvalitetu, a ne samo učinkovitost ili pouzdanost dijelova gradske mreže [3].

## **2.1. Ustaljeno upravljanje signalnim planovima**

Ustaljeno upravljanje signalnim planovima je klasično i najraširenije upravljanje koje se koriste za upravljanje semaforiziranim raskrižjima u gradskim sredinama. Kod ustaljenog upravljanja koriste se fiksna duljina trajanja ciklusa, fiksno vrijeme trajanja faza i njihov redoslijed mijenjanja koji se mijenjaju ovisno o dobu dana za koji su izračunati, te se tako prilagođavaju prema prometnoj potražnji. Za uspostavu ustaljenog upravljanja potrebni su prometni podaci kao što je prometno opterećenja (broj vozila), klasifikacija prema vrsti vozila i smjer kretanja vozila, a prema [4] za kvalitetniju radnju potrebno je izraditi P-O (polazišno-odredišna matrica) matricu volumen prometa koja prikazuje podatke volumena vozila po smjerovima unutar raskrižja.

S obzirom na to da je signalni plan ustaljenog trajanja zbog čega nema izmjene trajanja s obzirom na stvarnovremensku prometnu potražnju (osim promjene prema dnevnim varijacijama) dobro su prilagođeni periodičkim promjenama prometnog opterećenja koja nastaju za vrijeme vršnog sata (jutarnji i večernji termini) kada je povećana prometna potražnja. U slučajevima stohastičkih (slučajnih) promjena ustaljeni signalni plan se u određenim situacijama teže prilagođava (ovisno o odnosu potražnja-kapacitet prometnice), a još teže kod naglih promjena u kojima je potražnja veća od kapacitetu u dužem vremenskom periodu.

## **2.2. Adaptivno upravljanje signalnim planovima**

Kod adaptivnih sustava upravljanja signalnim planovima trajanje signalnog pojma i trajanja ciklusa je promjenjivo iz razloga što algoritam upravljanja se prilagođava stvarnovremenskim prometnim opterećenjima. Algoritam upravljanja ima djelomičnu ili potpunu slobodu kod upravljanja semaforiziranog raskrižja. Djelomična upravljanja se koriste kod raskrižja u kojima glavni prometni pravac (cesta s većim kapacitetom vozila) ima slobodni prolaz kroz raskrižje sve dok na sporednom pravcu algoritam ne detektira prisutnost vozila pomoću detektora. Takav način upravljanja raskrižja gdje je manji broj vozila na sporednim pravcima poboljšava protok vozila na glavnim prometnim pravcima jer su smanjeni gubici vremena putovanja. Za potrebe detekcije vozila koriste se detektori koji se postavljaju samo na sporednim privozima s obzirom na to da je prioritet propuštanja vozila na glavnom prometnom pravcu. Prednosti djelomičnog upravljanja prema [5] su:

1. Efikasna uporaba u koordiniranom dijelu prometne mreže,

2. Smanjenje kašnjenja na glavnom toku,
3. Potreban manji broj detektora (samo na sporednom privozu),
4. Glavni tok ima maksimalnu iskorištenost prolaska (trajanja zelenog svjetla).

Algoritam potpunog upravljanja se koristi na onim raskrižjima gdje je udio prometnog volumena podjednako raspoređen po svim privozima, pa je iz toga razloga potrebno postavljanje detektora na svim privozima kako bi se redosljed faze i njeno trajanje moglo manipulirati stvarnovremenskim potrebama protoka vozila. Prednosti algoritma potpunog prometnog upravljanja prema [5] su:

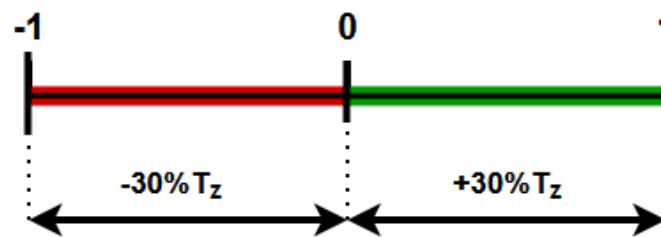
1. Smanjenje kašnjenja u odnosu na ustaljeni signalni plan,
2. Osjetljivo na trenutno prometno opterećenje,
3. Informacija o prisustvu (detekciji) vozila omogućuje efikasnu raspodjelu ciklusa s izmjenama u svakom slijedećem ciklusu,
4. Ako nema prisustva vozila na određenom privozu, omogućeno je preskakanje faza - neiskorišteno vrijeme raspodjeljuje se potrebnim privozima/fazama.

Adaptivni sustavi imaju brojne mogućnosti kada se radi o metodama upravljanjima raskrižjima te se najviše koriste kod metoda promjene trajanja i redosljeda faza koje su korištene u ovome radu i u prethodnim radovima autora [6–8], a isto tako se metode mogu prilagoditi kod sustava određivanja prioriteta za propuštanja određenih vozila (vozila žurnih službi) kao što je opisano u [9, 10].

### **2.2.1. Promjena trajanja faze**

Metoda adaptivnog upravljanja promjenom trajanja faze (PTF) ima primjenu kod odlučivanja o produljenju, skraćanju trajanja zelenog pojma i ostajanju realnog vremena trajanja zelenoga pojma (nema promjena nad zelenom pojmu). Kod odlučivanja promjene trajanja zelenog pojma ovise više faktora ovisno na temelju kojih prometnih parametara se donosi zaključak odlučivanja, a za sustav odlučivanja koristi se logički sustav neizravne logike. Koeficijent povećanja odnosno skraćivanja duljine trajanja zelenog pojma ovisi o principu i načinu na koji se prometni problemi žele riješiti. Iznos maksimalnog koeficijenta promjene duljine trajanja CDC (engl. Change of

duration coefficient) preporučuje se prema [11] da iznosi 0.25, odnosno da se promjena nove duljine trajanja zelenog pojma produlji ili skрати u iznosu od 25% od početnog vremena trajanja (u ovome radu CDC iznosi 0.30). Postoje dvije vrste metode koje se koriste za upravljanje trajanjem faza, a to su: određivanje duljine trajanja zelenog pojma prije početka faza i za vrijeme trajanja faze. Na slici 1 je prikazano upravljanje promjenom trajanja zelenog pojma, tako da se prije početka faze definira minimalno i maksimalno vrijeme trajanja zelenog pojma. Drugi način upravljanja PTF-a podrazumijeva da se za vrijeme trajanja faze odredi hoće li se i za koliko vremena produžiti, te se tako mogu bolje nadoknaditi prometni gubitci zaustavljanja vozila i repa čekanja jer djeluje istovremeno.



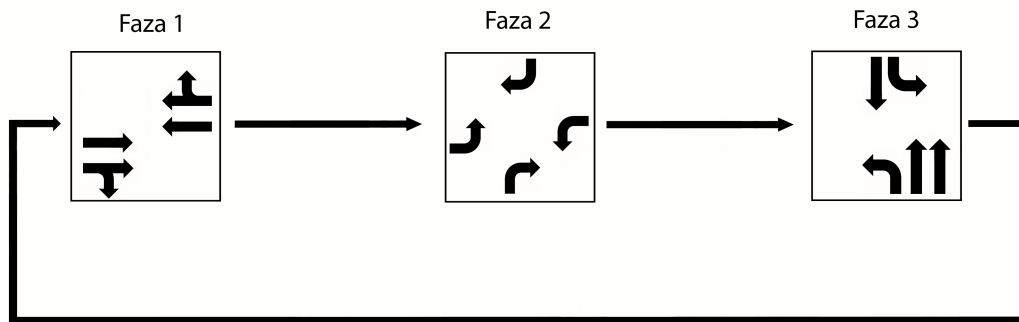
Slika 1: Promjena trajanja zelenog pojma

### 2.2.2. Promjena redoslijeda faze

Promjena redoslijeda faze (PRF) je sustav koji se koristi za kontrolu faza i vremena prolaska vozila. PRF koristi takozvanu prstenastu signalnu fazu pomoću koje ima kontrolu odlučivanja o hitnosti faze za propuštanjem vozila, pa je s toga jako ovisan o prometnim podacima broju vozila na svakome privozu. PRF sustav je jako dobar kod rješavanja problema kod težih prometnih zagušenja jer daje bolje rezultate u odnosu na PTF sustav upravljanja, a kod upravljanja PRF-a moguće je od ustaljenog signalnog plana napraviti jednostruki prsten, dvostruki prste ili višestruki prsten signalne faze ovisno o stupnju faza na raskrižju. Promjenom redoslijeda faze PRF sustav adaptivno djeluje na one faze na kojima je velika prometna opterećenost te se tako sustav pokušava riješiti nepotrebnih faze na kojima ja mala ili nikakva prometna potražnja što znači da u jednom ciklusu može se zaobići određenu fazu u odnosu na ustaljeni signalni plan ili PTF sustav upravljanja. Za potrebe ovoga rada napravljen je dvostruki prstenasti signalni plan koja se

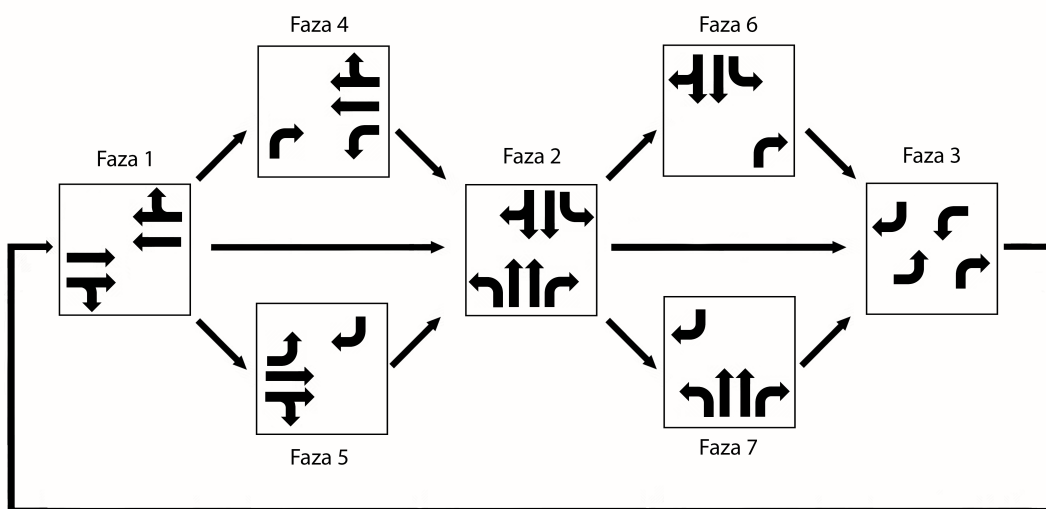


temelji na ustaljenom signalnom planu kakav je prikazan na slici 2 koji prikazuje signalni plan raskrižja Zvonimirove-Heinzelove ulice koja se sastoji od tri faze.



Slika 2: Ustaljeni signalni plan raskrižja Zvonimirova-Heinzelova [8]

Dvostruki prstenasti signalni plan je prikazan na slici 3 te može se vidjeti da postoji 9 mogućih smjerova kretanja adaptivnog signalnog plana. Faza 1, 2 i 3 su glavne faze koje će se u svakom ciklusu uključiti, dok su Faza 4, 5, 6 i 7 sporedne faze koje dolaze u obzir u slučaju njihove hitnosti pokretanja zbog repova čekanja. Iz slike je vidljivo da i u trenucima kada se sporedne faze zaobilaze, vozila iz tih faza će se pojaviti u glavnim fazama jer su svi cestovni trakovi uključeni u glavnim fazama. Ovakav način adaptivnog upravljanja semaforiziranim raskrižjem znatno poboljšava uvjete prometne potražnje, mada treba imati na umu da u slučajevima manje prometne potražnje ovakvi sustavi upravljanja polučuju lošije rezultate, pa je u tim uvjetima bolje koristiti PRF sustav upravljanja ili njihovu kombinaciju.



Slika 3: Dvostruka prstenasta struktura raskrižja Zvonimirova-Heinzelova [8]

### 3. Primjena neizrazite logike u upravljanju signalnim planovima

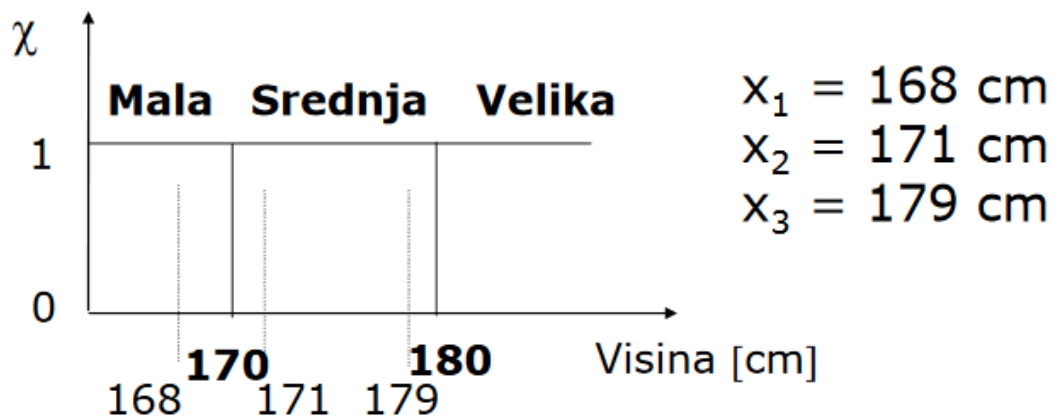
Neizrazita logika je sustav koji se zasniva na matematičkome izražavanju ljudskoga znanja i iskustva u smislu proširene binarne logike te ima široku primjenu u mnogim područjima. Razvoj neizrazite logike počinje Lofti A. Zadeh u članku [12] iz 1965. godine gdje je uveo pojam neizrazitih skupova elemenata te je postavio neizrazito zaključivanje. Daljnjim razvojem neizrazitih sustava započinje ispitivanje i razvoj te primjena u prirodnim, tehničkim i društvenim disciplinama.

Potreba za primjenom neizrazite logike u komercijalne svrhe javila se prvi put 1985. godine u japanskom gradu Sendai s ciljem dizajniranja optimizacije sustava upravljanja kočenja vlakova za japanski željeznički sustav. Primjena neizrazite logike omogućila je poboljšani sustav upravljanja u željezničkom prometu te je modernizacija prometne infrastrukture dala podlogu za daljnje istraživanje mogućih načina uporabe neizrazitih sustava unutar prometne struke. Neizrazite logika se u širokoj primjeni koristi u polju robotike kao i u ostalim granama tehnologije koja zahtjeva neku vrstu međusobne ovisnosti više ulaza koja se neposredno odražava na izlaznu vrijednost sustava [13].

#### 3.1. Izraziti i neizraziti skupovi

Razlika u izrazitim i neizrazitim skupovima je jako bitna kod zaključivanja i dobivanja konkretnog rješenja problema. Kako funkcionira izrazito i neizrazito zaključivanje mogu se opisati na sljedećem primjeru gdje imamo izrazite i neizrazite skupove za određivanje visine čovjeka. Na slici 4 prikazani su izraziti skupovi tri funkcije pripadnosti: mala, srednja i velika koje u svojim zadanim granicama predstavljaju pripadnost članova  $X$  koji u ovome slučaju predstavlja vrijednost visine. Ako se postavi da za tri osobe visina iznosi  $X \in \{168, 171, 179\}$  tada se može vidjeti da će prvi član  $X_1$  pasti u funkciju *Mala* visina dok ostali članovi spadaju u funkciju *Srednja* visina. Kada se analiziraju malo bolje rezultati može se uočiti da između članova  $X_1$  i  $X_2$  nema velikih razlika s obzirom na to da su vrijednosti njihovih visina približno

jednake. Isto tako logično je zaključiti da su članovi  $X_1$  i  $X_2$  približno jednakih visina i da prirodno oba člana pripadaju istome skupu funkcijama *Mala* ili *Srednja*, dok vrijednost člana  $X_3$  pripada u skupu funkcija *Srednja* ili *Velika* (zbog veće razlike u odnosu na član  $X_2$ ) u ovome slučaju to nije tako jer izrazito zaključivanje se zasniva na Booleovom zaključivanju vrijednosti između 0 i 1 kako je prikazano u tablici 1 rješenja.



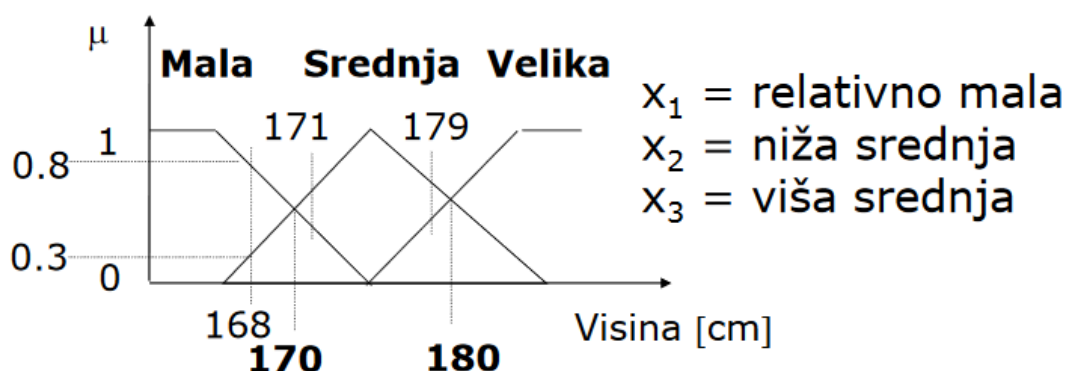
Slika 4: Prikaz izrazitih skupova [14]

Tablica 1: PRIMJER STANJA IZRAZITE LOGIKE [14]

<i>Visina</i>	<i>Mala</i>	<i>Srednja</i>	<i>Velika</i>
168cm	1	0	0
171cm	0	1	0
179cm	0	1	0

Ako se isti slučaj primjeni na neizrazitu logiku zaključivanja onda može se vidjeti da se ona temelji na proširenom zaključivanju kao što je prikazano na slici 5. Iz slike je vidljivo da svaki član ima vlastitu vrijednost pomoću koje se svrstavaju u one skupove kojima realno pripadaju. Iz slike je vidljivo da za član  $X_1$  visina iznosi 168, pa on pripada 0.8 skupu *Mala* i 0.3 skupu *Srednja* dok je član  $X_2$  na granici oba. Na tablici 2 su prikazani rezultati neizrazitog zaključivanja visine čovjeka na kojima su prikazani sve vrijednosti svakoga člana  $X$  za svaki skup, te se iz tih rezultata može uočiti kako se pomoću neizrazitog zaključivanja dobivaju bolji opisani rezultati. Za takav opis rezultata neizrazita logika koristi procese fuzifikacije i defuzifikacija koji se koriste za pretvaranje izrazitih vrijednosti u neizrazite kako bi se ispitali preko neizrazitih pravila, pa ih sustav vraća nazad u izrazite prilikom ispisa rezultata. Takav način rada omogućuju

mnogobrojnu primjenu kod rada složenijih sustava kao što sustavi upravljanja prometa gdje se pomoću više kreiranih funkcija pripadnosti dobivaju bolji opisani rezultati.



Slika 5: Prikaz izrazitih skupova [14]

Tablica 2: PRIMJER STANJA NEIZRAZITE LOGIKE [14]

Visina	Mala	Srednja	Velika
168cm	0.8	0.3	0.0
171cm	0.4	0.7	0.0
179cm	0.0	0.7	0.4

### 3.2. Pravila neizrazite logike

Neizrazita logika koristi pravila koja imaju ulogu u formiranju rješenja na izlaznoj funkciji promatranog sustava. Rad neizrazitog sustava upravljanja radi tako da preko ulaznih varijabla prima podatke koje postupkom fuzifikacije pretvara u neizrazite vrijednosti koji su opisani pomoću funkcija pripadnosti kako je opisano u prijašnjem potpoglavlju. Za dobivanje rezultata na temelju ulaznih podataka i funkcije pripadnosti potrebna su pravila neizrazite logike koja imaju ulogu u povezivanju ulaznih podataka i izlazni vrijednosti. Pravila neizrazite logike se zasnivaju na pravilima tipa Ako-Onda koja se mogu međusobno povezati s logičkim operatorima  $I$  i  $III$  ovisno o problemu rješavanja. Primjer pravila neizrazite logike su prikazana na tablici 3 ,a postavljaju se ručno, pa kažemo da se pravila određuju na bazi znanja stručnjaka ili već postojećih podataka.

Tablica 3: IZVADAK NEIZRAZITIH PRAVILA 33.-48. [8]

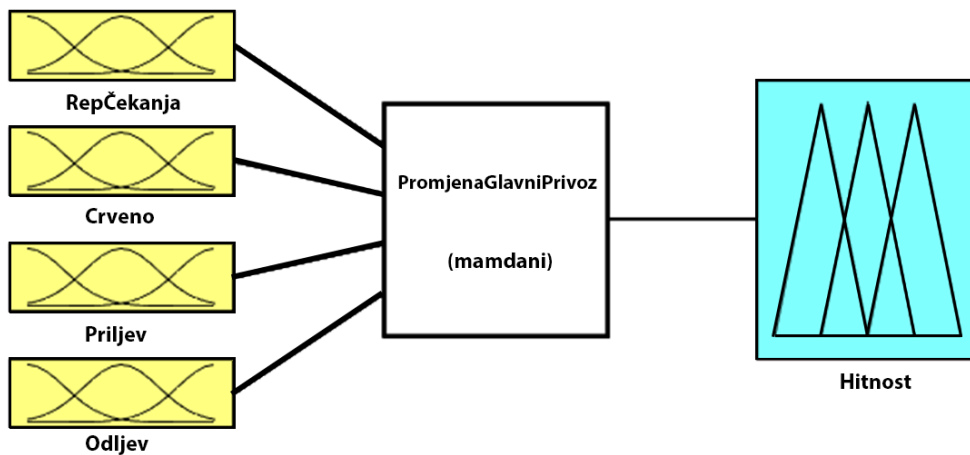
	Rep čekanja		Priljevni tok		Odljevni tok		Hitnost
<i>ako</i>	<i>VISOK</i>	<i>i</i>	<i>NIZAK</i>	<i>i</i>	<i>NIZAK</i>	<i>onda</i>	<i>SREDNJA</i>
<i>ako</i>	<i>VISOK</i>	<i>i</i>	<i>NIZAK</i>	<i>i</i>	<i>SREDNJI</i>	<i>onda</i>	<i>SREDNJA</i>
<i>ako</i>	<i>VISOK</i>	<i>i</i>	<i>NIZAK</i>	<i>i</i>	<i>VISOK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

## 4. Implementacija adaptacije signalnog plana promjenom neizrazite logike

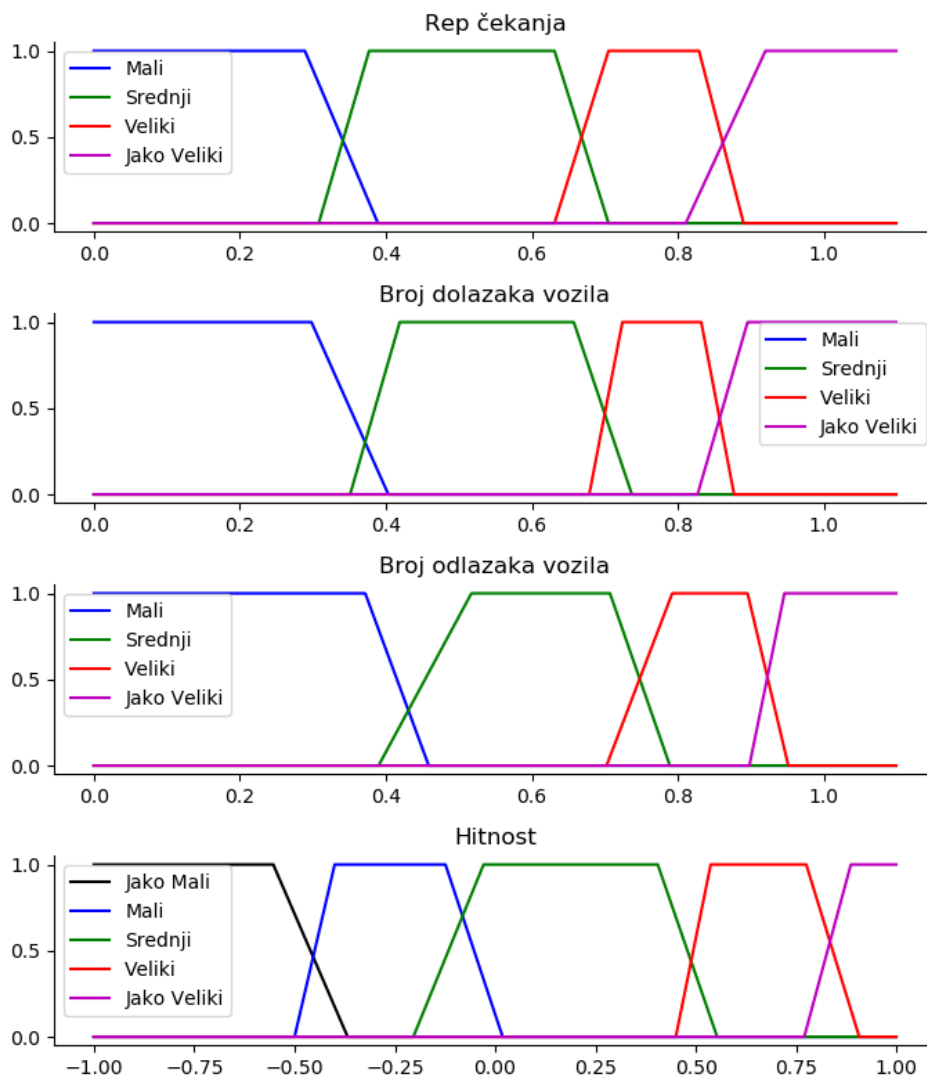
U ovom radu za upravljanje PTF-a i PRF-a sustavima napravljena je i implementirana neizrazite logike koja se koristi za dobivanje vrijednosti varijable *hitnost* za svaku fazu. Za implementaciju sustava neizrazite logike potrebno je definirati ulazne i izlazne varijable. Ulazne varijable predstavljaju prometne podatke unutar kontroliranog raskrižja kako bi se preko izlaznih varijabli dobile određene vrijednosti koje onda sustav upravljanja koristi za odluke o promjeni, odnosno produljenju/skraćenju trajanja faza. Na slici 6 je prikazan Mandanijev sustav neizrazite logike koji je korišten u ovom radu za upravljanje semaforiziranim raskrižjem i on se sastoji od četiri ulazne varijable i jedne izlazne varijable. Ulazne varijable primaju direktno prometne podatke o repu čekanja vozila, priljevu vozila, odljevu vozila te duljine trajanja crvenoga pojma na svakome privozu te donosi odluku o hitnosti faze na kojoj su potrebne operacije upravljanja. Cijeli sustav upravljanja semaforiziranim raskrižjem se sastoji od četiri neizrazite logike ovisno o metodi upravljanja signalnim planovima i prometnici na kojoj se određuje promjena. Sustavi neizrazite logike su implementirani i podijeljeni na sljedeći način:

1. Sustavi upravljanja PTF-a za Zvonimirovu ulicu ( $PTF_z$ ),
2. Sustavi upravljanja PTF-a za Heinzlovu ulicu ( $PTF_h$ ),
3. Sustavi upravljanja PRF-a za Zvonimirovu ulicu ( $PRF_z$ ),
4. Sustavi upravljanja PRF-a za Heinzlovu ulicu ( $PRF_h$ ).

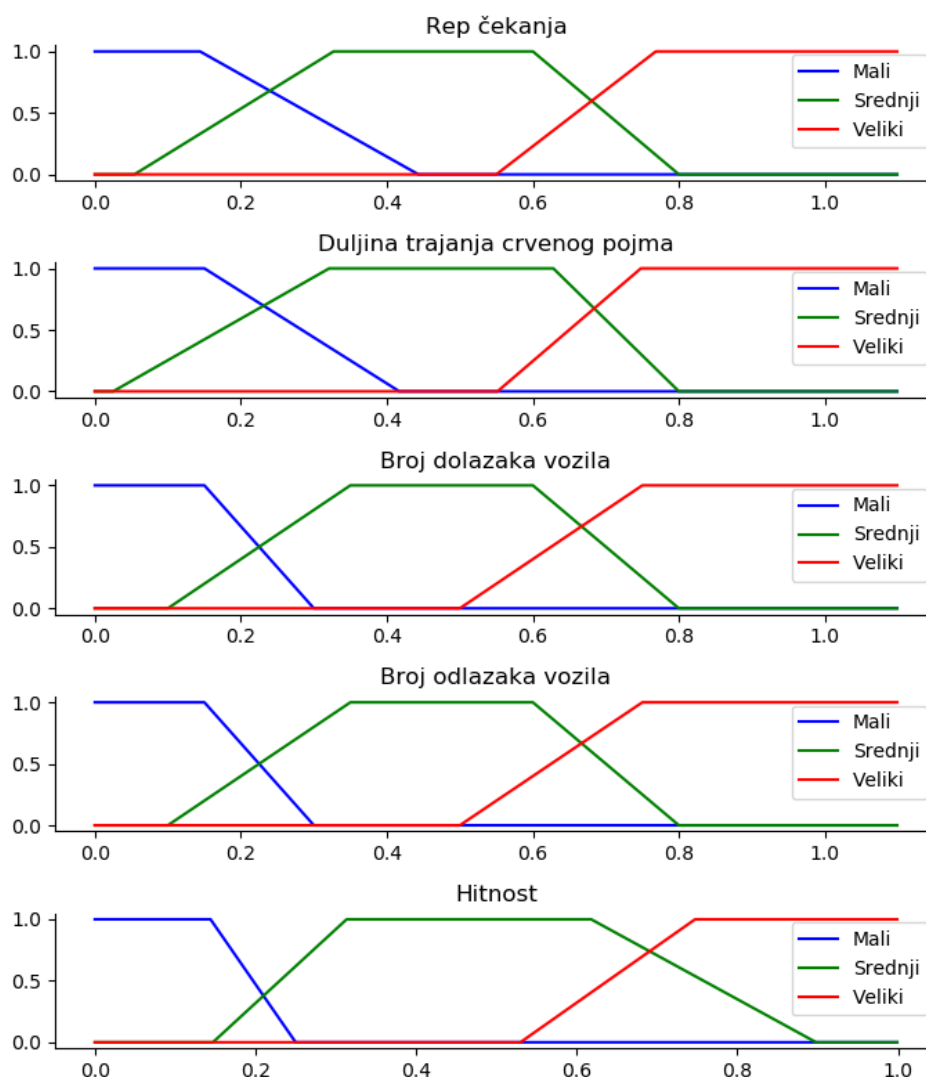
Razlika u sustavima neizrazite logike je u tome što neizrazita logika kod sustava PTF-a koristi samo tri ulazne varijable (Rep čekanja, Priljev, Odljev) s obzirom na to da se sustav zasniva na produljenju trajanja faza, dok kod promjene redoslijeda faza potrebna je dodatna varijabla o trajanju crvenog svijetla u svakoj fazi. Svaka ulazna i izlazna varijabla se sastoji od funkcija pripadnosti koje potrebno definirati kao što je prikazano na slikama 7 i 8.



Slika 6: Neizrazita logika sustava PRF-a [8]



Slika 7: Funkcije pripadnosti za ulazne varijable  $PTF_z$ -a



Slika 8: Funkcije pripadnosti za ulazne varijable  $PRF_z$ -a

## 4.1. PTF sustav upravljanja

PTF sustav adaptivnog upravljanja je jedna od tri metode koje su napravljene i ispitane za potrebe ovoga rada. Sustav se zasniva na određivanju hitnosti svake faze unutar ciklusa gdje u trenutku faze postavlja novu vrijednost zelenog pojma i na takav način pokušava smanjiti prometna zagušenja na raskrižju Zvonimirova-Heinzelova ulica. PTF sustav koristi dvije neizrazite logike ( $PTF_z$  i  $PTF_h$ ) za svaki prometni koridor zato što su različita prometna opterećenja, pa za određivanje hitnosti faza uzima se u obzir privoz na prometnom koridoru koji ima najveći prometni volumen vozila. Ulazne varijable za sustave neizrazite logike se računaju preko detektora unutar mikrosimulacijskog alata VISSIM te služe za računanje hitnosti faze, a promjena trajanja



faze računa se prema [6]:

$$\Delta T_{max} = T_{faze} \cdot CDC, \quad (1)$$

gdje je  $T_{max}$  maksimalna promjena duljine zelenog pojma, dok je  $T_{phase}$  fiksno trajanja zelenog pojma svake faze unutar signalnog programa.  $CDC$  je koeficijent promjene duljine trajanja i on iznosi 0.30. Kada se izračuna nova duljina trajanja tada se primjenjuje na signalni plan zelenog pojma prema formuli [6]:

$$\Delta T = U_{faze} \cdot \Delta T_{max}. \quad (2)$$

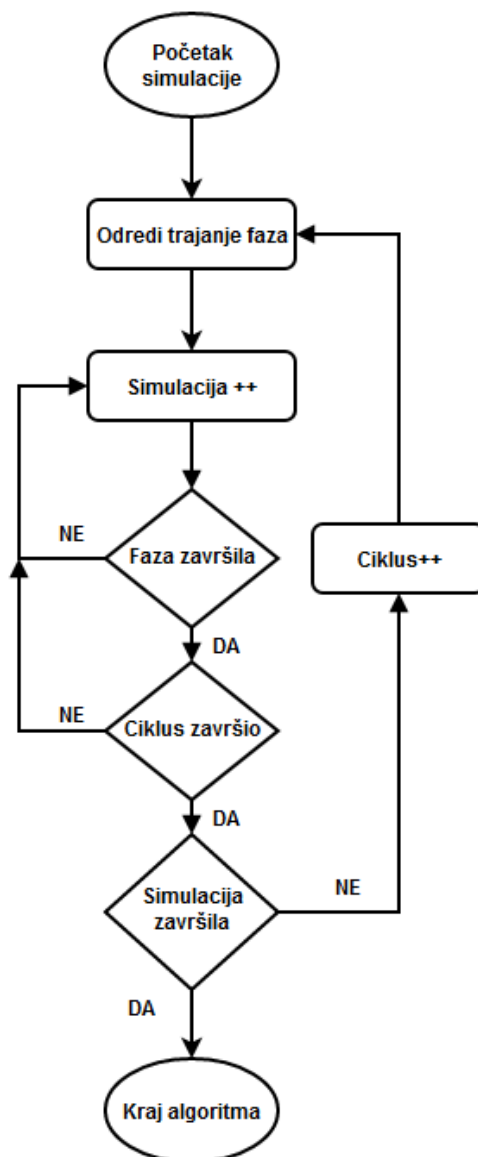
gdje je  $\Delta T$  novo trajanje zelenog pojma, a  $U_{faze}$  predstavlja hitnost faze. Na slici 9 je prikazan rad metode unutar algoritma upravljanja.

## 4.2. PRF sustav upravljanja

PRF sustav adaptivnog upravljanja zasniva se na promjeni redoslijeda faza unutar signalnog plana tako da pri završetku svake faze na temelju prikupljenih prometnih podataka (iste kao i kod PTF uz dodatan trajanja crvenog svijetla) odredi hitnosti svih faza osim *Faze1*. Razlog izbjegavanja određivanja *Faze1* prikazano je na slici 3 gdje je vidljivo da u trenutku kada se simulacija nalazi na kraju ciklusa *Faze3* dolazi do ponavljanja. Unutar PRF sustava potrebno je isto kao i u prethodnome PTF sustavu potrebno odrediti glavne *Faze* koje imaju veću prometnu potražnju kako bi se sustav u slučaju istih hitnosti faza mogao odrediti onu s najvećim prioritetom s obzirom na to da postoji 9 mogućih scenarija odabira. PRF sustav je preporučeno koristiti kod raskrižjima s većim prometnim zagušenjem jer ima mogućnost ponavljanja traka s većom prometnom potražnjom. Rad PRF sustava je prikazan na slici 10.

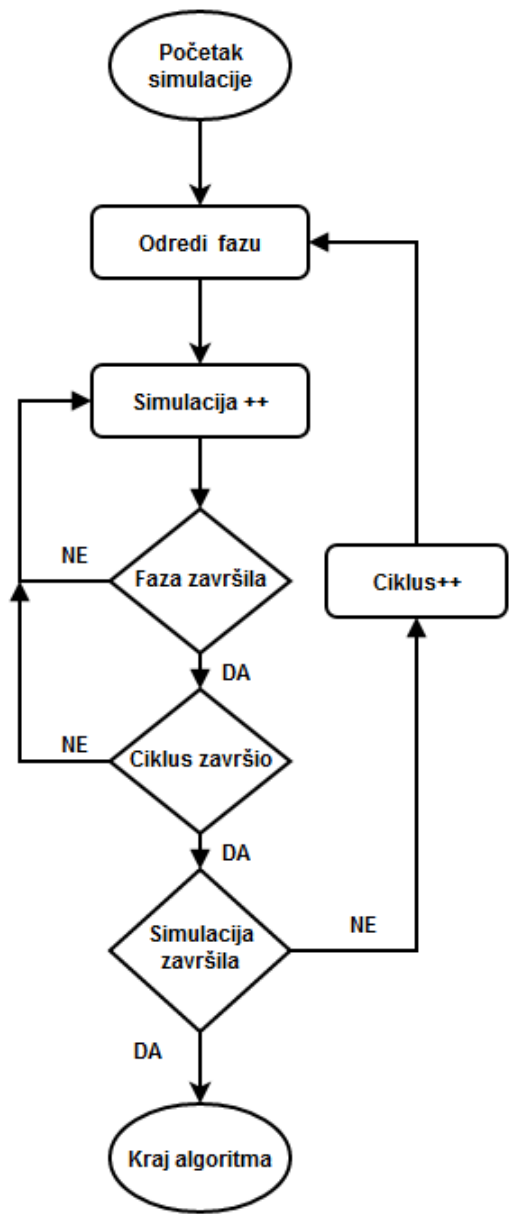
## 4.3. PTIRF sustav upravljanja

U ovome radu uz adaptivne sustave upravljanja PTF-a i PRF-a implementirana je njihova kombinacija upravljanja adaptivnog sustava koja se naziva PTIRF (Promjena trajanja i redoslijeda faze). PTIRF radi na isti način kao i prethodni sustavi samo što se na početku trajanje simulacije određuje hitnost redoslijeda faze, a unutar same faze potrebu o promjeni vremena trajanja zelenog pojma zbog čega koristi četiri sustava neizrazite logike. PTIRF sustav je naprednija verzija

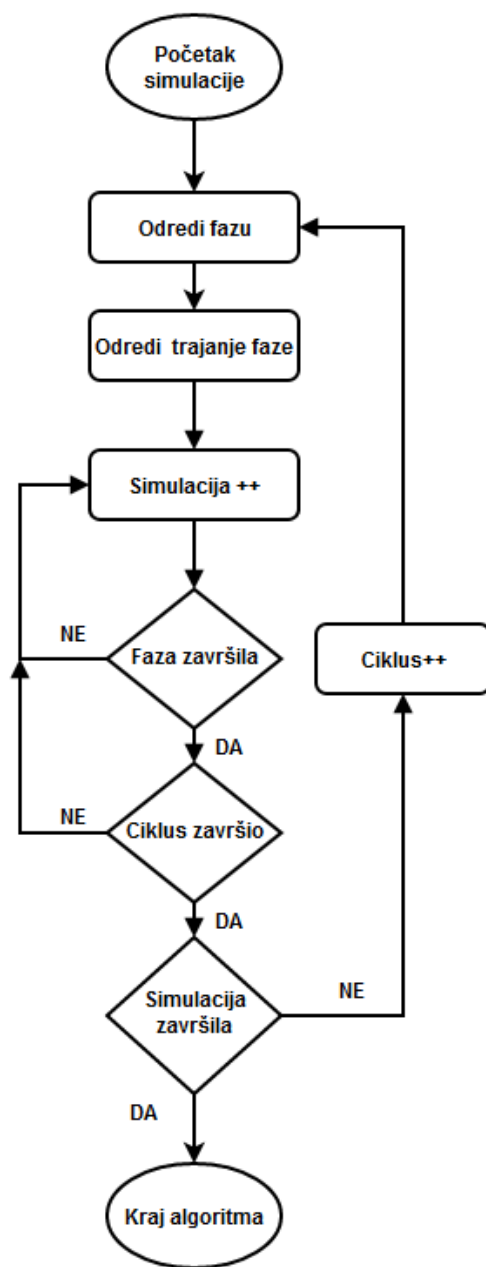


Slika 9: Rad adaptivne metode upravljanja PTF-a

prethodnih implementiranih sustava upravljanja zbog svoje autonomnosti i višestruke mogućnosti kod upravljanja signalnim planovima. PTIRF sustav se koristi kod raskrižja s malim ili većim prometnim opterećenjem jer zbog svog načina rada prilagođava se bolje stvarnovremenskim situacijama na semaforiziranom raskrižju u odnosu na PTF i PRF sustave kojima optimizacija sustava ovisi o prometnim opterećenjima. Na kraju ispitivanja svih sustava za PTIRF sustav se radi dodatna optimizacija neizrazitih pravila kako bi se postigla još bolja optimizacija upravljanja sustava i postigli bolji rezultati. Rad algoritma je prikazan na slici 11.



Slika 10: Rad adaptivne metode upravljanja PRF-a



Slika 11: Rad adaptivne metode upravljanja PTIRF-a

## 5. Optimizacija pravila sustava neizrazitog zaključivanja

Optimizacija pravila i finkcija pripadnosti neizrazitog zaključivanja može se provesti korištenjem načela evolucije živih organizma tako da se konstantnom evolucijom traže optimalna rješenja za prilagođavanje i rješavanje tehničkih problema. Optimizacija je postupak pronalaska optimalnog rješenja zadanog problema s definiranim problemom, definiranim ograničenjima i definiranom ocjenom kvalitete rješenja koja se još u literaturama naziva i kriterijskom funkcijom ili evaluacijskom funkcijom ili funkcija dobrote (engl. fitness function) [15].

Kriterijska funkcija služi za pretragu rješenja nad svim kreiranim odnosno generiranim populacijama jedinki te se mogu podesiti za traženje minimalne ili maksimalne vrijednosti. Kriterijska funkcija ima mogućnosti potražnje više mogućih rješenja populacija tako da za jednu populaciju tražimo minimalne vrijednosti, a za drugu maksimalne vrijednosti. Osnovna ideja genetskog algoritma je da se iz početke slučajne generirane populacije  $P$  generira nova populacija  $P'$  kroz genetske operatore selekcije, križanje i mutacije sve dok se ne postigne optimizirano rješenje kako je prikazano na slici 12.



Slika 12: Osnovni rad genetskog algoritma [15]

Kriterijska funkcija računa se prema sljedećoj formuli:

$$dobrota(v) = f(x). \quad (3)$$

gdje binarni vektor  $v$  predstavlja realan broj  $x \in [dg, gg]$ . Svaka jedinka koja ima veću dobrotu ima veću šansu za preživljavanje, dok one s malom dobrotom jedinke imaju malu šansu preživljavanja [16]. Na kraju optimizacije se računa ukupna dobrota svih populacije i uzima se maksimalna ili minimalna vrijednost (ovisno da li se traži maksimizacija ili minimizacija problema) te jedinke za tu populaciju prema formuli:

$$D = \sum_{i=1}^n dobrota(v). \quad (4)$$

## 5.1. Genetski algoritam

Postoje dva koncepta upravljanja genetskim algoritimima, a to su: generacijski genetski algoritam upravljanja i eliminacijski genetski algoritam upravljanja. Razlika između ova dva koncepta je u tome što generacijski radi na principu stvaranja nove populacije nakon svake provjere evaluacije rezultata gdje izbacuje najbolje rješenje nakon provjere uvjeta zaustavljanja. Kod eliminacijskog genetskog algoritma upravljanja princip upravljanja se sastoji od toga da nakon svake provjere uvjeta zaustavljanja izbacuje najgora rješenja, te koristi samo najbolja koja koristi za daljnju generaciju. U ovome radu korišten je generacijski princip upravljanja gdje se nakon početne populacije koja se sastoji od 10 kromosoma (jedinki) ispita dobrota jedinki, te vrši genetski operatori nad populacijom stvarajući nove. Dobrote kromosoma se spremaju u zajedničku listu preko koje se na kraju zaustavljanja simulacije traži najbolja i pokreće ispitivanje nad adaptivnim sustavima upravljanjima. Genetski operatori koji se koriste za optimiziranje sustava su:

1. Selekcija,
2. Križanje,
3. Mutacija,
4. Evaluacija.

### 5.1.1. Selekcija

Glavna uloga selekcije da iz populacije  $P$  uzme najbolja rješenja prenoseći dobra svojstva svih kromosoma na daljnju koraku reprodukcije. Postoje više vrsta selekcija, a neke od njih su

prikazane na slici 13, pa je potrebno izabrati onu selekciju s kojom ovisno o vrsti problema može postići najbolju optimizaciju.



Slika 13: Osnovni vrste selekcija [15]

Jednostavna selekcija (ili metoda ruleta) pripada generacijskom genetskom algoritmu čija je vjerojatnost odabira roditelja jednaka proporcionalna njihovoj dobroti. Generirana populacija  $P'(t)$  ima jednak broj jedinki kao i populacija  $P(t-1)$  što znači da prilikom svakom kreiranja nove populacije veličina  $P$  ostaje ista. Ovim postupkom selekcije može se dogoditi da prilikom kreiranja nove populacije jedan kromosom se pojavljuju više puta zbog toga što se prenose jedinke s boljom dobrom, pa zbog toga postoje nedostaci kod odabire jednostavne selekcije [16]. Stohastička selekcija je jako slična jednostavnoj selekciji gdje se kreira raspodjela rješenja i rulet s  $N$  polja, a za rješenja se uzimaju ona koja se nalaze u području kumulativne dobrote unutar polja ruleta [15]. U ovome radu korištena je jednostavna turnirska selekcija koja radi na principu da  $N$  puta odabere  $k$  kromosoma između kojih selektira najbolji ili najlošiji kromosom i spremi u međupopulaciju. Eliminacijska turnirska selekcija  $M$  puta odabere  $k$  jedinki i radi eliminaciju najlošijih među njima. Parametar  $k$  ovisno o veličini se dijeli na binarnu turnirsku selekciju ( $k = 2$ ), 3-turnirsku, 4-turnirsku, itd. [17].

Selekcija najboljih se zasniva na odabiru unaprijed zadanog broja najboljih jedinki, a dijeli se na tri vrste:  $\mu + \lambda$  selekcija koja slučajno odabire  $\mu$  roditelja kako bi stvorio  $\lambda$  djece, a zatim iz dobivenog skupa rješenja odabrao  $\mu$  rješenja skup, zatim  $(\mu, \lambda)$  selekcija koja radi na sličan način kod odabira roditelja i stvaranja djece ali samo ako vrijedi  $\lambda \geq \mu$  pa se odabire  $\mu$  najbolje djece za novi skup rješenja i krnja selekcija koja odabire  $n$  najboljih jedinki i kopira ih  $N/n$  puta

u novi skup rješenja [15].

### 5.1.2. Križanje

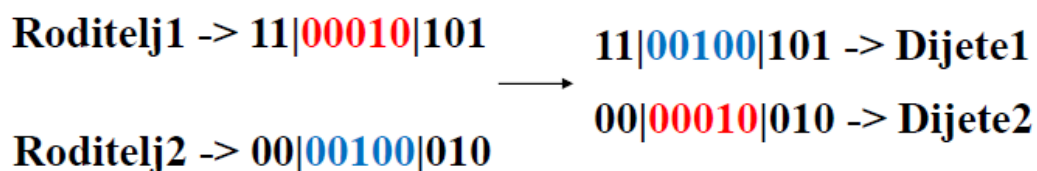
Križanje ima svrhu u stvaranju nove populacije (djece) stapanjem dvaju prethodnih selektiranih kromosoma (roditelja) te na takav način stvara djecu s potencijalnim jednakim dobrim genima roditelja (nasljeđivanje). Prema [15] vrste križanja može se podijeliti na:

1. Uniformno,
2. S  $n$ -točaka prekida,
3. Aritmetičko,
4. Heurističko.

Uniformno križanje ima vjerojatnost križanja svakoga gena u iznosu od  $p = 0.5$  ali se mogu postaviti da se geni unutar kromosoma koji su isti samo prepisu, a različiti postave na nulu. To se postiže logičkom funkcijom  $I : AIB$  gdje su  $A$  i  $B$  roditelji. Logičkom operacijom  $RI(AXILIB)$  se dobiva maska slučajnih bitova koja služi za provjeru različitosti bitova između roditelja  $A$  i  $B$ , a logičkom operacijom  $ILI$  dobivamo traženo rješenje prema formuli [16]:

$$DIJETE = AB + R(A \oplus B). \quad (5)$$

Križanje s  $n$ -točaka prekida slučajno izabere jedno ili više mjesta (ovisno o postavljenom parametru  $n$ ) unutar kromosoma roditelja  $A$  i  $B$  te ih zamjeni za svako dijete kako je prikazano na slici 14.



Slika 14: Križanje s  $n$ -točaka prekida [15]

Aritmetičko i heurističko križanje ima sličan postupak stvaranja novih populacija jer se oboje koriste kod prikaza rješenja u obliku realnih brojeva. Stvaranje novih populacija (djece)



kod aritmetičkog križanja prikazan je izrazom 6, a heurističkim križanjem izrazom 7.

$$\begin{aligned} DIJETE1 &= \alpha * roditelj1 + (1 - \alpha) * roditelj2, \\ DIJETE2 &= (1 - \alpha) * roditelj1 + \alpha * roditelj2. \end{aligned} \quad (6)$$

$$\begin{aligned} DIJETE1 &= boljiroditelj + r * (boljiroditelj - lošjiroditelj), \\ DIJETE2 &= boljiroditelj. \end{aligned} \quad (7)$$

gdje roditelji predstavljaju kromosome (jedinke), djeca produkte križanja, a  $\alpha$  i  $r$  predstavljaju težinski koeficijent iz  $[0, 1]$ .

### 5.1.3. Mutacija

Mutacija je zadnji proces genetskog operatora prije početka evaluacije nove kreirane populacije, a glavna uloga je promjena jednog ili više gena unutar kromosoma. U prirodi mutacije je trajna promjena genetskog materijala zbog vanjskog utjecaja, a unutar genetskog algoritma provodi ubacivanje  $n$  nizova u pojedino postojeće rješenje. Mutaciju dijeli na: jednostavnu i miješajuću koja se još dijeli na potpuna, potpuna miješajuća i invertirajuća miješajuća [15].

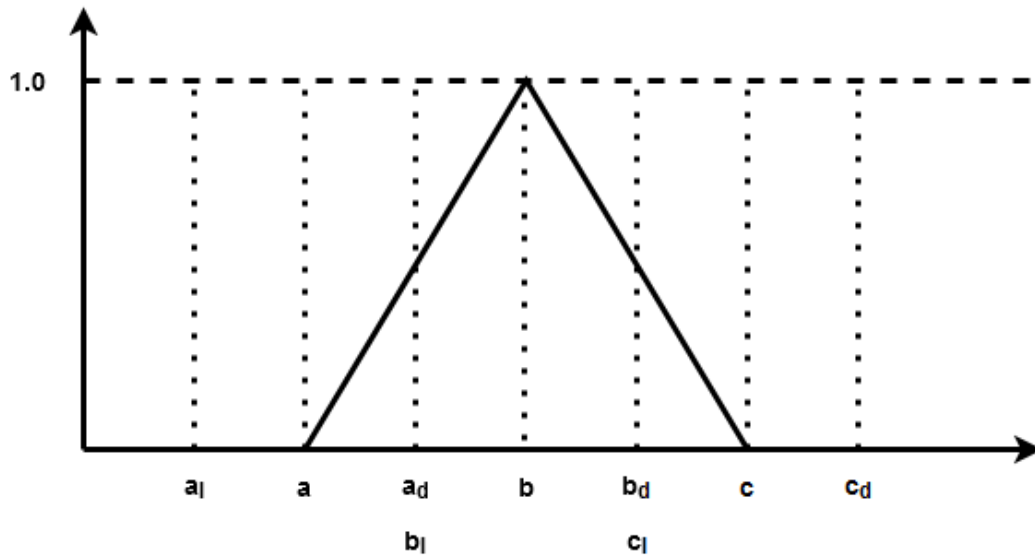
## 5.2. Optimiziranje pravila

Kod optimizacije pravila neizrazite logike pravila je potrebno namjestiti i prezentirati u obliku cijelih brojeva  $\{1, 2, 3, 4, 5\}$  za  $\{JakoMalo, Malo, Srednje, Veliko, JakoVeliko\}$ . Za svaki sustav neizrazitog upravljanja imamo  $n$  broj pravila koji predstavlja krajnju granicu kromosoma i može se predstaviti prema [18] u obliku jedinki:

$$\begin{aligned} x &\in \{i \mid i = 1, 2, \dots, n\}, \\ y &\in \{i \mid i = 1, 2, \dots, m\}, \\ z &\in \{i \mid i = 1, 2, \dots, l\}. \end{aligned} \quad (8)$$

### 5.3. Optimiziranje funkcija pripadnosti

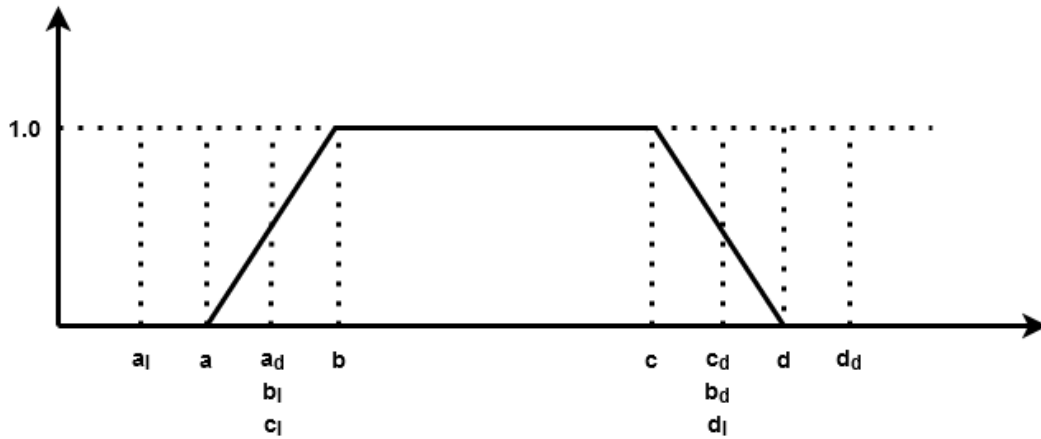
Kod optimiziranja funkcija pripadnosti za potrebe izrade kromosoma potrebno je definirati sve moguće kombinacije pomicanja funkcija unutar definiranih okvira, a to ovisi o tipu funkcije unutar neizrazitog sustava. Najčešće korištene funkcije su trapez i trokut, pa prema [18] može ih se definirati na sljedeći način. Za funkciju trokuta prema slici 15 može se definirati granice prema izrazu 9:



Slika 15: Trokutasta funkcija pripadnosti

$$\begin{aligned}
 a \in [a_l, a_d] &= \left[ a_0 - \frac{b_0 - a_0}{2}, a_0 + \frac{b_0 - a_0}{2} \right], \\
 b \in [b_l, b_d] &= \left[ b_0 - \frac{b_0 - a_0}{2}, b_0 + \frac{c_0 - b_0}{2} \right], \\
 c \in [c_l, c_d] &= \left[ c_0 - \frac{c_0 - b_0}{2}, b_0 + \frac{c_0 - b_0}{2} \right].
 \end{aligned} \tag{9}$$

Za trapez funkciju na slici 16 kromosome definiramo na prema sljedećem izrazu 10:



Slika 16: Trapez funkcija pripadnosti

$$\begin{aligned}
 a \in [a_l, a_d] &= \left[ a_0 - \frac{b_0 - a_0}{2}, a_0 + \frac{b_0 - a_0}{2} \right], \\
 b \in [b_l, b_d] &= \left[ b_0 - \frac{b_0 - a_0}{2}, c_0 + \frac{d_0 - c_0}{2} \right], \\
 c \in [c_l, c_d] &= \left[ b_0 - \frac{b_0 - a_0}{2}, b_0 + \frac{d_0 - c_0}{2} \right], \\
 d \in [d_l, d_d] &= \left[ d_0 - \frac{c_0 - d_0}{2}, d_0 + \frac{d_0 - c_0}{2} \right].
 \end{aligned}
 \tag{10}$$

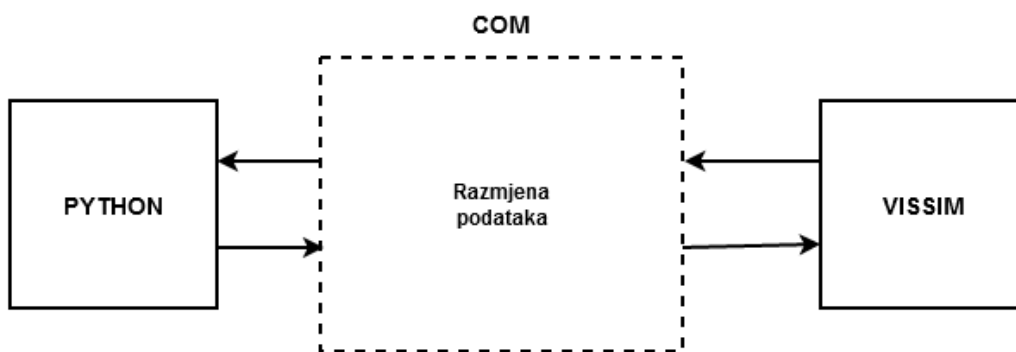
Iz formule 10 za određivanje kromosoma za svaku točku funkcije vidljivo je da su točke  $b$  i  $c$  jednakih iznosa zbog većeg intervala u kojima se mogu kretati, pa je potrebno nadodati uvjet ispravljanja logičke pogreške u slučajevima gdje je  $b > c$ .

## 6. Simulacijski rezultati

U ovome poglavlju bit će analizirani rezultati istraživanja rada adaptivnog algoritma upravljanja semaforiziranog raskrižja, te prikazan prometni model u kojima je ispitivan. Također će se opisati simulacijsko okruženje u kojim je algoritam definiran.

### 6.1. Simulacijsko okruženje

Algoritam adaptivnog upravljanja napravljen je u programskome jeziku Python verziji 3.8.1 te je ispitano na mikrosimulacijskom alatu PTV VISSIM. VISSIM ima mogućnost upravljanja simulacija izvan samog programa zahvaljujući COM sučelju kako je prikazano na slici 17. Pomoću COM (engl. Component Object Model) [19] sučelja VISSIM djeluje kao poslužitelj, a Python kao klijent preko kojeg se upravlja.

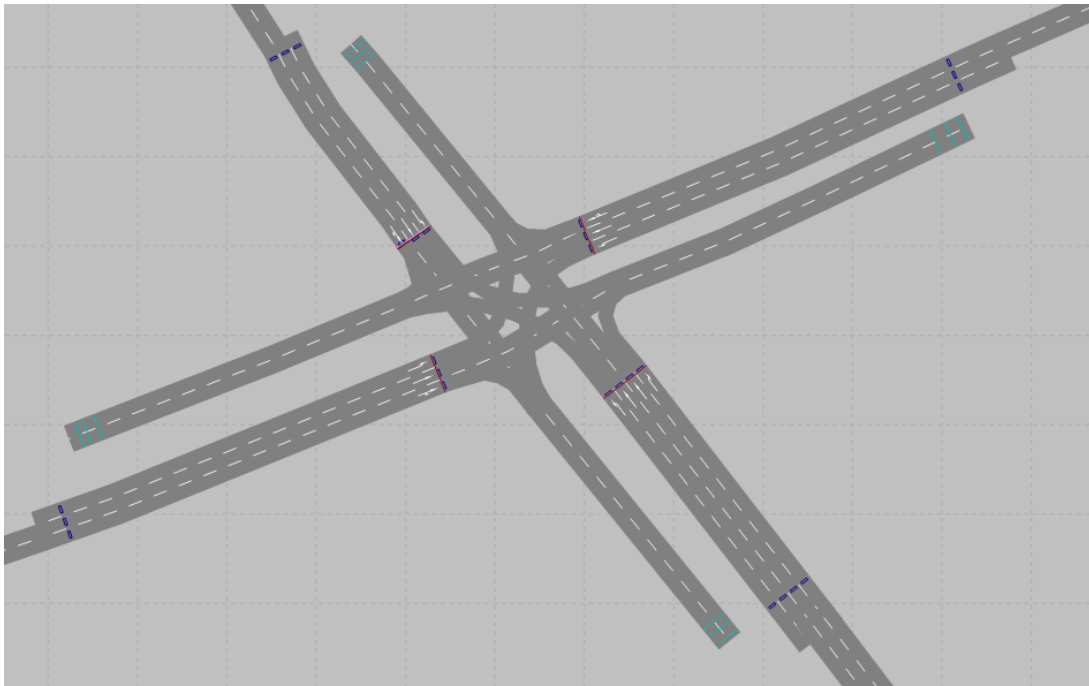


Slika 17: Prikaz COM sučelja između Pythona i VISSIMA

Za potrebe izrade adaptivnog algoritma unutar Pythona korišteni su programski paketi Scikit-fuzzy za izradu sustava neizrazite logike [20] i DEAP [21] za izradu genetskog algoritma za optimizaciju pravila neizrazite logike.

## 6.2. Prometni model

Za potrebe ovoga rada napravljen je prometni model raskrižja ulice kralja Zvonimira i Heinzellove ulice prikazan na slici 18 unutar paketa PTV VISSIM gdje su se vršila sva testiranja adaptivnog upravljanja semaforiziranog raskrižja i svih metoda upravljanja. Kod ispitivanja algoritma uzeti su stvarno mjereni podaci prometne potražnje iz [22] koji su ispitani kroz tri scenarija. Prvi scenarij uključuje prometnu potražnju koja je umanjena za 40%, drugi scenarij koristi stvarno mjerene podatke prometne potražnje, a treći scenarij koristi prometnu potražnju uvećanu za 40%. Prva metoda upravljanja semaforiziranog raskrižja je ispitana na ustaljenome signalnome planu prikazanom na slici 19 kako bi se mogli usporediti rezultati metoda adaptivnog upravljanja.



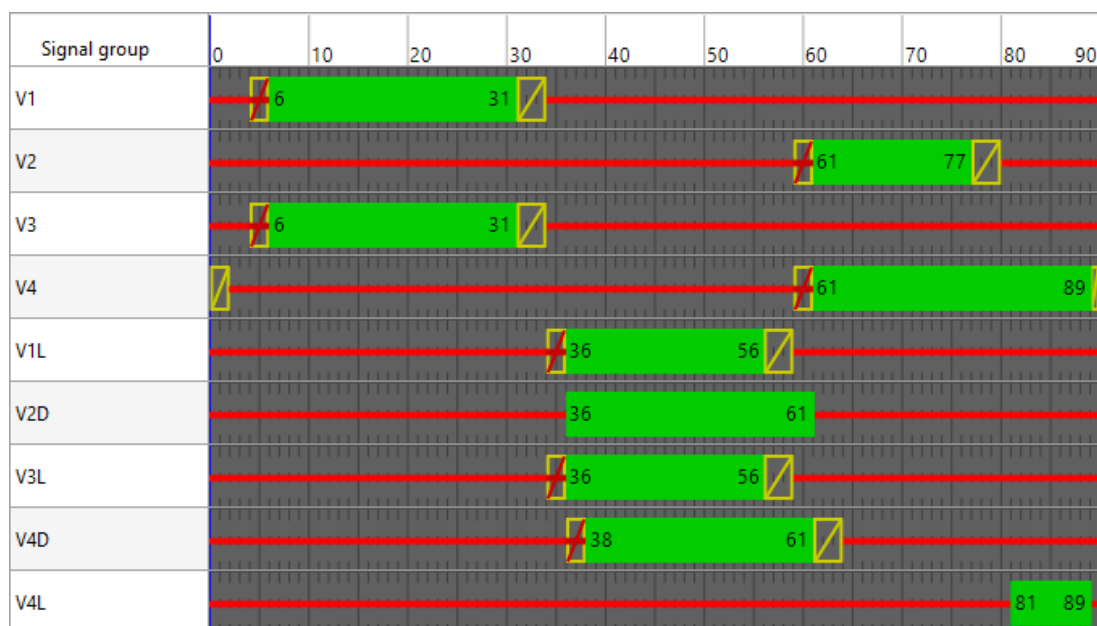
Slika 18: Prometni model raskrižja ulice kralja Zvonimirova i Heinzellove ulice

## 6.3. Analiza simulacijskih rezultata

U ovome dijelu bit će prikazani rezultati ispitivanja adaptivnog algoritma upravljanja uspoređujući rezultate upravljanja ustaljenog signalnog plana s adaptivnim metodama PTF-a, PRF-a, PTIRF-a i  $PTIRF_p$ -a. Preko mikrosimulacijskog alata VISSIM računali su se sljedeći parametri za svaki scenarij prometne potražnje:

Tablica 4: PROMETNA POTRAŽNJA

Scenarij	Prometna potražnja [voz/h]			
	Privoz			
	Istočni	Sjeverni	Zapadni	Južni
1	1,136	291	660	372
2	1,892	485	1,100	620
3	2,649	679	1,540	868

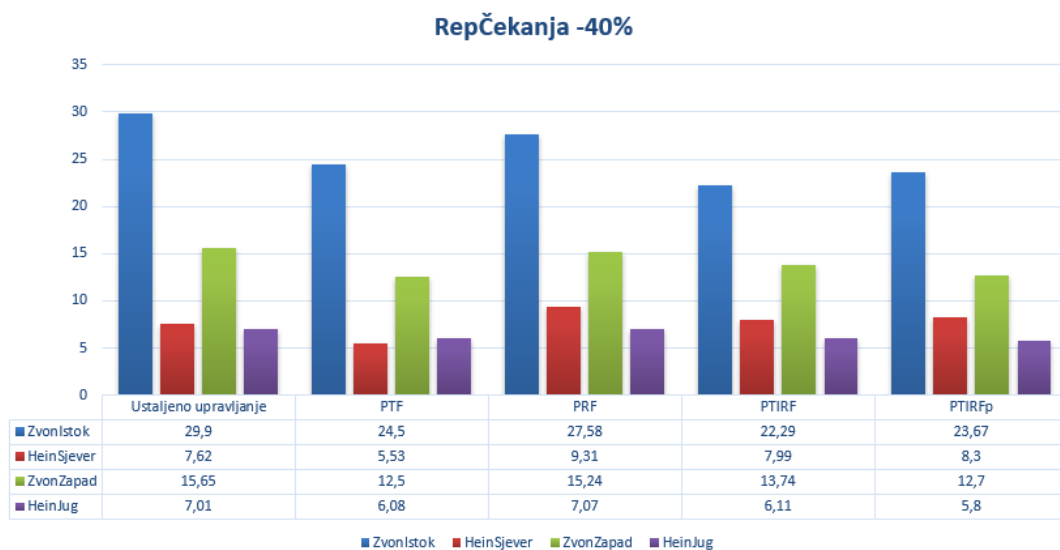


Slika 19: Ustaljeni signalni plan

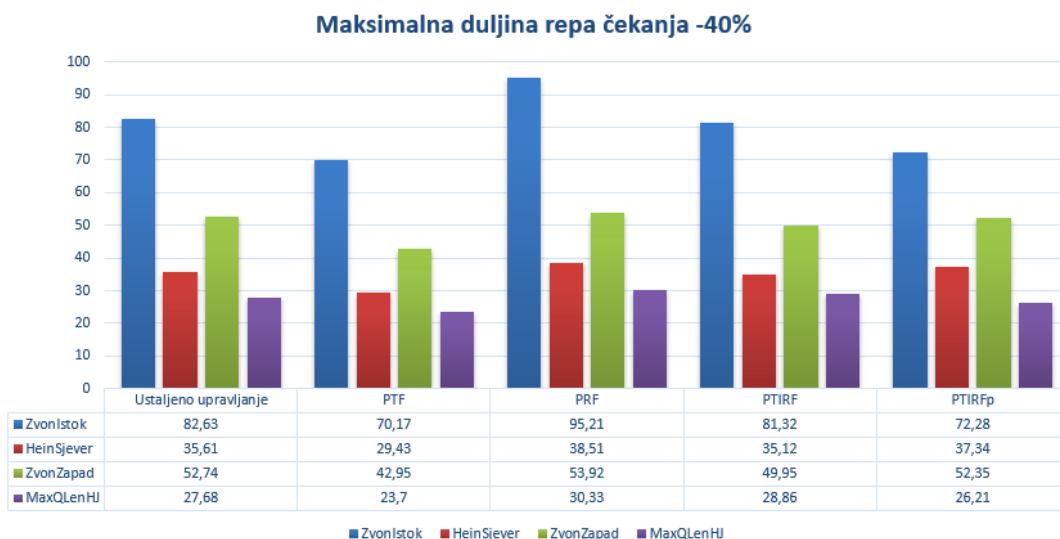
1. Rep čekanja,
2. Maksimalni rep čekanja,
3. Broj vozila zaustavljanja.

Na grafikonu 1 prikazani su rezultati izmjerenih duljina repova čekanja na svim privozima unutar križanja ulice kralja Zvonimira i Heinzelve ulice. Rezultati repa čekanja prikazuju bolje prilagođavanje prometnim situacijama u odnosu na ustaljeni signalni plan. PTF sustavi upravljanja rezultiraju boljim rezultatima od PRF-a zbog boljeg prilagođavanja prometnim situacijama kod manjih prometnih opterećenja. Problem je u tome što PTF sustavi brže djeluju na faze s većom hitnosti, dok PRF sustavi u slučaju propuštanja traka unutar nove faze (4,5,6 i 7) pogoršavaju ostale trake zbog toga što je potreban jedan cijeli ciklus da novo poboljšanje. PTIRF sustavi imaju veću autonomiju u odnosu na PTF i PRF sustave, pa imaju najbolje rezultate

jer osim mogućnosti promjene redoslijeda faze također je mogu skratiti u slučaju hitnosti. Za  $PTIRF_p$  sustave potrebno je izvršiti više simulacija optimizacije pravila neizrazite logike kako bi rezultati bili bolji od PTIRF-a, ali i u kraćim optimizacijama vidi se učinak pružanja boljih rezultata od ostalih sustava. Na grafikonima 2 i 3 prikazani su rezultati djelovanja svih sustava upravljanja koji govore da u manjim količinama prometa PTIRF sustavi pružaju manje zaustavljanja vozila na privozima raskrižja, dok je najmanji maksimalni rep čekanja kod PTF sustava upravljanja signalnim planovima.



Grafikon 1: Rep čekanja za 1. prometni scenarij



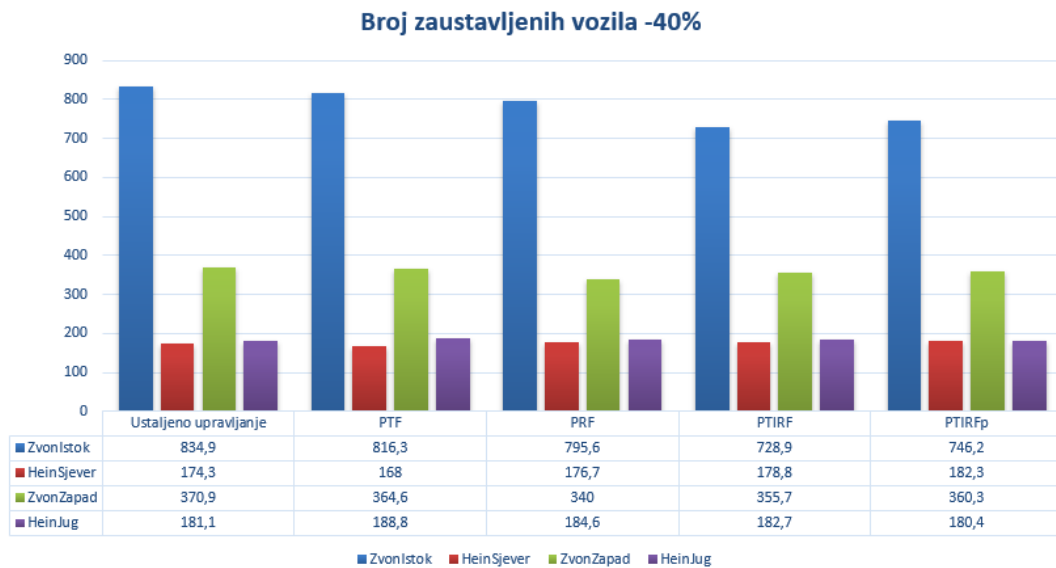
Grafikon 2: Maksimalni rep čekanja za 1. prometni scenarij

Na grafikonu 6 prikazani su rezultati stvarnovremenske potražnje, odnosno 2 prometnog scenarija u kojem sustavi PTIRF i  $PTIRF_p$  najbolje optimiziraju semaforizirano raskrižje u

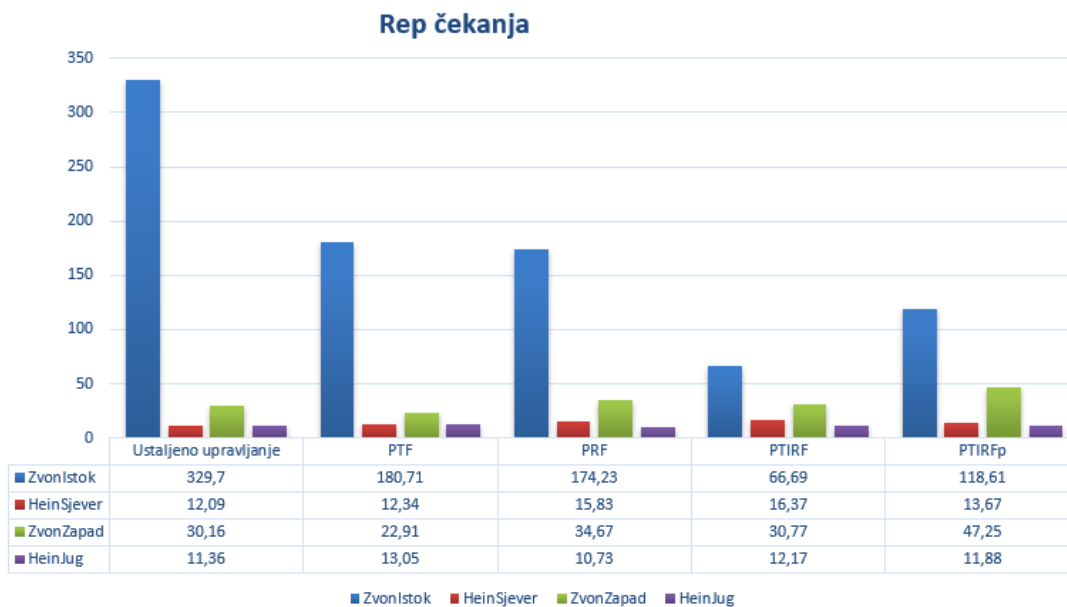
odnosu na ostale sustave upravljanja. PTF i PRF sustavi upravljanja upravljaju preko 50% uspješnije od sustava ustaljenog upravljanja. PRF sustav ima malo bolje rezultate od PRF sustava upravljanja kod privoza s najvećim prometnim zagušenjem. Na grafikonima 5 i 6 prikazani su rezultati maksimalne duljine repa čekanja i broja zaustavljanja vozila. Kod maksimalnog repa čekanja rad adaptivnih sustava je bolji od ustaljenog sustava, a metoda s najboljim rezultatima za istočni privoz Zvonimirove je PTIRF sustav upravljanja. Za bolje rezultate potrebna je duža optimizacija pravila  $PTIRF_p$  sustava koji može postići još bolje rezultate. PTIRF sustavi imaju najmanji broj zaustavljenih vozila što pokazuje veliki potencijal kod implementacije adaptivnih sustava.

Kod rezultata veće prometne potražnje odnosno 3. scenarija na grafikonu 7 sustavi zbog prevelikoga prometnog opterećenja pokazuju dosta loše rezultate. Razlog tome je što je za veća opterećenja potrebno ispitati rad sustava na modelu od minimalno dva raskrižja kako bi se razvio sustava kooperativnog upravljanja i preusmjerio dio opterećenja. Adaptivni sustavi su postigli bolje rezultate od ustaljenog upravljanja ali nedovoljno za postizanjem optimalnog sustava. Na grafikonu 8 rješenja su preslika rješenjima repa čekanja, pa su rezultati jako slični. Tek na grafikonu 9 mogu se vidjeti djelovanja adaptivnih algoritama naspram ustaljenog upravljanja. Kod PRF, PTIRF i  $PTIRF_p$  prikaz najboljih rezultata sustava upravljanja koji govori da sustavi propuštaju više vozila od ostalih sustava upravljanja, pa je broj zaustavljanja manji. Ti rezultati također daju jasan prikaz da sustavi mogu dobro utjecati na propuštanje vozila, no zbog velikih opterećenja nisu u mogućnosti smanjiti repove čekanja i maksimalnu duljinu repa. PTF sustavi u ovim prometnim situacijama rade dosta loše, pa i od ustaljenog upravljanja jer produljenjem jedne faze, drugima koji su već pod opterećenjem produžuju vrijeme crvenog pojma, pa je tim broj zaustavljanja veći.

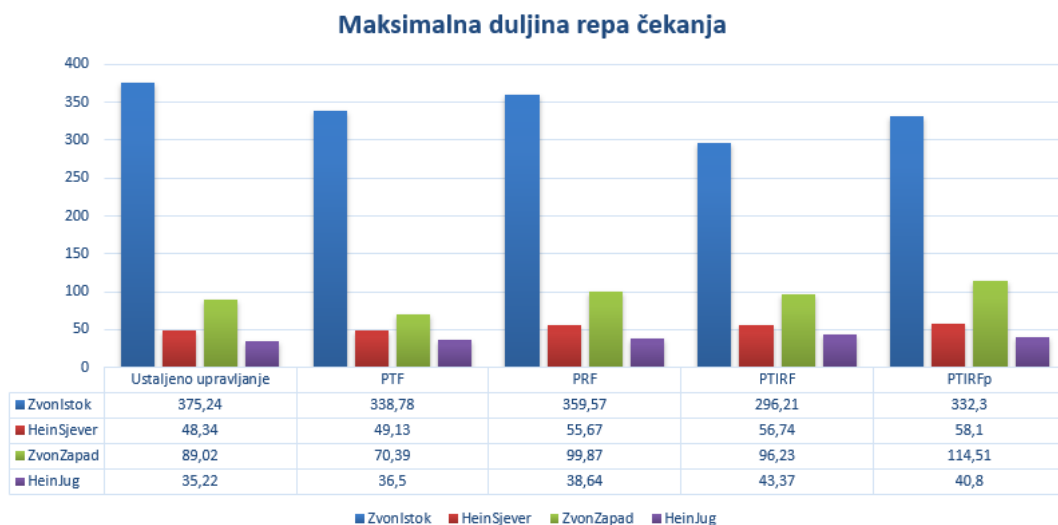




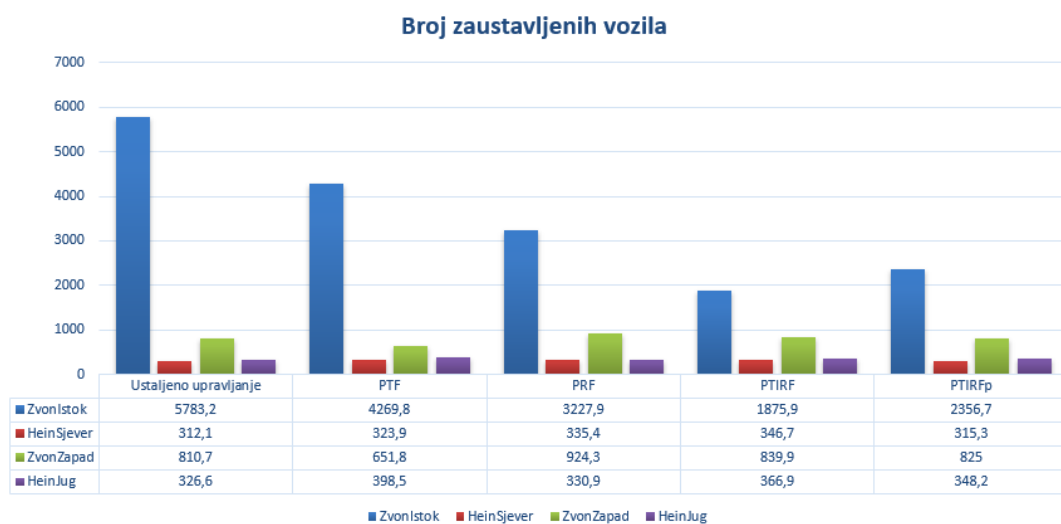
Grafikon 3: Broj zaustavljanja vozila za 1. prometni scenarij



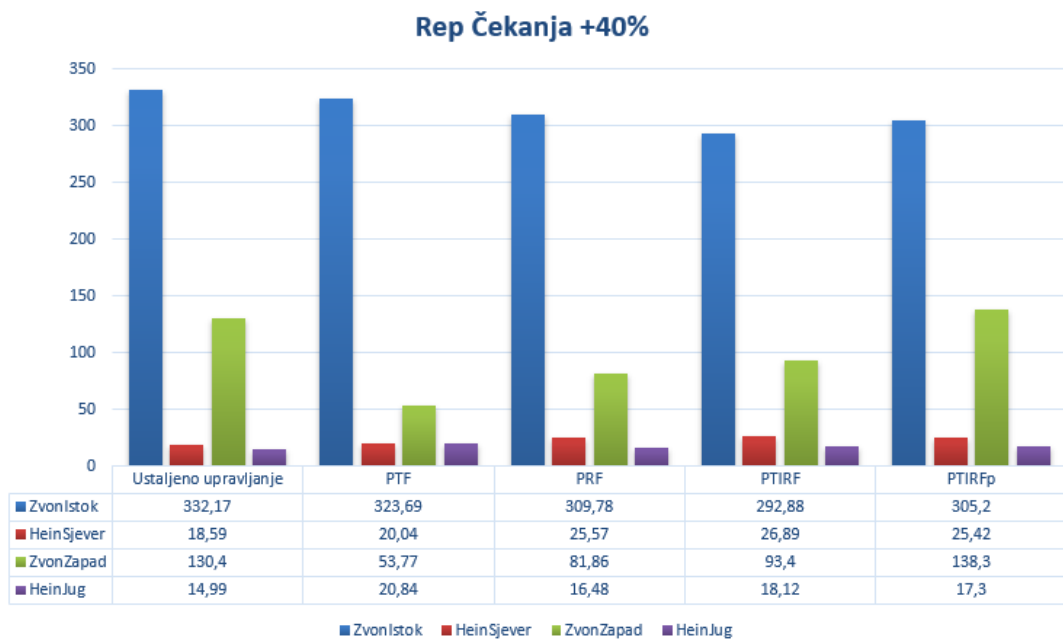
Grafikon 4: Rep čekanja za 2. prometni scenarij



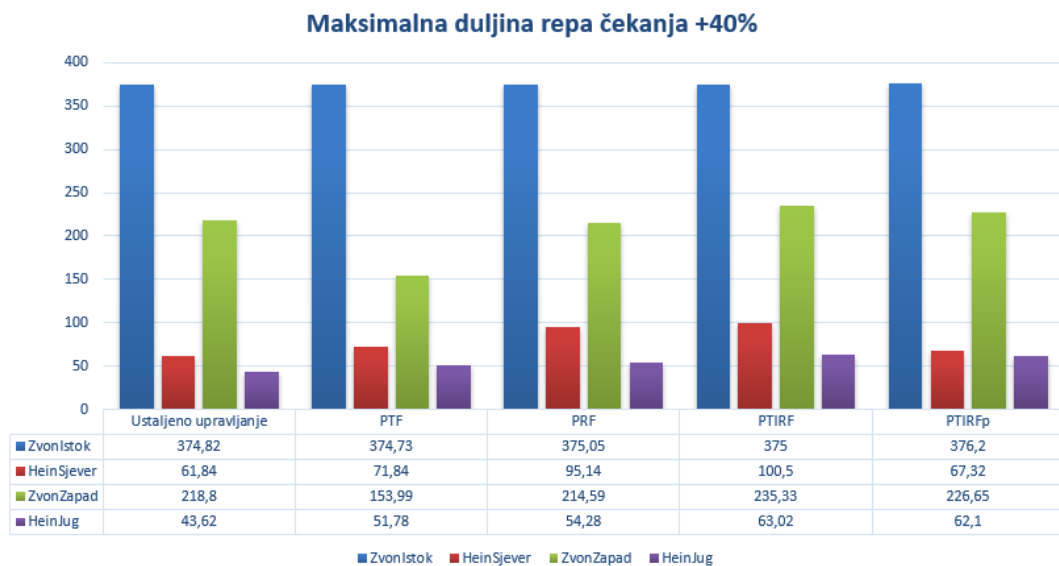
Grafikon 5: Maksimalni rep čekanja za 2. prometni scenarij



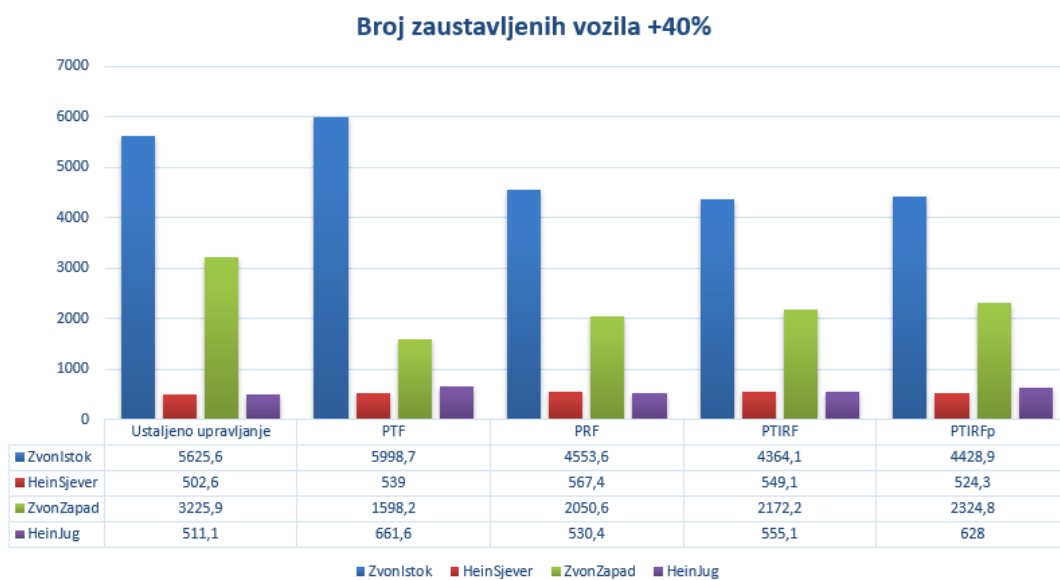
Grafikon 6: Broj zaustavljanja vozila za 2. prometni scenarij



Grafikon 7: Rep čekanja za 3. prometni scenarij



Grafikon 8: Maksimalni rep čekanja za 3. prometni scenarij



Grafikon 9: Broj zaustavljanja vozila za 3. prometni scenarij

## 7. Zaključak

Razvoj adaptivnih sustava upravljanja semaforiziranim raskrižjima započeo je još 70-tih godina prošlog stoljeća kad je postajala potreba za novim tehnološkim rješenjima. Od tada su se pokazali kao jako dobro rješenje u rješavanju stvarnovremenih prometnih situacija i prometnih zahtjeva. Najveći nedostaci ili prepreke adaptivnih sustava su povećana početna ulaganja za razvoj infrastrukture i implementaciju algoritma za upravljanje prometom, te veći troškovi održavanja infrastrukture. Iako su početna ulaganja velika u odnosu na klasična ustaljena upravljanja, adaptivni sustavi pokazuju veliku prilagodljivost okolini kada su u pitanju velike promjene u opterećenjima sustava. Prometna opterećenja se dinamički mijenjaju kroz kratke periode vremena (svakodnevni vršni sati), pa na određenim dijelovima gradova dolazi do velikih prometnih zagušenja koje ustaljeni signalni planovi ne mogu sami riješiti. Zbog toga se isplati ulagati u novije sustave upravljanja koji su prilagodljivi svojoj prometnoj okolini i mogu podnijeti puno veća prometna opterećenja što govori da su opravdana ulaganja u takve sustave kada se gleda odnos uloženog i vraćenog. S obzirom na to da su prilagodljivi, moguće je pretpostaviti da imaju puno veći period korištenja unutar gradske prometne mreže. U današnje vrijeme razvijaju se i ispituju razni složeniji sustavi kao što su kooperativna upravljanja. Kooperativna upravljanja uz primjenu adaptivnih sustava optimizira uvjete povezivanja više raskrižja u jedan veći prometni model. S takvim sustavom upravljanja povećana je prometna okolina upravljanja gradskih prometnica s mogućnošću preusmjerenja velikih prometnih opterećenja. S obzirom na to da se u današnje vrijeme tehnologija brzo razvija nastaju nova ITS rješenja koja se kroz projekt "pametni gradovi" mogu implementirati za razvoj sigurnosti na cestama i boljeg transporta uz smanjenje onečišćavanja okoliša. Ideja ovoga rada proizlazi iz toga da se uz smanjenje duljine repova čekanja povećava sigurnost na cestama uz znatne štednje u troškovima transporta kao što su smanjenje potrošnje goriva, manje onečišćenje okoliša, smanjenje vremena putovanja itd.

U ovome radu su ispitani adaptivni sustavi upravljanja izoliranog semaforiziranog raskrižja, te ispitane tri metode upravljanja sustava PTF, PRF i PTIRF uz dodatnu optimizaciju neizranih pravila PTIRF-a u pronalasku rješenja kod prometnih opterećenja koja nastaju na ulasku u raskrižje. Sve tri metode pokazale su dobre rezultate i prilagodljivost kada imamo nagle promjene prometne potražnje. Ove metode upravljanja imaju mogućnosti dodatnog razvoja i proširenja u

svrhu dodatnih testiranja i ispitivanja ponašanja unutar prometne okoline u kojima se potražuju određeni rezultati. Za budući razvoj ovih sustava potrebno je optimizirati cijeli sustav upravljanja proširenim genetskim algoritmom koji kompletno optimizira ulazne funkcije pripadnosti sustava neizrazite logike upravljanja uz izlazne funkcije pripadnosti i pravila. Također moguće je ispitati rad sustava na više od jednog raskrižja te time ispitati ponašanje sustava adaptivnog upravljanja za sve tri metode na jednoj manjoj prometnoj mreži semaforiziranih raskrižja.

## Popis literature

- [1] Bošnjak, I. *Inteligentni transportni sustavi 1*. Sveučilište u Zagrebu, Fakultet prometnih znanosti, Zagreb, 2006.
- [2] Vujić, M. Cestovna telematika - Arhitektura telematičkih sustava - predavanja. Fakultet prometnih znanosti, Zagreb, 2016.
- [3] Bošnjak, I., Badanjak, D. *Osnove prometnog inženjerstva*. Sveučilište u Zagrebu, Fakultet prometnih znanosti, Zagreb, 2005.
- [4] Jelušić N. Telematička sučelja, nastavna skripta. Fakultet prometnih znanosti, Zagreb, 2017.
- [5] Vujić, M. Cestovna telematika - Strategije i taktike upravljanja prometom. Fakultet prometnih znanosti, Zagreb, 2016.
- [6] Vogel, A., Oremović, I., Šimić, R., Ivanjko, E. Improving traffic light control by means of fuzzy logic. In *Proceedings of 60th International Symposium ELMAR-2018*, pages 51–56, Zadar, Croatia, September 2018.
- [7] Vogel, A., Oremović, I., Šimić, R., Ivanjko, E. Fuzzy traffic light control based on phase urgency. In *Proceedings of 61th International Symposium ELMAR-2019*, pages 9–14, Zadar, Croatia, September 2019.
- [8] Oremović I. Šimić R. Vogel, A. Istovremeno upravljanje vremenom trajanja i redosljedom faza signalnog plana semaforiziranog raskrižja. Rektorova nagrada, Sveučilište u Zagrebu, Zagreb, 2019.
- [9] Kapusta, B., Miletić, M., Ivanjko, E., Vujić, M. Preemptive traffic light control based on vehicle tracking and queue lengths. In *Proceedings of 59th International Symposium ELMAR-2017*, pages 11–16, Zadar, Croatia, September 2017.
- [10] Miletić, M., Kapusta, B., Ivanjko, E. Comparison of two approaches for preemptive traffic light control. In *Proceedings of 60th International Symposium ELMAR-2018*, pages 57–62, Zadar, Croatia, September 2018.

- [11] TRB. *Highway Capacity Manual 2010 (HCM2010)*. Transport research board, Washington DC, USA, 2010.
- [12] L. A. Zadeh. "Fuzzy sets". *Information and Control*. vol. 8, no. 3, pp. 338-353, June 1965.
- [13] R. Šimić. Mogućnosti primjene neizrazite logike za određivanje redoslijeda faze kod semaforiziranih raskrižja. Završni rad, Fakultet Prometnih Znanosti, Sveučilište u Zagrebu, Zagreb, Rujan 2018.
- [14] Gold, H., Ivanjko, E. Umjetna inteligencija - predavanja - Neizrazita logika - Skupovi. Fakultet prometnih znanosti, Zagreb, 2018.
- [15] Gold, H., Ivanjko, E. Umjetna inteligencija - predavanja - Genetski algoritam. Fakultet prometnih znanosti, Zagreb, 2018.
- [16] Golub, M. Genetski algoritam - Prvi dio. Fakultet elektrotehnike i računarstva, Zagreb, 2004.
- [17] Golub, M. Genetski algoritam - Drugi dio. Fakultet elektrotehnike i računarstva, Zagreb, 2004.
- [18] Qiao J., Yang N., Gao J. Two-stage fuzzy logic controller for signalized intersection. *IEEE TRANSACTIONS ON SYSTEMS, MAN, AND CYBERNETICS-PART A: SYSTEMS AND HUMANS*, VOL.41,NO.1,JANUARY 2011.
- [19] COM Technical Overview. <https://docs.microsoft.com/en-us/windows/win32/com/com-technical-overview> pristupljeno: rujan 2020.
- [20] Scikit fuzzy documentation. <https://scikit-fuzzy.readthedocs.io/en/latest/> pristupljeno: rujan 2020.
- [21] Deap documentation. <https://deap.readthedocs.io/en/master/> pristupljeno: rujan 2020.
- [22] Vujić, M. Sustav dinamičkih prioriteta za vozila javnog gradskog prijevoza u automatskom upravljanju prometom. Doktorska disertacija, Fakultet prometnih znanosti, Sveučilište u Zagrebu, 2013.



## Popis ilustracija

1	Promjena trajanja zelenog pojma . . . . .	7
2	Ustaljeni signalni plan raskrižja Zvonimirova-Heinzelova [8] . . . . .	8
3	Dvostruka prstenasta struktura raskrižja Zvonimirova-Heinzelova [8] . . . . .	8
4	Prikaz izrazitih skupova [14] . . . . .	10
5	Prikaz izrazitih skupova [14] . . . . .	11
6	Neizrazita logika sustava PRF-a [8] . . . . .	14
7	Funkcije pripadnosti za ulazne varijable PTF <sub>z</sub> -a . . . . .	14
8	Funkcije pripadnosti za ulazne varijable PRF <sub>z</sub> -a . . . . .	15
9	Rad adaptivne metode upravljanja PTF-a . . . . .	17
10	Rad adaptivne metode upravljanja PRF-a . . . . .	18
11	Rad adaptivne metode upravljanja PTIRF-a . . . . .	19
12	Osnovni rad genetskog algoritma [15] . . . . .	20
13	Osnovni vrste selekcija [15] . . . . .	22
14	Križanje s $n$ -točaka prekida [15] . . . . .	23
15	Trokutasta funkcija pripadnosti . . . . .	25
16	Trapez funkcija pripadnosti . . . . .	26
17	Prikaz COM sučelja između Pythona i VISSIMA . . . . .	27
18	Prometni model raskrižja ulice kralja Zvonimirova i Heinzelove ulice . . . . .	28
19	Ustaljeni signalni plan . . . . .	29

## Popis tablica

1	PRIMJER STANJA IZRAZITE LOGIKE [14] . . . . .	10
2	PRIMJER STANJA NEIZRAZITE LOGIKE [14] . . . . .	11
3	IZVADAK NEIZRAZITIH PRAVILA 33.-48. [8] . . . . .	12
4	PROMETNA POTRAŽNJA . . . . .	29

## Popis grafikona

1	Rep čekanja za 1. prometni scenarij . . . . .	30
2	Maksimalni rep čekanja za 1. prometni scenarij . . . . .	30
3	Broj zaustavljanja vozila za 1. prometni scenarij . . . . .	32
4	Rep čekanja za 2. prometni scenarij . . . . .	32
5	Maksimalni rep čekanja za 2. prometni scenarij . . . . .	33
6	Broj zaustavljanja vozila za 2. prometni scenarij . . . . .	33
7	Rep čekanja za 3. prometni scenarij . . . . .	34
8	Maksimalni rep čekanja za 3. prometni scenarij . . . . .	34
9	Broj zaustavljanja vozila za 3. prometni scenarij . . . . .	35



Sveučilište u Zagrebu  
Fakultet prometnih znanosti  
10000 Zagreb  
Vukelićeva 4

## IZJAVA O AKADEMSKOJ ČESTITOSTI I SUGLASNOST

Izjavljujem i svojim potpisom potvrđujem kako je ovaj \_\_\_\_\_ diplomski rad  
isključivo rezultat mog vlastitog rada koji se temelji na mojim istraživanjima i oslanja se na  
objavljenu literaturu što pokazuju korištene bilješke i bibliografija.

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


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

Svojim potpisom potvrđujem i dajem suglasnost za javnu objavu \_\_\_\_\_ diplomskog rada  
pod naslovom **ADAPTIVNO UPRAVLJANJE IZOLIRANIM SEMAFORIZIRANIM**  
**RASKRIŽJEM PRIMJENOM NEIZRAZITE LOGIKE**

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

U Zagrebu, 10.9.2020

Student/ica:

  
\_\_\_\_\_  
(potpis)