

# Proširenje neizrazitog adaptivnog upravljanja semaforiziranim raskrižjem prioritetima prolaska vozila žurnih službi

---

Oremović, Izidor

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://um.nsk.hr/um:nbn:hr:119:392261>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2025-03-29**



Repository / Repozitorij:

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



**SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET PROMETNIH ZNANOSTI**

**Izidor Oremović**

**PROŠIRENJE NEIZRAZITOG ADAPTIVNOG UPRAVLJANJA  
SEMAFORIZIRANIM RASKRIŽJEM PRIORITETIMA  
PROLASKA VOZILA ŽURNIH SLUŽBI**

**DIPLOMSKI RAD**

**Zagreb, 2020.**

Zagreb, 31. siječnja 2020.

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

## DIPLOMSKI ZADATAK br. 5492

Pristupnik: **Izidor Oremović (0135237973)**  
Studij: **Inteligentni transportni sustavi i logistika**  
Smjer: **Inteligentni transportni sustavi**

Zadatak: **Proširenje neizrazitog adaptivnog upravljanja semaforiziranim raskrižjem  
prioritetima prolaska vozila žurnih službi**

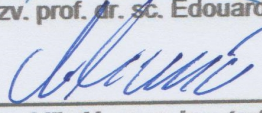
### Opis zadatka:

Adaptivnim upravljanjem signalnim planovima semaforiziranih raskrižja moguće je podići njihovu razinu uslužnosti te dati prioritet određenim skupinama vozila. Pri tome upravljanje signalnim planovima mora biti sposobno reagirati na trenutne zahtjeve prometne potražnje adaptacijom trajanja i redoslijeda pojedinih faza. Poseban slučaj predstavljaju vozila žurnih službi kojima je potrebno dati prioritet prolaska kroz raskrižje uz minimiziranje negativnog utjecaja na ostala vozila. U radu je potrebno proširiti postojeći neizraziti upravljački sustav na način da se u adaptivno mijenjanje trajanja redoslijeda i trajanja pojedinih faza može uključiti i prioritet prolaska vozila žurnih službi, ispitati mogućnost optimizacije kreiranih neizrazitih pravila te simulacijski ispitati postignutu razinu uslužnosti za odabrano izolirano raskrižje.

Mentor:

Predsjednik povjerenstva za  
diplomski ispit:

  
\_\_\_\_\_  
izv. prof. dr. sc. Edouard Ivanjko

  
\_\_\_\_\_  
Mladen Miletic, mag. ing. traff. (komentor)

Sveučilište u Zagrebu  
Fakultet prometnih znanosti

## **DIPLOMSKI RAD**

**PROŠIRENJE NEIZRAZITOG ADAPTIVNOG UPRAVLJANJA  
SEMAFORIZIRANIM RASKRIŽJEM PRIORITETIMA  
PROLASKA VOZILA ŽURNIH SLUŽBI**

**EXTENSION OF FUZZY ADAPTIVE TRAFFIC SIGNAL  
CONTROL WITH PREEMPTION FOR EMERGENCY  
VEHICLES**

Mentor: izv. prof. dr. sc. Edouard Ivanjko  
Komentor: Mladen Miletić, mag. ing. traff.

Student: Izidor Oremović  
JMBAG: 0135237973

Zagreb, srpanj 2020.

# Zahvale

Zahvaljujem se mentoru izv. prof. dr. sc. Edouardu Ivanjku na danim savjetima, smjernicama i strpljenju. Zahvaljujem se Mladenu Miletiću, mag. ing. traff. te Borni Kapusti, mag. ing. traff. na pomoći prilikom izrade ovog rada te Robertu Šimiću, bacc. ing. traff. i Alanu Vogelu, bacc. ing. traff. na suradnjama koje su dovele do ovoga rada. Zahvaljujem se i svojim prijateljima, obitelji i djevojci na potpori.

# Sažetak

**Naslov:** Proširenje neizrazitog adaptivnog upravljanja semaforiziranim raskrižjem prioritetima prolaska vozila žurnih službi

Broj vozila u optičaju je diljem svijeta u konstantom rastu, no prometna infrastruktura se u većini slučajeva ne može prilagođavati tom rastu fizičkim preinakama u veličini. Iz tog razloga je potrebno razvijati inteligentna rješenja koja mogu iskoristiti postojeću infrastrukturu na optimalan način. U tome je sadržana i ideja adaptivnog upravljanja semaforiziranim raskrižjima. U upravljanju prometom često postoji potreba za ispunjavanjem više ciljeva, što je slučaj i s ovim radom u kojemu je cilj bio izraditi neizraziti sustav adaptivnog upravljanja raskrižjem koji će umanjiti vrijeme putovanja svih vozila te pružiti prioritetni prolazak za vozila žurne službe. U radu je izrađen neizraziti upravljački sustav za adaptivno upravljanje signalnim planovima. Utjecaj na signalni plan je u vidu promjene redoslijeda faza i njihovog trajanja. U upravljački sustav je također ugrađena i osjetljivost na blizinu vozila žurne službe sa ciljem da propusti to vozilo pomoću intervencija na signalnom planu. Upravljački sustav je dodatno optimiran genetskim algoritmom kako bi se dodatno umanjilo vrijeme koje sva vozila i vozila žurne službe provode putujući kroz prometnu mrežu. Rad upravljačkog sustava je testiran u mikroskopskom prometnom simulatoru PTV VISSIM te je sami upravljački sustav izrađen u programskom paketu MATLAB. Evaluacija rada sustava je pokazala da su ispunjeni ciljevi optimizacije te da upravljački sustav uspješno smanjuje prosječne duljine repova čekanja i vremena putovanja vozila.

**Ključne riječi:** Inteligentni transportni sustavi, semaforizirano raskrižje, signalni plan, neizrazita logika, genetski algoritam, prioritet prolaska.

# Abstract

**Title:** Extension of Fuzzy Adaptive Traffic Signal Control with Preemption for Emergency Vehicles

The number of vehicles in circulation around the world is continuously increasing, but the traffic infrastructure mostly cannot adapt to this increase with physical changes in size. Thus, it is necessary to develop intelligent solutions that can optimally use the existing infrastructure. That is the idea of adaptive traffic control. In traffic management, there is often a need to meet multiple objectives, as was the case with this work. This thesis aims to develop a fuzzy adaptive signal controller that can reduce the travel time of all vehicles and provide priority of passage to emergency vehicles. A fuzzy control system is designed for adaptive control of signal programs. The impact on the signal program is given in the form of a change in the order of the signal phases and their corresponding duration. The controller also has a built-in sensitivity to the proximity of the emergency service vehicle to give the right to pass to that vehicle employing signal program interventions. The controller is further optimized by a genetic algorithm to reduce the time that all vehicles and emergency vehicles spend traveling through the traffic network. The operation of the fuzzy signal controller was tested in the microscopic traffic simulator PTV VISSIM and the controller itself was implemented in the software package MATLAB. The evaluation of the system's operation showed that the optimization goals were met and that the fuzzy control system successfully reduced the average queue lengths and vehicle travel times.

**Keywords:** Intelligent Transportation Systems, signalized intersection, signal program, fuzzy logic, genetic algorithm, traffic signal preemption



# Sadržaj

<b>1. Uvod</b>	<b>1</b>
<b>2. Opis metoda adaptivnog upravljanja semaforiziranim raskrižjima</b>	<b>4</b>
2.1. Metode upravljanja prometnom potražnjom . . . . .	5
2.1.1. Promjena trajanja faze . . . . .	6
2.1.2. Promjena redoslijeda faze . . . . .	7
2.2. Metode upravljanja prioritetom prolaska . . . . .	8
<b>3. Primjena neizrazite logike i genetskog algoritma u upravljanju signalnim planovima</b>	<b>10</b>
3.1. Neizrazita logika . . . . .	11
3.1.1. Funkcije pripadnosti . . . . .	11
3.1.2. Neizrazita pravila . . . . .	13
3.2. Genetski algoritam . . . . .	14
3.2.1. Kriterijska funkcija i selekcija . . . . .	15
3.2.2. Križanje . . . . .	18
3.2.3. Mutacija . . . . .	19
3.3. Primjena u upravljanju signalnim planovima . . . . .	20
<b>4. Implementacija neizrazitog upravljačkog sustava s uključenim prioritetima</b>	<b>22</b>
4.1. Sustav za promjenu redoslijeda faza . . . . .	24
4.2. Sustav za promjenu trajanja faza . . . . .	25
<b>5. Optimizacija pravila sustava neizrazitog upravljanja</b>	<b>28</b>
5.1. Kôdiranje neizrazitih pravila i funkcija pripadnosti . . . . .	29
5.2. Određivanje kriterijske funkcije . . . . .	31
<b>6. Simulacijska provjera</b>	<b>33</b>
6.1. Simulacijski model i scenariji . . . . .	33
6.2. Postavke simulacije i optimizacije . . . . .	35



6.3. Analiza rezultata . . . . .	36
6.3.1. Analiza scenarija 1 . . . . .	37
6.3.2. Analiza scenarija 2 . . . . .	37
6.3.3. Analiza scenarija 3 . . . . .	38
6.3.4. Analiza scenarija 4 . . . . .	39
6.3.5. Analiza scenarija 5 . . . . .	40
6.3.6. Analiza scenarija 6 . . . . .	41
6.3.7. Zbirni rezultati . . . . .	41
<b>7. Zaključak</b>	<b>46</b>
<b>Popis literature</b>	<b>48</b>
<b>Popis ilustracija</b>	<b>51</b>
<b>Popis tablica</b>	<b>52</b>
<b>Popis grafikona</b>	<b>53</b>

# 1. Uvod

Potreba za inteligentnim upravljanjem prometom se javlja s pojavom semafora kao sredstva za upravljanje prometnim tokovima. U tom trenutku se pojavio problem vezan uz donošenje odluke u kojem trenutku i kojem prometnom toku dopustiti pravo prolaska kroz raskrižje. U to vrijeme kada su semafori ustvari bili još mehanički i malo nalik na one koje danas poznajem je rješavanje ovog problema bilo lakše nego danas. Jedan od glavnih razloga zašto je to tako je zbog male količine vozila koja je bila u opticaju u to doba. Kroz godine se konstantno povećava broj vozila na prometnicama, ali je i tehnologija prometa donedavno uspješno pratila taj trend s naprecima u vidu stvaranja novih oblika raskrižja, novih regulacija prometa, no i napredaka u vidu inteligentnog upravljanja semaforskim uređajima.

Na ideji stvaranja pametnog prometnog sustava su nastali Inteligentni Transportni Sustavi (ITS) kao grana tehnologije prometa. Prema [1] ITS predstavljaju "kritičnu ideju" koja mijenja načine funkcioniranja i strukturiranja prometnog odnosno transportnog sustava. Ta definicija se odnosi na fundamentalnu promjenu u prometnom sustavu koja dolazi s ITS-om, a to je digitalizacija cjelokupnog prometnog sustava. Ta pojava se može promatrati dvojako. Iz perspektive sakupljanja prometnih podataka u idealnom sustavu je moguće sakupiti sve relevantne faktore koji opisuju prometni sustav do najniže razine, odnosno do razine vozila pa čak i do razine samog vozača. U drugu ruku s dostupnošću svih prometnih podataka u digitalnom obliku i prometne infrastrukture, kojom se može digitalno upravljati, postavlja se mogućnost vođenja sustava na optimalan način. No u stvarnosti nisu dostupni svi prometni podatci i često sama infrastruktura nije dovoljno sofisticirana za napredne upravljačke pristupe te je potrebno s ograničenjima razvijati rješenja na prometne probleme. Razlog zašto uopće podizati ljestvicu te tražiti inteligentnija rješenja i težiti tom savršenom sustavu sa sveopćom dostupnošću podataka leži u značajnom utjecaju prometnog sustava na ljudski život. Na području EU je 2016. godine u prometnim nesrećama preminula 25.651 osoba, a ozljeđenih je bilo 1.099.032 te je procijenjeno da na svaku smrtno stradalu osobu dolazi 4 osobe s trajnim oštećenjima, 8 s ozbiljnim ozljedama te 50 s lakšim ozljedama [2]. Te iste godine je na razini EU u gužvi stanovnik Ujedinjenog Kraljevstva u prosjeku proveo 45,62 sati (što je skoro 2 cijela dana), a Hrvatskoj u prosjeku 23,72 sati proveo u gužvi [3]. Emisije stakleničkih plinova su 2014. godine u EU bile za 20%

više od vrijednosti iz 1990. godine te su putnički automobili doprinosili s 44%, a teretna vozila i autobusi s 18% u transportnom sektoru [4].

Jedno od područja primjene ITS-a je u upravljanju semaforiziranim raskrižjima. Većina postojećih semaforskih uređaja funkcionira pomoću ustaljenih signalnih planova. Odnosno radi se o signalnim planovima koji su predodređeni za neko doba dana ili dan u tjednu. Kod ovog pristupa upravljanju postoji prostor za nadogradnju. Prometni uvjeti nisu uvijek isti, promet je stohastičke prirode i može se ponašati nepredvidivo, te je potrebno upravljati raskrižjem prema trenutnim potrebama, odnosno adaptivno. Na taj način je moguće voditi prometne tokove na primjereniji način kako bi se smanjili repovi čekanja i vremena putovanja što izravno utječe na količinu stvorenih stakleničkih plinova te vrijeme koje čovjek provodi u gužvi. Osim toga, s inteligentnim upravljanjem raskrižja je moguće zadovoljiti i drugi cilj kao što je davanje prioriteta vozilima žurnih službi ili Javnog Gradskog Prijevoza (JGP). Važnost mogućnosti davanja prioriteta tim vozilima dolazi iz njihovog značaja za cijelo društvo. Ako se govori o žurnim službama, smanjenje vremena putovanja vozila hitne pomoći izravno utječe na vjerojatnost spašavanja neke osobe što vrijedi i za vatrogasna vozila i policijska vozila. U drugu ruku davanje prioriteta vozilima javnog gradskog prijevoza u pravilu ne utječe na spašavanje ljudskih života, ali ima velik značaj jer agregira veću količinu putnika te pridonosi smanjenju broja vozila na prometnicama.

Jedan od pristupa upravljanju semaforiziranim raskrižjima pomoću mjerenih podataka o ponašanju prometnih tokova je izmjena signalnih planova. Adaptivnim upravljanjem je moguće mijenjati redoslijed propuštanja prometnih tokova te vrijeme koje im je dano za prolazak, odnosno redoslijed signalnih faza i njihovo trajanje. Rješavanje ovog problema zahtjeva znanje prometnog stručnjaka koji barata iskustvom potrebnim da procjeni kako podesiti sustav da pravedno poslužuje sve prometne tokove, a da sustav i skraćuje duljine repova čekanja i vremena putovanja. Ovo znanje je moguće digitalizirati pomoću neizravne logike. Ona je alat za digitaliziranje znanja izrečenoga lingvističkim izrazima koji su neodređeni. Ovisno o broju ulaznih i izlaznih varijabli te unutarnje logike takvog sustava, njegovo podešavanje može postati složeno. Iz toga se javlja potreba za dodatnim optimiranjem takvog sustava pomoću genetskog algoritma. Radi se algoritmu koji na temelju određenog cilja i evolucijski inspiriranih unutarnjih procesa generira rješenja na problem zadan tim ciljem.

Cilj ovog diplomskog rada je razviti i optimirati neizravni sustav za promjenu redoslijeda i trajanja signalnih faza koji će u odnosu na ustaljeno upravljanje signalnim planovima smanjiti

vrijeme putovanja svih vozila te davati prioritet vozilima žurne službe. Rad je podijeljen u sedam poglavlja. U drugom poglavlju su opisane metode adaptivnog upravljanja raskrižjima te metode za davanje prioriteta prolaska. U trećem poglavlju je dan uvod u neizrazitu logiku i genetski algoritam te je dan kratak pregled znanstvenih radova koji su se bavili sličnom problematikom. U četvrtom poglavlju je izloženo kako su implementirani neizraziti upravljački sustavi za izmjenu signalnog plana. U petom poglavlju je prikazan proces optimizacije tih upravljačkih sustava genetskim algoritmom. U šestom poglavlju je dan korišteni simulacijski model za evaluaciju i optimizaciju, razne postavke te analiza rezultata rada predloženih upravljačkih sustava. U posljednjem poglavlju je dan zaključak s prijedlozima za nastavak rada.

## 2. Opis metoda adaptivnog upravljanja semaforiziranim raskrižjima

Ustaljeno upravljanje semaforiziranim raskrižjem odnosi se na ustaljene karakteristika signalnog plana koji se odvija. Kod takve vrste upravljanja, signalni plan je unaprijed podešen za određeno doba dana i/ili dan u tjednu. Takva vrsta upravljanja zasniva se na prometnim studijama samog raskrižja kojima se pokušava utvrditi optimalni signalni plan za niz zadanih uvjeta. Ustaljeno upravljanje je učinkovito u područjima u kojima ne dolazi do znatnih odstupanja prometne potražnje od uobičajenih razina za to područje. Za razliku od ustaljenog, adaptivno upravljanje semaforiziranim raskrižjem se temelji na aktivnom praćenju i predviđanju prometne potražnje. Sustavi adaptivnog upravljanja mogu biti izvedeni na više razina s obzirom na obuhvat. Moguće je pokriti samo jedno raskrižje, više raskrižja u nizu (koridor), dio grada i cjeli grad. Neki od značajnijih poznatih komercijalni sustavi adaptivnog upravljanja su: SCOOT (engl. Split Cycle and Offset Optimisation Technique), SCATS (engl. Sydney Coordinated Adaptive Traffic System), UTOPIA (engl. Urban Traffic Optimisation by Integrated Automation), RHODES (engl. Real-time Hierarchical Optimized Distributed Effective System) i InSync. Prema [5] razni adaptivni sustavi upravljanja prometom su pokazali iduće rezultate:

1. Smanjenje vremena putovanja od 9 do 19 posto;
2. Povećanje srednje brzine od 7 do 22 posto;
3. Smanjenje potrošnje goriva od 2 do 7 posto;
4. Smanjenje emisija štetnih plinova do 17 posto
5. Smanjenje broja stajanja od 23 do 34 posto;
6. Smanjenje broja nesreća do 28 posto.

Središnje komponente adaptivnog sustava upravljanja semaforiziranim raskrižjem čine signalno upravljačko računalo te detektori prometa. Signalno upravljačko računalo je ona komponenta koja obrađuje podatke prikupljene osjetilima o prometnoj potražnji te rješava

problem određivanja optimalnog signalnog plana za neki period. Adaptivno upravljanje je moguće slobodno shvatiti iz perspektive implementacije različitih rješenja. U ovom radu su pokrivene dvije komponente takvoga sustava. Radi se o upravljanju cjelokupnom prometnom potražnjom i upravljanjem prioriteta prolaska vozila.

Adaptivno upravljanja semaforiziranim raskrižjima je u uobičajenim uvjetima rada potraga za onom konfiguracijom signalnog plana koji će raditi u korist svih prometnih tokova. Odnosno radi se o aktivnom minimiziranju prometnih parametara kao što su vrijeme čekanja, duljina repova čekanja i vrijeme putovanja pomoću manipulacija signalnim planovima.

Prioritet prolaska se odnosi na potrebu za propuštanjem, prioritiziranjem, određenih prijevoznih sredstava kako bi ona što prije prošla kroz raskrižje. Radi se o vrlo specifičnoj mjeri koja se osigurava samo za vozila od važnosti kao što su vozila žurnih službi ili vozila javnog gradskog prijevoza. Kako su raskrižja mjesta križanja više prometnih tokova, ovakvo djelovanje može prouzročiti povećanje repova čekanja kod prometnih tokova u kojima se ne nalaze vozila s prioritetom.

Oba spomenuta pristupa se u najmanju ruku oslanjaju na podatke o količini prometnog toka i duljina repova čekova na pojedinim privozima. Međutim, postoji niz drugih prometnih veličina koje se mogu koristiti za ocjenjivanje opterećenja prometnica i učinka upravljanja na promet kao što su: gustoća prometnog toka, brzina prometnog toka, vremenski interval slijeđenja vozila u toku, razmak slijeđenja vozila u toku i mnoge druge izvedene veličine. Također je potrebno uzeti u obzir i same konstrukcijske parametre raskrižja i zaštitna međuvremena kod križanja prometnih tokova. Za davanje prioriteta se u prostor parametara unosi i lokacija samog vozila koje zahtjeva prioritet, njegova udaljenost od raskrižja i broj vozila koji ga dijeli od raskrižja. To su dakle parametri odluke koji se obrađuju u pojedinačnim metodama.

## **2.1. Metode upravljanja prometnom potražnjom**

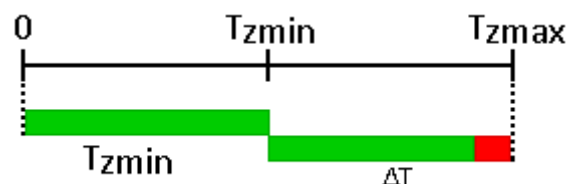
Signalni plan jest raspored propuštanja prometnih tokova na raskrižju. Njime je dakle određena i količina vozila koja će proći kroz raskrižje u nekom razdoblju. Metode upravljanja prometnom potražnjom imaju za cilj maksimizirati broj vozila koji prolazi raskrižjem, bez pratećih negativnih posljedica kao što su: narušavanje sigurnosti u prometu, pretjerano zanemarivanje jednih prometnih tokova u korist drugom itd. Kako se signalni plan sastoji od više faza koje su definirane svojim trajanje i prometnim tokovima koji su u istoj aktivni, ova metoda upravljanja

se oslanja na trajanje i raspored signalnih faza.

### 2.1.1. Promjena trajanja faze

Postoje dva generalna pristupa promjeni trajanja faze, određivanje trajanja faze prije njenog izvođenja te promjena trajanja za njenoga izvođenja. U oba slučaja je potrebno definirati početne vrijednosti. Radi se o određivanju trajanja faze te njenoj minimalnoj i maksimalnoj vrijednosti, tj. trajanja zelenog svjetla. U struci ne postoji konsenzus o jednoj ispravnoj metodologiji za računanje tih vremena, već postoje preporuke. Na razini države, tj. institucije unutar države koja se bavi regulacijom prometnih standarda postoje određene preporuke za računanje potrebnog trajanja signalne faze i ciklusa. Minimalno i maksimalno trajanje zelenog svjetla je različito za svako raskrižje i ovisi o usmjerenju individualnog prometnog toka. Kao generalne okvirne vrijednosti za minimalno trajanje može se uzeti od 2 do 15 sekundi, a za maksimalno od 15 do 80 sekundi [6].

Promjena trajanja signalne faze označava promjenu trajanja zelenog signalnog pojma. Postoji više pristupa manipulaciji vremena trajanja signalne faze. Jedan od pristupa, onaj koji je korišten u ovom radu i prethodnim radovima autora, se temelji na odabranoj referentnoj vrijednosti trajanja signalne faze na kojoj se zatim vrši ispravljanje [7], [8], [9]. Za tu referentnu vrijednost se uzima vrijednost između minimalnoga i maksimalnog trajanja faze, po mogućnosti izračunata prema jednoj od metodologija za ustaljene signalne planove. Nad tom je vrijednosti zatim moguće činiti promjene u vidu skraćivanja i produljenja. Iznos za koji skratiti ili produljiti fazu je u ovisnosti s trenutnom prometnom situacijom. Ovaj pristup pruža mogućnost određivanja trajanja faze netom prije njenog početka, prije izvršavanja samog ciklusa ili u prethodno definiranom trenutku (vidi sliku 1). Prilagođavanje signalnog plana na ovaj način omogućava proračunavanje signalnog plana u intervalima u trajanju po želji.

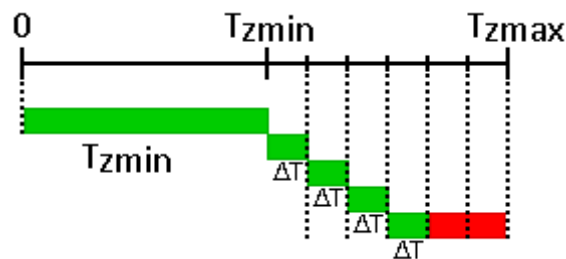


Slika 1: Promjena trajanja signalne faze prije izvođenja [8]

Definiranje tog referentnog vremena kao minimalnoga vremena koliko može uopće trajati faza čini temelj drugog pristupa promjene trajanja faze. Iz te perspektive je moguće samo



povećavati iznos trajanja faze do dostizanja njene maksimalne vrijednosti. Radi se o iterativnom procesu koji nakon svakog produljenja evaluira parametre odluke kako bi utvrdio da li je postignuto željeno stanje sustava (vidi sliku 2). Ako se prometni sustav nalazi unutar željenih veličina faza se prekida i slijedi iduća signalna faza u planu. U drugom slučaju, ako se sustav ne nalazi unutar željenih veličina i još nije dosegnuto predodređeno maksimalno trajanje faze, faza se produljuje za određeni vremenski period do iduće evaluacije kada se proces ponavlja. Odabir iznosa tog vremenskog perioda je proizvoljan, u već spomenutom sustavu za adaptivno upravljanje SCOOT koristi se interval od 1 do 4 sekunde ovisno o potrebi [10]. U prijašnjem radu autora ([8]) se interval od 2 sekunde pokazao kao dobra vrijednost, što je potvrđeno smanjenjem vremena putovanja od 3 do 26 posto u različitim prometnim scenarijima.

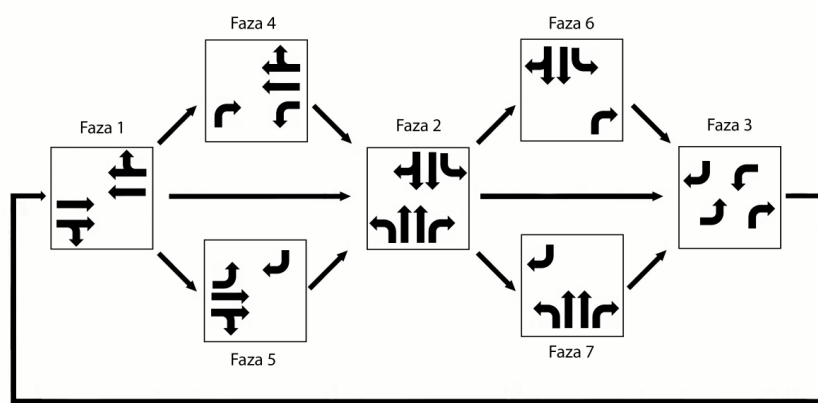


Slika 2: Promjena trajanja signalne faze tokom izvođenja [8]

### 2.1.2. Promjena redoslijeda faze

Uz moguću izmjenu trajanja pojedinih faza, također je moguće i mijenjati njihov poredak u signalnom planu. Signalna faza određuje koji prometni tokovi imaju pravo prolaska u zadanom vremenu. Kombinacija prometnih tokova unutar faza i njihov redoslijed prati iskustvene preporuke dane kroz standarde [11]. Također je važno naglasiti da ne postoji samo jedan ispravan način kako se stvaraju signalni planovi, kako u vidu trajanja tako i u vidu rasporeda faza. Svako raskrižje je različito u svojim dimenzijama, rasporedu i broju privoza, drugim konstrukcijskim elementima i samim prometnim opterećenjima. Sve ove stavke diktiraju potencijalni izgled signalnog plana. Ni jedan raspored faza i njihovog trajanja u signalnom planu ne može u potpunosti pokriti sve potencijalne otežavajuće okolnosti koje postoje u toj jedinstvenoj situaciji [12]. Uz standardne oblike redoslijeda faza poznate iz ustaljenih signalnih planova poznajemo i drugačije forme kao što je struktura NEMA (engl. National Electronic Manufacturer Association). Struktura NEMA podrazumijeva kombinaciju faza koje se obavezno izvode svaki ciklus bez iznimke te onih koje su neobavezne u svom izvođenju te potpuno ovise o razini opterećenja privoza [13].

Radi se o prstenastoj strukturi signalnih faza čiji se segmenti aktiviraju u ovisnosti o parametrima odluke koji predstavljaju prometnu potražnju. Ovakva struktura omogućava potpuno novu dinamiku kod upravljanja radom raskrižja. Osnovnu strukturu čine dva prstena od kojih se svaki sastoji od dvije obavezne i dvije neobavezne faze. Finalni signalni plan takve strukture može sadržavati 4, 5 ili 6 signalnih faza, ovisno o aktiviranju neobaveznih faza. Na slici 3 je dan prikaz različitog aktiviranja faza. Obavezne faze su označene brojkama od 1 do 4, a neobavezne od 5 do 8. Na ovu osnovnu strukturu su moguće i varijacije. Jedna od mogućnosti je svođenje strukture na samo jedan prsten. Takav prsten bi se sastojao od dvije obavezne i dvije neobavezne faze. Također je moguće i umetanje novih faza, a mjesta predviđena za takva umetanja su između faza 2 i 3 te između faza 4 i 1. Odabir samih prometnih tokova koji sačinjavaju signalne faze je proizvoljan.



Slika 3: Prikaz prstenaste NEMA strukture [9]

## 2.2. Metode upravljanja prioritetom prolaska

Iz perspektive upravljanja gradom, neka prijevozna sredstva imaju viši društveni značaj od drugih. Ovo se prvenstveno odnosi na vozila JGP-a i vozila žurnih službi. Vozila JGP-a u ovu kategoriju spadaju zbog svojih dimenzija i kapaciteta. Jedan autobus ili tramvaj prevozi mnogo više putnika te zauzima daleko više mjesta od automobila koji je puno češći na prometnicama. Iz tog razloga kako bi se smanjilo izgubljeno vrijeme samih putnika i kako bi se smanjila potrošnja goriva, ta vozila spadaju u kategoriju iznad običnih vozila po važnosti u uređenom prometnog sustavu. Vozila žurnih službi u drugu ruku predstavljaju važne segmente sustava održavanja sigurnosti i spašavanja ljudskih života iz čega proizlazi potreba da se maksimalno skрати njihovo vrijeme prometovanja.

Dodjeljivanje prioriteta vozilima se prema [14] može promatrati kroz tri različite dimenzije. Prva dimenzija te podjele se odnosi na odziv upravljačkog sustava u odnosu na vozila koja zahtijevaju prioritet. Radi se o aktivnim i pasivnim prioritetima, aktivni prioritet se zasniva na detekcijskom sustavu koji prepoznaje da se približava vozilo koje ima prioritet te sukladno tome djeluje, a pasivni prioritet se oslanja na ustaljene karakteristike sustava koje potiču ubrzani prolazak kroz raskrižje (koridor). Druga dimenzija ove podjele opisuje utjecaj davanja prioriteta na ostatak prisutnih prometnih vozila. Dakle prema tome prioritet može biti: potpuni, djelomični i relativni. Potpuni prioritet je strategija koja teži osigurati prolazak bez kašnjenja za vozilo. Strategija djelomičnog prioriteta djeluje blaže na signalni plan s produljenjem trajanja zelenog signalnog pojma ili njegovim ranijim početkom. Kod strategije relativnog prioriteta se uzimaju u obzir svi prometni tokovi te prioritet ne mora biti dodijeljen vozilu ako bi time ostali sudionici bili značajno zakinuti. Treća dimenzija ove podjele se odnosi većinom na vozila JGP-a. Dijeli se na bezuvjetni prioritet, što znači da će vozilo uvijek biti propušteno kroz raskrižje neovisno o uvjetima i uvjetni prioritet, što znači da će vozilo tražiti prolazak samo ako trenutno kasni prema rasporedu ili u slučaju promjene linije [15].

Konkretni načini kako djelovati na signalni plan da bi se propustilo vozilo s prioritetom su većinom već spomenuti. Ako se vozilo približava raskrižju i prema procjeni sustava se nalazi na dovoljnoj blizini te se nalazi u prometnom traku unutar trenutno aktivne signalne faze, onda se ta signalna faza može produžiti. U slučaju da se vozilo približava raskrižju ili se već nalazi u repu čekanja, a ne nalazi se u prometnom traku čija je signalna faza aktivna, onda se skraćuje trajanje trenutno aktivne faze. Uz te manipulacije trajanja zelenog svjetla, postoji i mogućnost umetanja dodatne faze gdje se ona inače ne nalazi u signalnom planu. Takva umetnuta faza bi trebala trajati onoliko koliko je potrebno vozilu s prioritetom da prođe kroz raskrižje. Ova metoda se koristi kod davanja bezuvjetnog prioriteta.

### **3. Primjena neizrazite logike i genetskog algoritma u upravljanju signalnim planovima**

Izražavanje pomoću neodređenih pojmova u svakodnevnom govoru je uobičajena pojava. Korištenjem riječi poput toplo, mlako, hladno, sporo, umjereno itd. možemo na neodređen način kvantificirati neke pojave. Da bi se prenijela informacija da nije sigurno dotaknuti neku površinu jer je ugrijana na visoku temperaturu dovoljno je reći da je površina jako vruća. Na taj način u komunikaciji ne prenosimo točnu temperaturu te površine, već simboličkim izrazom obuhvaćamo određeni raspon vrijednosti. Iz toga je vidljivo da je neizrazitim pojmovima lako opisati iskustvena znanja toga tipa. Neizrazita logika se bavi procesom prevođenja takvih simboličkih izraza u numeričke vrijednosti i obratno. Iz toga proizlazi veliki potencijal njenog korištenja za digitalizaciju ljudskog znanja. Od samih početaka korištenja neizrazite logike za upravljanje procesima pokazala se mogućnost njene primjene kod rješavanja problema iz domene tehnologije prometa.

Genetski algoritam spada u kategoriju evolucijskih algoritama koji prema nazivu povlače temeljene ideje iz biološkog procesa evolucije. Radi se o heurističkoj metodi koja se koristi za rješavanje optimizacijskih problema, odnosno problema gdje se u nekom području mogućih rješenja traži ono koje najbolje zadovoljava željeni kriterij. Taj kriterij je dan kroz funkciju dobrote kojom se ocjenjuje svaka jedinka u procesu pretrage. Algoritam prati terminologiju iz teorije evolucije te se su pojmovi poput jedinka, populacija i generacija uobičajeni. Same metode kojima se postiže transformacije iz jedne jedinke u drugu, odnosno iz generacije u generaciju su također analogne onima iz teorije evolucije te su one: mutacija, selekcija i reprodukcija.

Upravljanje signalnim planovima odnosno stvaranje signalnih planova je tradicionalno neuniformni proces. Time se misli na to da je svako semaforizirano raskrižje različito među ostalom s projektantske razine, ponašanja lokalnih vozača, količine prometnog opterećenja, okoline itd. Iz toga proizlazi potreba za jedinstvenim pristupom i stvaranjem signalnih planova za svako raskrižje. U procesu stvaranja tih planova je uz sigurnosne smjernice koje se mogu donekle kvantificirati presudno i znanje i iskustvo samog inženjera prometa. Analizom svih relevantnih čimbenika na njemu je da odredi ponašanje samog raskrižja kroz signalne planove te

da time postigne što veću efikasnost rada raskrižja u svim prometnim situacijama. Segment tog znanja, onaj koji uzima u obzir parametre poput količine prometnog toka, duljine repova čekanja, vremena koje privoz provodi bez zelene faze je moguće modelirati pomoću neizrazite logike. Iako može biti koristan sam po sebi, kod tako izrađenog upravljačkog sustava postoji prostor za poboljšanjem. Jedan vid takvog poboljšanja je optimizacija neizrazitog sustava odlučivanja genetskim algoritmom. Ovo poglavlje daje pregled neizrazite logike i genetskog algoritma te se u idućem poglavlju razrađuje ideja i implementacija tih dviju metoda u spregu.

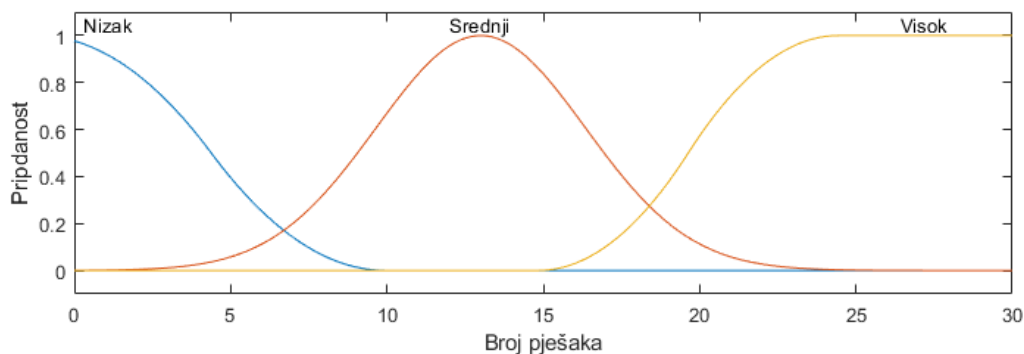
### **3.1. Neizrazita logika**

Neizrazita logika vuče svoje korijene iz teorije neizrazitih skupova koju je postavio Lofti. A. Zadeh još 1965. godine [16]. Zadeh je u tom radu uvidio u ograničenost klasičnih skupova kojima elementi ili potpuno pripadaju ili potpuno ne pripadaju. Iz toga je razvio ideju skupova čiji se elementi mogu opisati ocjenom pripadnosti što istovremeno čini klasične skupove posebnim slučajem. Ocjenu pripadnosti skupu je zatim odredio kao mjeru između nula i jedan kojom prikazujemo koliko neki član pripada skupu. Pripadnost elementa skupu je dana funkcijom pripadnosti koju formiraju ocjene pripadnosti elemenata skupu. Na temelju tih pretpostavki je Zadeh razvio i osnovne logičke operacije među neizrazitim skupovima iz čega proizlazi i neizrazita logika. Neizrazita logika je dakle logika koja djeluje kroz neizrazite vrijednosti, odnosno vrijednosti koje mogu biti djelomično istinite. Idući važan događaj u povijesti za neizrazitu logiku je pokrenut od strane Ebrahim-a Mamdani-ja. Mamdani je 1975. osmislio prvi neizraziti regulator [17]. Radilo se o regulatoru parnog stroja s dvije ulazne i dvije izlazne varijable. On je prepoznao potencijal neizrazite logike kao sredstva pomoću kojeg se lingvistički izražena pravila u određenoj formi mogu koristiti za izradu koherentne upravljačke strategije. Mamdani-jev se regulator na posljetku pokazao kao alternativa dotadašnjim regulatorima. To dostignuće je pokrenulo cjeli niz istraživanja upotrebljivosti neizrazite logike koja su se većinom odvijala u Japanu i SAD-u. Sukladno tome se pojavljuju njene razne primjene kao npr. u perilicama rublja, ventilacijskim sustavima, sustavima kočenja vlakova i dr.

#### **3.1.1. Funkcije pripadnosti**

Kako je već rečeno, osnovna ideja neizrazite logike i njenih skupova je da stanje neke varijable ne mora biti binarno, već se njena vrijednost može naći u gradijentu između binarnih

krajnosti. U tom smislu je klasična logika, koja dopušta da iskaz bude samo istinit ili samo lažan, u stvari samo posebni slučaj neizrazite logike. Pripadanje jedne vrijednosti dvama skupovima može se prikazati na primjeru određivanja broja pješaka koji čekaju kod pješačkog prijelaza. Svaka osoba donosi drugačiju procjenu o broju ljudi u grupi. Količinu ljudi koju bi netko nazvao niskom neka druga osoba može nazvati srednjom količinom. Procjene te vrste su visoko individualne te ih je teško savršeno kvantificirati. Prikaz takve procjene uz pomoć neizrazitih funkcija pripadnosti je dan na slici 4.



Slika 4: Funkcije pripadnosti za procjenu broja pješaka

Na slici se može vidjeti tri funkcije pripadnosti koje opisuju broj pješaka, to su redom: *nizak*, *srednji* i *visok*. Svaka od tih funkcija opisuje dio raspona vrijednosti broja pješaka (od 0 do njih 30), no na određenim mjestima se funkcije preklapaju. Tako recimo broj pješaka između 15 i 25 spada i u skup srednje i visoke količine pješaka. No vrijednost 16 pješaka gotovo potpuno pripada funkciji pripadnosti *srednji*, te vrlo malo funkciji pripadnosti *visoki*. U drugu ruku 20 pješaka puno manje spada u skup *srednjeg* broja pješaka, već gotovo potpuno pripada skupu *visokog* broja pješaka.

Funkcije pripadnosti mogu biti razne matematičke funkcije, neke od najčešće korištenih su: trokutna, trapezna, eksponencijalna, sigmoidna i Gaussova. Funkcije pripadnosti su opisane parametrima koji su specifični za svaki tip funkcije. Trokutna funkcija je opisana s tri parametra, trapezna s četiri, Gaussova s dva te sigmoidna također sa dva. Svaki sustav koji se oblikuje zahtjeva različit pristup, tako da je određivanje broja funkcija pripadnosti, njihovih pozicija na rasponu i njihovih oblika za opisivanje jednog neizrazitog skupa zahtjeva personalizirani proces. Te odluke se zasnivaju na znanju stručnjaka ili na bazi istraživanja koje čine ta znanja koja se opisuju neizrazitom logikom.

Tablica 1: PRIMJER NEIZRAZITIH PRAVILA U UPRAVLJANJU TRAJANJEM SIGNALNIH FAZA

No		Rep čekanja		Priljev vozila		Broj pješaka		Trajanje faze
1.	<i>ako</i>	<i>NIZAK</i>	<i>i</i>	<i>NIZAK</i>	<i>i</i>	<i>NIZAK</i>	<i>onda</i>	<i>KRATKO</i>
2.	<i>ako</i>	<i>NIZAK</i>	<i>i</i>	<i>SREDNJI</i>	<i>i</i>	<i>SREDNJI</i>	<i>onda</i>	<i>SREDNJE</i>
3.	<i>ako</i>	<i>SREDNJI</i>	<i>i</i>	<i>SREDNJI</i>	<i>i</i>	<i>SREDNJI</i>	<i>onda</i>	<i>DUGO</i>
4.	<i>ako</i>	<i>VISOK</i>	<i>i</i>	<i>VISOK</i>	<i>i</i>	<i>SREDNJI</i>	<i>onda</i>	<i>VRLO DUGO</i>

### 3.1.2. Neizrazita pravila

U vidu izrade upravljačkog mehanizma, neizraziti skupovi sami po sebi nam nisu dovoljni. Kako bi od tih skupova i funkcija pripadnosti mogli stvoriti nekakav smisleni međusobno povezani sustav ulaza i izlaza potrebno je postaviti pravila rada sustava. Ta pravila se nazivaju neizrazita pravila. Ona su ustvari pravila tipa Ako-Onda kojima se opisuju interakcija između ulaza i izlaza neizrazitog upravljačkog sustava. Primjer takvih pravila za jednostavan sustav upravljanja promjenom trajanja signalne faze dan je u tablici 1.

Neizrazita pravila povezuju stanja ulaza upravljačkog sustava s izlazima preko logičkih operacija. Neizrazite varijable se u pravilima mogu povezivati s logičkim operacijama *i* ili *ili*, te se mogu pojedinačno negirati. U tablici je dan primjer pravila za upravljanje zamišljenim sustavom ventilacije. Lijevo od riječi *onda* se nalaze ulazne vrijednosti, a desno od nje izlazne, odnosno izlazna vrijednost. Iz primjera možemo vidjeti povezanost lingvističkih izraza s prethodno raspravljanim funkcijama pripadnosti te kako njihova sinteza proizvodi rezultat. Neizrazita pravila su baza neizrazite logike, metode povezivanja lingvističkih izraza s konkretnim veličinama u nekom odnosu.

Cjelokupni proces dobivanja izlazne vrijednosti neizrazitog sustava možemo raščlaniti na tri cjeline: fuzifikacija, evaluacija pravila i defuzifikacija. Fuzifikacija je proces pretvorbe brojčanih vrijednosti ulaza sustava u odgovarajuće neizrazite vrijednosti prema zadanim funkcijama pripadnosti. Evaluacija pravila je proces zaključivanja na osnovi unesenih neizraziti vrijednosti. Defuzifikacija je proces suprotan fuzifikaciji, te označava proces pretvorbe neizrazite vrijednosti iz evaluacije pravila u brojčanu vrijednost koja se koristi za upravljanje nekim procesom.



## 3.2. Genetski algoritam

Genetski algoritam je heuristička metoda optimiranja koja dolazi iz kategorije evolucijskih algoritama. Evolucijski algoritmi se temelje na biološkom procesu evolucije. Biološka evolucija podrazumijeva promjene nasljednih karakteristika kroz generacije s težnjom prema prilagodbi okolini. Teoriju evolucije je postavio Charles Darwin u svome djelu "Postanak vrsta". Darwin je kroz svoje istraživanje primijetio da živa bića u pravilu stvaraju više potomaka od cijele njihove populacije. Prema tome bi bilo za očekivati da broj jedinki eksponencijalno raste iz generacije u generaciju, no to nije tako. Broj jedinki populacije teži ka konstantnom broju. Razlog tome leži u procesu prirodne selekcije. Jedinke koje naslijede dobra svojstva svojih roditelja preživljavaju, dok one druge ne. Sva živa bića teže ka prilagodbi uvjetima života i okolini. Proces te prilagodbe je upravo evolucija. Kako bi se neka vrsta održala, nužno je da postoji međugeneracijski prijenos dobrih svojstava. Za bolje razumijevanje je potrebno uvesti niz termina koji povezuju jedinke i njihove osobine, a to su [18]:

1. Jedinica (engl. individual): potencijalno rješenje razmatranog problema optimizacije;
2. Fenotip (engl. phenotype): značajke jedinke koje se mogu interpretirati na razini problema;
3. Genotip (engl. genotype): kôdiranje fenotipa na gene; u pravilu se primjenjuje binarno kôdiranje;
4. Kromosom (engl. chromosome): kromosom (niz ili lanac) predstavlja u području genetskog algoritma jedinku: sastoji se od gena linearno poredanih jedan iza drugoga;
5. Položaj u nizu (engl. locus): gen u nizu ima definirani položaj;
6. Populacija (engl. population): skup svih kromosoma (jedinki) iste duljine niza u generaciji;
7. Generacija (engl. generation): populacija u diskretnom trenutku.

Iz navedenoga slijedi da je generacija jedne vrste u stvari njena populacija u promatranom trenutku. Ta populacija se sastoji od jedinki, odnosno kromosoma koji se razlikuju prema kombinaciji gena od kojih se sastoje. Genotip govori o čistim informacijama koje se nalaze u genetskom kodu te je jedna od stavki u stvaranju fenotipa, odnosno vidljive karakteristike ili osobine jedinke. Promjene svojstva jedinki koje se dešavaju kod skoka iz generacije u generaciju se dešavaju zbog procesa selekcije, mutacije i križanja.

Dakle genetski algoritam je računalna primjena biološkog procesa evolucije kod procesa optimizacije odnosno za pronalaženje optimalnog rješenja zadanog problema. Optimalno rješenje jest najbolje rješenje prema korištenoj ocjeni kvalitete rješenja i danim ograničenjima [19]. Genetski algoritam promatran na taj način služi za pronalaženje globalnoga minimuma ili maksimuma neke funkcije. Rad genetskog algoritma je dan kroz idući pseudokôd dan u 1.

---

**Pseudokôd 1** Genetski algoritam [19]

**Podatci:** Generiraj slučajni skup početnih rješenja veličine  $N$

**dok** (*rješenje loše*) *ILI* (*broj iteracija < dopuštenih iteracija*) **čini**

    Selektiraj najbolja rješenja

**Primjeni genetsku operatore na odabrana rješenja uz provjeru ispravnosti novog rješenja:**

        Selekcija

        Križanje

        Mutacija

        Inverzija

**Rezultat:** Ispiši najbolje rješenje

---

Prvi korak u radu algoritma je generiranje početne populacije. No osim prepuštanja algoritmu da samostalno nasumično odabere populaciju, moguće je dati primjer jedne jedinke iz koje će se razviti druge. Petlja se započinje s tom prvom populacijom te će se ponavljati sve dok se ne ispuni jedan od dva uvjeta. Prvi uvjet ispituje za koliko je najbolje rješenje generacije bolje od prethodnih najboljih rješenja. Ako algoritam procjeni da ne postoji dovoljan napredak među generacijama, onda zaustavlja optimizaciju. Drugi uvjet ispituje da li je algoritam dostigao maksimalni broj dopuštenih generacija, ako je onda se optimizacija zaustavlja. Unutar optimizacijske petlje se pomoću genetskih operatora: selekcije, križanja, mutacije i inverzije iz trenutno populacije dobiva nova populacija.

### 3.2.1. Kriterijska funkcija i selekcija

Kako je cilj ovog algoritma pronaći rješenja koja ispunjavaju neki kriterij, taj kriterij je potrebno zadati pomoću takozvane kriterijske funkcije (engl. fitness function). Kriterijska odnosno funkcija dobrote je mjera koja ocjenjuje dobrotu jedinke prema postavljenom cilju. Određivanje funkcije dobrote je specifično za svaki pojedinačni problem. Ako se na primjer radi o pronalaženju minimuma neke matematičke funkcije, onda se kao funkcija dobrote može koristiti ta sama funkcija s određenim ograničenjima. Sposobnost algoritma da pronađe dobra rješenja u generaciji te sveukupno optimalno rješenje direktno ovisi o odabiru kriterijske funkcije. Ukupna

dobrota populacije  $D$  (vidi formulu 1) i prosječna dobrota populacije (vidi formulu 2) su mjere za praćenje rada algoritma. Te se mjere po [20] računaju na slijedeći način:

$$D = \sum_{i=1}^{VEL\_POP} dobrota(v_i), \quad (1)$$

$$\bar{D} = \frac{D}{VEL\_POP}, \quad (2)$$

gdje je:

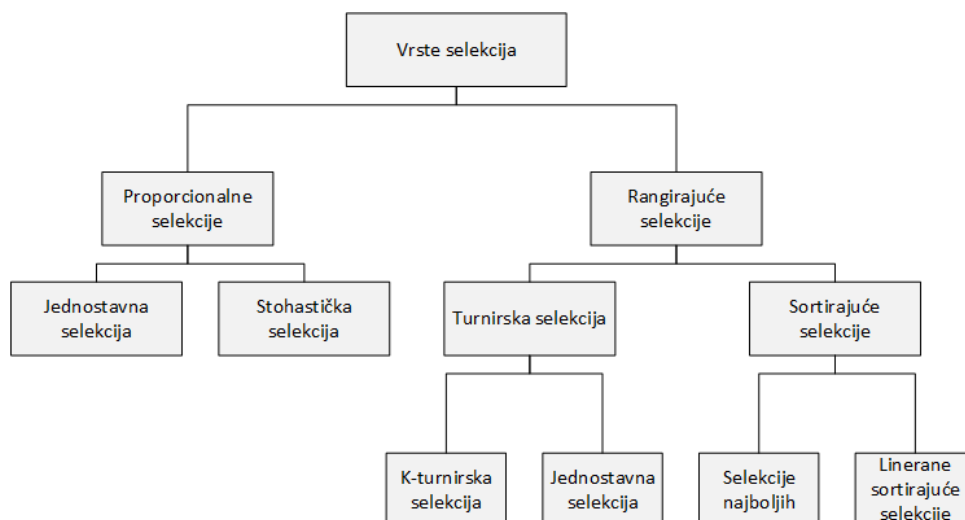
$D$  - ukupna dobrota populacije;

$VEL\_POP$  - veličina populacije;

$v_i$  - iznos kriterija koji se obrađuje;

$\bar{D}$  - prosječna dobrota populacije.

Kriterijska funkcija je temelj prvog velikog koraka u petlji izvođenja genetskog algoritma, selekcije. Selekcija je proces odabira jedinki iz populacije čija je dobrota prema kriterijskoj funkciji najbolja. Kao i prirodna selekcija, selekcija u genetskom algoritmu služi za odbacivanje jedinki čija sposobnost ne odražava željeni cilj, te čuvanje jedinki koje se cilju približavaju. Na slici 5 je prikazana podjela različitih vrsta selekcije. Najčešće korištene selekcije u praksi su jednostavna i turnirska selekcija.



Slika 5: Vrste selekcije [15]

Jednostavna selekcija odnosno selekcija temeljena na igri ruleta je osnovni tip selekcije. Srž ove selekcije je u tome da vjerojatnost odabira jedinke ovisi o iznosu dobrote jedinke. Potrebno

je odrediti kumulativnu dobrotu te omjer dobrote jedinke naspram ukupnoj dobroti populacije. Ti izračuni su dani u formulama 3 i 4. Zatim je potrebno generirati slučajan broj  $R$  u intervalu  $[0, D]$ , gdje je  $D$  ukupna dobrota svih kromosoma. Zatim se odabire kromosom u čiji je interval kumulativne dobrote upao generirani broj [19]. Jednostavnost ove selekcije sa sobom donosi i određene nedostatke. Ovim postupkom je pojavljivanje duplikata kromosoma u sljedećoj generaciji čest slučaj čime se usporava rad algoritma. Budući da je vjerojatnost odabira jedinke proporcionalna s dobrotom, negativne vrijednosti kriterijske funkcije nisu dozvoljene [20].

$$q_k = \sum_{i=1}^k \text{dobrota}(v_i); \quad k = 1, 2, \dots, \text{VEL\_POP}, \quad (3)$$

$$p_k = \frac{\text{dobrota}(v_k)}{\sum_{i=1}^N \text{dobrota}(v_i)}, \quad (4)$$

gdje je:

$q_k$  - kumulativna dobrota kromosoma;

$p_k P$  - vjerojatnost selekcije kromosoma;

Stohastička univerzalna selekcija je posebna vrsta jednostavne selekcije koja se od nje razlikuje po načinu odabira jedinke. Stohastička univerzalna selekcija obavlja odabir svih jedinki u jednom koraku: generira se  $N$  jednako udaljenih znački tako da se interval  $[0,1]$  podijeli na  $N + 1$  jednakih odsječaka. U iduću se generaciju prenosi onoliko istih jedinki koliko njihov interval vjerojatnosti zauzima znački.

Turnirska selekcija se zasniva na usporedbi nasumično odabranih jedinki. Najčešće korištene inačice su jednostavna turnirska selekcija, generacijska  $k$ -turnirska selekcija i eliminacijska  $k$ -turnirska selekcija. U svakom koraku jednostavne turnirske selekcije se odabiru dva para jedinki. U svakome od tih parova se odbacuje loše rješenje (eliminacija), a preostala rješenja iz oba para se koriste se odabiru kao rješenja koja preživljavaju. Postoji više inačica ovog tipa selekcija pa je moguće u ovaj proces integrirati i genetski operator križanja kako bi se iz preživjelih rješenja odmah generirala i njihova djeca. U drugu ruku, kod generacijske  $k$ -turnirske selekcije se odabire  $N$  puta  $k$  rješenja iz ( $k=2, 3, 4, \dots, N$ ) i između njih se odabire najbolja jedinka i prenosi u međupopulaciju. U slučaju eliminacijske  $k$ -turnirske selekcije se proces odvija kao i kod generacijske, no umjesto da se vrši selekcija najboljih rješenja, eliminiraju se najlošija među njima. Pogodnost korištenja turnirske selekcije proizlazi iz jednostavnog pristupa promjeni

parametara rada algoritma te mogućnosti programiranja algoritma na efikasan način korištenjem paralelnog izvođenja na više dretvi.

Selekcije najboljih se zasnivaju na ideju o odabiru unaprijed znanog broja najboljih jedinki iz populacije. Razlikuju se tri vrste selekcije najboljih:  $(\mu+\lambda)$  selekcija,  $(\mu,\lambda)$  selekcija i krnja selekcija. Kod  $(\mu+\lambda)$  selekcije se na slučajan način odabire  $\mu$  roditelja iz populacije te se njihovim križanjem stvara  $\lambda$  djece. Iz ta dva skupa se zatim odabire  $\mu$  jedinki te se premještaju u međupopulaciju, postupak se ponavlja dok međupopulacija ne postane iste veličine kao i populacija. U slučaju  $(\mu,\lambda)$  selekcije se također odabire  $\mu$  roditelja iz populacije te se iz njih stvara  $\lambda$  djece, no djece ima više nego roditelja. Nova populacija se sastoji od  $\mu$  rješenja od najbolje djece. Krnja selekcija odabire  $n$  najboljih jedinki iz populacije i kopira ih  $N/n$  puta u novi skup rješenja [19], [21].

Kod procesa selekcije ja također moguće i iskoristiti princip elitizma. Ideja elitizma je prenošenje jedne ili više najboljih jedinki iz generacije u generaciju. Potreban je oprez kod određivanja količine jedinki koje će biti prenesene radi očuvanja raznolikosti unutar populacije. Nije potrebno uvijek prenijeti sve elitne jedinke nepromijenjene, moguće je i provesti nad njima i mutiranje i dodatno križanje, ovisno o preferenciji autora.

### 3.2.2. Križanje

Križanje je genetski operator koji služi za dobivanje novih rješenja iz postojećih. Križanje je binarni genetski operator (zahtjeva dvije jedinke) te je nadahnut biološkim procesom reprodukcije. U križanju sudjeluju dvije jedinke, odnosno roditelji, te stvaraju jednu ili dvije jedinke - dijete, djecu. Ideja je da će dvoje roditelja koji nose dobre gene, stvoriti dijete koje je bar jednako dobro kao oni ili bolje. No kako je križanje miješanje i dobrih i lošijih gena, postoji i mogućnost da pojedinačno ne tako dobri roditelji uspiju stvoriti vrlo dobre jedinke. Te mogućnost da dobri roditelji stvore i lošu djecu. Neke od najčešće korištenih metoda križanja su: uniformno, križanje s  $n$ -točaka prekida, aritmetičko križanje i višetočkasto križanje.

Tip križanja kod kojega svako dijete sadrži pola gena pojedinog roditelja se naziva uniformno križanje. Dakle vjerojatnost križanja svakog gena iznosi 0,5. Generalizirani oblik ovakvog križanja je aritmetičko križanje. Taj pristup križanju podrazumijeva zadavanje parametra  $a$  na temelju kojega se određuje količina utjecaja pojedinog roditelja na pojedino dijete. Ideja takvog

križanja je prikazana kroz slijedeće izraze:

$$\begin{aligned}Dijete_1 &= a * Roditelj_1 + (1 - a) * Roditelj_2; \\Dijete_2 &= (1 - a) * Roditelj_1 + a * Roditelj_2.\end{aligned}\tag{5}$$

Prijenos više gena u nizu iz različitih dijelova kromosoma roditelja u dijete je moguć pomoću višetočkastog križanja. Odabirom  $n$  nasumičnih točaka, odnosno pozicija unutar kromosoma, moguće je prenijeti segment genskog kôda direktno iz roditelja u dijete. Ako se promatra križanje s jednom točkom, oba roditelja se dijele na dva dijela na istome mjestu. Prvo dijete se dobiva na način da se uzme prvi segment prvog roditelja i drugi segment drugoga roditelja te da ih se spoji. Drugo dijete se dobiva spajanjem prvog dijela drugog roditelja s drugim dijelom prvog roditelja. Na analogan način je moguće raditi križanje i s višim brojem  $n$ .

Genetski operator križanja je važan jer se pomoću njega može napraviti veliki skok u razlici među rješenjima. Taj skok je važan jer genetski algoritam mora biti podešen na način da generacija pokuša pokriti što veći prostor rješenja, s izvodljivošću na umu, kako ne bi zapeo u lokalnom optimumu.

### 3.2.3. Mutacija

Mutacija označava pojavu promjene jednog ili više gena u kromosomu uslijed nekakvoga vanjskog djelovanja. U biološkom procesu je najčešći uzrok mutacije greška prilikom procesa unutar staničnih genetskih procesa ili uslijed vanjskog utjecaja, kao na primjer radioaktivnog zračenja. U kontekstu genetskog algoritma, mutacija je namjerna izmjena jednog ili više gena u kromosomu. U logičkom slijedu algoritma, mutacija je operator koji dolazi nakon križanja te služi za dodatnu izmjenu gena djece u odnosu na njihove roditelje. Uloga mutacije je također i u obnavljanju izgubljenoga genetskog materijala. Dogodi li se, npr. da sve jedinke populacije imaju isti gen na određenom mjestu u kromosomu, samo križanjem se taj gen nikad ne bi mogao promijeniti. Ako je riječ o binarnom prikazu kromosoma, time je izgubljeno čak pola prostora pretraživanja [20].

Uzmimo pretpostavku da je kromosom sastavljen od gena koji mogu poprimiti binarna vrijednosti odnosno nulu ili jedinicu. Ako na takvom kromosomu odaberemo jedan gen i napravimo njegov inverz onda je upravo to jednostavna mutacije. Kompleksnija forma mutacije je miješajuća koja slučajnim postupkom stvara masku koja pokazuje nad kojima će se genima

Tablica 2: POTPUNO MIJEŠAJUĆA MUTACIJA

Originalni kromosom	0 1 1 0 1 0 1 0 1 1 1 0 1 0 0
Maska	0 0 0 0 0 0 1 1 1 0 1 0 0 0 0
Kromosom nakon mutacije	0 1 1 0 1 0 1 1 0 1 0 0 1 0 0

raditi inverz, no vodi računa da novonastali kromosom ima jednak broj nula i jedinica kao i originalni. Nadalje, potpuno miješajuća mutacija nad slučajno odabranim genima, isto pomoću maske, nekada vrši promjene, a nekada ne, bez obzira na ukupno količinu nula i jedinica. U tablici 2 je dan primjer potpuno miješajuće mutacije.

### 3.3. Primjena u upravljanju signalnim planovima

Potencijal korištenja umjetne inteligencije za rješavanje problema iz domene prometa je prepoznat već 1970-ih godina. Točnije, prethodno spomenuti Ebrahim Mamdani je s C. P. Pappisom postavio prvi neizraziti upravljački sustav signalnim planovima za raskrižja. Odabrali su model križanja dvije jednosmjerne ulice te su koristili kašnjenje vozila kao mjeru učinkovitosti. U tome radu, [22], je neizraziti regulator dao bolje rezultate od klasičnoga prometno ovisnog upravljanja. Ovaj rad predstavlja temelj korištenja neizrazite logike u upravljanju signalnim planovima te time i temelj ovoga istraživanja.

Nešto recentniji pristup rješavanju problema upravljanju signalnim planovima raskrižja pomoću neizrazite logike, [23], no uz dodatak korištenja genetskog algoritma za optimizaciju jednog po jednog pravila. Autori su s ovim pristupom uspjeli ostvariti bolja rješenja u odnosu na upravljanje ustaljenim signalnim planovima. Također su primijetili i efikasnost njihovog pristupa pri uvjetima promjenjive prometne potražnje.

Qiao i ostali su u svome radu [24] pristupili problemu upravljanja signalnim planovima s neizrazitim regulatorom u dva koraka. U prvome koraku regulator odabire koja će biti iduća signalna faza, a u drugome koraku odlučuje o trajanju zelenog svijetla u toj fazi. Pravila i funkcije tog regulatora su optimirali genetskim algoritmom te su iskoristili model iz [22] i na njemu pokazali kako je njihov regulator bolji.

Proširenje prethodnog rada u vidu potpore za dodjeljivanje prioriteta vozilima hitne službe je dano u [25]. Autori su u postojeći princip neizrazitog regulatora u dva koraka zasebno u svaki od njih ugradili potporu za osjetljivost na prisutnost vozila žurne službe u mreži. U usporedbi s ustaljenim signalnim planovima su dobivena značajna poboljšanja.



Između ostaloga je i autor ovog rada je sudjelovao u istraživanjima upravljanja signalnim planovima pomoću neizrazite logike. Tako da je autorskim i su-autorskim radovima [26], [7], [13], [8] i [9] stekao iskustvo određeno iskustvo s problematikom. Ovaj rad je također i nastavak na [27], [28] te [15] koji su se bavili razvitkom neizrazitih regulatora za davanje prioriteta vozilima žurnih službi.

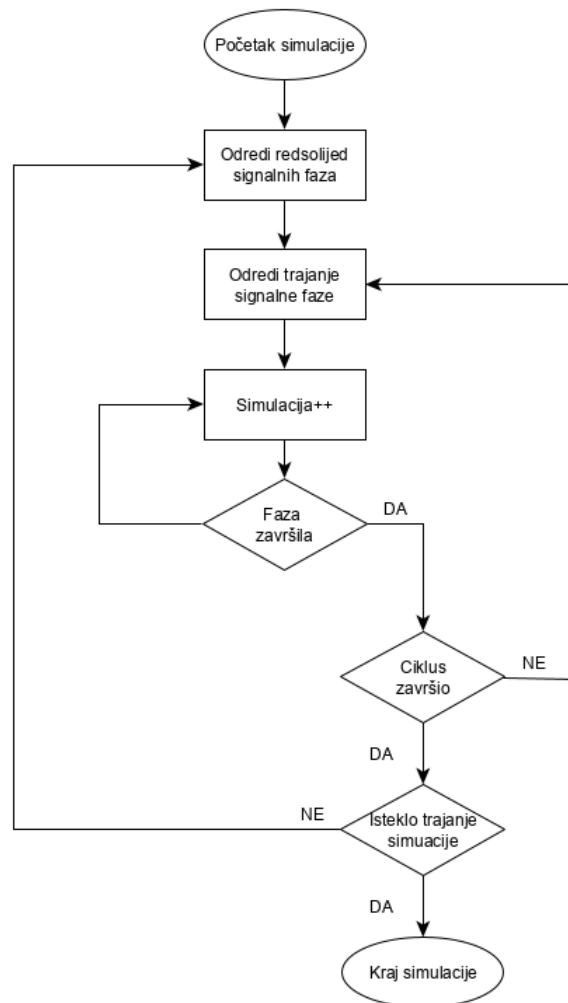
## 4. Implementacija neizrazitog upravljačkog sustava s uključenim prioritetima

Implementirani neizraziti regulator se sastoji od dvije zasebne komponente: sustava za promjenu redoslijeda faza i sustava za promjenu trajanja faza. Obje komponente vrše prilagodbe signalnog plana na temelju mjerenih prometnih podataka. Sustavi su postavljeni tako da imaju dva cilja, smanjiti repove čekanja i vrijeme čekanja vozila na raskrižju te smanjiti vrijeme putovanja vozila žurne službe. Kako je u radu odabran pristup strategije djelomičnog prioriteta moguće je bilo samu strategiju uključiti u ove dvije komponente.

Oba sustava osim prometnih parametara svih vozila također i zasebno primaju podatak o lokaciji vozila žurne službe. Predloženi neizraziti regulatori dijele iduće ulaze varijable:

1. Rep čekanja;
2. Priljevni tok (stupanj zasićenja);
3. Odljevni tok (stupanj zasićenja);
4. Trajanje crvenog svjetla;
5. Udaljenost vozila žurne službe.

Ulazni parametar rep čekanja predstavlja količinu popunjenosti promatrane trake vozilima. Računa se stavljanjem u omjer duljine trake koju vozila zauzimaju i duljine predodređene detekcijske zone. Priljevni i odljevni tok se računaju kao stupanj zasićenja prometnog toka. Stupanj zasićenja prometnog toka se dobiva dijeljenjem protoka vozila kroz neki period s propusnom moći prometnog traka. Dakle taj podatak govori o opterećenju prometnog traka, odnosno koliko prometni trak vozila u satu može podnijeti. Priljevni tok se računa na presjeku na određenoj udaljenosti od raskrižja, a odljevni tok iza same stop linije na raskrižju. Oba se računaju svakih 15 minuta simulacije te su srednjoročni pokazatelj. Trajanje crvenog svjetla označava koliko je vremena prošlo od kada je za neki promatrani prometni trak bio omogućen prolazak. Udaljenost vozila žurne službe govori o tome koliko se vozilo žurne službe nalazi daleko od stop linije.

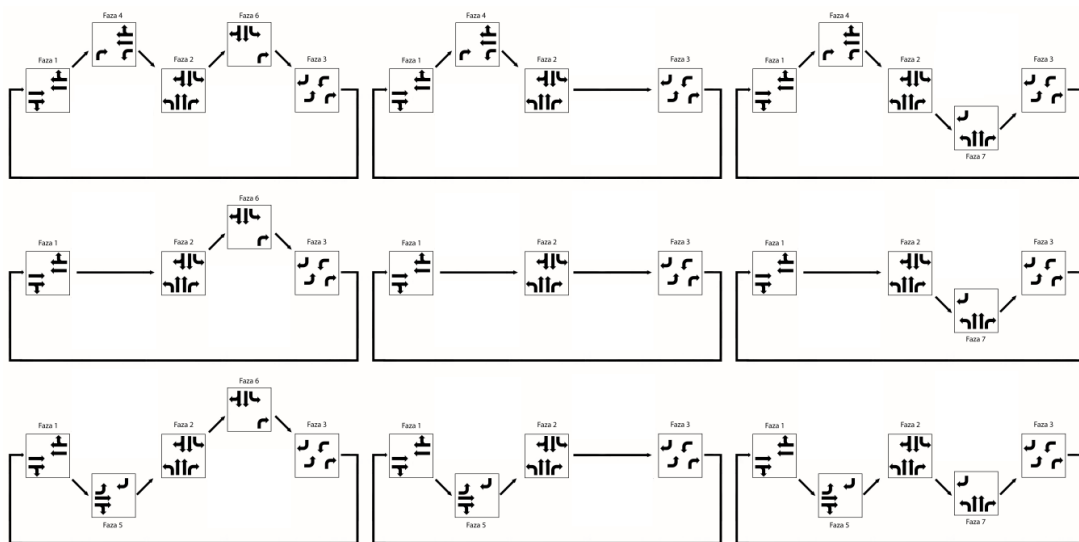


Slika 6: Dijagram adaptivnog upravljanja semaforiziranim raskrižjem

Na slici 6 je prikazan dijagram toka adaptivnog upravljanja pomoću navedena dva sustava. Početak simulacije započinje s pozivanjem sustava za promjenu redoslijeda signalnih faza. Odnosno u tom trenutku se stvara ciklus. Zatim netom prije početka prve faze u ciklusu se pokreće sustav za promjenu trajanja signalne faze (SPTF) koji donosi odluku da li je potrebno skratiti ili produljiti trajanje signalne faze. Kada završi faza, iduća je onda iz predodređenoga ciklusa te se za nju ponovno računa njeno trajanje. Kada prođe jedna iteracija cijeloga ciklusa, ponovno se pokreće sustav za promjenu redoslijeda signalnih faza (SPRF) i cjeli proces se nastavlja kako je prethodno opisano.

## 4.1. Sustav za promjenu redoslijeda faza

Za upravljanje fazama signalnog plana je odabrana prethodno raspravljana NEMA struktura. Korištena je struktura (vidljiva na slici 3 iz drugog poglavlja) od tri osnovne faze i četiri izborne faze. Propuštanje prometnih tokova je postavljeno tako da je prva signalna faza obavezna faza namijenjena za propuštanje glavnog prometnog toka u oba smjera, druga signalna faza a sporedni tok u oba smjera te treća i zadnja obavezna signalna faza za lijeve i desne skretače svih pravaca. Prvo grananje dolazi nakon prve faze. Osim prijelaza u drugu obaveznu fazu, moguće je prijeći i u dopunsku fazu ili za jedan ili za drugi smjer glavnog prometnog toka. Na analogan način je postavljeno i grananje iza druge obavezne faze za sporedne tokove. Ideja je da sustav bude prilagodljiv neovisno o tome koji je prometni pravac izvor opterećenja za raskrižje. Na slici 7 je prikazano devet mogućih kombinacija signalnih faza u ovom režimu rada.



Slika 7: Prikaz svih kombinacija signalnih faza u NEMA strukturi

Svrha neizrazitog regulatora u ovoj okolini je donošenje odluke o tome koju kombinaciju signalnih faza izabrati. Sustav je zamišljen tako da na kraju svakog ciklusa bira novi signalni plan za idući ciklus. Neizraziti regulator je osmišljen tako da ocjeni prometno stanje svakog prometnog traka zasebno. Ta ocjena nazvana je *hitnost* kao i u [7] te prikazuje prometne opterećenje trake te je u ocjenu ukomponirana i udaljenost vozila žurne službe od raskrižja. Prometni parametri koji se koriste kao ulazi tog sustava su: rep čekanja, priljevni tok, odljevni tok, trajanje crvenog svjetla i udaljenost vozila žurne službe. Na temelju ovih ulaznih parametara, neizraziti regulator dodjeljuje svakoj traci ocjenu od 0 do 1. Ocjene bliže nuli signaliziraju da traka nije zagušena te da se vozilo žurne službe ne nalazi u okolini raskrižja ili da je već jako

blizu raskrižju. U drugu ruku, ocjene koje gravitiraju broju 1 označavaju da je traka zagušena te da se vozilo žurne službe nalazi u okolini raskrižja, ali ne i blizu njemu. Tako da je sustav zamišljen tako da "favorizira" faze u kojima se pojavljuje vozilo žurne službe.

Kako su signalne faze ustvari kombinacije individualnih prometnih tokova koji se propuštaju u istom trenutku onda ih je moguće promatrati i kao grupacije prometnih traka. Iz toga slijedi da zbrajanjem ocjena *hitnosti* individualnih traka koje tvore jednu signalnu fazu moguće dobiti hitnost same faze. Kako se sve faze ne sastoje od jednakog broja traka, onda je tu ukupnu sumiranu *hitnost* moguće podijeliti s brojem traka u fazi kako bi se dobila normalizirana vrijednost *hitnosti* signalne faze.

Zadnji korak u ovom slijedu je odlučivanje koja će se kombinacija signalnih faza koristiti u nadolazećem ciklusu. Kao što je već navedeno postoji devet mogućih kombinacija te je potrebno izabrati koje signalne faze slijede prvu i drugu obaveznu fazu. Ta odluka se donosi na temelju usporedbe ocjene *hitnosti* sve tri potencijalne signalne faze na grananju. Ona faza koja ima najvišu hitnost odnosi poblijedu i nalaziti će se u signalnom planu idućeg ciklusa u slijedu s obaveznim fazama.

## 4.2. Sustav za promjenu trajanja faza

Kod upravljanja raskrižjima s ustaljenim signalnim planova, trajanje signalnih faza je uvijek isto. Dodavanjem detektora vozila u okolinu raskrižja moguće je upogoniti prometno ovisno upravljanje koje vrši izmjene na signalnom planu u ovisnosti prolaska vozila kroz detekcijsku zonu. Jedna od mogućih izmjena je produljenje trajanja signalne faze za neki predodređeni iznos. No u slučaju adaptivnog upravljanja, čijom se materijom bavi ovaj rad, trajanje signalnih faza je moguće mijenjati s većom preciznošću u odnosu na ponašanje prometnih tokova. Postoji više smjerova kako pristupu promjeni trajanja signalne faze. U [8] su isprobana dva pristupa, odlučivanje o trajanju signalne faze na njenom početku i kontinuirano kroz njeno trajanje. Oba pristupa su se pokazala slične učinkovitosti. U ovome radu je odabran prvi spomenuti pristup, odlučivanje o trajanju signalne faze na njenom početku, odnosno neposredno prije njenoga početka.

Koristeći istu ideju računanja *hitnost*, koja je uvedena u prethodnom podpoglavlju, moguće je prilagođavati trajanje signalnih faza trenutnim prometnim zahtjevima. No postoje i razlike između ulaza neizravitog regulatora i njegovog unutarnjeg kroja. SPTF preuzima iste ulaze

osim onog koji govori o trajanju crvenoga svijetla. Taj ulaz je procijenjen kao nepotreban podatak u donošenju ocijene o trajanju trenutne faze, je ona ima veći naglasak na zadovoljavanju kratkoročnih prometnih zahtjeva dok se kod biranja ciklusa zadovoljavaju dugoročni zahtjevi. Također je važan kratkoročan odziv sustava na pojavu vozila žurne službe. Željeno ponašanje podrazumijeva produljenje trajanja faze u slučaju pojave vozila žurne službe. No potrebno je neizraziti sustav postaviti tako da je sposoban dobro procijeniti koliko je vremena potrebno vozilu žurne službe da prođe raskrižje da ne dođe do nepotrebno dugog trajanja faze.

Sama ocjena *hitnosti* se u ovome sustavu kreće između vrijednosti  $-1$  i  $1$ , gdje ocjene do  $-1$  označava da fazu treba skratiti, ocjena oko  $0$  da je početno trajanje faze dovoljno te ocjene do  $1$  koje označavaju da fazu treba produljiti. *Hitnost* faze se računa kao i u prethodnome sustavu. Početno trajanje signalnih faza, odnosno trajanja pojma zelenih svjetla se uzima iz ustaljenog signalnog plana. Zatim je potrebno odrediti za koliki iznos se može mijenjati to početno trajanje faze. U ovome radu je korišten pristup prethodno predložen u [8] i [9]. Ideja tog pristupa je da se odredi postotak početnog trajanja faze za koji se ona može maksimalno skratiti ili produljiti (vidi izraz 6):

$$\Delta T_{max} = T_{faze} \cdot KPT, \quad (6)$$

gdje je:

- $\Delta T_{max}$  - iznos za koji se najviše može promijeniti trajanje faze;
- $T_{faze}$  - zadano trajanje faze;
- $KPT$  - koeficijent trajanja faze.

Zatim kako je ocjena *hitnosti* hitnosti faze izražena u vrijednostima od  $-1$  do  $1$  njenim umnoškom s dobivenim maksimalnim iznosom za za koliko je moguće promijeniti trajanje faze je moguće dobiti prilagođeno trajanje faze. Na ovaj način je ostvaren izravan i jednostavan utjecaj na trajanje signalne faze. Navedeno je prikazano u izrazu 7:

$$\Delta T = H_{faze} \cdot \Delta T_{max}, \quad (7)$$

gdje je:

- $\Delta T$  - iznos za koji se mijenja trajanje faze;

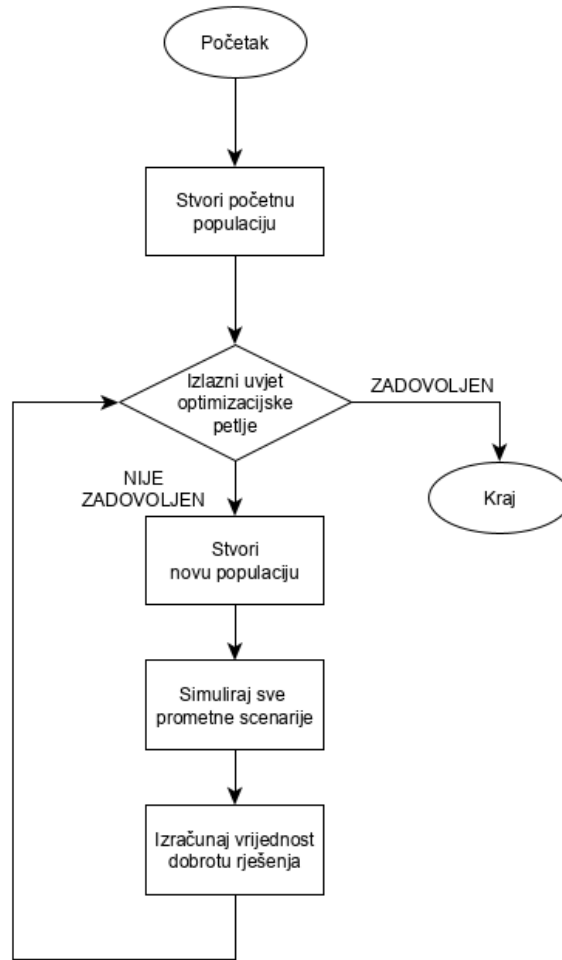
- $H_{faze}$  - ukupna hitnost svih traka;
- $\Delta T_{max}$  - iznos za koji se najviše može promijeniti trajanje faze.



## 5. Optimizacija pravila sustava neizrazitog upravljanja

Neizraziti sustav upravljanja može raditi onoliko dobro koliko ga je dobro autor podesio. No u radu s neizrazitim sustavima koji modeliraju kompleksnije pojave te imaju više desetaka neizrazitih pravila, te mnoštvo funkcija pripadnosti postaje teže podesiti sve parametre optimalno. Još jedna otežavajuća okolnost je potreba za osmišljavanjem sustava na taj način da radi povoljno za sva vozila i za vozila žurnih službi. Iz tog razloga je pogodan pristup optimizacije sustava koji je prethodno postavljen s aspekta znanja stručnjaka kako bi se u fino podesili parametri rada sustava. Za optimizaciju tog digitaliziranog znanja je korišten genetski algoritam.

Na slici 8 se nalazi tok optimizacijskog procesa koji je osmišljen za ovaj rad. Kod optimizacije neizrazitih regulatora potrebno je odvojeno optimirati neizrazita pravila i funkcije pripadnosti. Predloženi sustav upravljanja signalnim planovima sastoji od dva neizrazita regulatora, dakle potrebno je provesti optimizacijski proces četiri puta. Odabrani slijed optimizacije je: optimizacija pravila pa funkcija SPTF te zatim optimizacija pravila pa funkcija sustava za promjenu redoslijeda faza. Nakon što se pravila i funkcije kôdiraju prema procesu koji je objašnjen u idućim podpoglavljima potrebno je stvoriti početnu populaciju nad kojom će se izvoditi genetski algoritam. Zatim se s tom početnom populacijom ulazi u optimizacijsku petlju. Unutar petlje će svaka jedinka biti evaluirana pomoću kriterijske funkcije te će se pomoću genetskih operatora iz tih jedinki napraviti nova populacija koja će biti iduća generacija u procesu optimizacije.



Slika 8: Optimizacijski tok algoritma

## 5.1. Kôdiranje neizrazitih pravila i funkcija pripadnosti

Kao što je prethodno rečeno neizraziti regulator se sastoji od tri glavna segmenta: ulaznih varijabli, neizrazitih pravila i izlaznih varijabli. Ulazne i izlazne varijable su opisane funkcijama pripadnosti koje su pridružene neizrazitim vrijednostima ovisno o iznosu varijable. Neizrazita pravila su dana u vidu *AKO – ONDA* pravila koja povezuju ulazne i izlazne varijable. Kako bi se optimirala neizrazita pravila ili funkcije pripadnosti za početak je potrebno odrediti na koji će način izgledati sama jedinka koju se optimira. Dakle potrebno je provesti kôdiranje segmenata neizrazitog sustava u jedinku podobnu za optimizaciju genetskim algoritmom.

Neizrazita pravila su sačinjena s jedne strane od ulaznih, a s druge strane od izlaznih varijabli te logičkim operatorima između. Kod optimizacije pravila je u stvari potrebno mijenjati samo njihovu desnu stranu, vrijednost izlazne varijable. Pretpostavka je da je stručnjak koji je definirao pravila ili pokrio sve kombinacije na lijevoj strani ili odlučio o tome koje su mu

Tablica 3: PRIMJER KÔDIRANJA KROMOSOMA

Broj pravila	1.	2.	3.	4.	...	85.
Nekôdirane vrijednosti	Niska	Srednja	Visoka	Jako visoka	...	Jako visoka
Kôdirane vrijednosti	1	2	3	4	...	4

kombinacije bitne za rad sustava. U slučaju ovoga rada je korištena prva od tih dvaju opcija te je sustav osmišljen da ima jednu izlaznu varijablu, *hitnost*. U SPRF, *hitnost* može poprimiti 3 različite vrijednosti ("Niska", "Srednja" i "Visoka"), a u SPTF može poprimiti 5 različite vrijednosti ("Jako niska", "Niska", "Srednja", "Visoka", "Jako visoka"). Te jezične vrijednosti se mogu direktno mapirati na skupove cjelobrojnih vrijednosti (vidi tablicu 3). Pomoću tog mapiranja možemo stvoriti kromosom u kojoj će svaki gen predstavljati jedno pravilo. Dakle, taj kromosom će imati gena koliko sustav ima pravila. Primjer jednog takvog kromosoma je dan u tablici 3.

Kôdiranje funkcija pripadnosti teče na sličan način kao i kod neizrazitih pravila. Proces optimizacije se u ovome slučaju izvršava na strani ulaza sustava, odnosno optimiraju se parametri koji opisuju funkcije pripadnosti neizrazitih vrijednosti ulaza u sustav. Kao što je rečeno poglavlju 4, funkcije pripadnosti su određene s parametrima kojih je broj specifičan za svaki tip funkcije. Za potrebe ovoga rada su korištene sljedeće funkcije: Gaussova, z-funkcija i s-funkcija. Svaka od tih funkcija je opisana s dva parametra. Iz toga slijedi da je kromosom koji nosi informacije o funkcijama pripadnosti moguće formirati nizanjem parametara svih funkcija pripadnosti neizrazitog sustava u nizu. Broj gena u tom kromosomu će biti jednak umnošku broju parametara funkcije i ukupnom broju funkcija pripadnosti.

Kod kôdiranja funkcija pripadnosti potrebno je obratiti pažnju na raspon u kojem dolaze rješenja koje stvara genetski algoritam. Generiranjem parametara koji se ne nalaze unutar ograničenja, algoritam može zadobiti "osjećaj" lažne dobrote. Odnosno moguće je da algoritam proizvede cjeli niz kombinacija parametara funkcija pripadnosti koji su realno neupotrebljivi. Recimo neka funkcija pripadnosti bi mogla zauzimati preveliki raspon rješenja samo zato jer je raspon neke druge premalen, ako se kroz generacije ta razlika ne smanji, algoritam može naučiti da je to dobro rješenje. Prije optimizacije je potrebno postaviti donju i gornju granicu između kojih se smije kretati iznos pojedinačnog gena. Time se može osigurati da se rješenja algoritma kreću unutar nekakvih smislenih granica.

## 5.2. Određivanje kriterijske funkcije

Svaka primjena genetskog algoritma zahtjeva personalizirani pristup ka određivanju kriterijske funkcije. Kao što je rečeno u prethodnom poglavlju, kriterijska funkcija je mjera dobrote kromosoma. Njome se evaluira da li rješenje stvoreno genetskim algoritmom ispunjava optimizacijom postavljeni cilj ili ne.

Cilj koji je potrebno ispuniti optimizacijom u ovome radu je dvojak. Potrebno je ubrzati prolazak vozila žurne službe kroz raskrižje, a da pritom ne druga vozila ne budu diskriminirana. Također isti sustav mora raditi dobro i kada je prisutno vozilo žurne službe u okolini, no i kada nije. Radi toga je kao osnovni prometni pokazatelj za funkcije pripadnosti odabrano ukupno vrijeme putovanja vozila. Konkretnije, radi se o ukupnom vremenu putovanja vozila žurne službe te prosječnom ukupnom vremenu putovanja svih vozila tokom simulacijske provjere. Nadalje, kako je potrebno evaluirati rad regulatora u različitim prometnim scenarijima osmišljen je i sustav normiranja dobivenih vrijednosti.

Potrebno je stvoriti dva vektora duljine  $N$  ( $N$  je broj različitih simulacijskih scenarija). Prvi vektor sadrži ukupno vrijeme putovanja vozila žurne službe, a drugi vektor sadrži prosječno ukupno vrijeme putovanje svih vozila kroz sve različite scenarije. Zatim se nad ta dva vektora provodi proces normiranja. Normiranje se provodi tako da se od oba vektora oduzmu njihovi ekvivalenti dobiveni iz simulacijske provjere rada ustaljenog signalnog plana u istim prometnim scenarijima (vidi izraze 8 i 9). U idućem koraku je potrebno odrediti srednju vrijednost svih članova oba vektora pojedinačno. Time dobivamo normirano prosječno ukupno vrijeme putovanja kroz više scenarija vozila žurne službe i svih vozila. Zatim je te dvije vrijednosti potrebno zbrojiti te im pridodati određeni koeficijent kojim se osigurava da krajnja vrijednost bude pozitivna, što je ujedno i izlazna vrijednost kriterijske funkcije (vidi izraz 10).

$$U\vec{V}P_{\check{Z}S} = U\vec{V}P_{\check{Z}S} - U\vec{V}P_{\check{Z}S-REF}, \quad (8)$$

$$U\vec{V}P_{SVI} = U\vec{V}P_{SVI} - U\vec{V}P_{SVI-REF}, \quad (9)$$

$$\vec{D} = \frac{\text{suma}(U\vec{V}P_{\check{Z}S})}{n} + \frac{\text{suma}(U\vec{V}P_{SVI})}{n} + C, \quad (10)$$

gdje je:

- $U\vec{V}P_{\check{Z}S}$  - vektor s ukupnim vremenom putovanja vozila žurne službe kroz simulacije;
- $U\vec{V}P_{SVI}$  - vektor s srednjim ukupnim vremenom putovanja svih vozila kroz simulacije;
- $U\vec{V}P_{\check{Z}S-REF}$  - vektor s ukupnim vremenom putovanja vozila žurne službe kroz referentne simulacije;
- $U\vec{V}P_{SVI-REF}$  - vektor s srednjim ukupnim vremenom putovanja svih vozila kroz referente simulacije;
- $D$  - iznos dobrote rješenja;
- $n$  - broj simuliranih scenarija;
- $C$  - koeficijent koji osigurava da je rješenje pozitivno.

## 6. Simulacijska provjera

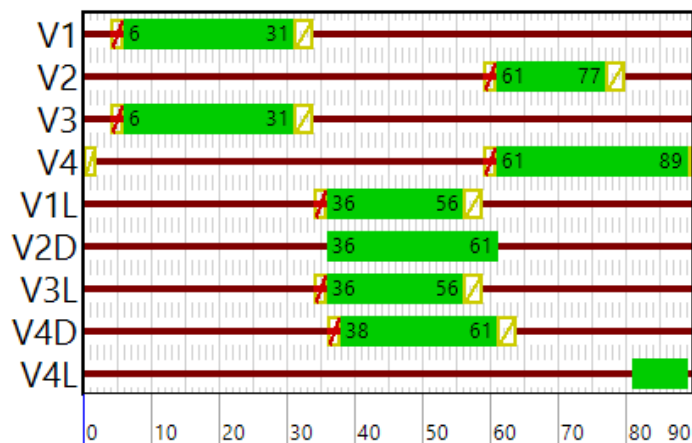
U ovome poglavlju su dani rezultati dobiveni optimizacijom neizrazitih regulatora. Napravljena je usporedba između ustaljenog upravljanja, upravljanja pomoću ručno podešenoga neizrazitih regulatora, upravljanja pomoću neizrazitog regulatora s optimiranim SPTF te upravljanja pomoću neizrazitog regulatora s optimiranim SPTF i SPRF. Usporedba je rađena prema više prometnih pokazatelja među kojima su i ukupno vrijeme putovanja vozila žurne službe i srednje ukupno vrijeme putovanja svih vozila.

Simulacije su odrađene u mikroskopskom prometnom simulatoru PTV VISSIM. Radi se o pristupu simuliranju prometa koji promatra sama vozila u mreži te njihov interakciju prema raznim psiho-fizičkim modelima vožnje. Osim korištenja već ugrađenih mehanizama za simuliranje složenijih prometnih pojava kao što su javni prijevoz, upravljanje semaforiziranim raskrižjima i naplatne postaje, VISSIM nudi mogućnost interakcije s drugim aplikacijama radi razvijanja složenih sustava upravljanja prometom. Za potrebe ovog rada je korištena baš ta mogućnost. Upravljački sustav te proces optimizacije je u cijelosti implementiran pomoću programskog paketa MATLAB-a. MATLAB (engl. MATrix LABoratory) je programska radna okolina stvorena za rješavanje matematičkih i inženjerskih problema. S vremenom je MATLAB postao okolina za razvijanje i implementaciju algoritama, analizu i vizualizaciju podataka interakciju s drugim programima i programskim jezicima [29].

### 6.1. Simulacijski model i scenariji

Za simulacijsku provjeru optimizacije je odabrano semaforizirano raskrižje Zvonimirova-Heinzelova ulica iz istočnog djela grada Zagreba. Ovo raskrižje je odabrano jer se ono koristilo u prethodnim radovima autora ([7] i [9]) vezanim uz adaptivno upravljanje semaforiziranim raskrižjima. Količina prometnog opterećenja po privozima ovog raskrižja je raznolika (vidi tablicu 4, redak za Scenarije 3-4) što ga čini zanimljivim za eksperimente s adaptivnim upravljanjem. Također, svaki od privoza ima po barem tri trake, od kojih je jedna za izdvojene lijeve skretače, što ga čini zanimljivog s aspekta stvaranja i izmjenjivanja signalnih faza. Na pravcu istok-zapad leži ulica kralja Zvonimirova, a na pravcu sjever-jug ulica Vjekoslava Heinzela. Iz

podataka o prometnoj potražnji možemo zaključiti da je Zvonimirova glavni prometni tok, a Heinzlova sporedni tok. Na slici 9 je prikazan signalni plan ovoga raskrižja. Plan se sastoji od tri signalne faze te devet signalnih grupa.



Slika 9: Signalni plan raskrižja Heinzlova-Zvonimirova ulica

U tablici 4 su dani prometni parametri za tri para scenarija. Vrijednosti za scenarije 1-2 i 5-6 su izvedene iz vrijednosti za scenarije 3 – 4. Te originalne vrijednosti su preuzete iz [30] te su vrijednosti za scenarije 1 – 2 dobivene kao originalne vrijednosti umanjene za 40%, za scenarije 5 – 6 uvećane za 40%. Ove promjene u količini prometne potražnje među scenarijima su izvedene kako bi se ispitala univerzalnost rada neizrazitog sustava te i sposobnost optimizacijskog procesa da pronade rješenja koja su također univerzalna.

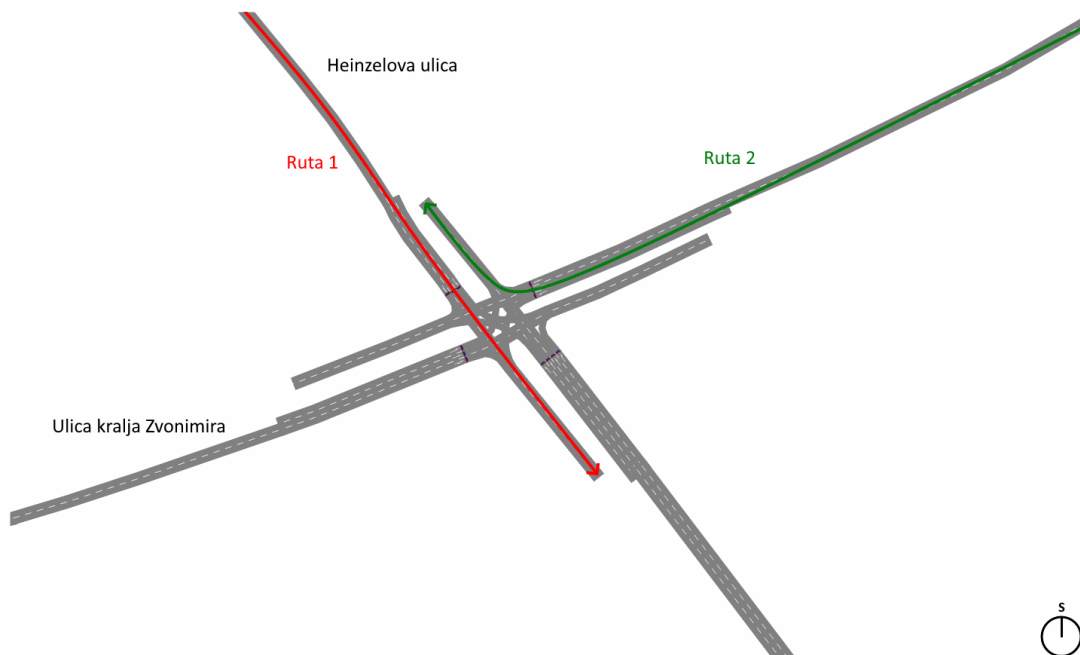
Tablica 4: PROMETNA POTRAŽNJA SVAKOG SCENARIJA

Scenarij	Prometna potražnja [voz/h]			
	Privoz			
	Zvonimirova Istok	Heinzlova Sjever	Zvonimirova Zapad	Heinzlova Jug
1	1.136	291	660	372
2	1.136	291	660	372
3	1.892	485	1.100	620
4	1.892	485	1.100	620
5	2.649	679	1.540	868
6	2.649	679	1.540	868

Osim u količini prometnog opterećenja, scenariji se razlikuju i po ruti koju prolazi vozilo žurne službe. Odabrane su dvije rute (vidi sliku 10), u kod *Rute1* (označena crvenom bojom)

vozilo dolazi iz smjera sjevera te se nastavlja spuštati prema jugu po Heinzellovoj. Kod *Rute 2* (označena zelenom bojom), vozilo dolazi s istoka iz Zvonimirove ulice te skreće u Heinzelovu prema sjeveru. Ove rute su odabrane jer se na djelu grada sjeverno od raskrižja nalazi više bolnica pa s pretpostavkom da je vozilo žurne službe vozilo hitne pomoći onda ove rute imaju smisla.

Šest prometnih scenarija je postavljeno ovako: u prvom scenariju vozilo žurne službe ide po *Ruti 1* te je količina prometne potražnje jednaka onoj za scenarije 1-2, u drugom scenariju vozilo žurne službe ide po *Ruti 2* te je količina prometne potražnje jednaka onoj za scenarije 1-2, u trećem scenariju vozilo žurne službe ide po *Ruti 1* te je količina prometne potražnje jednaka onoj za scenarije 3-4, u četvrtom scenariju vozilo žurne službe ide po *Ruti 2* te je količina prometne potražnje jednaka onoj za scenarije 3-4, u petome scenariju vozilo žurne službe ide po *Ruti 1* te je količina prometne potražnje jednaka onoj za scenarije 5-6, u šestom scenariju vozilo žurne službe ide po *Ruti 2* te je količina prometne potražnje jednaka onoj za scenarije 5-6. Iznos prometne potražnje po privozima bio je konstantan tokom simulacija.



Slika 10: Rute vozila žurne službe

## 6.2. Postavke simulacije i optimizacije

Za potrebe optimizacije rada neizrazitih regulatora izvršeno je ukupno 7.440 simulacija, svaka u trajanju od 3.600 simulacijskih sekundi. Do toga broja se dolazi na slijedeći način. Za



proces optimizacije jednog modula regulatora je odabrano veličina populacije od 10 jedinki te 30 generacija (potrebno je ovome pridodati još jednu generaciju, onu prvu gdje se ustvari stvara inicijalna populacija iz početne jedinke). Za svaku od tih jedinki je bilo potrebno provesti 6 simulacija kako bi se pokrili svi prethodno predloženi simulacijski scenariji. Te kako je potrebno optimirati četiri modula (posebno pravila i posebno funkcije pripadnosti dvaju neizrazitih regulatora) dobivamo broj 7.440 simulacija.

Za određivanje maksimalnog iznosa za koliko je moguće promjeniti trajanje faze korišten je koeficijent promjene trajanja ( $KPT$ ) u iznosu od 0,3. Dakle trajanje faze može biti najviše skraćeno ili produljeno za 30% njenog referentnog vremena. Ova vrijednost se pokazala kao prihvatljiva u prethodnim radovima [9] i [26].

Za potrebe evaluacije optimizacije su odabrane iduće konfiguracije korištenih regulatora: ustaljeni regulator, neizraziti regulator, neizraziti regulator s optimiranim SPTF i neizraziti regulator s optimiranim SPTF i SPRF (optimirana oba sustava). Za svaku od tih konfiguracija je provedeno po 5 za svaki od šest prometnih scenarija. Svaka od tih 5 simulacija je provedena s drugim simulacijskih sjemenom što je utjecalo na vremensku raspodjelu vozila generiranih tokom simulacije, ali ne i na njihov broj. Na ovaj način je osigurana provjera rada regulatora u raznovrsnim uvjetima.

### 6.3. Analiza rezultata

U ovome podpoglavlju su dani rezultati evaluacije prethodno navedenih konfiguracija. Analiziran je svaki scenarij zasebno te naposljetku izvršena i analiza rada optimizacije. Za praćenje efektivnosti rada regulatora su odabrani slijedeći prometni parametri:

1.  $UVP_{VŽS}[s]$  - ukupno vrijeme putovanja vozila žurne službe;
2.  $UVP_{SVI}[m]$  - srednje ukupno vrijeme putovanja svih vozila;
3.  $S_{VŽS}$  - broj stajanja vozila žurne službe od ulaska do izlaska iz mreže;
4.  $\bar{R} [m]$  - srednja duljina repova čekanja na svim privozima;
5.  $R_{MAX} [m]$  - maksimalna dosegnuta duljina repova čekanja.

### 6.3.1. Analiza scenarija 1

U tablici 5 su dani sabrani rezultati promatranih prometnih parametara za prvi scenarij i odabrane konfiguracije. Iz dane tablice je vidljivo da je korištenjem ustaljenog regulatora srednje vrijeme putovanja vozila žurne službe iznosilo 114 sekundi. Korištenjem neizrazitog regulatora je to vrijeme smanjeno na 111,80 sekundi (što je smanjenje iznosu od 1,93%), korištenjem neizrazitog regulatora s optimiranim SPTF je vozilo žurne službe putovalo 89,60 sekundi što je značajno smanjenje u odnosu na ustaljeno upravljanje (konkretan iznos smanjenja je: 21,40%). Kod korištenja neizrazitog regulatora s optimiranim SPTF i SPRF je vozilo žurne službe putovalo 62,20 sekunde, gotov je u pola smanjeno vrijeme putovanja u odnosu na ustaljeno upravljanje.

Drugi važni parametar i drugi optimizacijski cilj je srednje ukupno vrijeme putovanja svih vozila u mreži, za upravljanje ustaljenim regulatorom je ono iznosilo 217,49 sekundi. Ručno postavljene neizraziti regulator je smanjio to vrijeme za 49,03 sekundi, neizraziti regulator s optimiranim SPTF ga je smanjio za još više, za 66,02 sekundi. Neizraziti regulator s optimiranim SPTF i SPRF je uspio smanjiti vrijeme putovanja svih vozila za 41,55% što je više od ostalih regulatora. Na temelju ovoga je moguće zaključiti da je korištenje bilo kojeg od predloženih regulatora bolje od korištenja ustaljenog regulatora te da je proces optimizacije ispunio oba cilja za prvi scenarij.

Tablica 5: DOBIVENI REZULTATI - SCENARIJ 1

Regulator Parametar	Ustaljeni	Neizraziti		Neizraziti s optimiranim SPTF		Neizraziti s optimiranim SPTF i SPRF	
		Vrijednost	Smanjenje [%]	Vrijednost	Smanjenje [%]	Vrijednost	Smanjenje [%]
$UVP_{VZS}$ [s]	114,00	111,80	1,93	89,60	21,40	62,20	45,44
$UVP_{SVI}$ [s]	217,49	168,46	22,54	151,47	30,35	127,13	41,55
$S_{VZS}$	2,20	1,60	27,27	2,60	-18,18	1,40	36,36
$R$ [m]	95,20	78,10	17,96	72,66	23,68	54,62	42,62
$R_{MAX}$ [m]	361,58	361,79	-0,06	347,45	3,91	308,03	14,81

### 6.3.2. Analiza scenarija 2

U tablici 6 su dani sabrani rezultati promatranih prometnih parametara za drugi scenarij i odabrane konfiguracije. Iz dane tablice je vidljivo da je korištenjem ustaljenog regulatora srednje vrijeme putovanja vozila žurne službe iznosilo 186,20 sekundi. Korištenjem neizrazitog regulatora je to vrijeme smanjeno na 132,40 sekundi (što je smanjenje iznosu od 28,89%), korištenjem

neizrazitog regulatora s optimiranim SPTF je vozilo žurne službe putovalo 130,40 sekundi što je vrlo slično performansi prethodnog regulatora. Kod korištenja neizrazitog regulatora s optimiranim SPTF i SPRF je primijećen značajniji pad ukupnog vremena putovanja vozila žurne službe u odnosu na ustaljeni regulator, radi se o smanjenju za 37,70% što je jednako 116 sekundi vožnje.

Drugi važni parametar i drugi optimizacijski cilj je srednje ukupno vrijeme putovanja svih vozila u mreži, za ustaljeno upravljanje je ono iznosilo 220,52 sekundi. Ručno postavljeni neizraziti regulator je smanjio to vrijeme za 37,71 sekundi, neizraziti regulator s optimiranim SPTFF ga je smanjio za još više, za 70,41 sekundi. Neizraziti regulator s optimiranim SPTF i SPRF je uspio smanjiti vrijeme putovanja svih vozila za 99,93 sekundi što je 45,32%. Na temelju ovoga je moguće zaključiti da je korištenje bilo kojeg od predloženih sustava bolje od korištenja ustaljenog regulatora te da je proces optimizacije ispunio oba cilja za drugi scenarij. Neizraziti regulator s optimiranim SPTF i SPRF smanjio vrijeme putovanja za gotovo dva puta.

Tablica 6: DOBIVENI REZULTATI - SCENARIJ 2

Regulator Parametar	Ustaljeni	Neizraziti		Neizraziti s optimiranim SPTF		Neizraziti s optimiranim SPTF i SPRF	
		Vrijednost	Smanjenje [%]	Vrijednost	Smanjenje [%]	Vrijednost	Smanjenje [%]
UVP <sub>VŽS</sub> [s]	186,20	132,40	28,89	130,40	29,97	116,00	37,70
UVP <sub>SVI</sub> [s]	220,52	182,81	17,10	150,11	31,93	120,59	45,32
S <sub>VŽS</sub>	4,40	3,80	13,64	5,20	-18,18	2,20	50,00
R [m]	93,93	85,70	8,76	71,69	23,68	49,81	46,97
R <sub>MAX</sub> [m]	356,86	365,46	-2,41	340,08	4,70	337,62	5,39

### 6.3.3. Analiza scenarija 3

U tablici 7 su dani sabrani rezultati promatranih prometnih parametara za treći scenarij i odabrane konfiguracije. Iz dane tablice je vidljivo da je korištenjem ustaljenog regulatora srednje vrijeme putovanja vozila žurne službe iznosilo 121,60 sekundi. Korištenjem neizrazitog regulatora nije postignut gotovo nikakav efekt (smanjenje od 0,82%), korištenjem neizrazitog regulatora s optimiranim SPTF je vozilo žurne službe putovalo 98 sekundi što je smanjenje u iznosu od 19,41%. Kod korištenja neizrazitog regulatora s optimiranim SPTF i SPRF primijećeno je daljnje smanjenje u iznosu od 25,99%.

Drugi važni parametar i drugi optimizacijski cilj je srednje ukupno vrijeme putovanja svih vozila u mreži, za ustaljeni regulator je ono iznosilo 252,64 sekundi. Ručno postavljeni neizraziti

regulator je smanjio to vrijeme za 36,13 sekundi, neizraziti regulator s optimiranim SPTF ga je smanjio za još više, za 63,76 sekundi. Neizraziti regulator s optimiranim SPTF i SPRF je uspio smanjiti vrijeme putovanja svih vozila za 108 sekundi što je 42,75%. Na temelju ovoga je moguće zaključiti da je korištenje bilo kojeg od predloženih regulatora bolje od korištenja ustaljenog regulatora te da je proces optimizacije ispunio oba cilja za treći scenarij. Neizraziti regulator s optimiranim SPTF i SPRF smanjio vrijeme putovanja za gotovo dva puta.

Tablica 7: DOBIVENI REZULTATI - SCENARIJ 3

Regulator Parametar	Ustaljeni	Neizraziti		Neizraziti s optimiranim SPTF		Neizraziti s optimiranim SPTF i SPRF	
		Vrijednost	Smanjenje [%]	Vrijednost	Smanjenje [%]	Vrijednost	Smanjenje [%]
UVP <sub>VŽS</sub> [s]	121,60	120,60	0,82	98,00	19,41	90,00	25,99
UVP <sub>SVI</sub> [s]	252,64	216,51	14,30	188,88	25,24	144,64	42,75
S <sub>VŽS</sub>	2,60	1,60	38,46	2,40	7,69	2,00	23,08
R [m]	113,08	108,12	4,38	97,95	13,38	70,69	37,48
R <sub>MAX</sub> [m]	352,57	360,32	-2,20	347,54	1,43	337,37	4,31

#### 6.3.4. Analiza scenarija 4

U tablici 8 su dani sabrani rezultati promatranih prometnih parametara za četvrti scenarij i odabrane konfiguracije. Iz dane tablice je vidljivo da je korištenjem ustaljenog regulatora srednje vrijeme putovanja vozila žurne službe iznosilo 167 sekundi. Korištenjem neizrazitog regulatora je to vrijeme smanjeno na 130,4 sekundi (što je smanjenje iznosu od 21,92%), korištenjem neizrazitog regulatora s optimiranim SPT je vozilo žurne službe putovalo 100,4 sekundi što je smanjenje u iznosu od 39,88%. Kod korištenja neizrazitog regulatora s optimiranim SPTF i SPRF primijećeno je smanjenje u iznosu od 29,10%. U ovome slučaju se za smanjenje ukupnog vremena vožnje vozila žurne službe pokazao boljim neizraziti regulator s optimiranim SPTF.

Drugi važni parametar i drugi optimizacijski cilj je srednje ukupno vrijeme putovanja svih vozila u mreži, za ustaljeni regulator je ono iznosilo 263,99 sekundi. Ručno postavljeni neizraziti regulator je smanjio to vrijeme za 60,2 sekundi, neizraziti regulator s optimiranim SPTF ga je smanjio za još više, za 80,94 sekundi. Neizraziti regulator s optimiranim SPTF i SPRF je uspio smanjiti vrijeme putovanja svih vozila za 104,03 sekundi što je 39,41%. Na temelju ovoga je moguće zaključiti da je korištenje bilo kojeg od predloženih regulatora bolje od korištenja ustaljenog regulatora te da je proces optimizacije ispunio oba cilja.

Tablica 8: DOBIVENI REZULTATI - SCENARIJ 4

Regulator Parametar	Ustaljeni	Neizraziti		Neizraziti s optimiranim SPTF		Neizraziti s optimiranim SPTF i SPRF	
		Vrijednost	Smanjenje [%]	Vrijednost	Smanjenje [%]	Vrijednost	Smanjenje [%]
UVP <sub>VZS</sub> [s]	167,00	130,40	21,92	100,40	39,88	118,40	29,10
UVP <sub>SVI</sub> [s]	263,99	203,79	22,80	183,05	30,66	159,96	39,41
S <sub>VZS</sub>	5,20	2,80	46,15	2,00	61,54	4,60	11,54
R [m]	115,42	98,22	14,90	89,73	22,26	80,79	30,00
R <sub>MAX</sub> [m]	355,40	346,77	2,43	338,66	4,71	333,90	6,05

### 6.3.5. Analiza scenarija 5

U tablici 9 su dani sabrani rezultati promatranih prometnih parametara za peti scenarij i odabrane konfiguracije. Iz dane tablice je vidljivo da je korištenjem ustaljenog regulatora srednje vrijeme putovanja vozila žurne službe iznosilo 161,20 sekundi. Korištenjem neizrazitog regulatora je to vrijeme smanjeno na 129,80 sekundi (što je smanjenje iznosu od 19,48%), korištenjem neizrazitog regulatora s optimiranim SPTF je vozilo žurne službe putovalo 105,6 sekundi što je smanjenje u iznosu od 34,49%. Kod korištenja neizrazitog regulatora s optimiranim SPTF i SPRF primijećeno je daljnje smanjenje u iznosu od 49,13%. Taj se regulator pokazao za ovaj slučaj kao najbolja opcija smanjivši vrijeme putovanja vozila žurne službe za gotovo pola.

Drugi važni parametar i drugi optimizacijski cilj je srednje ukupno vrijeme putovanja svih vozila u mreži, za ustaljeni regulator je ono iznosilo 287,50 sekundi. Ručno postavljeni neizraziti regulator je smanjio to vrijeme za 70,74 sekundi, neizrazitog regulatora s optimiranim SPTF ga je smanjio za još više, za 110,28 sekundi. Neizraziti regulator s optimiranim SPTF i SPRF je uspio smanjiti vrijeme putovanja svih vozila za 132,81 sekundi što je 46,19%. Na temelju ovoga je moguće zaključiti da je korištenje bilo kojeg od predloženih regulatora bolje od korištenja ustaljenog regulatora te da je proces optimizacije ispunio oba cilja. U ovome scenariju je potpuno neizraziti regulator s optimiranim SPTF i SPRF postigao izvrsne rezultate za oba cilja.

Tablica 9: DOBIVENI REZULTATI - SCENARIJ 5

Regulator Parametar	Ustaljeni	Neizraziti		Neizraziti s optimiranim SPTF		Neizraziti s optimiranim SPTF i SPRF	
		Vrijednost	Smanjenje [%]	Vrijednost	Smanjenje [%]	Vrijednost	Smanjenje [%]
UVP <sub>VZS</sub> [s]	161,20	129,80	19,48	105,60	34,49	82,00	49,13
UVP <sub>SVI</sub> [s]	287,50	212,76	26,00	177,22	38,36	154,69	46,19
S <sub>VZS</sub>	4,60	2,20	52,17	2,40	47,83	2,20	52,17
R [m]	138,87	116,75	15,93	95,72	31,07	82,69	40,45
R <sub>MAX</sub> [m]	435,86	431,14	1,08	384,13	11,87	404,04	7,30

### 6.3.6. Analiza scenarija 6

U tablici 10 su dani sabrani rezultati promatranih prometnih parametara za šesti i posljednji scenarij i odabrane konfiguracije. Iz dane tablice je vidljivo da je korištenjem ustaljenog regulatora srednje vrijeme putovanja vozila žurne službe iznosilo 183,80 sekundi. Korištenjem neizrazitog regulatora je to vrijeme smanjeno na 137,40 sekundi (što je smanjenje iznosu od 25,24%), neizrazitog regulatora s optimiranim SPTF je vozilo žurne službe putovalo 94 sekundi što je smanjenje u iznosu od 48,86%. Kod korištenja neizrazitog regulatora s optimiranim SPTF i SPRF primijećeno je smanjenje u iznosu od 40,04%. U ovome slučaju se za smanjenje ukupnog vremena vožnje vozila žurne službe pokazao boljim neizraziti regulator s optimiranim SPTF.

Drugi važni parametar i drugi optimizacijski cilj je srednje ukupno vrijeme putovanja svih vozila u mreži, za ustaljeni regulator je ono iznosilo 273,26 sekundi. Ručno postavljani neizraziti regulator je smanjio to vrijeme za 80,67 sekundi, neizrazitog regulatora s optimiranim SPTF ga je smanjio za još više, za 94,65 sekundi. Neizraziti regulator s optimiranim SPTF i SPRF je uspio smanjiti vrijeme putovanja svih vozila za 125,24 sekundi što je 45,83%. Na temelju ovoga je moguće zaključiti da je korištenje bilo kojeg od predloženih regulatora bolje od korištenja ustaljenog regulatora te da je proces optimizacije ispunio oba cilja.

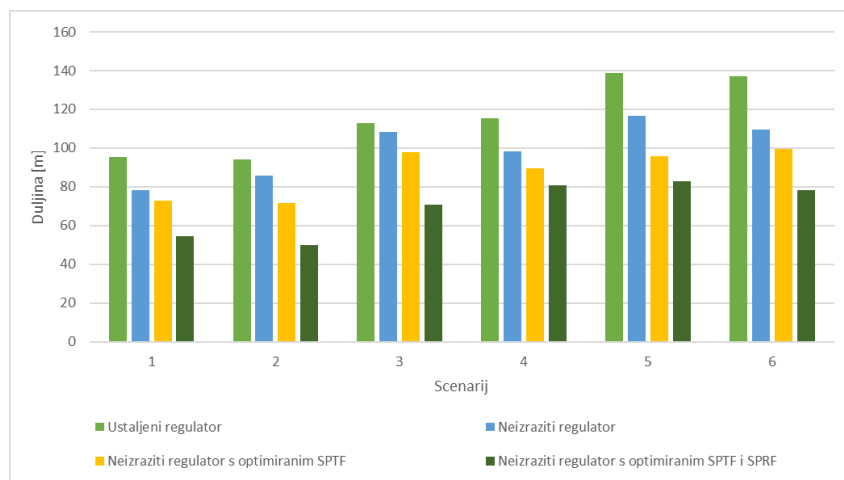
Tablica 10: DOBIVENI REZULTATI - SCENARIJ 6

Regulator Parametar	Ustaljeni	Neizraziti		Neizraziti s optimiranim SPTF		Neizraziti s optimiranim SPTF i SPRF	
		Vrijednost	Smanjenje [%]	Vrijednost	Smanjenje [%]	Vrijednost	Smanjenje [%]
$UVP_{V\check{Z}S}$ [s]	183,80	137,40	25,24	94,00	48,86	110,20	40,04
$UVP_{S\check{V}I}$ [s]	273,26	192,59	29,52	178,61	34,64	148,02	45,83
$S_{V\check{Z}S}$	5,20	3,20	38,46	1,80	65,38	2,20	57,69
$\bar{R}$ [m]	136,89	109,72	19,85	99,69	27,17	78,41	42,72
$R_{MAX}$ [m]	441,90	438,63	0,74	407,25	7,84	402,49	8,92

### 6.3.7. Zbirni rezultati

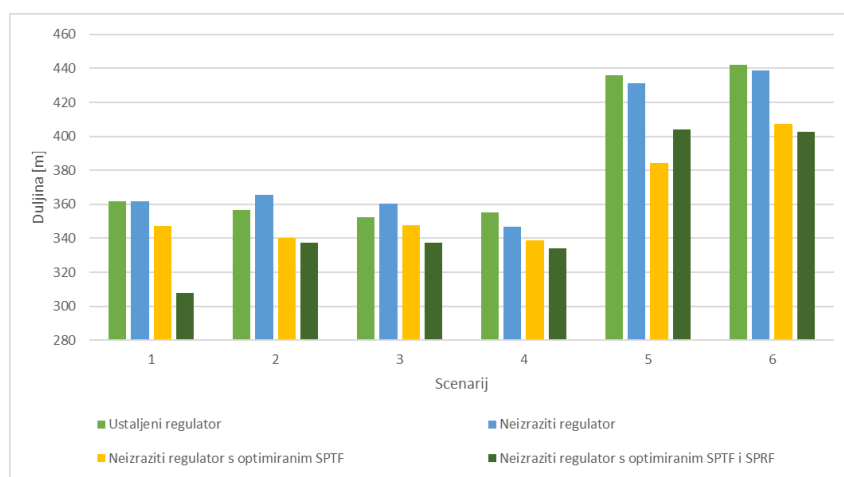
Na grafikonu 1 je prikazan iznos srednjeg repa čekanja na svim privozima. Za svaki scenarij je prikazana mjera dobivena različitim konfiguracijama regulatora. Sa grafikona se može vidjeti gotovo linearno poboljšanje među konfiguracijama u svim scenarijima. Neizraziti regulator s optimiranim SPTF i SPRF je uspio u svakom scenariju najviše smanjiti prosječnu duljinu repova čekanja. Promatrano u odnosu s ustaljenim regulatorom je postigao iduća smanjenja redom

po scenarijima: 42,62%, 46,97%, 37,48%, 30%, 40,45% i 42,72%. Najveće poboljšanje je zabilježeno u šestom scenariju te je srednja duljina repa čekanja smanjena za 58,48 metara.



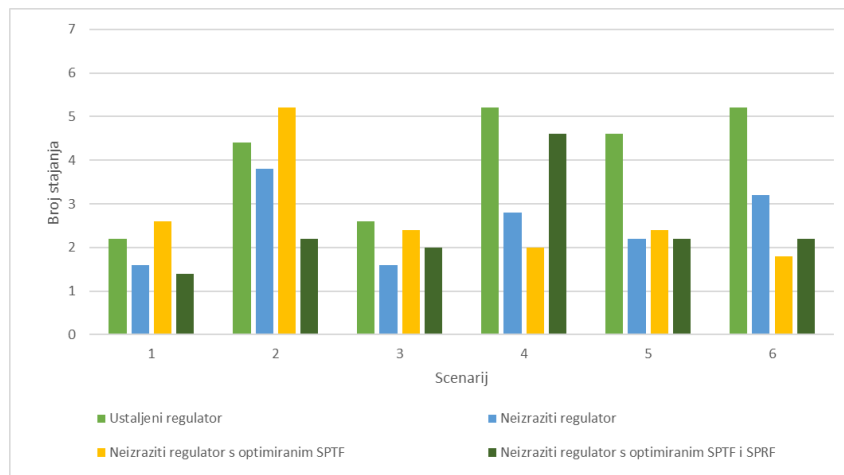
Grafikon 1: Prosječna duljina repova čekanja svih privoza

Na grafikonu 2 je prikazan iznos maksimalnog repa čekanja na svim privozima. Za svaki scenarij je prikazana mjera dobivena različitim konfiguracijama regulatora. Sa grafikona je vidljivo da su ponuđene neizrazite konfiguracije gotovo svaki put uspješno smanjile maksimalni dosegnuti rep čekanja (osim u slučaju ručno podešenoga neizrazitog regulatora u scenariju 2). Neizraziti regulator s optimiranim SPTF i SPRF je uspio gotovo u svakom scenariju najviše smanjiti maksimalnu duljinu repova čekanja izuzev petog scenarija. Promatrano u odnosu s ustaljenim upravljanjem je postigao iduća smanjenja redom po scenarijima: 14,81%, 5,39%, 4,31%, 6,05%, 7,30% i 8,92%. Najveće poboljšanje je zabilježeno u prvome scenariju te je maksimalno dosegnuta duljine repa čekanja smanjena za 53,55 metara.



Grafikon 2: Maksimalna duljina repova čekanja svih privoza

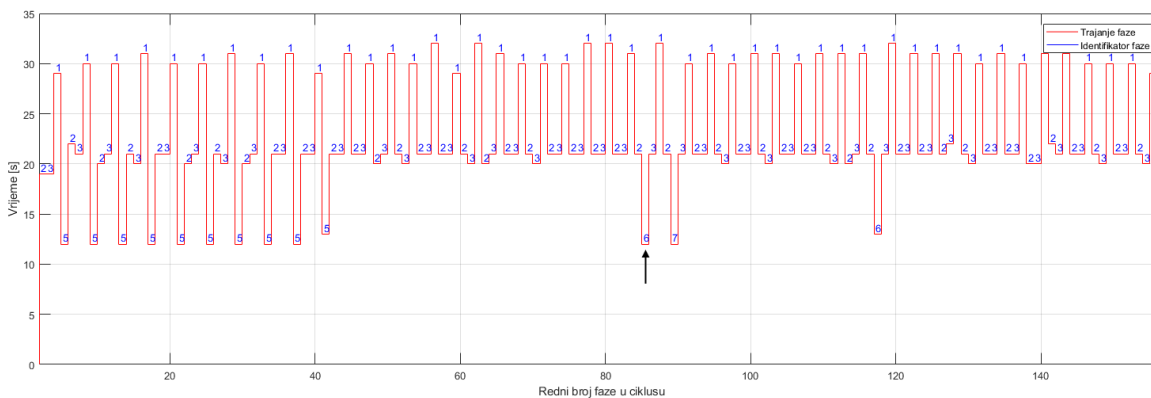
Na grafikonu 3 je prikazan iznos prosječnog broja stajanja vozila žurne službe. Za svaki scenarij je prikazana mjera dobivena različitim konfiguracijama regulatora. Sa grafikona je vidljivo da su ponuđene neizrazite konfiguracije gotovo svaki put uspješno smanjile broj koliko je puta vozilo žurne službe trebalo stati radi zagušenja na svome putu. Neizraziti regulator s optimiranim SPTF i SPRF je uspio u tri od šest scenarija najviše smanjiti broj stajanja. Promatrano u odnosu s ustaljenim regulatorom je postigao iduća smanjenja redom po scenarijima: 36,36%, 50,00%, 23,08%, 11,54%, 52,17% i 57,69%. Najveće poboljšanje je zabilježeno u šestom scenariju te broj stajanja smanjen sam 5,2 u prosjeku po vožnji na 2,2 stajanja.



Grafikon 3: Broj stajanja vozila žurne službe

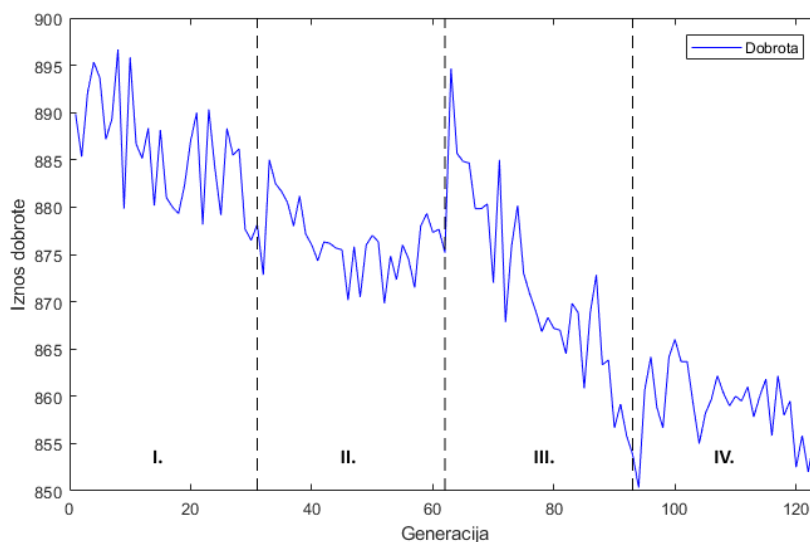
Na grafikonu 4 je prikazan redosljed izmjena faza te njihova trajanja iz odabrane simulacije trećeg scenarija uz upravljanje neizrazitog regulatora s optimiranim SPTF i SPRF. Dakle radi se o scenariju s srednjom količinom prometne potražnje te vozilo žurne službe dolazi sa sjevernog dijela Heinzelve ulice i nastavlja ulicom prema jugu (ruta 1, na slici 10 crvene boje). Na x-osi je prikazan redni broj faze, a na y-osi se nalazi vrijeme u sekundama. Crvena linija pokazuje koliko je trajala faza čiji je indeks naznačen plavom brojkom povrh te crvene linije. Ovi indeksi faza odgovaraju indeksima iz slike korištene NEMA strukture (vidi 3). Crnom strelicom je označena dodatna faza s brojem 6 na otprilike polovici trajanja simulacije. Šesta faza, je dodatna faza koja služi za propuštanje vozila koja se nalaze na sjeverom privozu Heinzelve ulice. Ova faza je istaknuta jer je u tom periodu i generirano vozilo žurne službe na tom privozu te se čini da je regulator procijenio da je potrebno dodati još jednu fazu te produljiti prolazak sjevernom privozu.





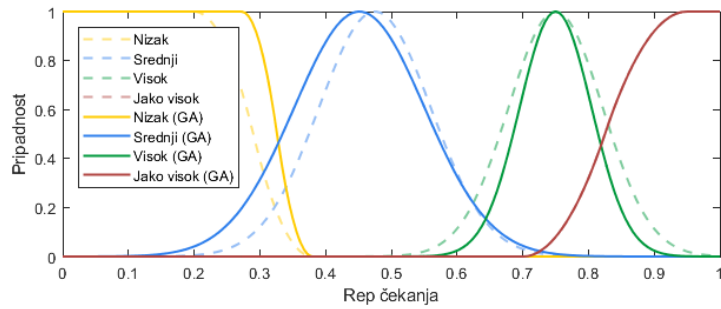
Grafikon 4: Prikaz redoslijeda izvođenja signalnih faza i njihova trajanja

Sami proces optimizacije je moguće prikazati praćenjem dobrote najbolje jedinice kroz generaciji. Na grafikonu 5 je prikazano upravo to. Grafikon je podijeljen u četiri cjeline, a one su redom: (I) optimizacija neizrazitih pravila SPTF, (II) optimizacija funkcija pripadnosti SPTF, (III) optimizacija neizrazitih pravila SPRF i (IV) optimizacija funkcija pripadnosti SPRF. Izgled ove krivulje koja prikazuje najbolje jedinice iz svih generacija je padajući. Kako je kriterijska funkcija koja ocjenjuje dobrotu rješenja postavljena na taj način da optimizacijski proces pokušava naći njen minimum, ovaj izgled krivulje je očekivan.

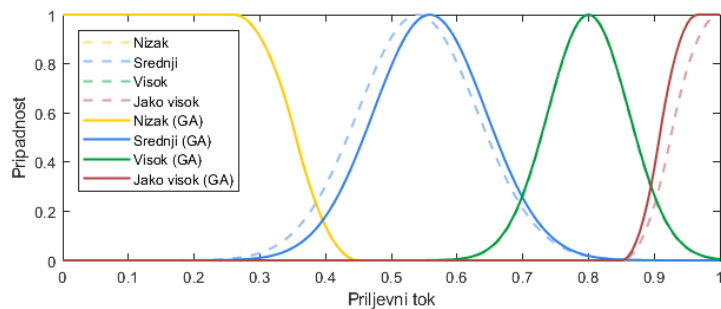


Grafikon 5: Najbolje jedinice kroz sve generacije optimizacije

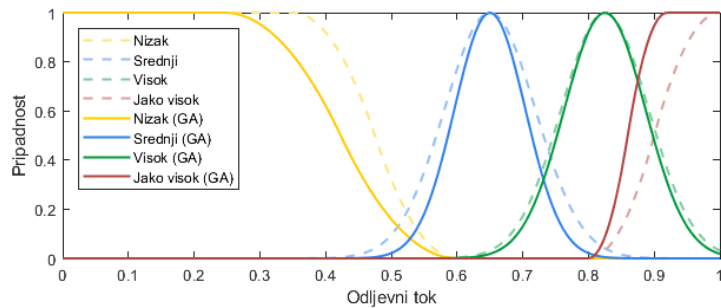
Na grafikonima 6, 7, 8 i 9 su prikazane funkcije pripadnosti SPTF prije i poslije optimizacije. Iscrtanim linijama su prikazane funkcije prije optimizacije, a punim linijama u istim bojama poslije nje.



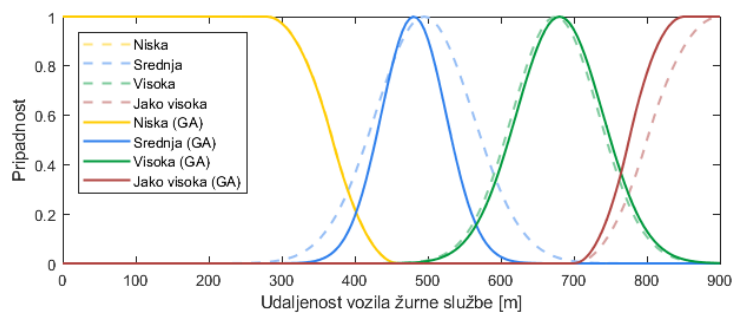
Grafikon 6: Prikaz optimiranih funkcija pripadnosti za ulaznu varijablu *Rep čekanja* sustava za promjenu trajanja faza



Grafikon 7: Prikaz optimiranih funkcija pripadnosti za ulaznu varijablu *Priljevni tok* sustava za promjenu trajanja faza



Grafikon 8: Prikaz optimiranih funkcija pripadnosti za ulaznu varijablu *Odljevni tok* sustava za promjenu trajanja faza



Grafikon 9: Prikaz optimiranih funkcija pripadnosti za ulaznu varijablu *Udaljenost vozila žurne službe* sustava za promjenu trajanja faza

## 7. Zaključak

Za potrebe ovoga rada su izrađena dva neizrazita upravljačka sustava za izmjenu signalnog plana. Jedan za promjenu redoslijeda signalnih faza, a drugi za promjenu trajanja signalnih faza. Oba sustava su izrađena tako da reagiraju na prisutnost vozila žurne službe te djeluju strategijom davanja djelomičnog prioriteta prolaska vozilima žurnih službi. Djelovanje tih sustava je evaluirano na četverokrakom raskrižju kroz šest različitih prometnih scenarija. Upravljanje signalnim planom izrađenim sustavom se pokazalo učinkovitije od upravljanja ustaljenim signalnim planom. Kako bi se istražio puni potencijal takvog upravljanja osmišljen je proces optimizacije implementiranih neizrazitih upravljačkih sustava pomoću genetskog algoritma. Cilj optimizacije je bio smanjenje vremena putovanja svih vozila, no jednako važno i vozila žurne službe. Nakon optimizacije je sustav postigao još bolje rezultate nego prije optimizacije. U jednom od testiranih scenarija su vremena putovanja svih vozila i vozila žurnih službi smanjena gotovo u pola.

Potencijal korištenja inteligentnih rješenja u području tehnologije prometa je velik. Smanjenjem vremena putovanja i duljina repova čekanja se smanjuju i troškovi koji nastaju uslijed gubitka vremena te povećane potrošnje goriva. Optimalnim vođenjem prometa se smanjuju i emisije štetnih plinova čime se čuva zdravlje ljudi i planeta, a skraćeno vrijeme putovanja vozila žurnih službi u intervenciji može izravno utjecati na porast vjerojatnosti spašavanja života. Posebno ako se navedeno uzme u obzir u kriterijskoj funkciji optimiranja.

Rješenja iz područja ITS-a se sve više i više koriste u svim prometnim granama te na širokoj lepezi problema unutar njih te pomažu činiti promet sigurnijim, bržim i ekološki prihvatljivijim. No uvijek je potrebno na umu imati i pitanje morala i povjerenja u jedan takav sustav. Od anonimnoga agregiranja podataka o vozilima je samo korak dalje od agregiranja podataka o njihovim vozačima. Neupitno je da su pametni gradovi, koji koriste ovakva rješenja, budućnost razvoja života u gradskim sredinama, no važno je da su implementirani tako da budu na službi svih članova društva i transparentni.

Nastavak istraživanja na ovu temu vidi se u nadogradnji optimizacijskog procesa povećanjem broja izvedenih generacija te provjeri drugačijih kriterijskih funkcija. Također je potrebno istražiti i mogućnost implementacije drugačijih poredaka optimizacije neizrazitih pravila i funkcija pripadnosti. Vjernije simulacije u smislu dužeg trajanja (najbolje cijeli tipični radni dan) i

vremenskih promjenljivih prometnih opterećenja bi također približile cjelokupni sustav stvarnim uvjetima.

## Popis literature

- [1] Bošnjak, I. *Inteligentni transportni sustavi 1*. Sveučilište u Zagrebu, Fakultet prometnih znanosti, Zagreb, 2006.
- [2] European Road Safety Observatory. Annual accident report 2018, 2018. [https://ec.europa.eu/transport/road\\_safety/sites/roadsafety/files/pdf/statistics/dacota/asr2018.pdf](https://ec.europa.eu/transport/road_safety/sites/roadsafety/files/pdf/statistics/dacota/asr2018.pdf) [Pristupljeno: lipanj 2020.].
- [3] European Environment Agency. Transport in europe: key facts and trends. <https://www.eea.europa.eu/signals/signals-2016/articles/transport-in-europe-key-facts-trends> [Pristupljeno: lipanj 2020.].
- [4] European Commission Department of Mobility and Transport. [https://ec.europa.eu/transport/facts-fundings/scoreboard/compare/energy-union-innovation/road-congestion\\_en#2016](https://ec.europa.eu/transport/facts-fundings/scoreboard/compare/energy-union-innovation/road-congestion_en#2016) [Pristupljeno: lipanj 2020.].
- [5] L.A. Klein. *ITS sensors and architectures for traffic management and connected vehicles*. ITS Sensors and Architectures for Traffic Management and Connected Vehicles, Jan 2017.
- [6] U.S. Department of Transportation Federal Highway Administration. Traffic signal timing manual. <https://www.fhwa.dot.gov/publications/research/randt/evaluations/17007/17007.pdf> [Pristupljeno: lipanj 2020.].
- [7] A. Vogel, I. Oremović, R. Šimić, and E. Ivanjko. Fuzzy traffic light control based on phase urgency. In *Proceedings of 62nd International Symposium ELMAR-2019*, pages 9–14, Zadar, Croatia, September 2019.
- [8] I. Oremović. Possibility of Applying Fuzzy Logic for Extending Phase Time for Signalized Intersections. Undergraduate thesis, Faculty of Transport and Traffic Sciences, University of Zagreb, Zagreb, September 2018. (In Croatian).
- [9] Oremović, I., Šimić, R., Vogel, A. Analiza utjecaja adaptivnog upravljanja signalnim planovima semaforiziranog raskrižja na vrijeme putovanja vozila žurnih službi. Rektorova nagrada, Sveučilište u Zagrebu, Zagreb, 2019.

- [10] SCOOT USER GUIDE. Siemens Mobility, Traffic Solutions UTC System, 2016.
- [11] Anžek, M., Divić, A., Lanović, Z. Smjernice za prometnu svjetlosnu signalizaciju na cestama. Ministarstvo pomorstva, prometa i veza, Zagreb, 2001.
- [12] Traffic Operations Division Traffic Engineering Office U.S. Department of Transportation. Traffic design manual, 2018. [https://www.tn.gov/content/dam/tn/tdot/traffic-engineering/tdm-2018/TDOT%20Traffic%20Design%20Manual\\_Complete%20Manual\\_Aug2018.pdf](https://www.tn.gov/content/dam/tn/tdot/traffic-engineering/tdm-2018/TDOT%20Traffic%20Design%20Manual_Complete%20Manual_Aug2018.pdf) [Pristupljeno: lipanj 2020.].
- [13] R. Šimić. Possibility of Applying Fuzzy Logic in Determining Phase Order for Signalized Intersections. Undergraduate thesis, Faculty of Transport and Traffic Sciences, University of Zagreb, Zagreb, September 2018. (In Croatian).
- [14] T. H. J Furth, P. G. i Muller. Conditional bus priority at signalized intersections: Better service with less traffic disruption. *Transportation Research Record*, 1731(1):23–30, 2000.
- [15] B. Kapusta. Upravljanje prioritetima prolaska vozila žurnih službi kroz izolirano semaforizirano raskrižje primjenom neizrazite logike. Diplomski rad, Fakultet prometnih znanosti, Sveučilište u Zagrebu, Zagreb, Rujan 2019.
- [16] Zadeh L.A. Fuzzy Sets. *Information and control*, 8:338–353, 1965.
- [17] Mamdani E.H. i Assilian S. An experiment in linguistic synthesis with a fuzzy logic controller. *International Journal of Man-Machine Studies*, 7:1–13, 1975.
- [18] Baotić M. i Perić N. Petrović I. Inteligentni sustavi upravljanja: Neuronske mreže, evolucijski i genetički algoritmi. Fakultet elektrotehnike i računarstva, Sveučilište u Zagrebu, 2012.
- [19] Ivanjko E. Umjetna inteligencija: Genetski algoritam - autorizirana predavanja. Fakultet prometnih znanosti, Sveučilište u Zagrebu, 2019.
- [20] M. Golub. Genetski algoritam - skripta prvo dio. Fakultet elektrotehnike i računarstva, Sveučilište u Zagrebu, 2004.
- [21] M. Golub. Genetski algoritam - skripta drugi dio. Fakultet elektrotehnike i računarstva, Sveučilište u Zagrebu, 2004.

- [22] Pappis C.P. i Mamdani E.H. A Fuzzy Logic Controller for a Traffic Junction. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, 7:707–717, 1977.
- [23] Chiou Y.-C. i Huang Y.-F. Lam W. Stepwise genetic fuzzy logic signal control under mixed traffic conditions. *Journal of Advanced Transportation*, 47, 01 2013.
- [24] Qiao J, Yang N, Gao J. Two-Stage Fuzzy Logic Controller for Signalized Intersection. *Systems, Man and Cybernetics, Part A: Systems and Humans, IEEE Transactions on*, 41:178 – 184, 02 2011.
- [25] Hejazi S. R. i Dehghan S. A. M. Homaei H. 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.
- [26] A. Vogel, I. Oremović, R. Šimić, and E. Ivanjko. Improving traffic light control by means of fuzzy logic. In *Proceedings of 60th International Symposium ELMAR-2018*, pages 51–56, Zadar, Croatia, September 2018.
- [27] B. Kapusta, M. Miletić, E. Ivanjko, and M. Vujić. 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.
- [28] M. Miletić, B. Kapusta, and E. Ivanjko. Comparison of two approaches for preemptive traffic light control. In *2018 International Symposium ELMAR*, pages 57–62, Zadar, Croatia, September 2018.
- [29] Pregled programskog paketa MATLAB. Preuzeto sa: <https://www.mathworks.com/videos/matlab-overview-61923.html> [Pristupljeno: lipanj 2020.].
- [30] 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 signalne faze prije izvođenja [8] . . . . .	6
2	Promjena trajanja signalne faze tokom izvođenja [8] . . . . .	7
3	Prikaz prstenaste NEMA strukture [9] . . . . .	8
4	Funkcije pripadnosti za procjenu broja pješaka . . . . .	12
5	Vrste selekcije [15] . . . . .	16
6	Dijagram adaptivnog upravljanja semaforiziranim raskrižjem . . . . .	23
7	Prikaz svih kombinacija signalnih faza u NEMA strukturi . . . . .	24
8	Optimizacijski tok algoritma . . . . .	29
9	Signalni plan raskrižja Heinzelova-Zvonimirova ulica . . . . .	34
10	Rute vozila žurne službe . . . . .	35



## Popis tablica

1	PRIMJER NEIZRAZITIH PRAVILA U UPRAVLJANJU TRAJANJEM SIGNALNIH FAZA	13
2	POTPUNO MIJEŠAJUĆA MUTACIJA . . . . .	20
3	PRIMJER KÔDIRANJA KROMOSOMA . . . . .	30
4	PROMETNA POTRAŽNJA SVAKOG SCENARIJA . . . . .	34
5	DOBIVENI REZULTATI - SCENARIJ 1 . . . . .	37
6	DOBIVENI REZULTATI - SCENARIJ 2 . . . . .	38
7	DOBIVENI REZULTATI - SCENARIJ 3 . . . . .	39
8	DOBIVENI REZULTATI - SCENARIJ 4 . . . . .	40
9	DOBIVENI REZULTATI - SCENARIJ 5 . . . . .	40
10	DOBIVENI REZULTATI - SCENARIJ 6 . . . . .	41

## Popis grafikona

1	Prosječna duljina repova čekanja svih privoza . . . . .	42
2	Maksimalna duljina repova čekanja svih privoza . . . . .	42
3	Broj stajanja vozila žurne službe . . . . .	43
4	Prikaz redoslijeda izvođenja signalnih faza i njihova trajanja . . . . .	44
5	Najbolje jedinice kroz sve generacije optimizacije . . . . .	44
6	Prikaz optimiranih funkcija pripadnosti za ulaznu varijablu <i>Rep čekanja</i> sustava za promjenu trajanja faza . . . . .	45
7	Prikaz optimiranih funkcija pripadnosti za ulaznu varijablu <i>Priljevni tok</i> sustava za promjenu trajanja faza . . . . .	45
8	Prikaz optimiranih funkcija pripadnosti za ulaznu varijablu <i>Odljevni tok</i> sustava za promjenu trajanja faza . . . . .	45
9	Prikaz optimiranih funkcija pripadnosti za ulaznu varijablu <i>Udaljenost vozila</i> <i>žurne službe</i> sustava za promjenu trajanja faza . . . . .	45



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.

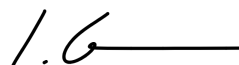
Svojim potpisom potvrđujem i dajem suglasnost za javnu objavu \_\_\_\_\_ diplomskog rada  
pod naslovom **PROŠIRENJE NEIZRAZITOG ADAPTIVNOG UPRAVLJANJA**

**SEMAFORIZIRANIM RASKRIŽJEM PRIORITETIMA PROLASKA VOZILA ŽURNIH SLUŽBI**

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

U Zagrebu, 8.7.2020 \_\_\_\_\_

Student/ica:



(potpis)