

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET PROMETNIH ZNANOSTI

Borna Kapusta, Mladen Miletić

ANALIZA UTJECAJA ADAPTIVNOG UPRAVLJANJA  
SIGNALNIM PLANOVIMA SEMAFORIZIRANOG RASKRIŽJA  
NA VRIJEME PUTOVANJA VOZILA ŽURNIH SLUŽBI

ZAGREB, 2017.

Ovaj rad izrađen je u Zavodu za inteligentne transportne sustave Fakulteta prometnih znanosti u Zagrebu pod vodstvom doc. dr. sc. Edouarda Ivanjka i predan je na natječaj za dodjelu Rektorove nagrade u akademskoj godini 2016/2017.

# Sadržaj

1.	Uvod .....	1
2.	Osnovni model upravljanja prometom u urbanim sredinama .....	4
3.	Problem dodjeljivanja prioriteta vozilima žurnih službi .....	7
	3.1. Strategije dodjeljivanja prioriteta na semaforiziranim raskrižjima.....	7
	3.1.1. Pasivne strategije dodjele prioriteta .....	8
	3.1.2. Aktivne strategije dodjele prioriteta.....	10
	3.1.3. Prometno ovisne (adaptivne) strategije dodjele prioriteta .....	12
	3.2. Pregled postojećih tehnologija.....	13
	3.3. Utjecaj dodjeljivanja prioriteta žurnim službama.....	13
	3.4. Centralizirani sustav upravljanja semaforiziranim raskrižjima .....	14
4.	Algoritam za dodjelu prioriteta zasnovan na duljini reda čekanja i praćenju vozila..	16
	4.1. Algoritam za dodjelu prioriteta.....	16
	4.2. Algoritam za povratak oduzetog vremena .....	20
5.	Simulacijsko okruženje .....	23
	5.1. Simulator prometa VISSIM .....	23
	5.2. Programski paket MATLAB .....	26
	5.3. Povezivanje MATLAB-a i VISSIM-a pomoću COM sučelja.....	27
6.	Simulacijski rezultati .....	30
	6.1. Model korištenog raskrižja .....	30
	6.2. Opis prometnih scenarija .....	31
	6.3. Prikaz dobivenih rezultata .....	33
	6.3.1. Rezultati simulacija scenarija 1 .....	34
	6.3.2. Rezultati simulacija scenarija 2 .....	39
	6.3.3. Rezultati simulacija scenarija 3 .....	43
	6.3.4. Rezultati simulacija scenarija 4 .....	47

6.4. Analiza dobivenih rezultata .....	51
7. Zaključak .....	56
Zahvale .....	58
Literatura .....	59
Sažetak.....	62
Summary.....	63
Popis slika.....	64
Popis tablica.....	65
Popis grafikona.....	66

# 1. Uvod

Iako se promet kao sustav razvijao stoljećima tek se sredinom 19og stoljeća pojavljuje potreba za njegovom regulacijom kao jedan od rezultata industrijske revolucije i sve većeg širenja urbanih sredina. Uslijed sve veće napućenosti gradova sve više pažnje se pridodavalo sigurnosnim pravilima i propisima za ponašanje sudionika u prometu. Kao rezultat pojavljuje se prva telematička naprava odnosno izum John Peak Knight-a koji danas poznajemo kao semafor. Krajem 19og i početkom 20og stoljeća pojavljuju se i prve studije vezane uz problem regulacije prometa. Daljnjim razvojem tehnike i tehnologije pojavljuju se električni semafori kao i prvi detektori prometa korišteni u svrhu upravljanja [1].

Broj vozila u urbanim sredinama je sve više rastao, sve dok nije premašio kapacitete urbanih prometnica. Zbog ograničenja postavljenih od okoline samih urbanih prometnica u većini slučajeva nije bila moguća izgradnja dodatnih prometnih trakova u svrhu povećanja propusne moći prometnice. Jedina preostala mogućnost je bilo uvođenje Inteligentnih Transportnih Sustava (*engl. Intelligent Transport Systems, ITS*), posebno u gradovima pogođenih zagušenjima u SAD-u u drugoj polovici prošlog stoljeća. U [2] se može naći sljedeća definicija ITS-a: "ITS se definira kao holistička, upravljačka i informacijsko-komunikacijska (kibernetika) nadogradnja klasičnog sustava prometa i transporta kojim se postiže znatno poboljšanje performansi, odvijanje prometa, učinkovitiji transport putnika i roba, poboljšanje sigurnosti u prometu, udobnost i zaštita putnika, manja onečišćenja okoliša, itd."

Iako je ITS razvijan s istim ciljem u SAD-u, Europi i Japanu, zbog različitosti ponude i potražnje za ITS uslugama su se početne taksonomije ITS usluga u tim zemljama dijelom razlikovale. To je posebice vidljivo u tržišnim paketima koji su u ponudi u navedenim zemljama [2]. Upravo zbog tih razlika uloženi su veliki naponi od strane međunarodne organizacije za standardizaciju (ISO) kako bi se definirala početna ITS taksonomija. Prvenstveno u području cestovnog, odnosno cestovno-željezničkog prometa. Početni model iz 1990. godine prema ISO TR 14813-1 sadržavao je podjelu ITS-a na osam funkcionalnih područja, što je 1999. godine prošireno na jedanaest, a konačno 2015. godine na trinaest funkcionalnih područja [3].

Mnogi ITS sustavi imaju mogućnost zasebnog rada, no tek kroz međusobnu integraciju do izražaja dolazi njihov puni potencijal. Međusobna integracija utječe na znatno

smanjenje troškova novih sustava jer se integracijom izbjegava nepotrebno dupliciranje komponenti više sustava koji primjerice zahtijevaju identičan podatak o trenutnom stanju prometa na specifičnoj prometnici. Kako bi se integracija sustava olakšala osmišljena je ITS arhitektura čija je zadaća pokriti sve tehničke, organizacijske, pravne i poslovne probleme koji se pojavljuju prilikom implementacije i integracije novog ITS sustava. Dan je veliki naglasak na pojašnjenju tokova podataka između različitih podsustava unutar ITS arhitekture [4]. Postojanje ITS arhitekture omogućuje izgradnju glavnog prometnog centra koji na lokalnoj razini prikuplja podatke o broju vozila na glavnim prometnim tokovima kroz grad, adaptivno upravlja semaforiziranim raskrižjima, šalje odgovarajuće informacije o stanju na cestama vozačima cestovnih vozila, vrši automatsku naplatu parkinga, nadzor prekršitelja prometne regulative, itd.

Unatoč tome što se razvitak prometa okrenuo razvoju primjerenom čovjeku i davanju sve većeg naglaska na korištenje javnog gradskog prijevoza (JGP), u mnogim urbanim sredinama se pojavljuju problemi zagušenja prometa, naročito unutar vršnog sata. Takva zagušenja ne utječu samo na promet osobnih vozila, već i na JGP, a osobito na prolazak vozila žurnih službi. Iako žurne službe imaju pravo prolaska kroz crveno svjetlu na semaforu, gubi se velika količina vremena na raščišćavanje vozila pred raskrižjem, te je znatno smanjena razina sigurnosti unatoč sporijem prolasku vozila žurne službe kroz raskrižje. Smanjenje vremena odaziva žurnih službi bitno utječe na smanjenje smrtno stradalih i sprječavanje dodatno stradalih nakon prometne nesreće pa je od iznimne važnosti osigurati što brži prolazak vozila žurnih službi kroz urbanu cestovnu prometnu mrežu. Sustavi dodjele prioriteta žurnim službama mogu uvelike smanjiti kašnjenja te povećati sigurnost svih sudionika u prometu na ruti vozila žurne službe.

Tradicionalno, dodjeljivanje prioriteta žurnim službama je ovisilo o detekciji vozila putem osjetila i regulatora koji bi nakon detekcije vozila žurne službe dodijelio prioritet prema prethodno definiranim pravilima [5]. Suvremeniji sustavi koriste satelitske lokacijske tehnologije poput GPS-a (*engl. Global Positioning System*) koji omogućuju višu razinu detekcije vozila jer postaje moguće procijeniti vrijeme dolaska žurnog vozila na semaforizirano raskrižje [6]. U ovom radu će se koristiti takav sustav detekcije vozila gdje će se GPS podaci, kao i prometna mreža simulirati.

Poznavanjem rute vozila žurne službe te uz integraciju mjerenja s osjetila redova čekanja na raskrižju postaje moguće adaptivnim upravljanjem prilagoditi signalne planove i to na nekoliko raskrižja unaprijed te time omogućiti informiranje vozača o nadolasku žurnog

vozila, smanjiti broj vozila na ruti žurnog vozila te u konačnici omogućiti siguran prolaz kroz semaforizirano raskrižje bez zaustavljanja.

Cilj ovog rada je predstaviti problematiku dodjele prioriteta na semaforiziranim raskrižjima, te implementirati i evaluirati algoritam dodjele prioriteta vozilima žurnih službi. Algoritam je zasnovan na praćenju lokacije vozila i duljini reda čekanja, te je implementiran za slučaj izoliranog semaforiziranog raskrižja korištenjem simulacijskog alata PTV VISSIM i programskog paketa MATLAB. Hipoteze ovog rada su:

1. Adaptivnim upravljanjem signalnog plana semaforiziranog raskrižja moguće je dodijeliti prioritet prolaska vozilima žurnih službi;
2. Adaptivnim upravljanjem signalnog plana semaforiziranog raskrižja moguće je smanjiti vrijeme putovanja i broj zaustavljanja vozila žurnih službi;
3. Adaptivnim upravljanjem signalnog plana semaforiziranog raskrižja moguće je smanjiti negativan utjecaj dodjele prioriteta vozilima žurnih službi na ukupnu razinu usluge semaforiziranog raskrižja.

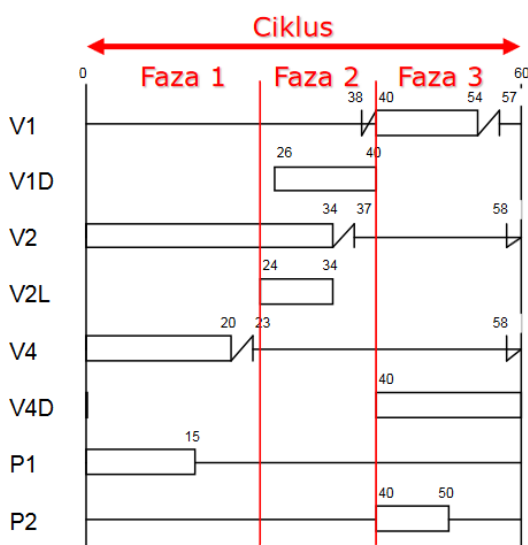
Ovaj rad je sastavljen od sedam poglavlja. U uvodnom poglavlju je iznesena motivacija, cilj i osnovna struktura rada. U drugom poglavlju je opisan osnovni model sustava upravljanja prometom u urbanim sredinama. U trećem poglavlju su opisane tehnike dodjele prioriteta žurnim službama te je dan pregled postojećih tehnologija. U četvrtom poglavlju je prikazan i opisan predloženi algoritam za dodjelu prioriteta zasnovan na duljini reda čekanja i praćenju vozila žurne službe. U petom poglavlju su opisani simulacijsko okruženje i korišteni programski alati. U šestom poglavlju su opisani prometni scenariji korišteni u simulacijama, te je dan prikaz i analiza dobivenih rezultata. U zadnjem poglavlju dan je zaključak prema prethodnim poglavljima.

## 2. Osnovni model upravljanja prometom u urbanim sredinama

Prometom u urbanim sredinama se prvenstveno upravlja semaforizacijom raskrižja. Svakom semaforiziranom raskrižju se pridružuje signalni plan odnosno plan izmjene signala na semaforu. Signalni plan određuje [7]:

1. **Signalni ciklus** - Vremenski period potreban da se obavi cijela sekvenca izmjene definiranih signalnih faza, prema [8] ovisi o broju faza na raskrižju;
2. **Signalne grupe** - skup upravljačkih naredbi namijenjen sudionicima u prometu koji imaju iste zahtjeve u prometnom procesu [9];
3. **Trajanje pojedinih faza** - Dio ciklusa u kojem pojedini prometni tokovi istovremeno imaju slobodan prolaz;
4. **Zaštitno međuvrijeme** - Vremenski period između dvije konfliktne signalne grupe koje slijede uzastopno;
5. **Vremenski pomak** (*engl. Offset*) - Vremenski odmak početka signalnog ciklusa određenog raskrižja u odnosu na definiranu referentnu točku.

Slika 1 prikazuje primjer vremenski ustaljenog signalnog plana gdje su sa lijeve strane navedene sve postojeće signalne grupe. S desne strane je prikazan vremenski raspored prema signalnim grupama gdje pravokutnik predstavlja zeleno svjetlo, ravna linija predstavlja crveno svjetlo i kosa linija žuto odnosno žuto-crveno svjetlo.



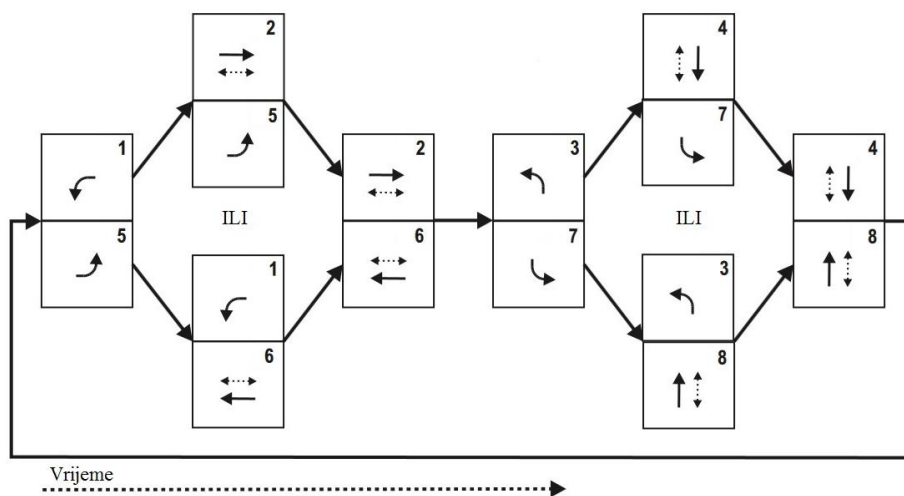
*Slika 1* Grafički prikaz vremenski ustaljenog signalnog plana [10]



Signalne uređaje, odnosno uređaje koji upravljaju izvođenjem signalnog plana na semaforiziranom raskrižju možemo podijeliti na fiksno programirane i prometno ovisne. Fiksno programirani su uglavnom jeftinije izvedbe i jednostavnijeg održavanja dok prometno ovisni iako skuplji mogu doprinijeti smanjenju izgubljenog vremena, povećanju kapaciteta prometnice, te mogu biti sigurniji od fiksno programiranih. Većina današnjih signalnih uređaja sadrži mikroprocesore, te su uglavnom kategorizirani kao NEMA (*engl. National Electrical Manufacturers Association*) upravljači ili upravljači tipa 170 [11].

NEMA upravljači su prilagođeni mnogim standardima za primjenu u raznim uređajima i opremi. Upravljači tipa 170 su upravljači široke namjene, ali nisu sposobni upravljati semaforiziranim raskrižjem bez programske podrške koju korisnik treba instalirati na jedan od modula upravljača. Uz korištenje programske podrške upravljači tipa 170 mogu izvoditi jednake funkcije kao i NEMA upravljači [11].

Korištenjem NEMA upravljača i standarda omogućuje se izvođenje signalnog plana prema prstenastoj strukturi. Prsten se može definirati kao slijed signalnih faza koje se izvode u nizu [12]. Primjer dvostruke prstenaste strukture dan je na slici 2. Slika 2 prikazuje vremenski slijed faza označenih brojevima u pojedinom bloku te mogućnosti prilagodbe faza prema zahtjevima prometne potražnje. U ovom radu NEMA prstenasta struktura je korištena kao podloga za izradu modela signalnog uređaja nad kojim se provode metode adaptivnog upravljanja. Prstenasta struktura je proširena da unutar slijeda faza sadrži i podatke o zaštitnom međuvremenu između faza.



**Slika 2** Prikaz dvostruke prstenaste strukture NEMA upravljača u osam faza [13]

Osnovni model upravljanja prometom u urbanim sredinama se zasniva na statističko-heurističkim metodama korištenim za izračun duljine trajanja pojedinih faza unutar signalnog ciklusa. Korištenjem ustaljenih signalnih planova nije moguće zadovoljiti stohastičku prirodu prometne potražnje te je gotovo nemoguće predvidjeti u kojem trenutku i na kojem mjestu će doći do zagušenja. Korištenjem osjetila i implementacijom adaptivnih upravljačkih rješenja iz domene ITS-a moguće je u bilo kojem trenutku prilagoditi signalne planove stvarnim potrebama prometne mreže. Takav pristup upravljanju omogućuje dodjelu prioriteta JGP-u i vozilima žurnih službi jer se omogućuje prilagodba signalnog plana trenutnim potrebama u stvarnom vremenu (*engl. real time*).

Prilikom implementacije ITS rješenja za upravljanje prometom postoji više mogućih operacijskih koncepata upravljanja semaforiziranim raskrižjima u urbanim sredinama koji se dijele ovisno o razini upravljanja na [14]:

1. **Upravljanje izoliranim raskrižjem** - tehnike upravljanja izvedene samo na jednom raskrižju;
2. **Upravljanje raskrižjima na malom prostoru** - tehnike upravljanja izvedene na dva susjedna međusobno ovisna raskrižja;
3. **Upravljanje arterijalnim koridorima** - koordinirano upravljanje na strateškim potezima gradske mreže;
4. **Upravljanje zatvorenim mrežama** - upravljanje na izoliranom dijelu prometne mreže;
5. **Upravljanje širim područjem** - koordinirano upravljanje na cijeloj prometnoj mreži grada.

### 3. Problem dodjeljivanja prioriteta vozilima žurnih službi

Problem dodjele prioriteta na semaforiziranim raskrižjima postaje aktivna tema istraživanja zbog sve veće zagušenosti prometa u gradovima. Dodjela prioriteta se prvenstveno razvija zbog potrebe za optimizacijom prometa JGP-a, ali se zbog analogije pristupa može primijeniti i na vozila žurnih službi. Zbog složenosti problema dodjeljivanja prioriteta u ovom poglavlju je dan pregled strategija dodjele prioriteta kao i kratak pregled korištenih tehnologija.

#### 3.1. Strategije dodjeljivanja prioriteta na semaforiziranim raskrižjima

Strategije dodjeljivanja prioriteta na semaforiziranim raskrižjima se mogu podijeliti na tri osnovna pristupa [15]:

1. **Podjela na aktivne i pasivne prioritete** - Aktivni prioriteti se odnose na detekciju prisustva vozila žurne službe u stvarnom vremenu, dok se pasivni prioriteti odnose na prethodno izmjerenim prometnim veličinama i uključuju predefiniranu koordinaciju signalnog plana;
2. **Podjela na potpune, djelomične i relativne prioritete** - Potpuni prioriteti, nastoje vozilu žurne službe dati pravo prolaska raskrižjem bez odgode. Djelomični ili parcijalni prioriteti minimalno utječu na protok ostalog prometa, a odnose se na produljenje zelenog svijetla, raniju fazu zelenog svijetla, itd. Relativni prioriteti su prioriteti s težinom i primjenjuju se na vozila JGP-a. Vozila JGP-a se uspoređuju težinskim faktorom, odnosno uspoređuje se broj putnika u pojedinom vozilu. Ukoliko je prometno opterećenje sporednih privoza veće ili jednakog protoka vozila, relativni prioritet se neće aktivirati;
3. **Podjela na uvjetne i bezuvjetne prioritete** - Takav pristup se uglavnom odnosi na vozila JGP-a. Ukoliko se svakom vozilu JGP-a dodjeli prioritet, bez obzira na kašnjenje za voznim redom ili mali broj putnika, takav prioritet se naziva bezuvjetni prioritet.

### 3.1.1. Pasivne strategije dodjele prioriteta

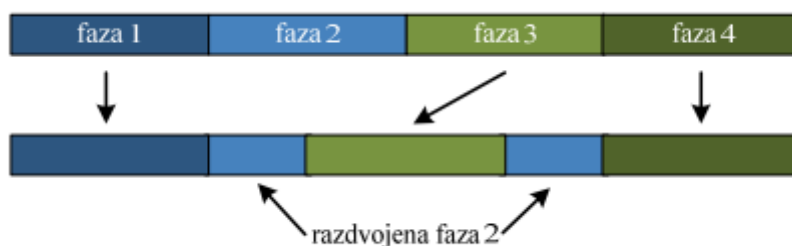
Pasivne strategije dodjele prioriteta koriste prethodna mjerenja i napravljene analize prometnih veličina prometnog toka, te zahtjevima sustava vozila za koje se radi strategija dodjeljivanja prioriteta kao ulazne parametre za izmjenu signalnog plana. Strategije pasivne dodjele prioriteta ne obrađuju i ne koriste trenutne mjerne podatke s prometnice. U uvjet za dodjelu prioriteta ne ulaze nadgledanje prometa, odnosno detekcija prisustva automobila, brojanje prometa i sl. Cilj pasivne strategije je smanjiti vrijeme čekanja vozila na semaforiziranom raskrižju smanjenjem trajanja ciklusa ili izmjenom redoslijeda pojedinih faza da bi se omogućilo što veća učestalost zelenog svjetla [14].

#### **Korekcija trajanja zelenog svjetla**

Pasivna tehnika korekcije zelenog svjetla postoji u dvije vrste: produljenje trajanja zelenog svjetla, te skraćivanje trajanja crvenog svjetla. Na temelju predviđenog vremena dolaska vozila na raskrižje, faze se modificiraju tako da se dodjeli zeleno svjetlo za odabrano vozilo [14].

#### **Razdvajanje faza**

Tehnika razdvajanja faza uključuje razdvajanje faze na privozu gdje je vozilu potrebno dodjeljivanje prioriteta za brži prolazak kroz raskrižje. Faza se razdvaja u dvije jednake faze kraćeg trajanja. Tehnika razdvajanja faza se koristi kod raskrižja kod kojih je striktno napravljen signalni plan i ne smije se mijenjati trajanje pojedinih faza kako se ne bi utjecalo na protok ostalog prometa [14].



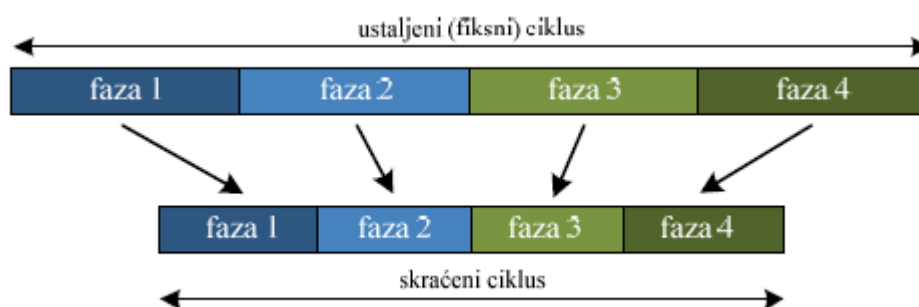
*Slika 3 Grafički prikaz pasivne tehnike razdvajanja faze [13]*

## Koordinacija voznog reda

Tehnika dodjele prioriteta pomoću koordinacije voznog reda se odnosi na vozila JGP-a. Ovom tehnikom se signalni plan koordinira po voznom redu JGP-a, poput zelenog vala. Ne mora se odnositi samo na jednu prometnicu, ali se ne koristi zbog velikih odstupanja posluživanja, odnosno vremena potrebnog da se putnici iskrcaju i ukrcaju u vozilo JGP-a na stajalištima [14].

## Smanjenje trajanja ciklusa

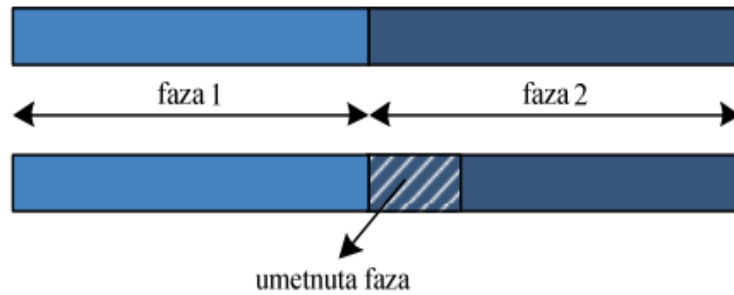
Tehnikom smanjenja trajanja ciklusa smanjuje se trajanje svih faza u signalnom planu kako bi se povećala frekvencija paljenja zelenog svjetla vozilima kojima je potreban prolaz kroz raskrižje. Ako nema odabranih vozila kojima je potrebno upravljanje, nema negativnog efekta, jer se smanjuje vrijeme trajanja svih faza u ciklusu ravnomjerno relativnom udjelu pojedine faze [14].



*Slika 4 Grafički prikaz pasivne tehnike smanjenja trajanja ciklusa [14]*

## „Preskakanje“ repa čekanja

Tehnika „preskakanja“ repa čekanja se može koristiti kod infrastrukture koja omogućuje odabranim vozilima posebnu traku za brži prolaz kroz semaforizirano raskrižje. Ova tehnika omogućuje dodatnoj prometnoj traci prijevremenu fazu zelenog svjetla kako bi vozila u njoj mogla proći raskrižjem prije faze zelenog svjetla za ostala vozila [14].



*Slika 5 Grafički prikaz pasivne tehnike „preskakanja“ repa čekanja [14]*

### 3.1.2. Aktivne strategije dodjele prioriteta

Aktivne strategije dodjele prioriteta podrazumijevaju obradu mjernih podataka s osjetila na raskrižju, odnosno prometnici u stvarnom vremenu. Da bi se takva strategija implementirala, potreban je i sustav detekcije odnosno identifikacije određene skupine vozila za koje se radi adaptivno upravljanje, odnosno dodjela prioriteta. Obavlja se izmjena signalnog plana u svrhu što manjeg čekanja vozila određene skupine na prolazak kroz raskrižje. Kao takve su ove strategije, zbog preciznosti i učinkovitosti, trenutno najčešće korištene strategije upravljanja semaforiziranim raskrižjima. Mogu se podijeliti na [14]:

- Produljenje trajanja zelenog svjetla;
- Skraćenje crvenog svjetla/raniji početak zelenog svjetla;
- Dodatna faza za vozila žurnih službi;
- Selektivna strategija.

#### **Produljenje trajanja zelenog svjetla**

Kako bi se smanjilo čekanje određene skupine vozila na semaforiziranom raskrižju, ili ga u potpunosti maknulo, koristi se tehnika produljenja trajanja zelenog svjetla. Tehnika produljenja trajanja zelenog svjetla na dolazak odabrane skupine vozila produljuje fazu zelenog svjetla sve dok vozilo ne prođe raskrižje ili ne istekne najduže vrijeme produljenja faze. Ako se ne radi o žurnim službama, maksimalna vrijednost trajanja zelenog svjetla mora se definirati zbog utjecaja na protok vozila na ostalim privozima raskrižja i mogućnosti višestrukih zahtjeva za prioritetom [14].

Zbog raznih prometnih situacija, najduže vrijeme produljenja varira ovisno o prometnom opterećenju po privozima, broju vozila kojima je potrebno adaptivno upravljanje itd. U većini slučajeva se koriste granice produljenja od 10 do 20 sekundi ili relativno

produljenje trajanja faze do 20 % [16]. Relativno produljenje trajanje faze je korišteno u ovom radu s najveće dopuštenim iznosom od 20 %.

Kako bi se detektirao dolazak i prolazak odabranog vozila kroz raskrižje, potrebna su dva detektora. Jedan prije raskrižja kako bi sustav znao da vozilo dolazi i traži prioritet, te jedan nakon raskrižja kako bi sustav znao da je vozilo prošlo kroz raskrižje. U novije vrijeme koriste se tehnologije poput GPS-a, kod kojeg nisu potrebni detektori na infrastrukturi, već samo uređaj u vozilu koji koordinate vozila na prometnici javlja upravljačkom sustavu raskrižja [14].

### Skraćenje crvenog svjetla/raniji početak zelenog svjetla

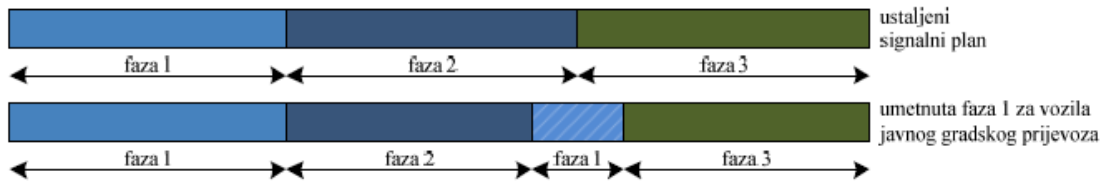
Ovom tehnikom se skraćuje trajanje faze crvenog svjetla ukoliko odabrana skupina vozila prilazi raskrižju, a predviđen je dolazak za vrijeme trajanja crvenog svjetla. Sve kako bi se odabranoj skupini vozila smanjilo vrijeme čekanja na crvenom svjetlu pomoću ranijeg paljenja zelenog svjetla. Kao i kod tehnike produljenja trajanja zelenog svjetla, tehnika skraćivanja trajanja crvenog svjetla ima minimalno trajanje te faze. Minimalno vrijeme trajanja crvenog svjetla, osim što ovisi o specifičnosti raskrižja, ovisi i o matrici zaštitnih međuvremena, odnosno najkraćem vremenu potrebnom da pješaci prijeđu prometnicu [14]. Strategija skraćivanja crvenog svjetla je korištena u ovom radu kao dio algoritma za dodjelu prioriteta vozilima žurnih službi.



*Slika 6 Grafički prikaz tehnike ranijeg početka zelenog svjetla [14]*

### Dodatna faza za vozila JGP-a

Dodatna faza je isključivo za vozila JGP-a i to samo u slučajevima kada postoji više od dvije faze u signalnom planu [14]. Tehnika omogućuje ubacivanje dodatne faze za vozila JGP-a, kao npr. dodavanje faze 1 između faze 2 i faze 3 kao što je prikazano na slici 7.



*Slika 7 Grafički prikaz tehnike umetanja faze za vozila JGP-a [14]*

### Selektivna strategija

Selektivna strategija dodjele prioriteta odabire najpogodniju aktivnu tehniku dodjele prioriteta ovisno o uvjetima u kojima se nalazi odabrano vozilo s potrebom za upravljanje prioritetom prolaska. Odnosno ovisi o predviđenom vremenu dolaska odabranog vozila na semaforizirano raskrižje i o trenutnoj aktivnoj fazi u trenutku dolaska vozila na raskrižje [16], [17].

#### 3.1.3. Prometno ovisne (adaptivne) strategije dodjele prioriteta

U prometnoj mreži s bliskim raskrižjima gdje se signalnim planovima semaforiziranih raskrižja ne upravlja koordinirano dolazi do negativnih utjecaja poput većeg broja zaustavljanja vozila i prekidanja prometnih tokova. Takve negativne utjecaje je moguće smanjiti ili ukloniti s adaptivnim upravljanjem signalnim planovima na semaforiziranim raskrižjima. Adaptivno upravljanje signalnim planovima je bitna komponenta u ITS-u. ITS rješenje adaptivnog upravljanja prometnim tokom povećava propusnost tako da se redoslijed odlučivanja i trajanja ciklusa stalno prilagođavaju promjenjivim potrebama prometnog toka i uvjetima okruženja. Obuhvaća dodjelu zelenog svjetla vozilima žurnih službi kad god je to moguće. Time je definiran i cilj adaptivnog upravljanja, dodjeljivanje prioriteta odabranim vozilima za smanjenje ukupnog vremenskog gubitka i sigurniji prolaz odabranih vozila kroz semaforizirano raskrižje [2].

Prometno ovisne, odnosno adaptivne strategije dodjele prioriteta zasnovane su na stvarno vremenskim podacima. Kao takve, odluke o izmjenama signalnog plana zasnivaju se na težinskim faktorima ili na prethodno definiranim korisničkim algoritmima za donošenje odluka, a ne na predefiniranim strategijama dodjele prioriteta. Postoje tri osnovna pristupa optimizacije rada prometno ovisnih (stvarno vremenskih) dodjela prioriteta [14], [18]:

1. Klasični optimizacijski model;



2. Modeli zasnovani na genetskim algoritmima i neuronskim mrežama;
3. Algoritmi zasnovani na neizrazitoj logici.

### 3.2. Pregled postojećih tehnologija

Današnji sustavi dodjele prioriteta vozilima žurnih službi koriste razne tehnologije poput optičkih, radio, akustičnih i GPS sustava. Prema [5] i [6] napravljena je tablica 1 koja sadrži usporedbu pojedinih tehnologija. U tablici 1 su vidljive prednosti GPS sustava u odnosu na ostale tehnologije. GPS sustavi jedini od ponuđenih imaju nisku mogućnost ilegalne aktivacije kao i mogućnost centraliziranog praćenja signala koje omogućuje koordinaciju signalnih planova na više raskrižja unaprijed korištenjem centralizirane upravljačke arhitekture.

**Tablica 1** Usporedba postojećih sustava dodjele prioriteta [5], [6]

Pregled zahtjeva	Sustav dodjele prioriteta			
	Optički	Radio	Akustični	GPS
Zahtjev zasebnog odašiljača	Da	Da	Da	Ne
Osjetljivost na elektroničke smetnje	Ne	Da	Ne	Ne
Zahtjev čiste vidljivosti	Ne	Ne	Da	Ne
Osjetljivost na vremenske uvjete	Da	Ne	Ne	Ne
Dodjela prioriteta drugim prilazima	Ne	Da	Da	Ne
Mogućnost ilegalne aktivacije	Visoka	Visoka	Visoka	Niska
Centralizirano praćenje signala	Ne	Ne	Ne	Da

### 3.3. Utjecaj dodjeljivanja prioriteta žurnim službama

Korištenjem sustava za dodjelu prioriteta žurnim službama ostvaruju se brojni pozitivni učinci. Prema [19] pozitivni učinci su:

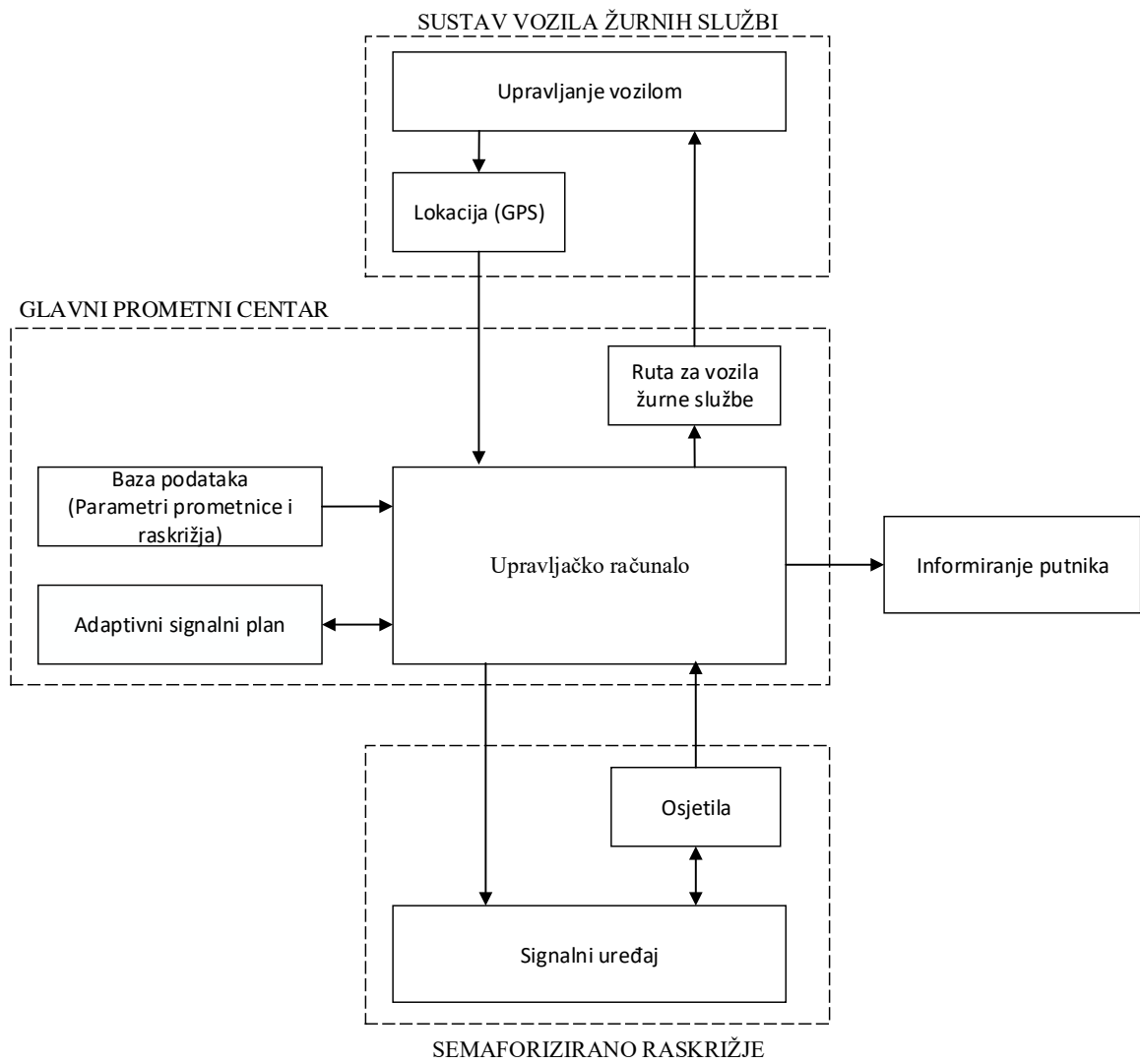
1. **Brži odziv žurne službe** - glavna prednost korištenja sustava dodjele prioriteta je smanjenje vremena odziva žurnih službi zbog bržeg prolaska kroz prometnu mrežu;
2. **Povećana sigurnost u prometu** - zbog dodjeljivanja zelenog svjetla na raskrižjima smanjuje se rizik prolaska vozila žurne službe kroz crveno svjetlo i time se smanjuje mogućnost nesreće nastale sudarom vozila žurne službe i vozila ostalog prometa;

3. **Ušteda novca poreznih obveznika** - zbog bržeg odziva žurnih službi veća je mogućnost sprječavanja gubitka neprocjenjivog života i uništenja privatne imovine, te se također smanjuju premije osiguravajućih tvrtki zbog veće razine sigurnosti;
4. **Ušteda novca u medicinskoj skrbi** - brži odziv žurne službe povećava se područje u kojem je pojedini centar žurne službe dostupan pa je time moguće uštediti prilikom gradnje takvih centara.

Unatoč navedenim pozitivnim učincima dodjeljivanje prioriteta može negativno utjecati na ostatak prometa. Dodjelom prioriteta vozilu žurne službe uzrokuju se poremećaji u koordinaciji raskrižja, te se povećava izgubljeno vrijeme svih vozila unutar prometne mreže. Odgovarajućim upravljanjem se taj negativni utjecaj želi što više smanjiti, a ostali sudionici u prometu takve poremećaju prihvaćaju kako je pozadina spašavanje života.

#### 3.4. Centralizirani sustav upravljanja semaforiziranim raskrižjima

Arhitektura centraliziranog sustava upravljanja uključuje glavni prometni centar za upravljanje prometom koji donosi odluku o dodjeli prioriteta žurnim službama. Prema toj arhitekturi moguća su dva načina izrade zahtjeva za dodjelu prioriteta. Prvi mogući način je izrada zahtjeva za dodjelu prioriteta od strane glavnog prometnog centra prema podacima o lokaciji vozila žurne službe. Drugi način je izrada zahtjeva od strane žurnog vozila. Prometni centar kao takav na temelju dobivenog zahtjeva za dodjelu prioriteta odlučuje o njegovoj važnosti i po potrebi mijenja signalni plan. Izmijenjeni signalni plan se šalje u sustav semaforiziranog raskrižja te ga primjenjuje prema uputstvima iz prometnog upravljačkog centra [14]. Primjer centraliziranog sustava upravljanja korišten u ovom radu prikazan je na slici 8.



*Slika 8 Model centraliziranog upravljanja semaforiziranim raskrižjima*

## 4. Algoritam za dodjelu prioriteta zasnovan na duljini reda čekanja i praćenju vozila

Prilikom prolaska vozila žurne službe kroz dio prometne mreže gubi se mnogo vremena na semaforiziranim raskrižjima. Najviše zbog osobnih vozila u redu čekanja pred raskrižjem iako mnogi vozači ipak nastoje propustiti vozila žurnih službi i osloboditi prostor za njihov prolazak. Takav proces raščišćavanja je spor i nepouzdan, a uz to je i značajno narušena sigurnost sudionika u prometu.

Cilj algoritma za dodjelu prioriteta je smanjiti izgubljeno vrijeme vozila žurnih službi i povećati sigurnost svih sudionika u prometu utjecanjem na signalni plan raskrižja. Ulazni podaci na kojima je zasnovan algoritam su lokacija i brzina vozila žurne službe te broj vozila u redu čekanja na svim privozima raskrižju. U stvarnom sustavu lokaciju i brzinu vozila moguće je odrediti korištenjem GPS prijemnika dok se za određivanje broja vozila u redu čekanja mogu koristiti detektori [6], [20].

Algoritam korišten u ovom radu moguće je podijeliti na dva dijela. Prvi dio je algoritam dodjele prioriteta čiji je cilj omogućiti vozilu žurne službe što nesmetaniji prolazak raskrižjem. Nakon njega dolazi drugi dio, odnosno algoritam za povratak oduzetog vremena čiji je cilj smanjiti negativne učinke na prometnu mrežu uzrokovane korištenjem algoritma za dodjelu prioriteta.

### 4.1. Algoritam za dodjelu prioriteta

Kako bi se lakše pratio slijed izvođenja algoritma određene su tri cjeline djelovanja:

- **Cjelina 1** - Praćenje vozila žurne službe;
- **Cjelina 2** - Dodjela prioriteta zasnovana na duljini reda čekanja;
- **Cjelina 3** - Dodjela apsolutnog prioriteta.

U prvoj cjelini algoritma se detektira pojava vozila žurne službe na prometnoj mreži te se određuje kojoj signalnoj grupi vozilo žurne službe pripada. Također se na osnovi brzine vozila žurne službe izračunava procjena vremena njegovog dolaska do semaforiziranog raskrižja. U trenutku kad je procijenjen dolazak vozila žurne službe unutar granica određenih vremenskih parametara započinje druga cjelina.

U drugoj cjelini algoritma se broje vozila u redu čekanja na privozu iz smjera dolaska žurnog vozila te se u slučaju zagušenosti, odnosno postojanja reda čekanja produžuje faza zelenog svjetla kako bi se dobilo više vremena za raščišćavanje vozila u pripadnom privozu. Iznimno se u slučaju jače zagušenosti skraćuje faza konfliktnih privoza. Procjena vremena dolaska vozila žurne službe na raskrižje se i dalje računa te ukoliko je procijenjen dolazak unutar trajanja jednog ciklusa signalnog plana započinje treća cjelina algoritma.

Treća cjelina algoritma dodjeljuje apsolutni prioritet nadolazećem vozilu žurne službe, odnosno u najbržem mogućem roku poštujući sigurnosne zahtjeve dodjeljuje zeleno svjetlo te ga drži sve do prolaska vozila žurne službe kroz raskrižje. Kada je dobiven signal potvrde prolaska vozila žurne službe kroz raskrižje algoritam završava.

Kako bi se lakše pratilo izvođenje algoritma dodjele prioriteta priložen je pojednostavljeni prikaz u obliku pseudokôda. Pseudokôd 1 prikazuje izvođenje algoritma dodjele prioriteta, dok je pojašnjenje korištenih varijabli prikazano u tablici 2.

### **Pseudokôd 1: Algoritam dodjele prioriteta vozilima žurnih službi**

**Dok je** zurnoVoziloUMrezi **činiti:**

**Odredi:** brzinaVozila, položajVozila

**Izračunaj:** udaljenostOdRaskrizja, vrijemeDolaska

**Ako je** ( $tAlpha * trajanjeCiklusa > vrijemeDolaska$   
 $\&\& vrijemeDolaska > tBeta * trajanjeCiklusa$ ) **onda:**

**Odredi:** duljinaRedaCekanja

**Ako je** ( $duljinaRedaCekanja > sAlpha$ ) **onda:**  
 Produljenje faze na privozu žurne službe

**Ako je** ( $duljinaRedaCekanja > sBeta$ ) **onda:**  
 Skraćenje faze konfliktnog privoza

**Ako je** ( $vrijemeDolaska < tBeta * trajanjeCiklusa$ ) **onda:**

**Ako je** ( $trenutnaFaza == faza\ na\ privozu\ vozila\ žurne\ službe$ ) **onda:**  
 Maksimalno produljenje faze na privozu žurne službe

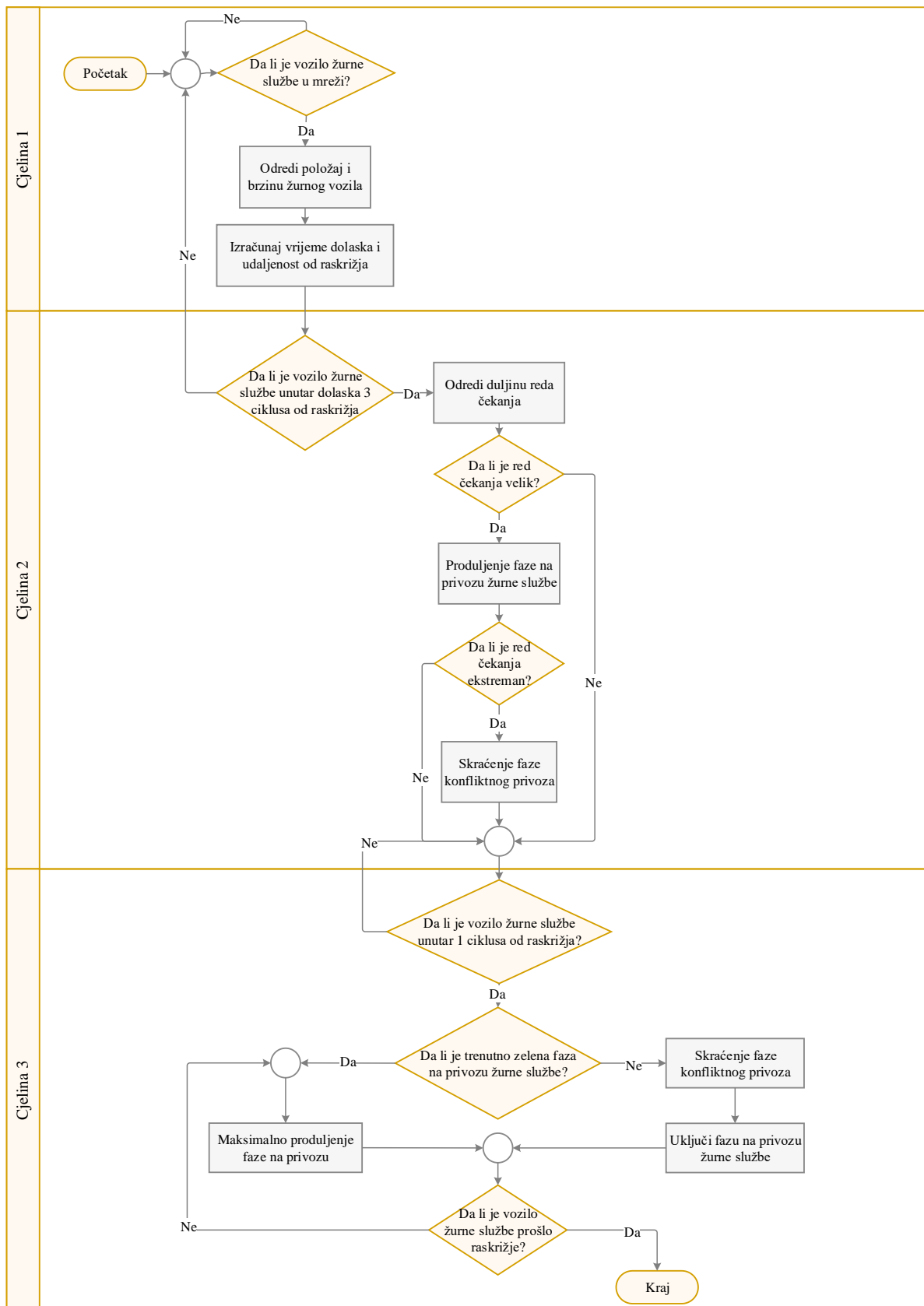
**Ako je** ( $trenutnaFaza == faza\ konfliktnog\ privoza$ ) **onda:**  
 Skraćenje faze konfliktnog privoza

**Ako je** ( $polozajVozila == polozajNakonRaskrizja$ ) **onda:**  
 Kraj algoritma

**Tablica 2 Pregled i pojašnjenje korištenih varijabli**

Naziv varijable	Pojašnjenje
zurnoVoziloUMrezi	Varijabla sadrži vrijednost istine ukoliko u prometnoj mreži postoji žurno vozilo sa zahtjevom za dodjelu prioriteta.
brzinaVozila	Trenutna brzina žurnog vozila korištena za izračun vremena dolaska na raskrižje.
polozajVozila	Sadrži podatak o trenutnoj lokaciji vozila.
udaljenostOdRaskrizja	Udaljenost od raskrižja se računa uspoređujući lokaciju vozila i lokaciju raskrižja.
vrijemeDolaska	Pretpostavljeno vrijeme dolaska do raskrižja. Računa se u svakoj iteraciji petlje.
tAlpha	Parametar podešava vrijeme aktivacije druge cjeline algoritma u ovisnosti o duljini ciklusa. Preporučene vrijednosti: 2-3.
tBeta	Parametar podešava vrijeme aktivacije treće cjeline algoritma u ovisnosti o duljini ciklusa. Preporučene vrijednosti: 0,5-1.
trajanjeCiklusa	Trajanje ciklusa određeno je fiksnim signalnim planom unutar baze podataka.
duljinaRedaCekanja	Sadrži podatak o trenutnoj duljini reda čekanja na privozu žurne službe.
polozajNakonRaskrizja	Sadrži podatak o lokaciji neposredno nakon raskrižja.
sAlpha	Parametar određuje duljinu reda čekanja potrebnu za produljenje faze na privozu žurne službe. Parametar je potrebno prilagoditi specifičnom raskrižju.
sBeta	Parametar određuje duljinu reda čekanja potrebnu za skraćenje faze konfliktnog privoza. Parametar je potrebno prilagoditi specifičnom raskrižju. Uvjet: $sAlpha < sBeta$ .
trenutnaFaza	Određuje fazu ciklusa koja se trenutno izvodi.
oduzetoVrijemeSve	Sadrži informaciju o oduzetom vremenu svih faza.
trenutnaFazaOduzeto	Sadrži informaciju o oduzetom vremenu trenutne faze.
trenutnaFazaTrajanje	Trajanje faze koja se trenutno izvodi.
tPovratak	Parametar određuje vrijeme za koje je produžena trenutna faza svakog ciklusa za vrijeme povratka oduzetog vremena. Preporuka: 10% vrijednosti trajanja trenutne faze.

Prema pseudokôdu 1 nacrtan je funkcijski dijagram toka algoritma za dodjelu prioriteta prikazan na slici 9.



**Slika 9** Prikaz dijagrama toka algoritma za dodjelu prioriteta prema cjelinama

## 4.2. Algoritam za povratak oduzetog vremena

Prilikom izvođenja algoritma za dodjelu prioriteta neizbježan je negativan utjecaj na konfliktne privoze. Kako bi se smanjio negativan utjecaj predložen je algoritam povratka oduzetog vremena. U [21] je predložen algoritam povratka oduzetog vremena po principu ravnomjernog povratka (*engl. round robin*) gdje je svakoj zakinutoj fazi vraćeno vrijeme jednako oduzetom vremenu. U ovom radu korištena je nadogradnja algoritma iz [21]. Umjesto ravnomjernog povratka oduzetog vremena uzet je u obzir odnos trajanja pojedinih faza fiksnog signalnog plana. Ukupno vraćeno vrijeme je dano izrazom (1):

$$T_{povratak} = T_{oduzeto} \cdot \frac{t_1}{t_2}, \quad (1)$$

gdje je:

$T_{povratak}$  - ukupno vrijeme vraćeno zakinutoj fazi [s];

$T_{oduzeto}$  - ukupno vrijeme oduzeto zakinutoj fazi [s];

$t_1$  - trajanje zakinute faze [s];

$t_2$  - trajanje konfliktne faze [s].

Nakon izračuna vrši se povratak oduzetog vremena raspodijeljen periodično unutar nekoliko ciklusa signalnog plana. Po završetku povratka oduzetog vremena se signalni plan vraća na početno fiksno stanje. Pseudokôd 2 prikazuje izvođenje algoritma za povratak oduzetog vremena prema varijablama opisanim u tablici 2.

### Pseudokôd 2: Povratak oduzetog vremena

**Izračunaj:** oduzetoVrijemeSve

**Dok je** (oduzetoVrijemeSve != 0) **činiti:**

**Odredi:** trenutnaFaza

**Ako je** (trenutnaFazaOduzeto > 0) **onda:**

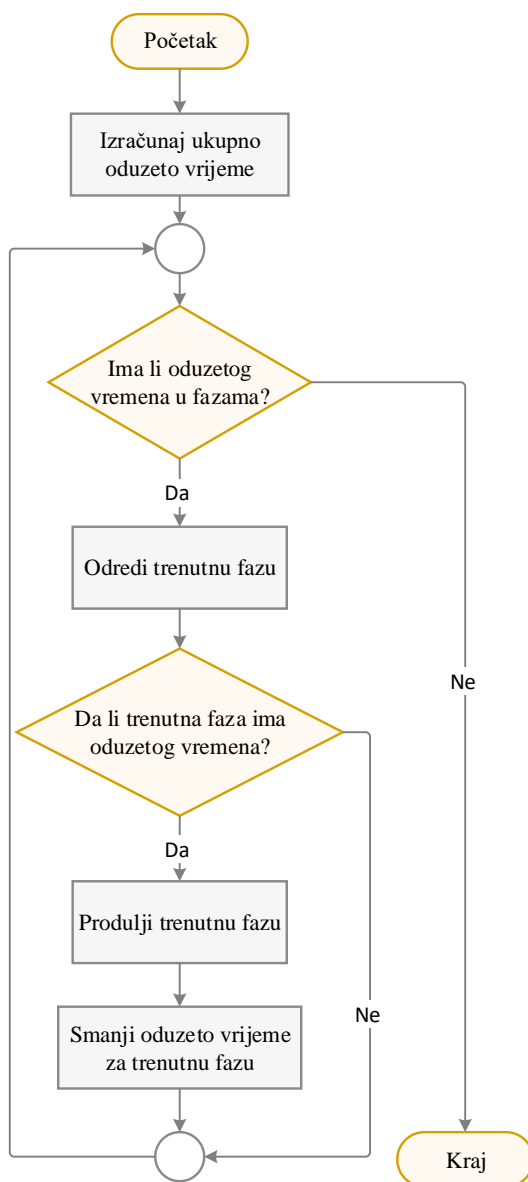
            trenutnaFazaTrajanje := trenutnaFazaTrajanje + t\_povratak

            oduzetoVrijemeSve := oduzetoVrijemeSve - t\_povratak

Povratak na početni fiksni signalni plan



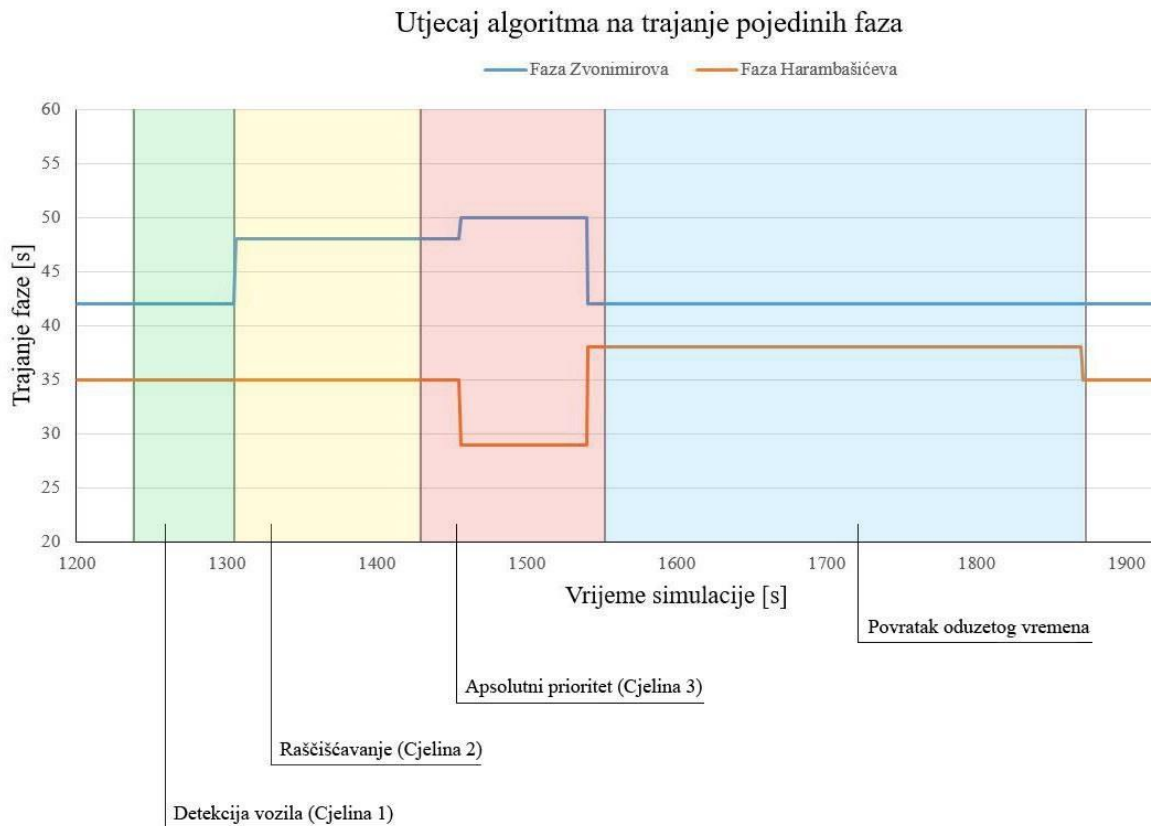
Prema pseudokôdu 2 nacrtan je funkcijski dijagram toka algoritma za povratak oduzetog vremena prikazan na slici 10.



**Slika 10** Prikaz dijagrama toka algoritma povratka oduzetog vremena

Grafikon 1 prikazuje utjecaj algoritma za dodjelu prioriteta i algoritma povratka oduzetog vremena na trajanje pojedinih faza signalnog plana. Na grafikonu 1 zeleno je prikazano područje detekcije vozila žurne službe, te nisu vidljive primjene u duljini faza. Žuto je prikazano područje raščišćavanja, odnosno djelovanje druge cjeline algoritma za dodjelu prioriteta, te je vidljivo produženje faze na privozu kojim dolazi vozilo žurne službe. Crveno je prikazano područje apsolutnog prioriteta, konfliktna faza se skraćuje na najmanju dopuštenu vrijednost, dok se faza na privozu vozila žurne službe produžuje do prolaska vozila

kroz raskriže. Plavo je prikazano djelovanje algoritma za povratak oduzetog vremena, te je vidljivo blago produženje konfliktne faze kroz duži vremenski period.



**Grafikon 1** Utjecaj algoritma na trajanje faza na primjeru signalnog plana izvedenog u dvije faze

## 5. Simulacijsko okruženje

U ovom poglavlju opisani su programski alati PTV VISSIM i MATLAB korišteni za simulaciju prometne mreže i implementaciju algoritma dodjele prioriteta vozilima žurnih službi.

### 5.1. Simulator prometa VISSIM

Za simuliranje cestovnog prometa korišten je simulacijski alat VISSIM tvrtke PTV. VISSIM je mikroskopski simulacijski program za analizu i optimizaciju prometnih tokova. Mikroskopska simulacija omogućuje simuliranje svakog prometnog entiteta individualno, odnosno automobila, autobusa, tramvaja, biciklista, pješaka i slično. VISSIM prikazuje sve sudionike u prometu i njihove interakcije u jednom modelu. Karakteristike vozača i vozila omogućavaju individualnu parametrizaciju. Osim toga, omogućuje sučelja za jednostavnu integraciju s drugim aplikacijama za vezu sa signalnim upravljačima, sustavom za upravljanje prometom ili modelom za izračun emisije ispušnih plinova. Mikroskopska simulacija prometa predstavlja promet u puno više detalja nego makroskopska ili mezoskopska. Zbog velikih detalja i točnijeg provođenja rezultata, klasificirana je kao model visoke vjernosti [18], [22].

U mikroskopskim simulacijama bez obzira na arhitekturu, algoritme i protok informacija, postoje algoritmi i funkcije koji su jezgreni i ne mijenjaju se. Postoji sedam jezgrenih modula u VISSIM-u [18]:

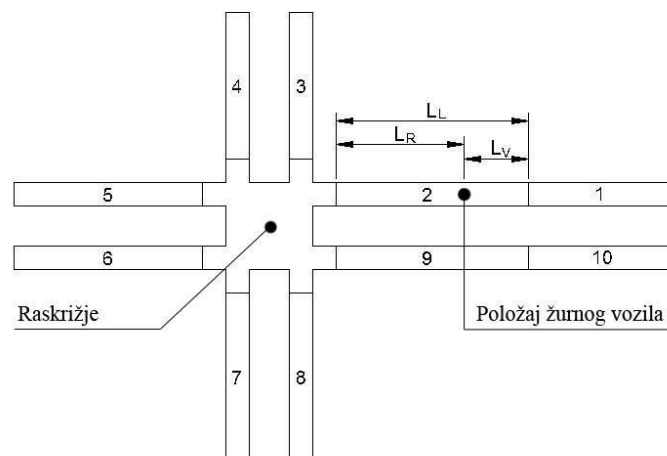
- 1. Modul generiranja slučajnih brojeva:** generira slučajne brojeve za primjenu u raznim metodama koje utječu na tijek simulacije;
- 2. Modul atributa vozila i vozača:** definira attribute i karakteristike vozila te vozača koji ulaze u prometnu mrežu;
- 3. Modul generiranja vozila:** definira kada i gdje će vozilo ući u prometnu mrežu;
- 4. Modul praćenja vozila:** definira kako će vozilo ubrzavati, usporavati i pratiti druga vozila;
- 5. Modul mijenjanja prometne trake:** definira kako i kad će vozilo promijeniti prometnu traku;
- 6. Modul signalnog uređaja:** upravlja signalnim planovima u prometnoj mreži;

7. **Animacijski modul:** prikazuje animaciju vozila u prometnoj mreži, rad animacijskog modula prikazan je na slici 11.



*Slika 11 Prikaz izvođenja simulacije raskrižja u VISSIM-u*

U ovom radu VISSIM je korišten kao simulator GPS podataka, gdje stvarne GPS podatke zamjenjuje izračun položaja vozila na cestovnoj poveznici (*engl. link*). Takav podatak o položaju se može koristiti za izračun udaljenosti od raskrižja uz poznavanje duljine cestovne poveznice. Zbog takvog načina računanja položaja potrebno je prilikom modeliranja raskrižja i cestovne mreže u VISSIM-u prilagoditi početak i kraj cestovne poveznice. Odnosno svaka poveznica mora započeti i završiti pred raskrižjem. Za spajanje tih poveznica se koriste pomoćne, odnosno spojne poveznice. Metoda izračuna položaja prikazana je na slici 12 i dana izrazom (2). Na slici 12 su brojevima označene cestovne poveznice, te je vidljivo da se poveznice nadovezuju jedna na drugu i u konačnici se pojedine poveznice nadovezuju s objektom koji predstavlja raskrižje.



*Slika 12 Metoda izračuna udaljenosti od raskrižja poznavanjem duljine spojnice i položaja na spojnici*

Poznavanjem rute vozila žurne službe, odnosno slijeda poveznica koje vozilo žurne službe treba proći da dođe do razmatranog raskrižja, moguće je odrediti udaljenost vozila žurne službe do razmatranog raskrižja korištenjem sljedećeg izraza:

$$L_R = \sum_{i=1}^k L_{L_i} + L_{LT} - L_V, \quad (2)$$

gdje je:

$L_R$  - udaljenost vozila žurne službe od raskrižja [m];

$k$  - broj cijelih poveznica između raskrižja i vozila žurne službe kroz koje vozilo žurne službe još nije prošlo;

$L_{L_i}$  - duljina  $i$ -te poveznice između raskrižja i vozila žurne službe [m];

$L_{LT}$  - duljina poveznice na kojoj se trenutno nalazi vozilo žurne službe [m];

$L_V$  - položaj vozila žurne službe u odnosu na početak poveznice na kojoj se vozilo žurne službe trenutno nalazi [m].

VISSIM koristi psihofizički Wiedmannov model ponašanja vozača kojeg je razvio Rainer Wiedemann 1974. godine na Sveučilištu u Karlsruhe-u. Wiedemannov model je izgrađen na temelju ljudskih percepcija i reakcija. VISSIM definira dva različita modela ponašanja vozača. Wiedemann 74 je prilagođen urbanom prometu, a Wiedemann 99 brzom prometu na autocestama. Oba modela su slična i koriste modele zasnovane na ljudskim percepcijama i ponašanjem, a razlikuju ih atributi koji ih opisuju. Atributi koji opisuju svaku jedinicu „čovjek-vozilo“ mogu se kategorizirati u tri osnovne skupine [14], [23]:

- 1. Tehničke specifikacije vozila:** duljina vozila, najveća brzina, potencijalno ubrzanje i usporjenje, trenutna brzina i ubrzanje itd.;
- 2. Ponašanje jedinice „čovjek-vozilo“:** karakteristike psihofizičkih pragova osjetljivosti vozača;
- 3. Međusobna zavisnost jedinica „čovjek-vozilo“:** odnos vozila u koloni u prometnoj traci i u odnosu na druge trake, odnos prema semaforiziranom raskrižju, odnos između prometnice vozila i sljedećeg raskrižja, itd.

Wiedemann-ov model definira sljedeća četiri režima praćenja vozila [24]:

- 1. Slobodan tok:** na vozilo ne utječu ostala vozila, pokušava dostići svoju zadanu brzinu i zadržati ju. Brzina varira zbog nesavršenosti održavanja gasa;

2. **Prilaženje:** nakon što vozilo shvati da prilazi drugom vozilu, usporava na brzinu vozila na kojeg nalijeće kako bi postiglo željenu sigurnosnu udaljenost;
3. **Praćenje:** vozilo nesvjesno prati vozilo ispred sebe kako bi razlike u brzinama i promjenama brzina držao što manjima;
4. **Opasnost:** ako udaljenost praćenog vozila padne ispod željene udaljenosti, vozilo reagira primjenom najvećeg usporavanja kako bi izbjeglo sudar;

Zbog potrebe za modelom urbanog prometa u ovom radu korišten je Wiedemann 74 model prema parametrima definiranim u VISSIM-u prema slici 13. Definirani parametri su prosječna udaljenost do prethodnog vozila prilikom stajanja i faktori za kreiranje razdiobe sigurnosne udaljenosti između vozila tijekom vožnje s parametrom prosječne udaljenosti do prethodnog vozila prilikom stajanja kao očekivanom vrijednošću.

Car following model

Wiedemann 74

Model parameters

Average standstill distance:	2,00 m
Additive part of safety distance:	2,00
Multiplic. part of safety distance:	3,00

*Slika 13* Podešavanje parametara Wiedemann 74 modela unutar PTV VISSIM-a

## 5.2. Programski paket MATLAB

Programski paket MATLAB (engl. MATrix LABoratory) je aplikacija za rješavanje različitih matematičkih problema, te izvođenje čitavog niza izračuna i simulacija vezanih uz obradu signala, upravljanje i identifikaciju sustava. Najčešće je korišten u područjima tehnike, u edukativne svrhe, te radi istraživanja na sveučilištima i u industriji. MATLAB je dizajniran kako bi posebno olakšao izračune s matricama i vektorima. To ovu aplikaciju čini jako korisnom za korištenje linearne algebre, ali MATLAB je također i odličan alat za rješavanje algebarskih i diferencijalnih jednadžbi te numeričke integracije. Ima korisne grafičke alate koji mogu reproducirati slike u 2D i 3D. MATLAB sadrži i programski jezik visokih performansi. Integrira računanje, vizualizaciju i programiranje u interaktivnu okolinu jednostavnu za korištenje. U njoj su problemi i rješenja izraženi u matematičkim notacijama.

Podržava napredne strukture podataka, ima ugrađeni alat za uređivanje i ispravljanje pogrešaka (*engl. debugging tool*), te objektno orijentirano programiranje [25], [26], [27]. Najčešće primjene su:

1. Matematika i računanje;
2. Razvoj algoritama;
3. Modeliranje, simulacija i ispitivanje prototipova;
4. Analiza podataka, istraživanje i vizualizacija;
5. Znanstvena i inženjerska grafika;
6. Razvoj aplikacija, uključujući i grafičko sučelje.

U ovom radu MATLAB je korišten kao upravljačka jedinica za adaptivno upravljanje signalnim planom prema simuliranim podacima o položaju žurnog vozila i podacima o duljini reda čekanja dobivenih iz VISSIM-a.

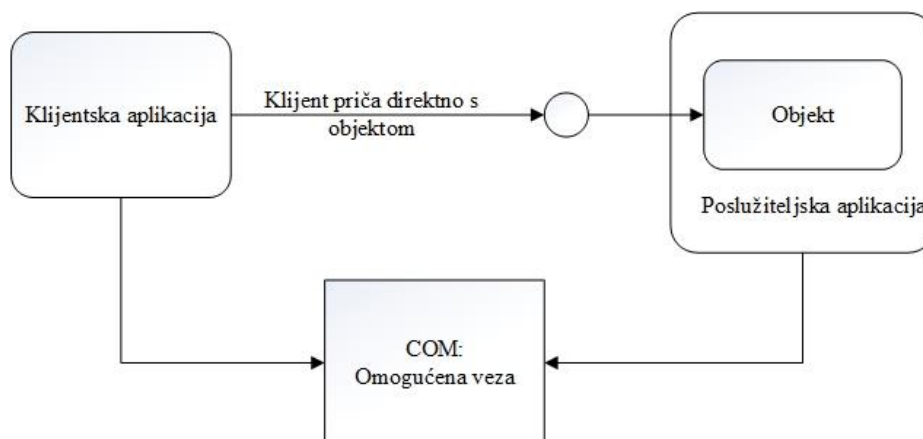
### 5.3. Povezivanje MATLAB-a i VISSIM-a pomoću COM sučelja

Komponentni objektni model (*engl. Component Object Model, COM*) je model arhitekture koja omogućuje povezivanje i interakciju između dvije različite aplikacije koji su proizvedene od strane dva različita proizvođača. COM ostvaruje vezu između te dvije aplikacije i daje strogo standardiziranu komunikaciju za razmjenu podataka te interakciju između njih. Klijentu omogućuje različite funkcionalnosti, ali s određenim ograničenjima. Radi se grupiranja objekata u različite komponente tako da se aplikacija sastoji od različitih dijelova koji pružaju određenu funkcionalnost, te laku dostupnost i transparentnost. COM programska arhitektura omogućuje [28]:

- Definiranje norme za komunikaciju;
- Neovisnost o vrsti programskog jezika;
- Mogućnost rada na različitim platformama;
- Nadogradivost.

COM omogućuje klijentu da se, tražeći neku uslugu, spoji na više ponuđača usluge. Ali jednom kada je veza uspostavljena COM više ne igra ulogu u komunikaciji, već klijent izravno komunicira s poslužiteljem koji pruža uslugu. U COM-u, interakcija aplikacije sa sustavom i međusobno, obavlja se preko skupova metoda koje nazivamo sučelje (*engl.*

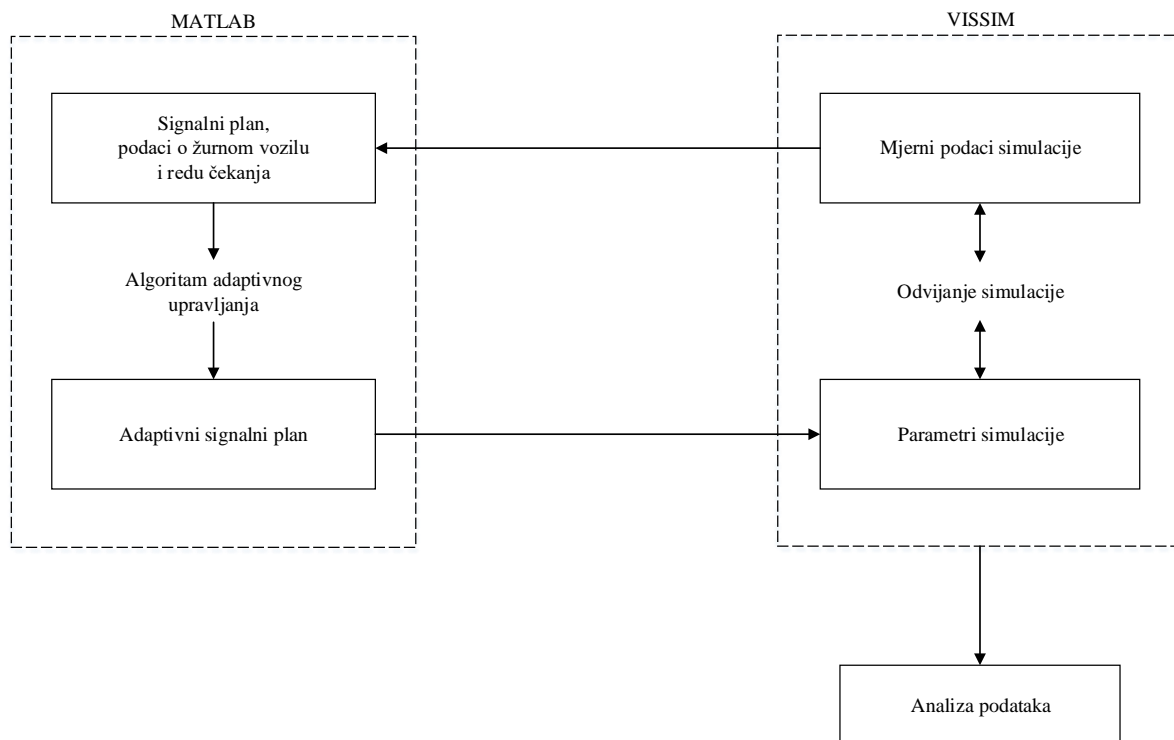
interface). COM sučelje je strogo dogovoren „ugovor“ između programskih dijelova, koje daju koristan skup semantičkih povezanih metoda [29], [30].



**Slika 14** COM veza između klijenta i poslužitelja [29]

Algoritam adaptivnog upravljanja semaforiziranim raskrižjem napravljen je u MATLAB programskom paketu, a simulacijski dio u VISSIM aplikaciji. Simulacija u VISSIM-u sadrži simulacijske parametre i podatke dobivene mjerenjem ponašanja simulacije. Kao ulazne parametre u MATLAB-u koriste se podaci o signalnom planu na raskrižju i žurnom vozilu. Korištenjem tih podataka algoritam adaptivnog upravljanja po potrebi izmjenjuje signalni plan ovisno o položaju vozila žurne službe. Nakon što se signalni plan izmjeni, MATLAB šalje simulacijske parametre u VISSIM, te nastavlja s odvijanjem simulacije s novim parametrima, odnosno novim signalnim planom. Po završetku simulacije podaci iz VISSIM-a su spremni za daljnju analizu i obradu. Blok shema opisanog upravljanja prikazana je na slici 15.





*Slika 15 Blok shema upravljanja simulatorom VISSIM uz pomoć MATLAB-a*

## 6. Simulacijski rezultati

U ovom poglavlju je dan prikaz i analiza rezultata korištenja algoritma za dodjelu prioriteta vozilima žurnih službi predstavljenog u poglavlju 4. Rezultati su grupirani prema zadanim prometnim scenarijima. Zbog stohastičke prirode prometnog sustava za svaki scenarij je simulirano deset različitih simulacija koje se međusobno razlikuju primjenom slučajnog sjemena (*engl. random seed*) generatora vrijednosti slučajnih varijabli. Primjenom slučajnih varijabli utječe se na vremensku raspodjelu generiranja prometne potražnje i na dolazak žurnog vozila u prometnu mrežu. Utjecanjem na vremensku raspodjelu prometne potražnje se ne utječe na ukupan broj vozila koje ulazi u mrežu već samo na vrijeme ulaska pojedinog vozila.

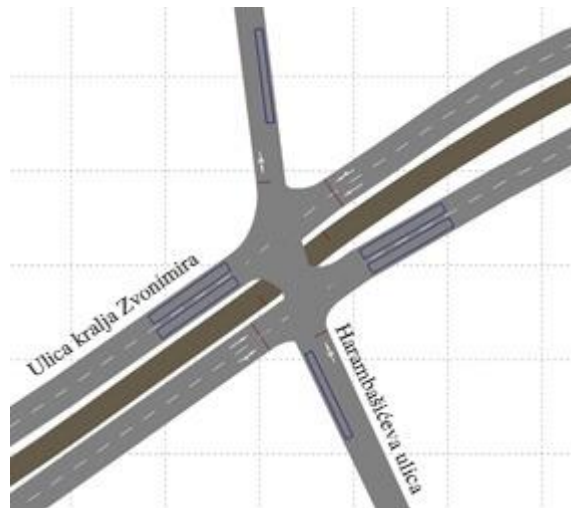
Svaka simulacija je simulirana u trajanju od 3600 simulacijskih sekundi. Prvih 900 sekundi je korišteno za punjenje simulacijske mreže vozilima iz razloga što VISSIM simulaciju započinje bez vozila u mreži. Kako bi se izbjegao negativan utjecaj na rezultate, tijekom punjenja mreže nisu mjereni prometni parametri.

### 6.1. Model korištenog raskrižja

Za implementaciju i analizu algoritma dodjele prioriteta napravljen je model raskrižja: „Ulica kralja Zvonimira - Harambašićeva ulica“ prikazan na slici 16. Na slici 16 su sivo prikazane cestovne površine, smeđe su prikazane tračnice tramvaja dok plavi pravokutnici predstavljaju detektore korištene za potvrdu prolaska vozila žurne službe kroz raskrižje.

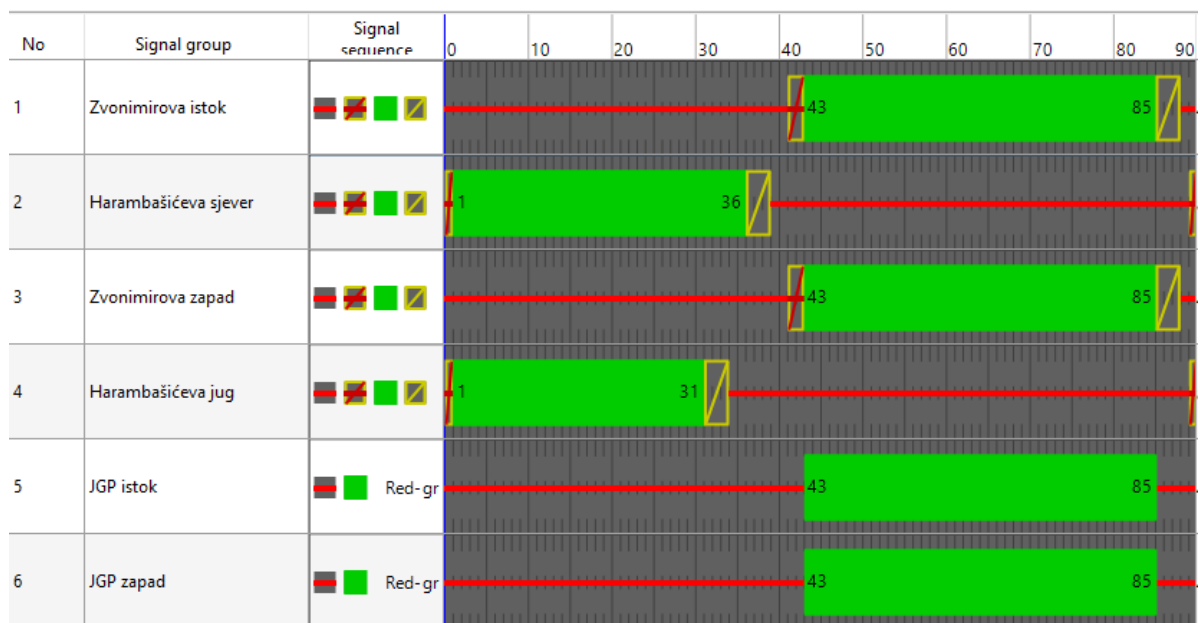
Razlozi za odabir ovog raskrižja su:

- Velika razlika u prometnoj potražnji sporednog i glavnog toka;
- Postojanje JGP-a u vidu tri tramvajske linije;
- Fiksni signalni plan izveden u dvije faze.



*Slika 16 Model raskrižja „Ulica kralja Zvonimira - Harambašićeva ulica“*

Korišten signalni plan prikazan na slici 17 modeliran je prema stvarnim podacima iz [14].



*Slika 17 Prikaz signalnog plana raskrižja „Ulica kralja Zvonimira - Harambašićeva ulica“*

## 6.2. Opis prometnih scenarija

U svrhu testiranja algoritma osmišljena su sljedeća četiri različita prometna scenarija koja su u nastavku detaljnije objašnjena.

**Scenarij 1** - Vozilo žurne službe prilazi raskrižju Zvonimirovom ulicom iz smjera istoka te nakon raskrižja nastavlja Zvonimirovom ulicom u smjeru zapada. Nakon slučajnog vremena

u rasponu od 13 do 23 minute vozilo žurne službe se vraća istim putem. Prometno opterećenje je zadano prema brojanju prometa u razdoblju od 15:00h do 16:00h prema podacima iz [14]. Vozni red JGP-a je zadani prema podacima iz [31].

**Scenarij 2** - Vozilo žurne službe prilazi na identičan način kao u scenariju 1 uz povećanje prometnog opterećenja za 40% čime se simulira vršni sat.

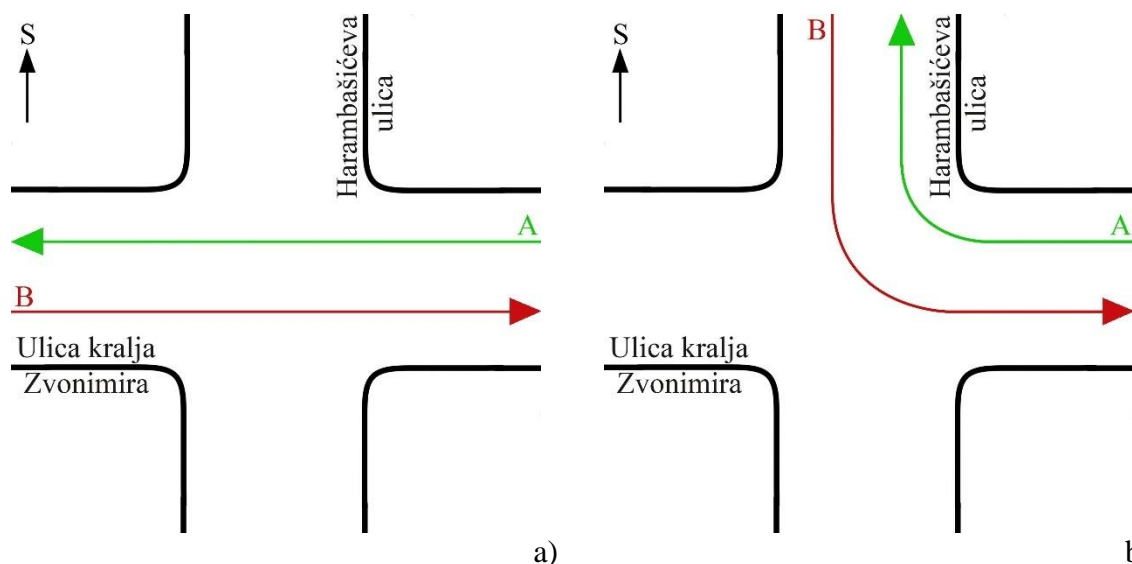
**Scenarij 3** - Vozilo žurne službe prilazi raskrižju Zvonimirovom ulicom iz smjera istoka te nakon raskrižja nastavlja Harambašićevom ulicom u smjeru sjevera. Nakon slučajnog vremena u rasponu od 13 do 23 minute vozilo žurne službe se vraća istim putem. Prometno opterećenje je identično opterećenju u scenariju 1.

**Scenarij 4** - Vozilo žurne službe prilazi na identičan način kao u scenariju 3 uz povećanje prometnog opterećenja za 40% kako bi se ispitao rad algoritma u vršnom satu.

Radi lakšeg pregleda parametara prometnih scenarija u tablici 3 je prikazana ovisnost prometnog opterećenja za svaki scenarij. Slika 18 prikazuje smjer dolaska i povratka vozila žurne službe u ovisnosti o prometnom scenariju. Dolazak vozila žurne službe simulira izradu zahtjeva za dodjelu prioriteta od strane glavnog prometnog centra. Povratak vozila žurne službe simulira izradu zahtjeva od strane vozila žurne službe.

**Tablica 3** Zadano prometno opterećenje u ovisnosti o prometnom scenariju

Prometni scenarij	Prometno opterećenje [voz/h]			
	Harambašićeva ulica		Zvonimirova ulica	
	Sjever	Jug	Istok	Zapad
1	220	150	1100	720
2	350	210	1540	1008
3	220	150	1100	720
4	350	210	1540	1008



**Slika 18** Prikaz smjera dolaska (zeleno) i povratka (crveno) vozila žurne službe: a) Scenarij 1 i 2; b) Scenarij 3 i 4.

### 6.3. Prikaz dobivenih rezultata

Kako bi se mogla provesti evaluacija predloženog algoritma za svaki od prethodno opisanih scenarija simulirane su tri konfiguracije, odnosno napravljeno je ukupno 30 simulacija. Svaki scenarij je 10 puta simuliran bez korištenja algoritma, 10 puta uz algoritam dodjele prioriteta i 10 puta uz algoritam dodjele prioriteta te povratka oduzetog vremena. Za svaki scenarij mjereni su sljedeći prometni parametri:

1. **Vrijeme trajanja putovanja vozila žurne službe** - vrijeme mjereno od trenutka pojave vozila žurne službe u simulacijskoj mreži do izlaska iz mreže;
2. **Broj zaustavljanja vozila žurne službe** - zaustavljanje je definirano kao svaki trenutak u kojem je brzina žurnog vozila jednaka nuli dok je u prethodnoj vremenskom koraku simulacije bila veća od nule;
3. **Izgubljeno vrijeme vozila žurne službe** - vrijeme koje vozilo izgubi zbog utjecaja ostalih vozila i utjecaja signalnih uređaja;
4. **Vrijeme stajanja vozila žurne službe** - ukupno vrijeme koje vozilo žurne službe provede sa brzinom jednakom nula;
5. **Ukupno vrijeme putovanja svih vozila** - zbroj vremena putovanja za svako vozilo u mreži;
6. **Ukupno vrijeme putovanja vozila JGP-a** - zbroj vremena putovanja za svako vozilo JGP-a u mreži.

Izgubljeno vrijeme vozila žurne službe se računa prema izrazu:

$$t_{izgubljeno} = \sum_{i=1}^N \left( \frac{s_i}{V_i} - \frac{s_i}{V_d} \right), \quad (3)$$

gdje je:

$t_{izgubljeno}$  - ukupno izgubljeno vrijeme vozila žurne službe [s];

$N$  - ukupan broj vremenskih koraka simulacije;

$i$  - broj trenutnog vremenskog koraka;

$s_i$  - udaljenost pređena u vremenskom koraku  $i$  [m];

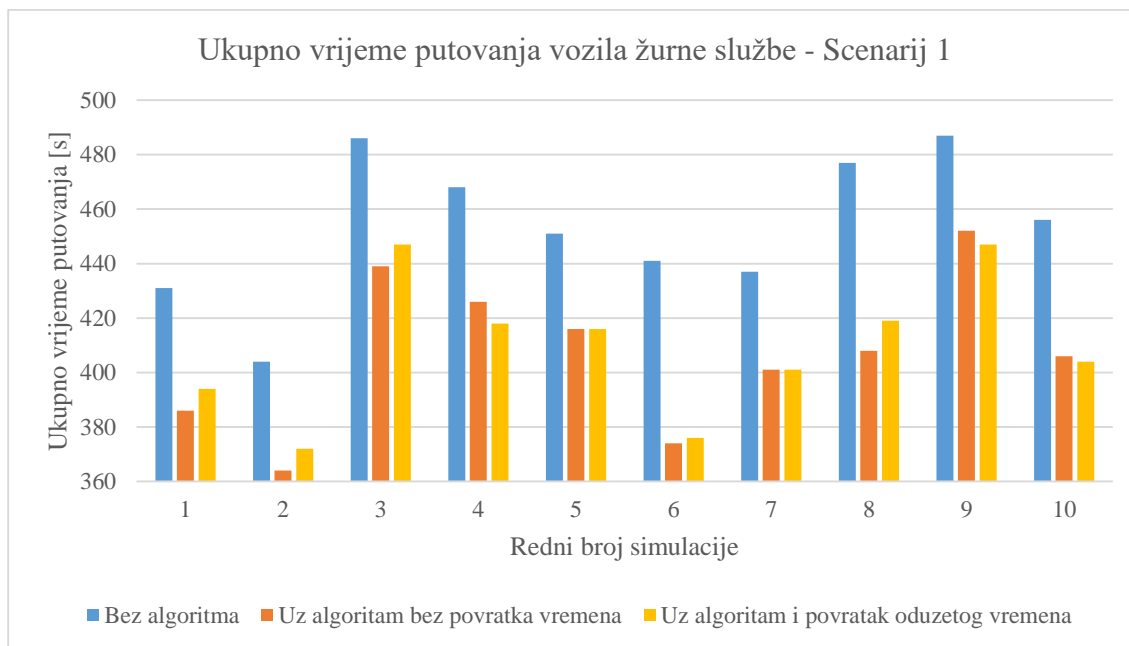
$V_i$  - brzina vozila žurne službe u vremenskom koraku  $i$  [m/s];

$V_d$  - željena brzina vozila žurne službe u vremenskom koraku  $i$  [m/s].

### 6.3.1. Rezultati simulacija scenarija 1

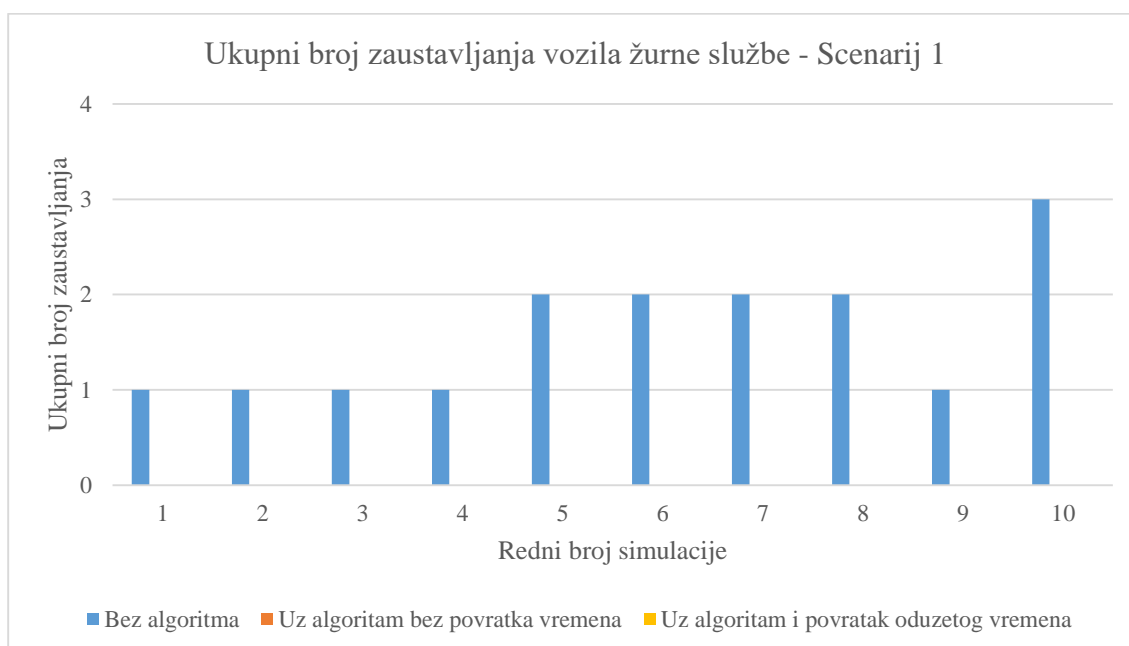
Prema parametrima scenarija 1 dobiveni su rezultati prikazani u Grafikonima 2-7. Grafikoni 2-5 prikazuju utjecaj algoritma na vozilo žurne službe dok grafikoni 6 i 7 prikazuju utjecaj korištenja algoritma na prometnu mrežu promatrano kroz ukupno vrijeme putovanja svih vozila i ukupno vrijeme putovanja vozila JGP-a. Ukupan broj vozila koja su prošla prometnom mrežom u svim simulacijama iznosi 2190.

Ukupno vrijeme putovanja vozila žurne službe prikazano je u grafikonu 2. Iz grafikona je vidljivo smanjenje ukupnog putovanja primjenom algoritma u svih deset simulacija. U prosjeku bez algoritma vozilo žurne službe je kroz mrežu putovalo 454 sekundi. Primjenom algoritma za dodjelu prioriteta prosječno vrijeme putovanja vozila žurne službe pada na 407 sekundi. Korištenjem algoritma za povratak oduzetog vremena prosjek putovanja vozila žurne službe iznosi 409 sekundi što u usporedbi s rezultatom bez korištenja algoritma daje prosječno smanjenje ukupnog vremena putovanja vozila žurne službe od 45 sekundi.



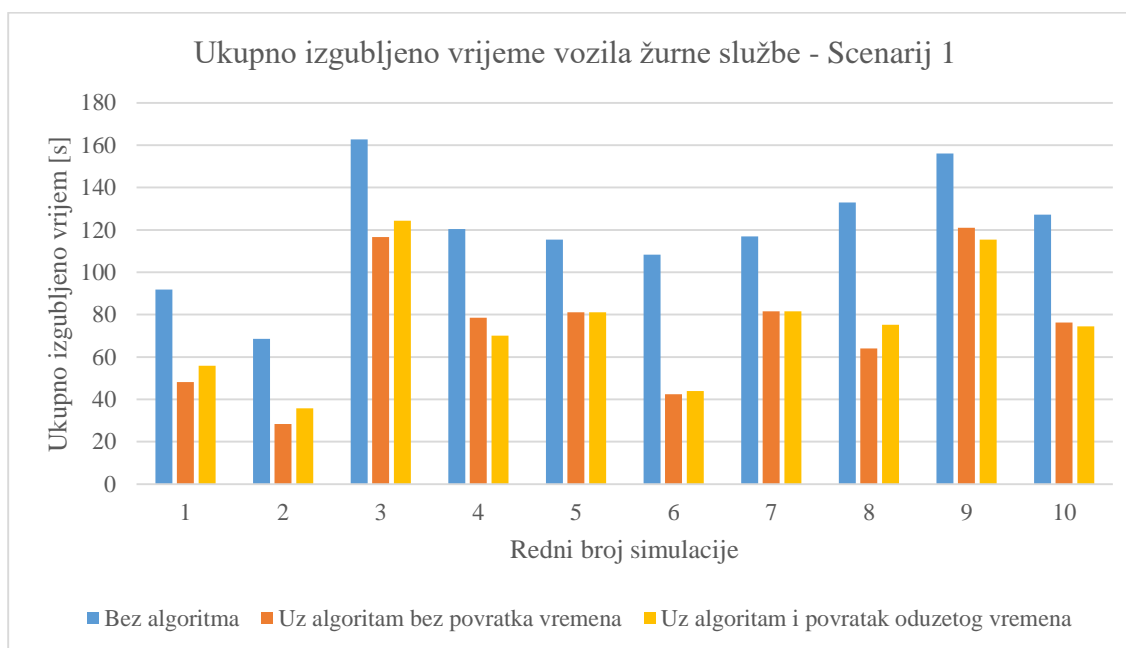
**Grafikon 2** Ukupno vrijeme putovanja vozila žurne službe za prvi scenarij

Ukupan broj zaustavljanja vozila žurne službe prikazan je u grafikonu 3. Iz grafikona je vidljivo da se korištenjem algoritma u potpunosti eliminiraju zaustavljanja. U prosjeku bez algoritma vozilo žurne službe se zaustavilo dva puta. Primjenom algoritma za dodjelu prioriteta kao i algoritma za povratak oduzetog vremena vozilo žurne službe u prosjeku prolazi simuliranom prometnom mrežom bez zaustavljanja.



**Grafikon 3** Ukupni broj zaustavljanja vozila žurne službe za prvi scenarij

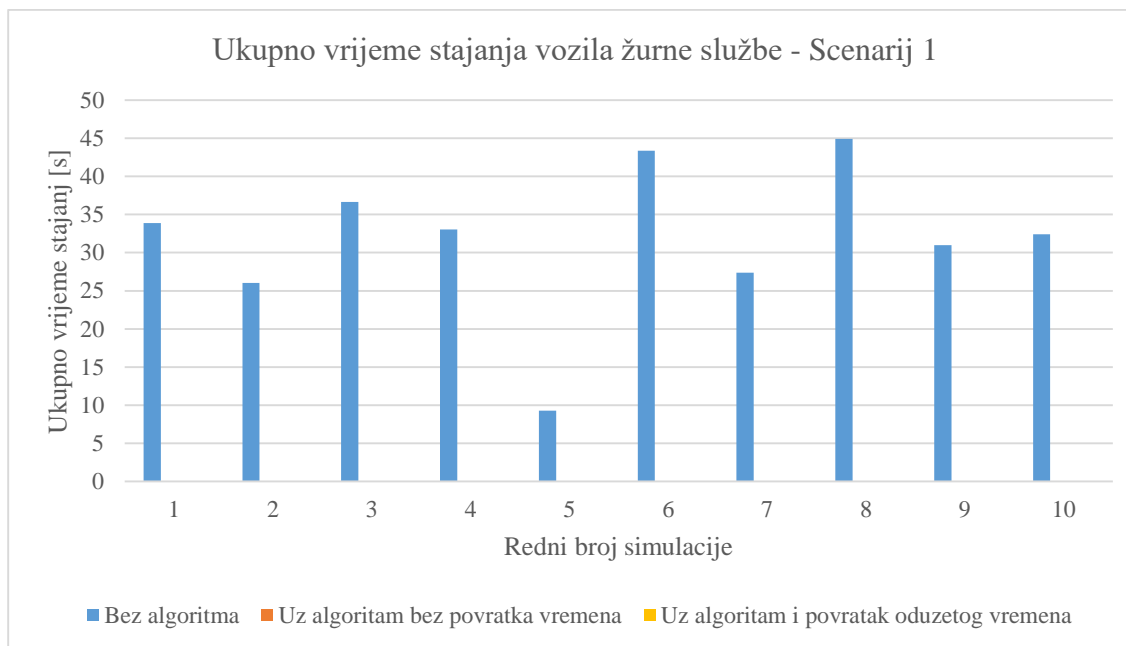
Grafikon 4 prikazuje ukupno izgubljeno vrijeme vozila žurne službe. Bez algoritma vozilo žurne službe zbog utjecaja ostalog prometa i čekanja na semaforiziranom raskrižju u prosjeku gubi 120 sekundi. Primjenom algoritma za dodjelu prioriteta prosječno se gubi 74 sekunde. Uz algoritam povratka oduzetog vremena prosječni gubici iznose 76 sekundi što je u usporedbi s rezultatom bez korištenja algoritma daje smanjenje izgubljenog vremena od 44 sekunde.



**Grafikon 4** Ukupno izgubljeno vrijeme vozila žurne službe za prvi scenarij

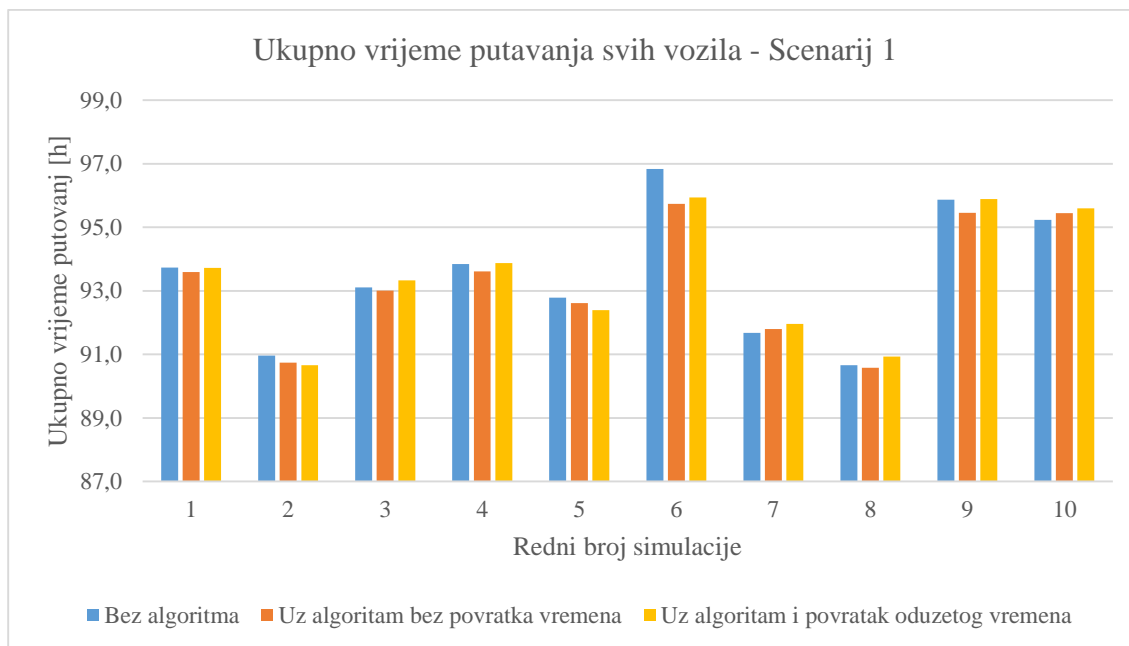
Grafikon 5 prikazuje ukupno vrijeme stajanja vozila žurne službe. U prosjeku bez algoritma vozilo žurne službe zaustavljeno provede 32 sekunde. Primjenom algoritma za dodjelu prioriteta i algoritma za povratak oduzetog vremena vozilo prosječno bude zaustavljeno 0 sekundi jer se u niti jednom trenutku nije zaustavilo.





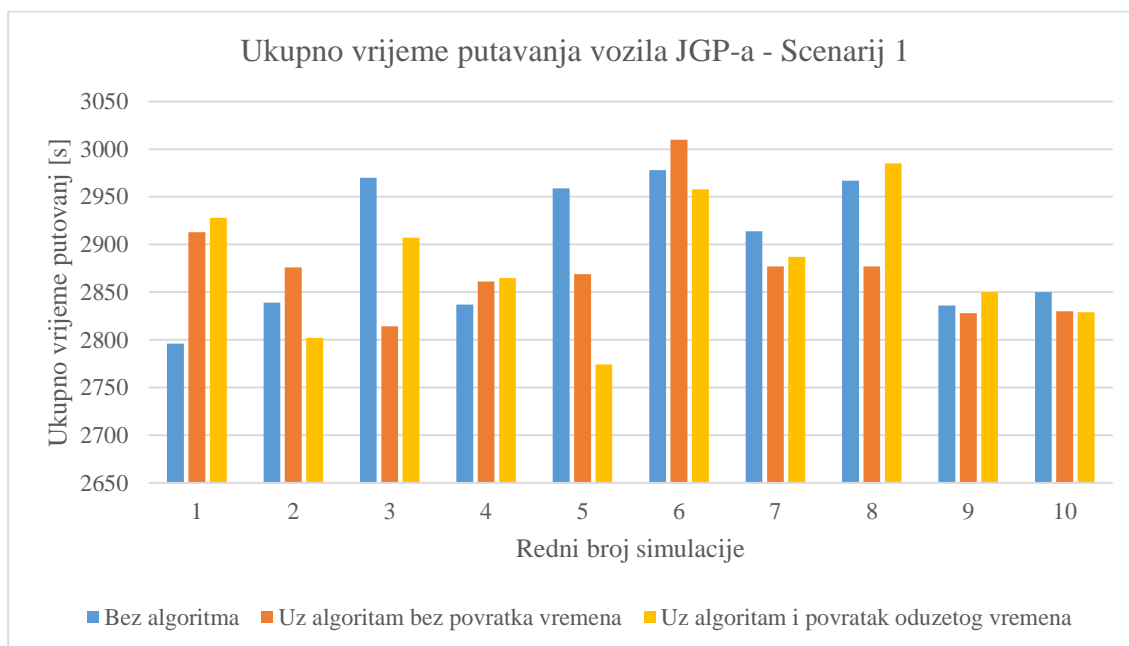
**Grafikon 5** *Ukupno vrijeme stajanja vozila žurne službe za prvi scenarij*

Grafikon 6 prikazuje ukupno vrijeme putovanja svih vozila iz kojeg je vidljiv neznatan utjecaj algoritma dodjele prioriteta. U prosjeku bez algoritma vozila u mreži ukupno provedu 93,5 sati. Korištenjem algoritma za dodjelu prioriteta prosjek pada na 93,3 sati. Uz povratak oduzetog vremena prosjek iznosi 93,4 sati što u usporedbi s rezultatom bez korištenja algoritma daje smanjenje ukupnog vremena putovanja za 0,1 sat. U slučajevima poput ovog s manjom prometnom potražnjom algoritam povratka oduzetog vremena nije ni potreban i čak može imati negativan utjecaj zbog velikih razlika prometne potražnje u pojedinim privozima.



**Grafikon 6** Ukupno vrijeme putovanja svih vozila za prvi scenarij

Grafikon 7 prikazuje ukupno vrijeme putovanja vozila JGP-a. U prosjeku bez algoritma vozila JGP-a u mreži provedu 2895 sekundi. Primjenom algoritma za dodjelu prioriteta taj prosjek iznosi 2876 sekundi. Prilikom korištenja algoritma za povratak oduzetog vremena taj prosjek iznosi 2879 sekundi. U usporedbi s rezultatom bez korištenog algoritma prosjek ukupnog vremena putovanja vozila JGP-a je smanjen za 16 sekundi.

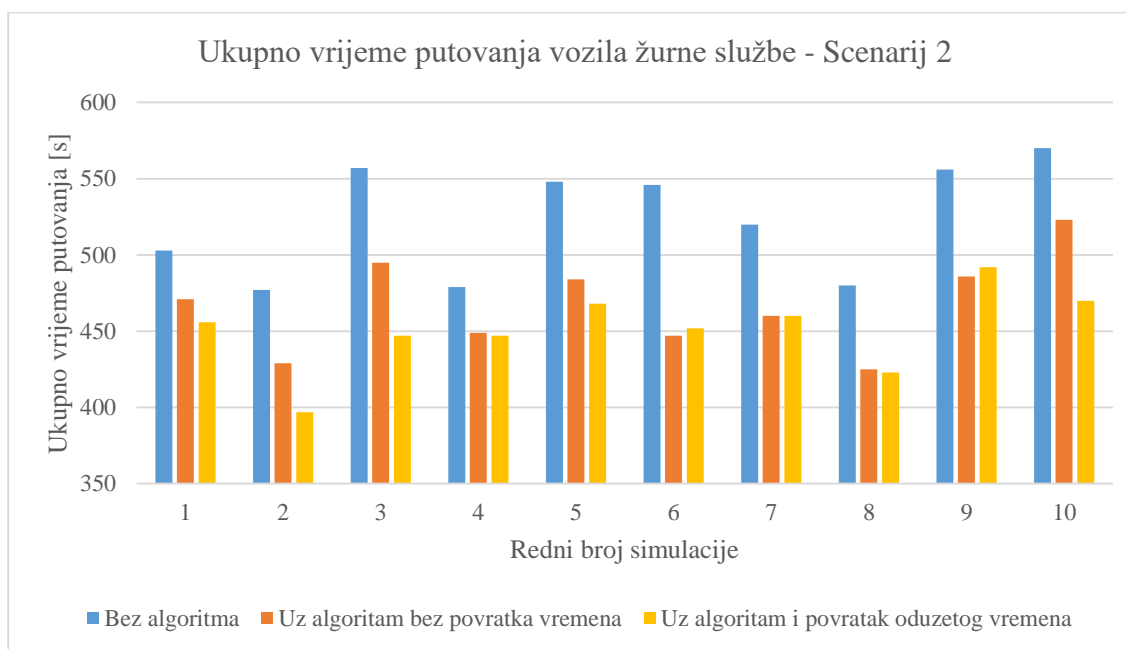


**Grafikon 7** Ukupno vrijeme putovanja vozila JGP-a za prvi scenarij

### 6.3.2. Rezultati simulacija scenarija 2

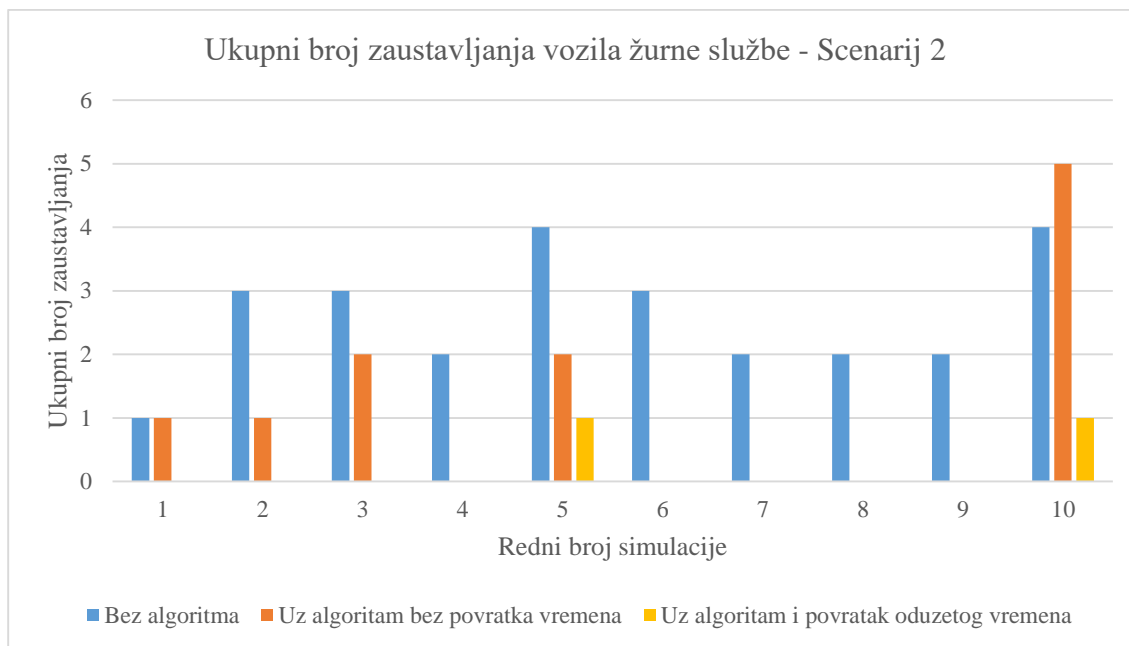
Prema parametrima scenarija 2 dobiveni su rezultati prikazani u Grafikonima 8-13. Grafikoni 8-11 prikazuju utjecaj algoritma na vozilo žurne službe dok grafikoni 12 i 13 prikazuju utjecaj korištenja algoritma na prometnu mrežu promatrano kroz ukupno vrijeme putovanja svih vozila i ukupno vrijeme putovanja vozila JGP-a. U svim simulacijama ukupan broj vozila koja su prošla mrežom iznosi 3108.

Ukupno vrijeme putovanja vozila žurne službe prikazano je u grafikonu 8. Iz grafikona je vidljivo smanjenje ukupnog vremena putovanja primjenom algoritma u svih deset simulacija. U prosjeku bez algoritma vozilo žurne službe je kroz mrežu putovalo 524 sekundi. Primjenom algoritma za dodjelu prioriteta prosječno vrijeme putovanje pada na 467 sekundi. Korištenjem algoritma za povratak oduzetog vremena prosjek iznosi 451 sekundu što u usporedbi s rezultatom bez korištenja algoritma daje prosječno smanjenje ukupnog vremena putovanja od 73 sekunde.



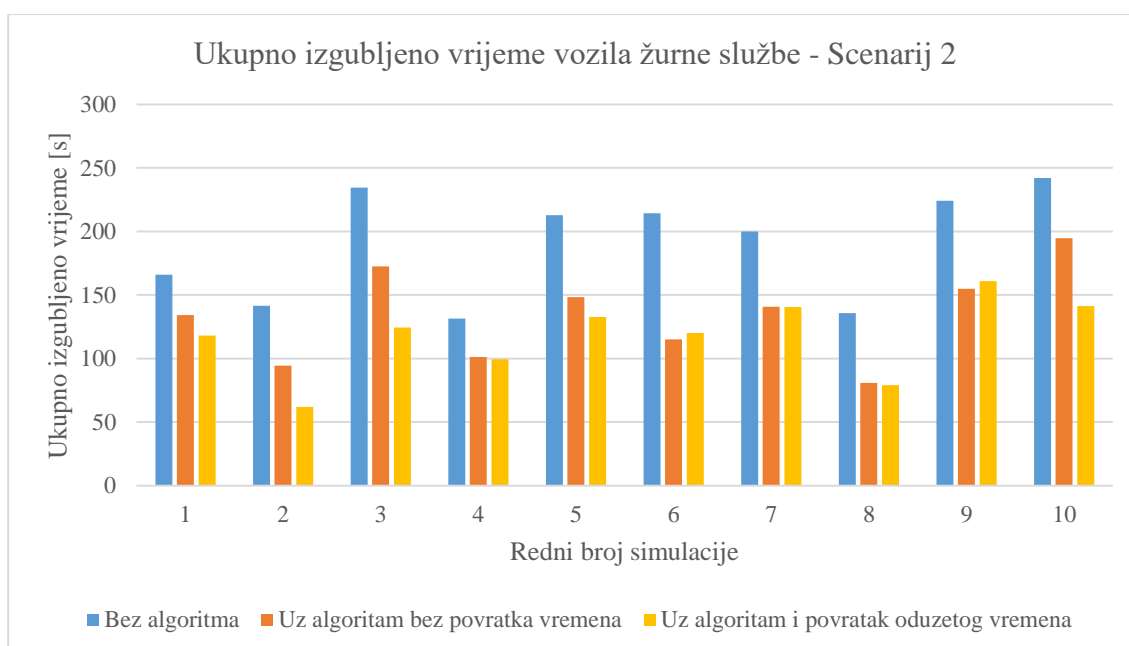
**Grafikon 8** Ukupno vrijeme putovanja vozila žurne službe za drugi scenarij

Ukupan broj zaustavljanja vozila žurne službe prikazan je u grafikonu 9. U prosjeku bez algoritma vozilo žurne službe se zaustavilo tri puta. Primjenom algoritma za dodjelu prioriteta vozilo se prosječno zaustavi jednom. Uz algoritam povratka oduzetog vremena vozilo žurne službe u prosjeku prolazi mrežom bez zaustavljanja.



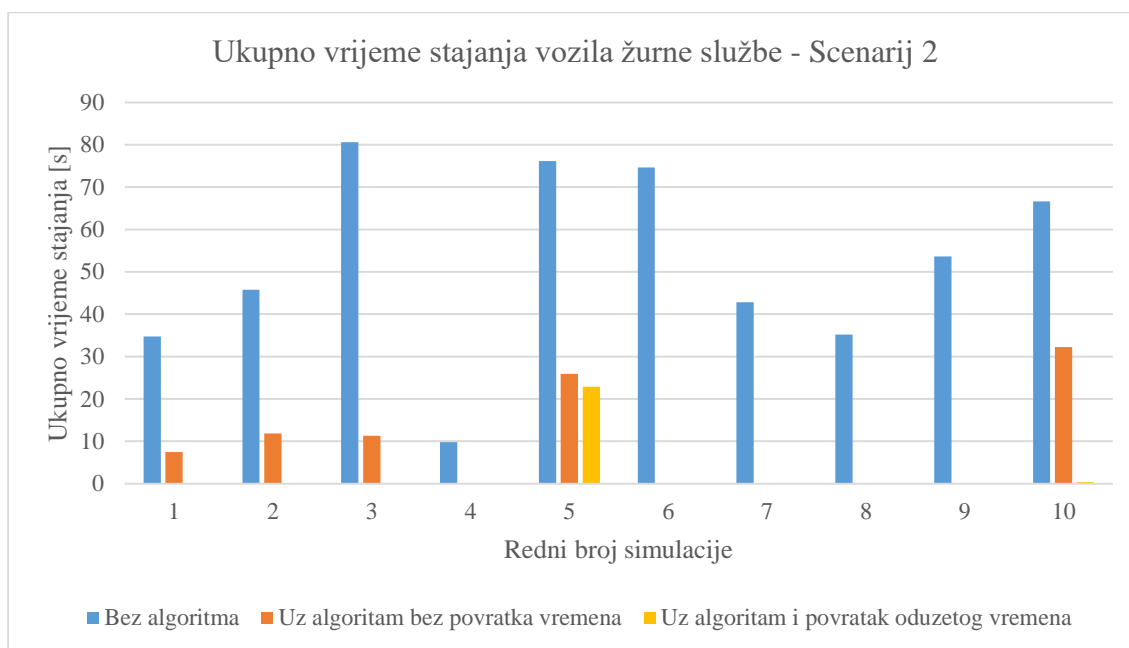
**Grafikon 9** Ukupan broj zaustavljanja vozila žurne službe za drugi scenarij

Grafikon 10 prikazuje ukupno izgubljeno vrijeme vozila žurne službe. U prosjeku bez algoritma vozilo žurne gubi 190 sekundi. Primjenom algoritma za dodjelu prioriteta prosječno se gubi 134 sekunde. Uz algoritam povratka oduzetog vremena prosječni gubici iznose 118 sekundi što je u usporedbi s rezultatom bez korištenja algoritma daje smanjenje izgubljenog vremena za 72 sekunde.



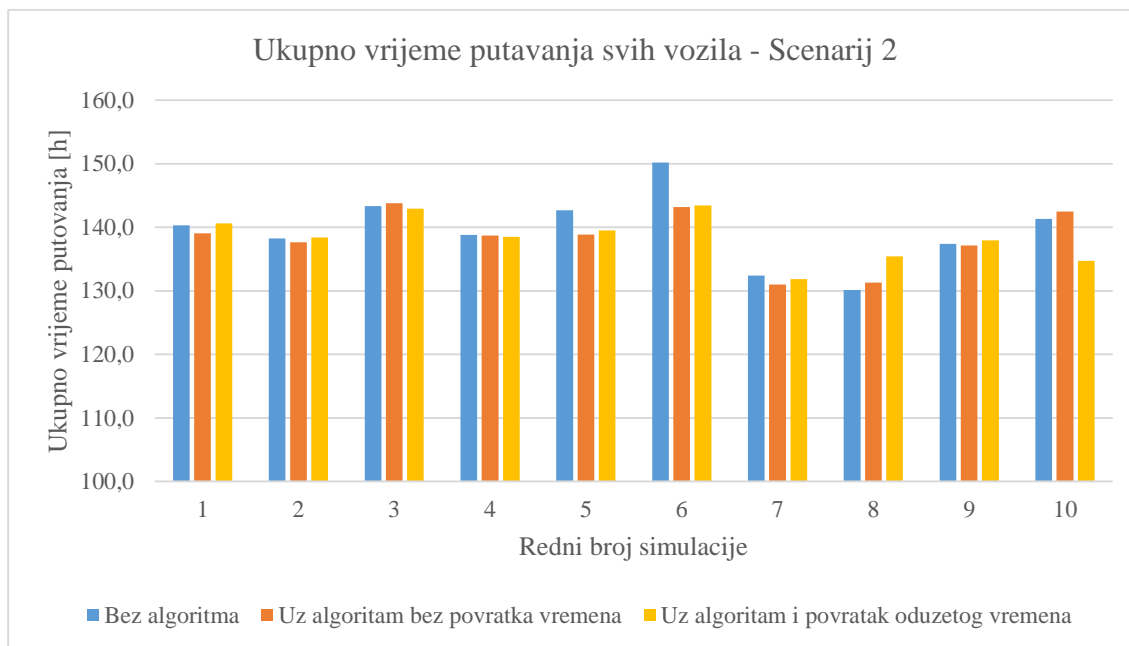
**Grafikon 10** Ukupno izgubljeno vrijeme vozila žurne službe za drugi scenarij

Grafikon 11 prikazuje ukupno vrijeme stajanja vozila žurne službe. U prosjeku bez algoritma vozilo žurne službe provede 52 sekunde zaustavljeno. Primjenom algoritma za dodjelu prioriteta prosječno vrijeme stajanja pada na 9 sekundi. Uz algoritam za povratak oduzetog vremena prosječno vrijeme stajanja iznosi tek 2 sekunde.



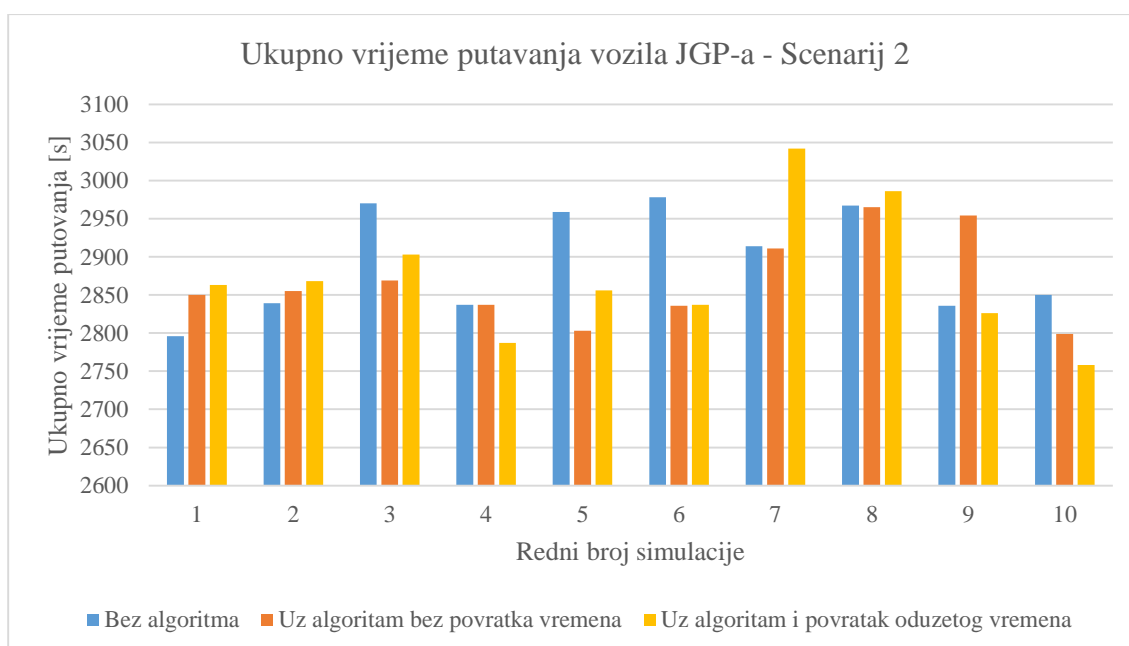
**Grafikon 11** Ukupno vrijeme stajanja vozila žurne službe za drugi scenarij

Grafikon 12 prikazuje ukupno vrijeme putovanja svih vozila. U prosjeku bez algoritma vozila u mreži ukupno provedu 139,5 sati. Korištenjem algoritma za dodjelu prioriteta prosjek pada na 138,3 sati. Uz povratak oduzetog vremena prosjek iznosi 138,3 sati što u usporedbi s rezultatom bez korištenja algoritma daje smanjenje ukupnog vremena putovanja za 1,2 sat.



**Grafikon 12** Ukupno vrijeme putovanja svih vozila za drugi scenarij

Grafikon 13 prikazuje ukupno vrijeme putovanja vozila JGP-a. U prosjeku bez algoritma vozila JGP-a u mreži provedu 2895 sekundi. Primjenom algoritma za dodjelu prioriteta prosjek iznosi 2868 sekundi. Prilikom korištenja algoritma za povratak oduzetog vremena prosjek iznosi 2873 sekundi. U usporedbi sa rezultatom bez korištenog algoritma prosjek ukupnog vremena putovanja je smanjen za 22 sekunde.

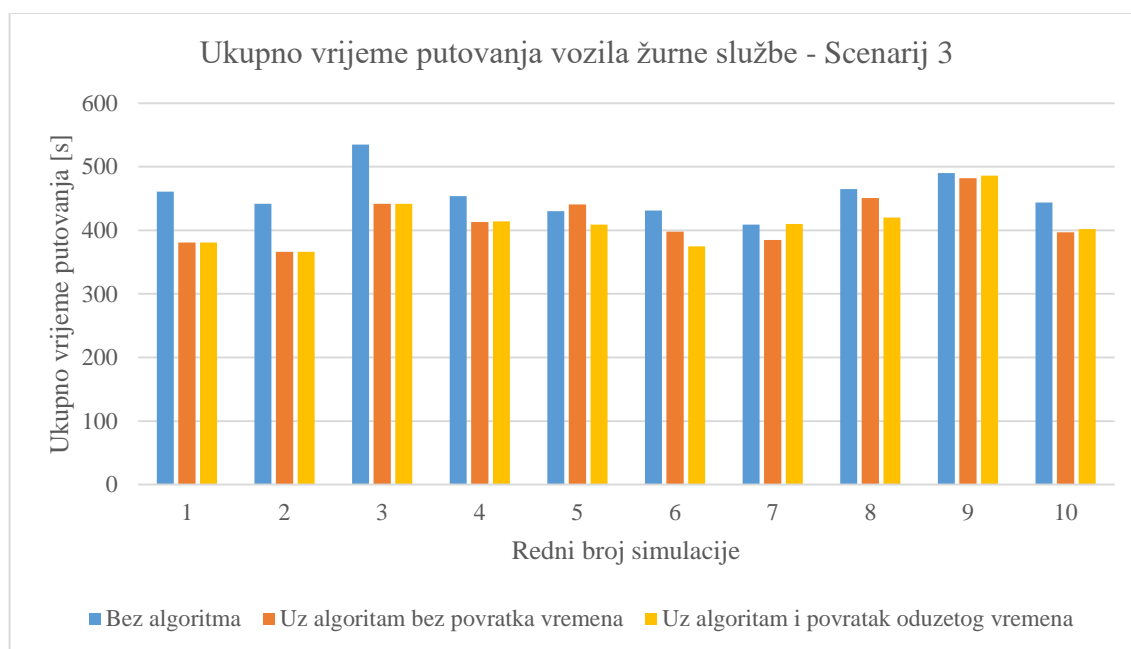


**Grafikon 13** Ukupno vrijeme putovanja vozila JGP-a za drugi scenarij

### 6.3.3. Rezultati simulacija scenarija 3

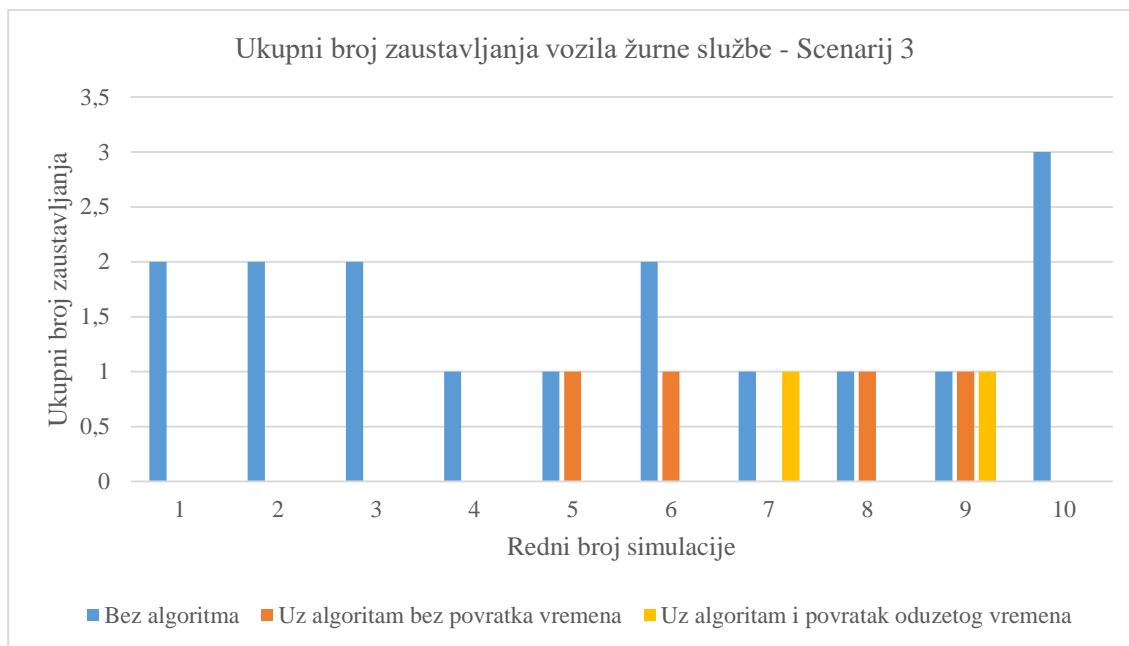
Prema parametrima scenarija 3 dobiveni su rezultati prikazani u Grafikonima 14-19. Grafikoni 14-17 prikazuju utjecaj algoritma na vozilo žurne službe dok grafikoni 18 i 19 prikazuju utjecaj korištenja algoritma na prometnu mrežu promatrano kroz ukupno vrijeme putovanja svih vozila i ukupno vrijeme putovanja vozila JGP-a. U svim simulacijama ukupan broj vozila koja su prošla mrežom iznosi 2190.

Ukupno vrijeme putovanja vozila žurne službe prikazano je u grafikonu 14. U prosjeku bez algoritma vozilo žurne službe kroz mrežu putuje 456 sekundi. Primjenom algoritma za dodjelu prioriteta prosječno putovanje pada na 416 sekundi. Korištenjem algoritma za povratak oduzetog vremena prosjek iznosi 411 sekundu što u usporedbi s rezultatom bez korištenja algoritma daje prosječno smanjenje ukupnog vremena putovanja od 45 sekundi.



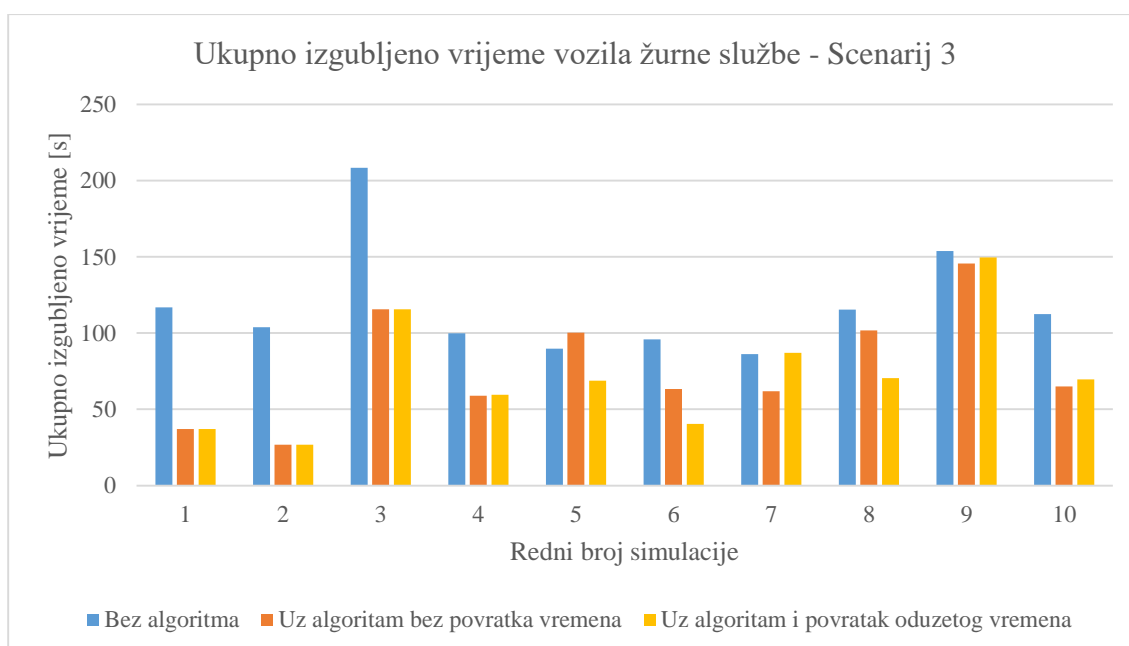
**Grafikon 14** Ukupno vrijeme putovanja vozila žurne službe za treći scenarij

Ukupan broj zaustavljanja vozila žurne službe prikazan je u grafikonu 15. U prosjeku bez algoritma vozilo žurne službe se zaustavilo dva puta. Primjenom algoritma za dodjelu prioriteta kao i algoritma za povratak oduzetog vremena u prosjeku vozilo žurne službe prolazi mrežom bez zaustavljanja.



**Grafikon 15** Ukupan broj zaustavljanja vozila žurne službe za treći scenarij

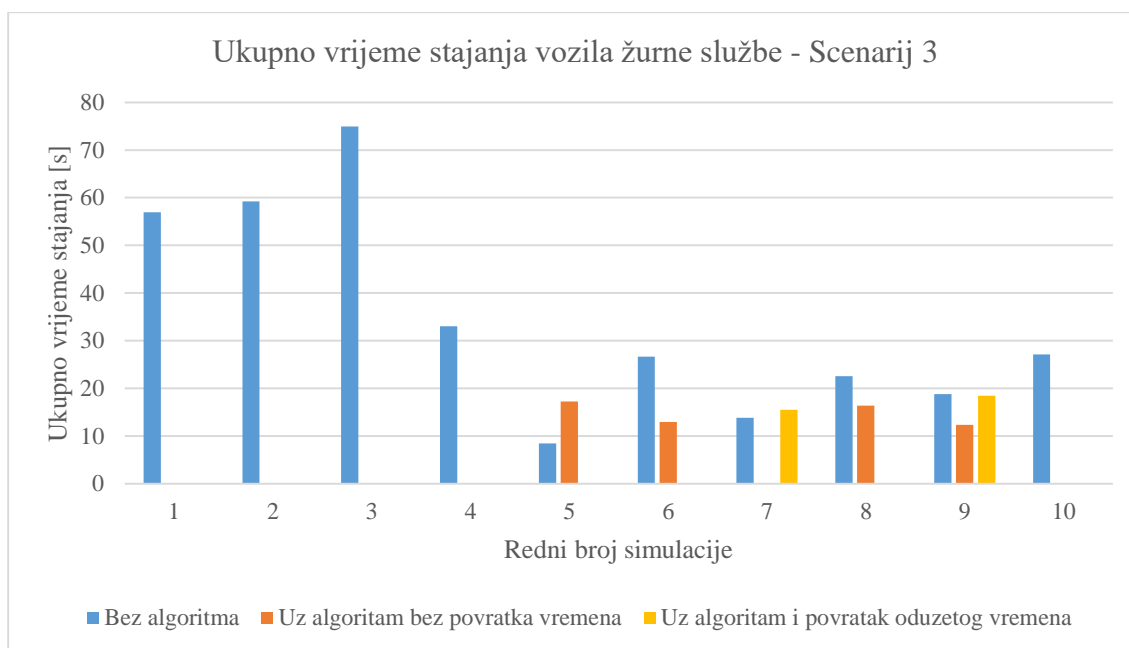
Grafikon 16 prikazuje ukupno izgubljeno vrijeme vozila žurne službe. U prosjeku bez algoritma vozilo žurne gubi 118 sekundi. Primjenom algoritma za dodjelu prioriteta prosječno se gubi 78 sekundi. Uz algoritam povratka oduzetog vremena prosječni gubici iznose 72 sekundi što je u usporedbi s rezultatom bez korištenja algoritma daje smanjenje izgubljenog vremena za 46 sekundi.



**Grafikon 16** Ukupno izgubljeno vrijeme vozila žurne službe za treći scenarij

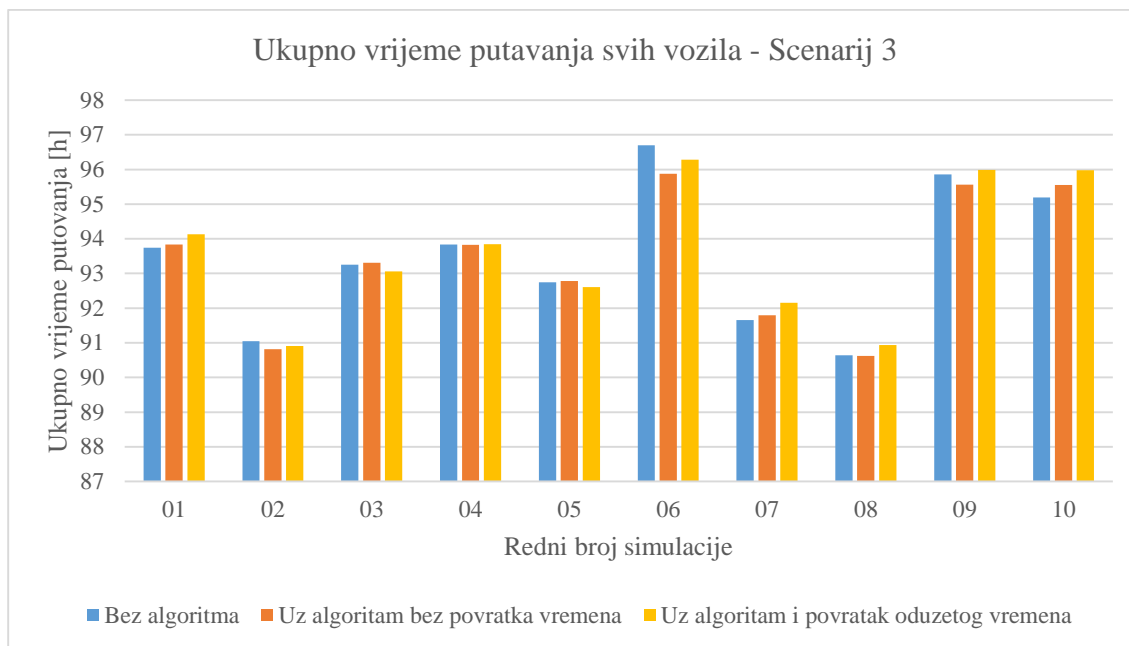


Grafikon 17 prikazuje ukupno vrijeme stajanja vozila žurne službe. U prosjeku bez algoritma vozilo žurne službe provede 34 sekunde zaustavljeno. Primjenom algoritma za dodjelu prioriteta prosječno vrijeme stajanja pada na 6 sekundi. Uz algoritam za povratak oduzetog vremena prosječno vrijeme stajanja iznosi tek 3 sekunde.



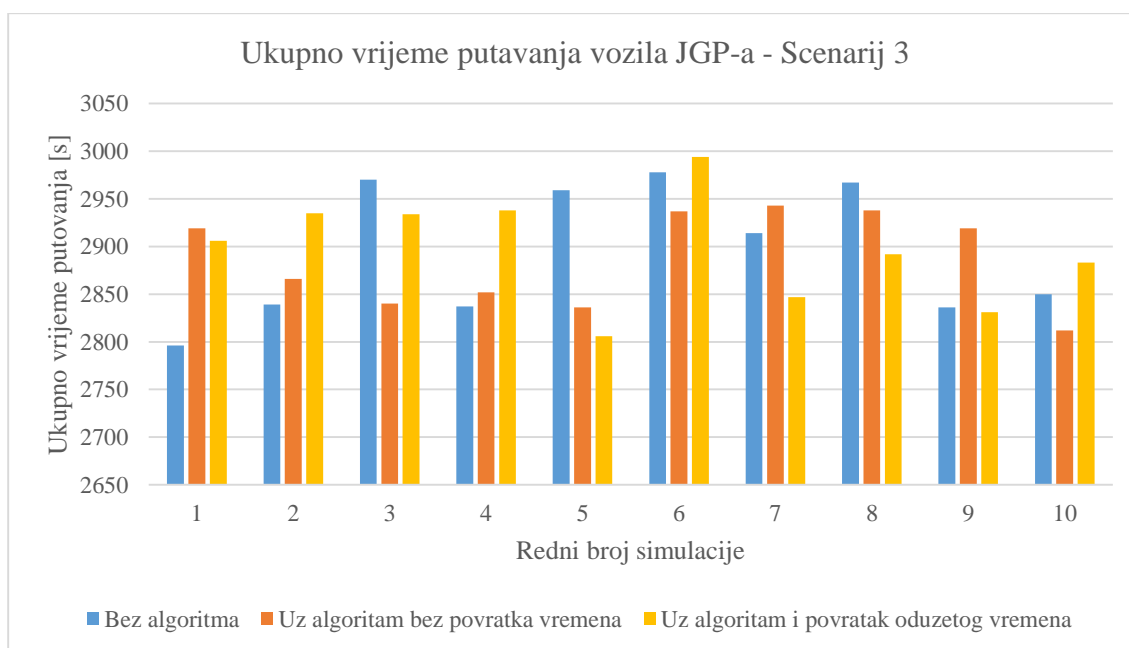
**Grafikon 17** Ukupno vrijeme stajanja vozila žurne službe za treći scenarij

Grafikon 18 prikazuje ukupno vrijeme putovanja svih vozila. U prosjeku bez algoritma vozila u mreži ukupno provedu 93,5 sati. Korištenjem algoritma za dodjelu prioriteta prosjek pada na 93,4 sati. Uz povratak oduzetog vremena prosjek iznosi 93,6 sati što u usporedbi s rezultatom bez korištenja algoritma daje povećanje ukupnog vremena putovanja za 0,1 sat.



**Grafikon 18** Ukupno vrijeme putovanja svih vozila za treći scenarij

Grafikon 19 prikazuje ukupno vrijeme putovanja vozila JGP-a. U prosjeku bez algoritma vozila JGP-a u mreži provedu 2895 sekundi. Primjenom algoritma za dodjelu prioriteta prosjek iznosi 2886 sekundi. Prilikom korištenja algoritma za povratak oduzetog vremena prosjek iznosi 2897 sekundi. U usporedbi s rezultatom bez korištenog algoritma prosjek ukupnog vremena putovanja je povećan za 2 sekunde. Iz istih razloga kao u scenariju 1 vidi se pogoršanje rezultata korištenjem algoritma za povratak oduzetog vremena.

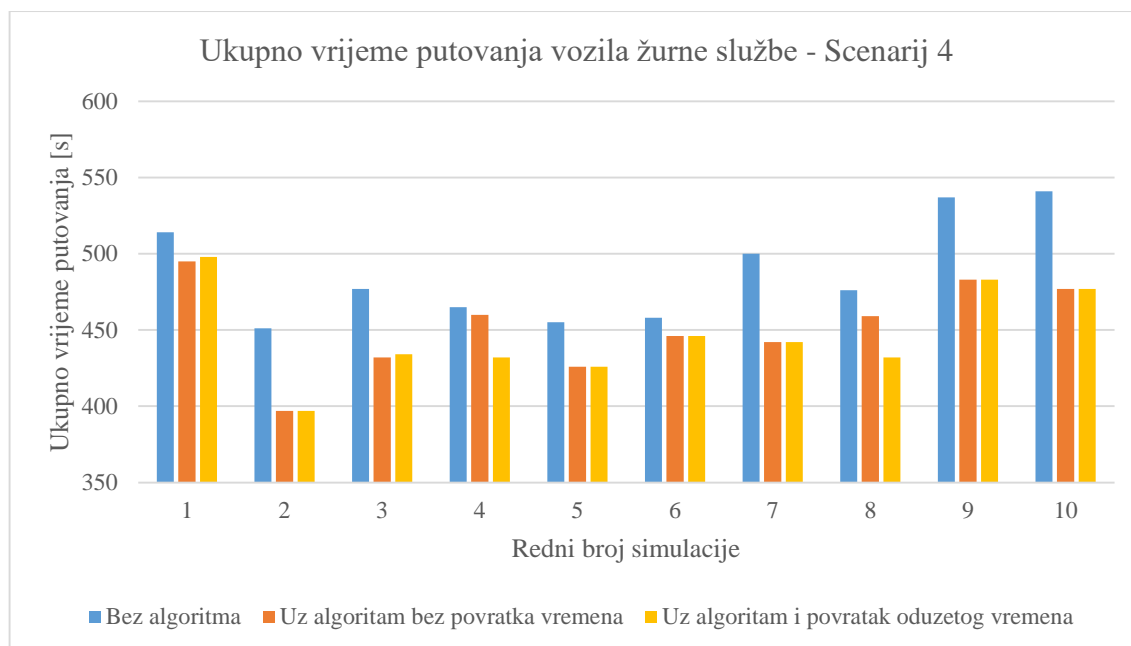


**Grafikon 19** Ukupno vrijeme putovanja vozila JGP-a za drugi scenarij

#### 6.3.4. Rezultati simulacija scenarija 4

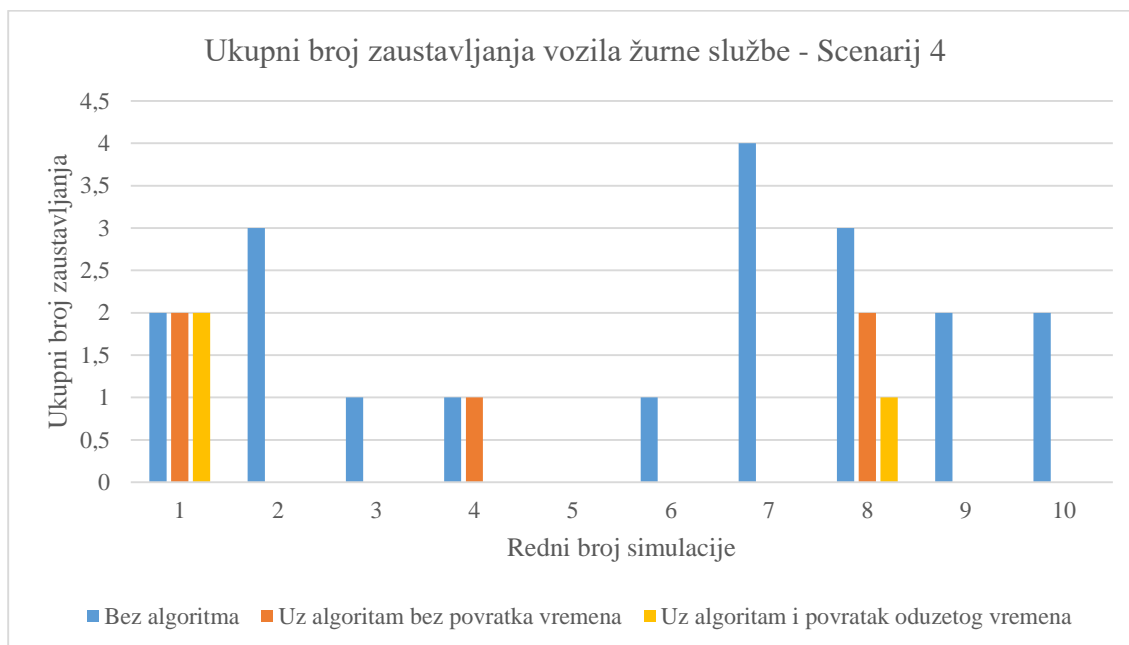
Prema parametrima scenarija 2 dobiveni su rezultati prikazani u Grafikonima 20-25. Grafikoni 20-23 prikazuju utjecaj algoritma na vozilo žurne službe dok grafikoni 24 i 25 prikazuju utjecaj korištenja algoritma na prometnu mrežu promatrano kroz ukupno vrijeme putovanja svih vozila i ukupno vrijeme putovanja vozila JGP-a. U svim simulacijama ukupan broj vozila koja su prošla mrežom iznosi 3108.

Ukupno vrijeme putovanja vozila žurne službe prikazano je u grafikonu 20. U prosjeku bez algoritma vozilo žurne službe je kroz mrežu putovalo 487 sekundi. Primjenom algoritma za dodjelu prioriteta prosječno putovanje pada na 452 sekundi. Korištenjem algoritma za povratak oduzetog vremena prosjek iznosi 447 sekundu što u usporedbi s rezultatom bez korištenja algoritma daje prosječno smanjenje ukupnog vremena putovanja za 40 sekundi.



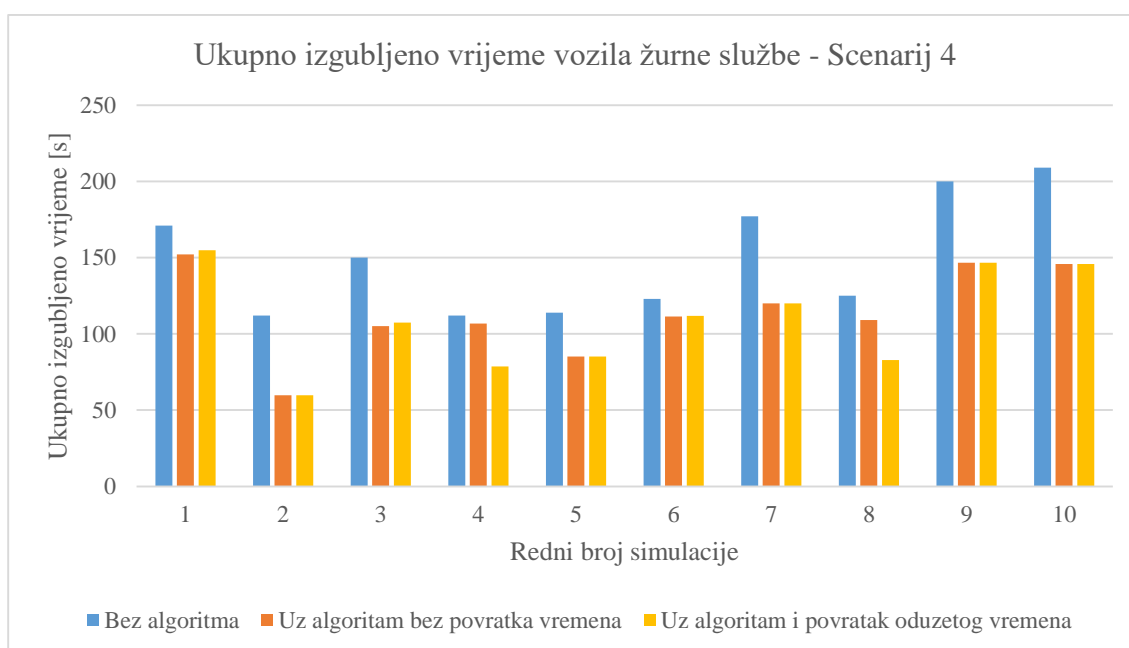
**Grafikon 20** Ukupno vrijeme putovanja vozila žurne službe za četvrti scenarij

Ukupan broj zaustavljanja vozila žurne službe prikazan je u grafikonu 20. U prosjeku bez algoritma vozilo žurne službe se zaustavilo dva puta. Primjenom algoritma za dodjelu prioriteta vozilo se prosječno zaustavi jednom. Uz algoritam povratka oduzetog vremena vozilo žurne službe u prosjeku prolazi mrežom bez zaustavljanja.



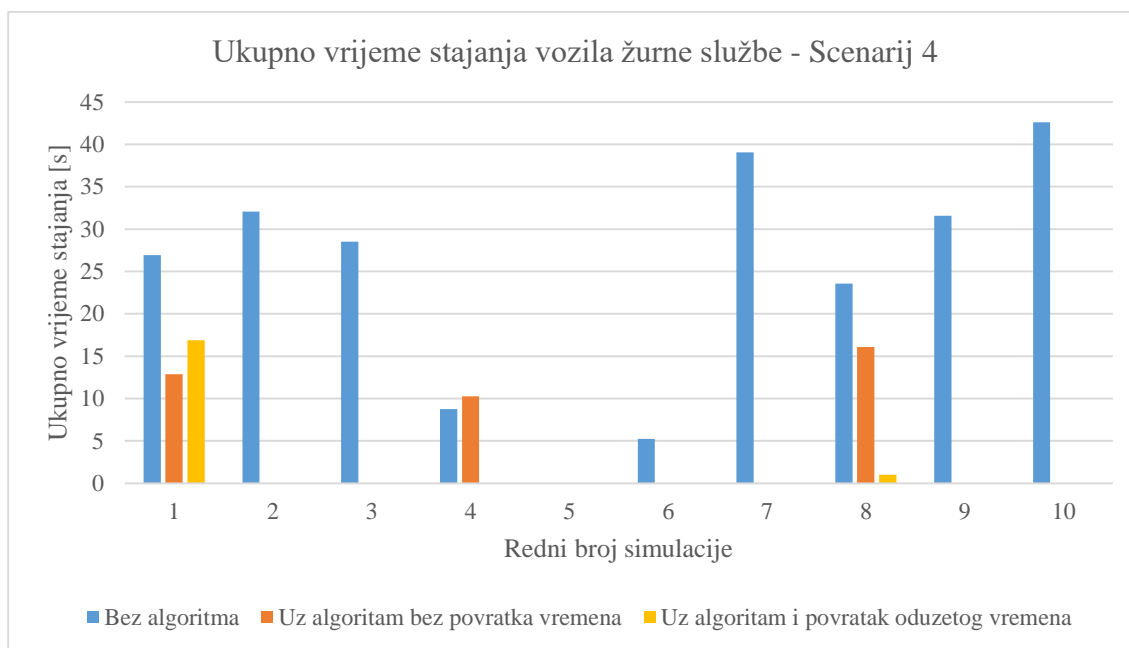
**Grafikon 21** Ukupni broj zaustavljanja vozila žurne službe za četvrti scenarij

Grafikon 22 prikazuje ukupno izgubljeno vrijeme vozila žurne službe. U prosjeku bez algoritma vozilo žurne službe gubi 149 sekundi. Primjenom algoritma za dodjelu prioriteta prosječno se gubi 114 sekunde. Uz algoritam povratka oduzetog vremena prosječni gubici iznose 109 sekundi što je u usporedbi s rezultatom bez korištenja algoritma daje smanjenje izgubljenog vremena za 40 sekundi.



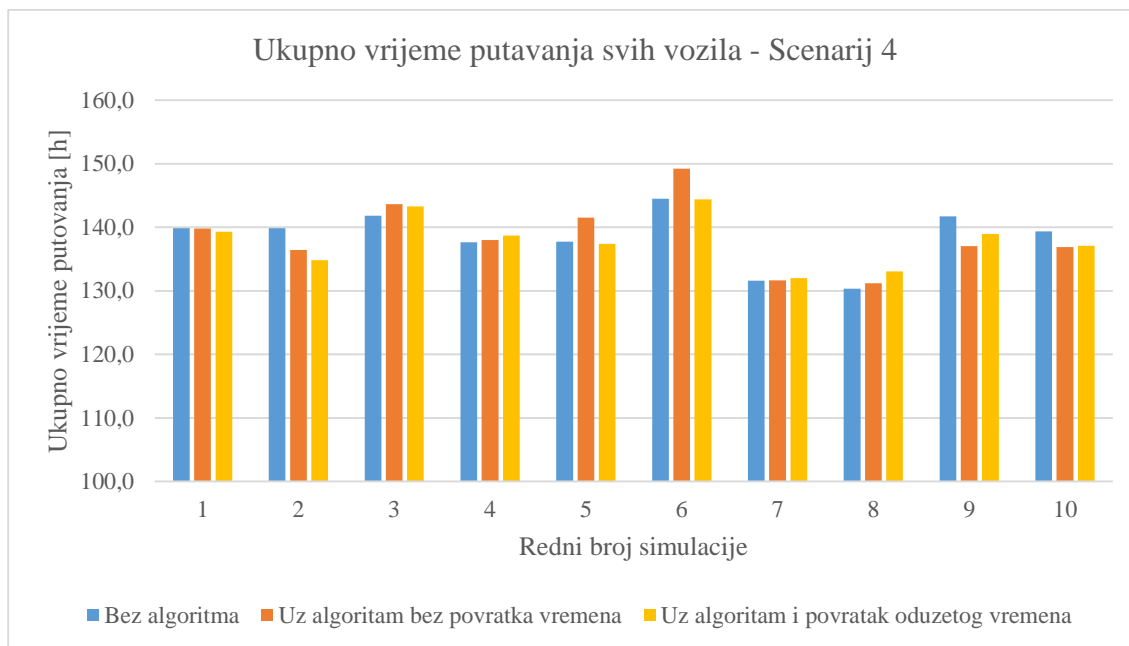
**Grafikon 22** Ukupno izgubljeno vrijeme vozila žurne službe za četvrti scenarij

Grafikon 23 prikazuje ukupno vrijeme stajanja vozila žurne službe. U prosjeku bez algoritma vozilo žurne službe provede 24 sekunde zaustavljeno. Primjenom algoritma za dodjelu prioriteta prosječno vrijeme stajanja pada na 4 sekunde. Uz algoritam za povratak oduzetog vremena prosječno vrijeme stajanja iznosi tek 2 sekunde.



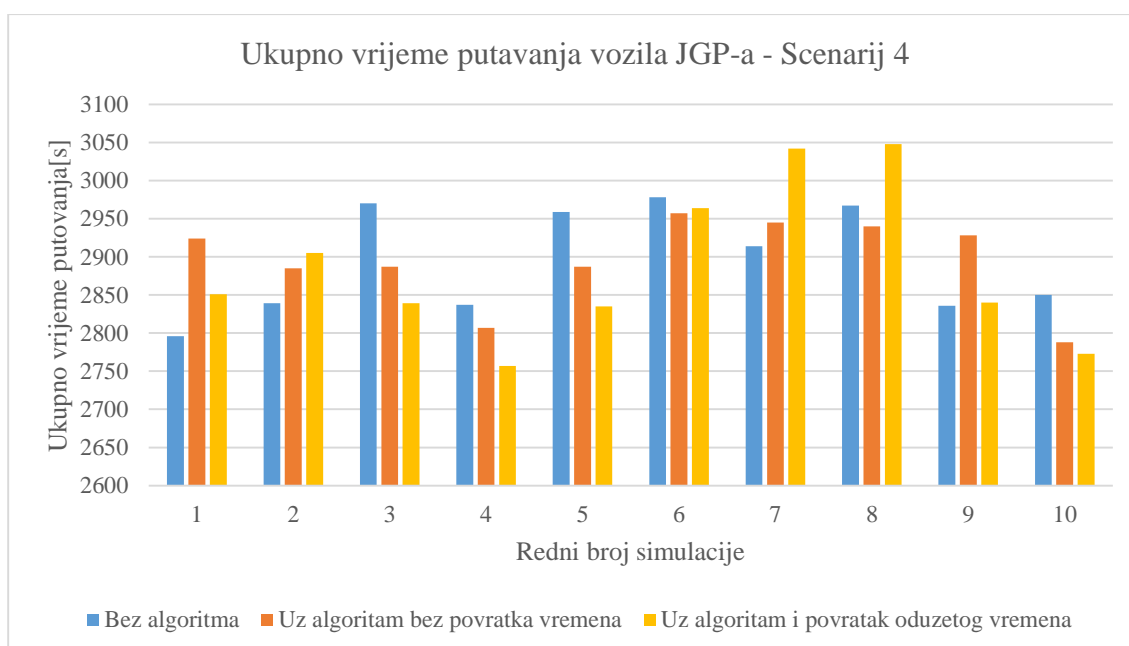
**Grafikon 23** Ukupno vrijeme stajanja vozila žurne službe za četvrti scenarij

Grafikon 24 prikazuje ukupno vrijeme putovanja svih. U prosjeku bez algoritma vozila u mreži ukupno provedu 138,4 sati. Korištenjem algoritma za dodjelu prioriteta prosjek se blago povećava na 138,5 sati. Uz povratak oduzetog vremena prosjek iznosi 137,9 sati što u usporedbi s rezultatom bez korištenja algoritma daje smanjenje ukupnog vremena putovanja za 0,5 sati.



**Grafikon 24** Ukupno vrijeme putovanja svih vozila za četvrti scenarij

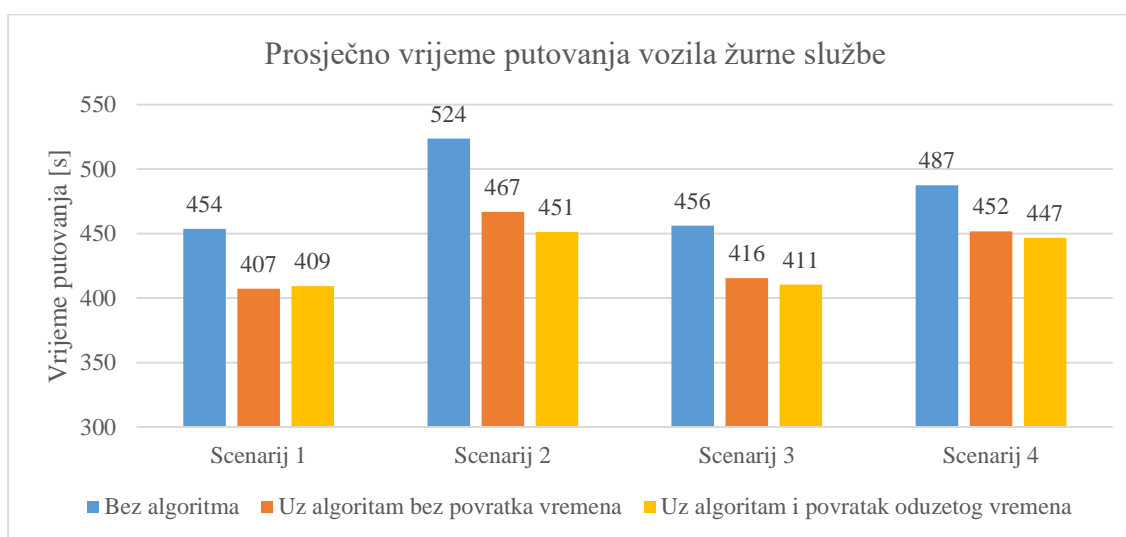
Grafikon 25 prikazuje ukupno vrijeme putovanja vozila JGP-a. U prosjeku bez algoritma vozila JGP-a u mreži provedu 2895 sekundi. Primjenom algoritma za dodjelu prioriteta prosjek iznosi 2895 sekundi. Prilikom korištenja algoritma za povratak oduzetog vremena prosjek iznosi 2885 sekundi. U usporedbi s rezultatom bez korištenog algoritma prosjek ukupnog vremena putovanja je smanjen za 10 sekundi.



**Grafikon 25** Ukupno vrijeme putovanja vozila JGP-a za četvrti scenarij

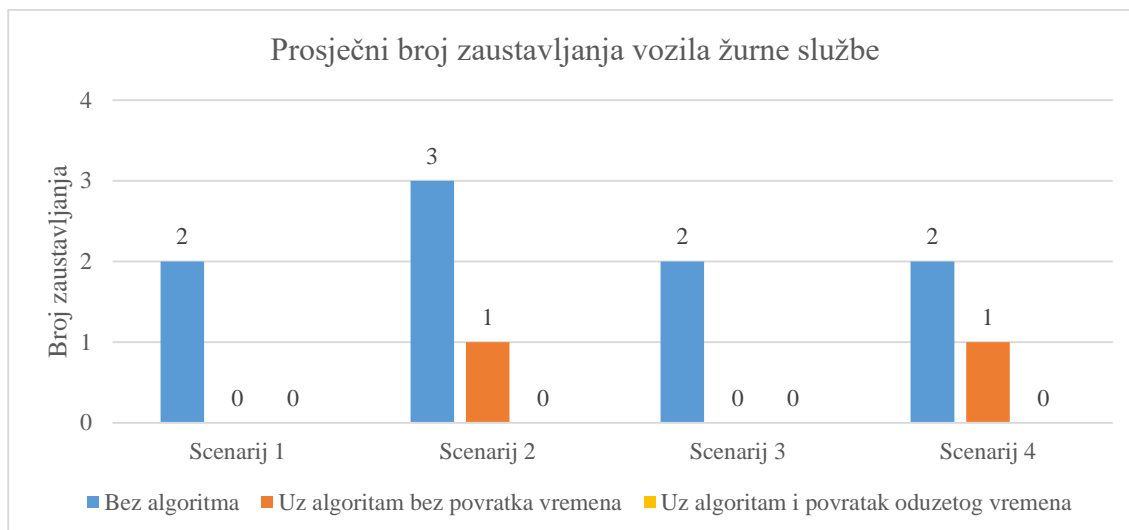
## 6.4. Analiza dobivenih rezultata

Zbog velikih oscilacija među simulacijama potrebno je izračunati prosječne podatke te nad njima provesti analizu. Usporedni podaci za prosječno vrijeme putovanja vozila žurne službe prikazani na grafikonu 26 potvrđuju prvu i drugu hipotezu radu. U svim scenarijima je postignuto smanjenje vremena putovanja vozila žurne službe. Korištenje algoritma za povratak oduzetog vremena daje blago poboljšanje rezultata u svim scenarijima osim u scenariju 1. Gledano u postotku najbolji rezultat je ostvaren u scenariju 2 gdje je korištenjem algoritma za dodjelu prioriteta ostvareno smanjenje vremena putovanja za 10,83%. Uz algoritam za povratak oduzetog vremena putovanja je smanjeno za 13,83%. Primjećuju se bolji rezultati u prva dva scenarija zbog jednostavnije rute vozila žurne službe prilikom prilaza raskrižju samo glavnim prometnim tokom.



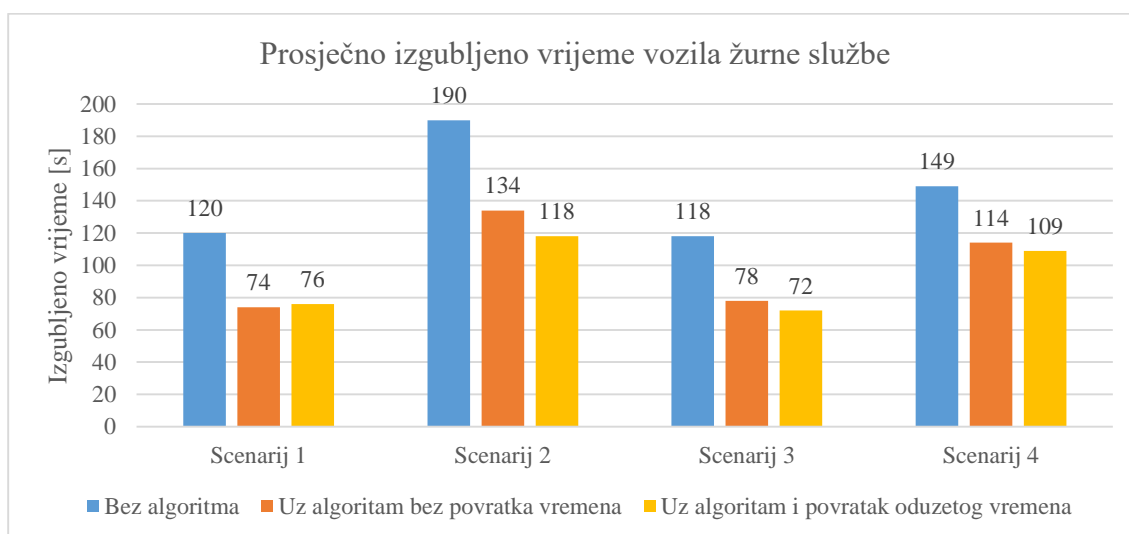
**Grafikon 26** Prosječno vrijeme putovanja vozila žurne službe

Rezultati prosječnog broja zaustavljanja vozila žurne službe prikazani na grafikonu 27 dodatno potvrđuju drugu hipotezu rada. Korištenjem algoritma zaustavljanja vozila žurne službe su u potpunosti eliminirana, osim u scenariju 2 i 4 u kojima je očekivan lošiji rezultat zbog povećanog broja vozila u prometnoj mreži. Zbog povoljnog utjecaja na mrežu korištenjem algoritma za povratak oduzetog vremena broj zaustavljanja vozila žurne službe iznosi nula u svim scenarijima.



**Grafikon 27** Prosječni broj zaustavljanja vozila žurne službe

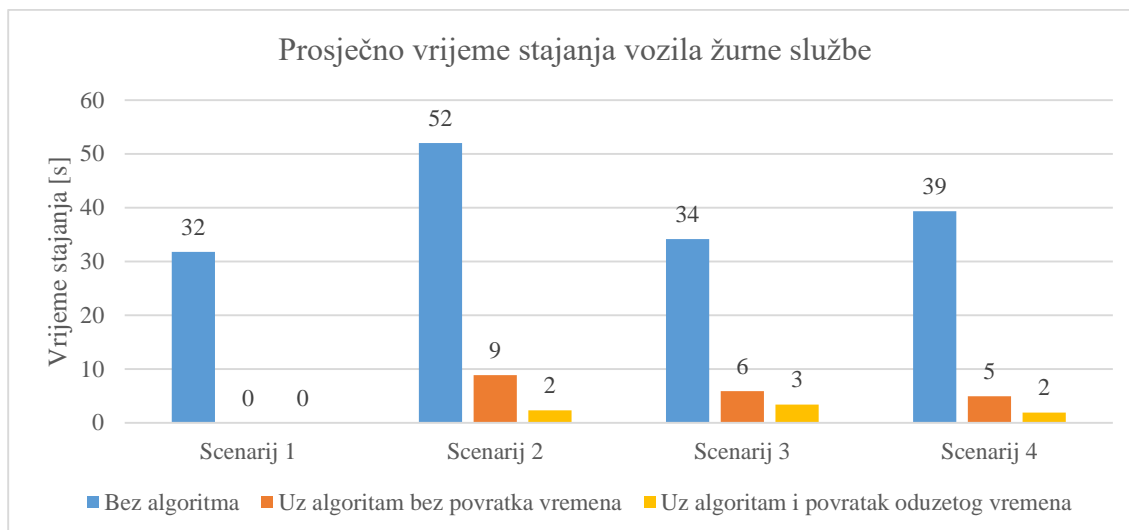
Prosječno izgubljeno vrijeme vozila žurne službe prikazano na grafikonu 28 također dodatno potvrđuje drugu hipotezu rada. Primjećuje se analogija s rezultatima vremena putovanja vozila žurne službe što potvrđuje da je smanjenje vremena putovanja vozila žurne službe izravno uzrokovano smanjenjem izgubljenog vremena.



**Grafikon 28** Prosječno izgubljeno vrijeme vozila žurne službe

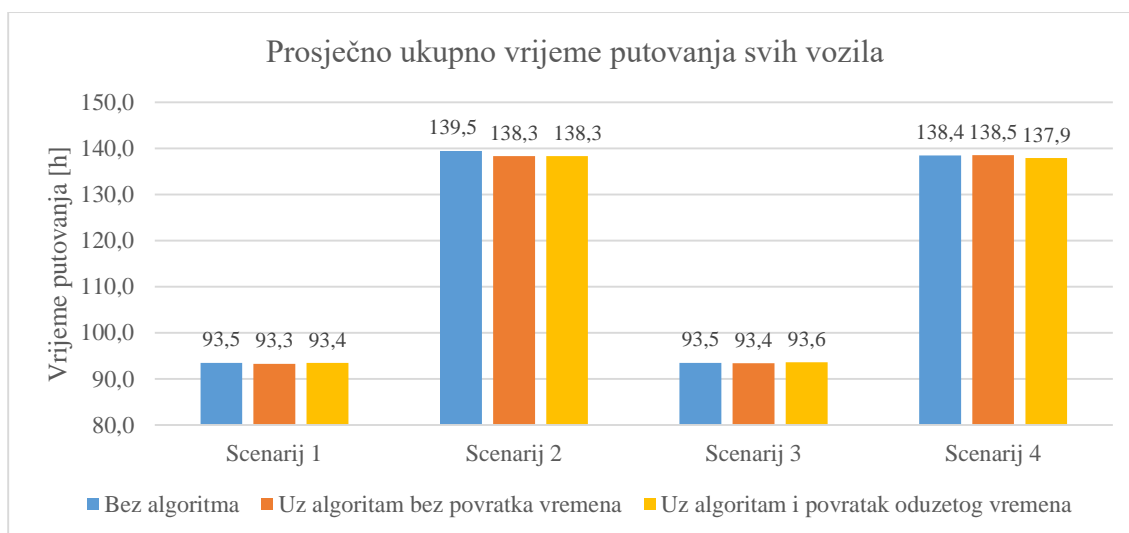
Prosječno vrijeme stajanja vozila žurne službe prikazano na grafikonu 29 također dodatno potvrđuje drugu hipotezu rada te je u skladu s rezultatima prosječnog broja zaustavljanja vozila žurne službe. Vrijeme stajanja vozila žurne službe je značajno smanjeno u svim scenarijima, a u scenariju 1 je u potpunosti eliminirano.





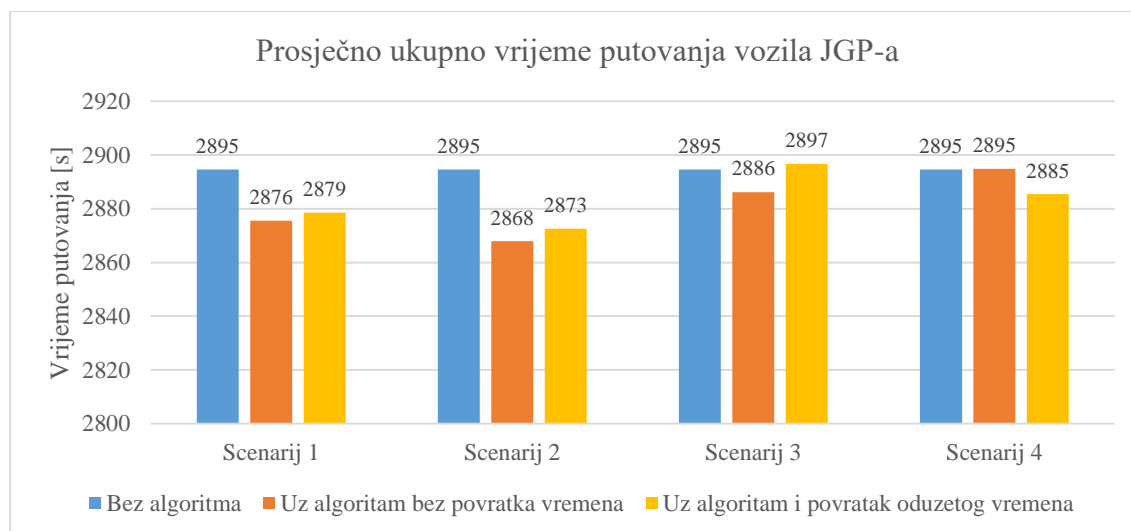
**Grafikon 29** Prosječno vrijeme stajanja vozila žurne službe

Prosječno ukupno vrijeme putovanja svih vozila prikazano na grafikonu 30 daje rezultat u skladu s trećom hipotezom rada. Ukupno vrijeme putovanja svih vozila se većinom blago smanjuje uz implementaciju algoritma za dodjelu prioriteta vozilima žurne službe i algoritma za povratak oduzetog vremena. Takav rezultat se pripisuje velikoj razlici u prometnoj potražnji glavnog i sporednog prometnog toka. Vozilo žurne službe u svim scenarijima najviše vremena provodi na glavnom prometnom toku. Dodjelom prioriteta glavnom prometnom toku smanjuje se ukupno vrijeme putovanja svih vozila jer je dodijeljeno zeleno svjetlo većem broju vozila. U prva tri scenarija rezultati korištenja algoritma dodjele prioriteta i algoritma povratka oduzetog vremena se vrlo malo razlikuju, dok je jedino značajno poboljšanje primijećeno u scenariju 4.



**Grafikon 30** Prosječno ukupno vrijeme putovanja svih vozila

Rezultati prosječnog vremena putovanja vozila JGP-a prikazani na grafikonu 31 analogni su rezultatima ukupnog vremena putovanja svih vozila jer je vrijeme putovanja vozila JGP-a smanjeno u svim scenarijima osim u scenariju 3 uz upotrebu algoritma za povratak oduzetog vremena. Time je dodatno potvrđena treća hipoteza rada.



**Grafikon 31** Prosječno ukupno vrijeme putovanja vozila JGP-a

Radi lakšeg pregleda prosječnih rezultata prikazanih na grafikonima 26-31 napravljena je zbirna tablica 4 s pregledom rezultata simulacija prema pojedinim scenarijima. U tablici 4 dan je i iznos relativne promjene pojedinog razmatranog prometnog parametra u postocima. Negativna vrijednost u tablici 4 znači da se vrijednost pripadnog prometnog parametra smanjila, odnosno dobiveno je poboljšanje.

**Tablica 4** Zbirni rezultati simulacija prema scenarijima

Varijable	Scenarij 1					Scenarij 2					Scenarij 3					Scenarij 4				
	Bez algoritma	Algoritam dodjele prioriteta		Algoritam povratka oduzetog vremena		Bez algoritma	Algoritam dodjele prioriteta		Algoritam povratka oduzetog vremena		Bez algoritma	Algoritam dodjele prioriteta		Algoritam povratka oduzetog vremena		Bez algoritma	Algoritam dodjele prioriteta		Algoritam povratka oduzetog vremena	
		Iznos	Promjena [%]	Iznos	Promjena [%]		Iznos	Promjena [%]	Iznos	Promjena [%]		Iznos	Promjena [%]	Iznos	Promjena [%]		Iznos	Promjena [%]	Iznos	Promjena [%]
TTŽS [s]	454	407	-10,27	409	-9,78	524	467	-10,83	451	-13,83	456	416	-8,88	411	-10,00	487	452	-7,32	447	-8,35
BŽŽS	2	0	-100,00	0	-100,00	3	1	-66,67	0	-100,00	2	0	-100,00	0	-100,00	2	1	-50,00	0	-100,00
IVŽS [s]	120	74	-38,33	76	-36,67	190	134	-29,47	118	-37,89	118	78	-33,90	72	-38,98	149	114	-23,49	109	-26,85
TSŽS [s]	32	0	-100,00	0	-100,00	52	9	-82,91	2	-95,54	34	6	-82,76	3	-90,06	39	5	-87,48	2	-95,16
TTT [h]	93,5	93,3	-0,23	93,4	-0,04	139,5	138,3	-0,84	138,3	-0,82	93,5	93,4	-0,07	93,6	0,13	138,4	138,5	0,07	137,9	-0,28
TTJGP [s]	2895	2876	-0,66	2879	-0,56	2895	2868	-0,92	2873	-0,76	2895	2886	-0,29	2897	0,07	2895	2895	0,01	2885	-0,32

Značenja varijabli navedenih u tablici 4 su sljedeća:

TTŽS - Ukupno trajanje putovanja vozila žurne službe [s];

BŽŽS - Broj zaustavljanja vozila žurne službe;

IVŽS - Izgubljeno vrijeme vozila žurne službe [s];

TSŽS - Vrijeme stajanja vozila žurne službe [s];

TTT - Ukupno vrijeme putovanja svih vozila [h];

TTJGP - Ukupno trajanje putovanja vozila JGP-a [s].

## 7. Zaključak

Implementacija ITS rješenja u području upravljanja semaforiziranim raskrižjem u urbanim sredinama korisnicima pruža dodatne mogućnosti poput dodjele prioriteta vozilima žurnih službi. U ovom radu je predložen i implementiran jednostavan algoritam dodjele prioriteta zasnovan na praćenju položaja vozila i mjerenju reda čekanja na raskrižju. Algoritam na temelju procjene vremena dolaska žurnog vozila mijenja trajanje faza signalnog plana s ciljem omogućavanja neometanog prolaska žurnog vozila kroz raskrižje. Dodatno je predložen i implementiran algoritam za povratak oduzetog vremena kako bi se smanjio negativan utjecaj na prometnu mrežu zbog dodjele prioriteta vozilu žurne službe. Navedeni algoritmi su implementirani u programskom paketu MATLAB povezan COM sučeljem s mikroskopskim prometnim simulatorom PTV VISSIM radi njihove simulacijske provjere.

Analiza algoritama je provedena nad jednim izoliranim raskrižjem modeliranim korištenjem stvarnih podataka o prometnoj potražnji. Algoritmi su analizirani kroz postavljena četiri scenarija, te je za svaki scenarij analiziran rad bez upotrebe algoritma, uz upotrebu algoritma dodjele prioriteta, te uz upotrebu algoritma dodjele prioriteta i algoritma povratka oduzetog vremena. Primjenom navedenog algoritma dodjele prioritete i algoritma povratka oduzetog vremena postignuto je smanjenje vremena putovanja vozila žurne službe u svim scenarijima.

Analizom rezultata primijećen je bolji rezultat u scenarijima u kojima vozilo žurne službe putuje glavnom prometnicom. Najbolje poboljšanje se očituje u scenariju s povećanom prometnom potražnjom gdje je postignuto smanjenje trajanja putovanja vozila žurne službe za 73 sekunde, odnosno 13,83%. Ovakvo poboljšanje pridonosi većoj sigurnosti sudionika u prometu, smanjenju troškova poreznih obveznika i vlasti, te omogućuje brz odziv žurnih službi što doprinosi većoj javnoj sigurnosti i spašava živote. U stvarnom scenariju bi rezultati mogli biti još bolji zbog tendencije vozača da propuštaju vozila žurne službe.

Dubljom analizom algoritma nije primijećen negativan utjecaj na prometnu mrežu unatoč očekivanjima. Takav rezultat se može pripisati neusklađenosti fiksnog signalnog plana sa stvarnim podacima prometne potražnje i postavkama scenarija zbog kojih je vozilo žurne službe veći dio putovanja provelo na glavnoj prometnici.

Mogući nastavak istraživanja se vidi u implementaciji algoritama na cijelom prometnom koridoru urbane mreže, te u upotrebi neizrazite logike, algoritama strojnog učenja ili neuronske mreže za optimizaciju postavljenih parametara dodjele prioriteta.

## Zahvale

Zahvaljujemo našem mentoru doc. dr. sc. Edouardu Ivanjku na mnogim savjetima, strpljenju i riječima potpore prilikom izrade ovog rada. Zahvaljujemo dr. sc. Miroslavu Vujiću za pomoć pri izradi simulacije i nabavi stručne literature. Zahvaljujemo Tomislavu Soldi, dipl.ing. za pomoć pri nabavi stručne literature. Zahvaljujemo se Tijani Migić, mag. ing. i Dominiku Miletiću za pomoć pri izradi grafičkih elemenata rada. Također se zahvaljujemo našim obiteljima, prijateljima i kolegama koji su nas podupirali pri izradi ovog rada.

## Literatura

- [1] Anžek, M.: „Cestovna telematika - Povijest Cestovne Telematike“, predavanja, Fakultet prometnih znanosti, Zagreb, 2016.
- [2] Bošnjak, I.: Inteligentni transportni sustavi 1, Sveučilište u Zagrebu, Fakultet prometnih znanosti, Zagreb, 2006.
- [3] <https://www.iso.org/standard/57393.html> (pristupljeno: travanj 2017.)
- [4] <http://frame-online.eu/> (pristupljeno: travanj 2017.)
- [5] P.Rohini Priya, Anju Joy Jose, G.Sumathy.: Traffic Light Pre-emption control System for Emergency Vehicles, SSRG International Journal of Electronics and Communication Engineering (SSRG-IJECE), volume 2, issue 2, veljača 2015.
- [6] Nikhil Mascarenhas, Pradeep G, Manish Agrawal, Subash P, Ajina A.: A proposed model for traffic signal preemption using global positioning system (GPS). Third International Conference on Advances in Computing & Information Technology, pp. 219–226, 22. – 25. kolovoz 2013., Mysore, India, doi:10.5121/csit.2013.3423
- [7] Anžek, M., Divić, A., Lanović, Z.: Smjernice za prometnu svjetlosnu signalizaciju na cestama, Ministarstvo pomorstva, prometa i veza, Zagreb, 2001.
- [8] Highway Capacity Manual - HCM2010, Transportation Research Board of the National Academies, 2010.
- [9] Anžek, M.: „Cestovna telematika - Pojmovnik“, predavanja, Fakultet prometnih znanosti, Zagreb, 2016.
- [10] Lanović, Z.: „Cestovna telematika - Signalni plan“, vježbe, Fakultet prometnih znanosti, Zagreb, 2016.
- [11] <http://wisconsindot.gov/dtsdManuals/traffic-ops/programs/training/synchro/signal-timing-bckgrnd.pdf> (pristupljeno: travanj 2017.)
- [12] Peter Koonce, Lee Rodegerdts, Kevin Lee, Shaun Quayle, Scott Beaird, Cade Braud, Jim Bonneson, Phil Tarnoff, Tom Urbanik.: Traffic Signal Timing Manual, Federal Highway Administration, Turner-Fairbank Highway Research Center, 6300 Georgetown Pike, lipanj 2006.

- [13] Traffic design manual, Traffic Operations Division, Traffic Engineering Office, prosinac 2016.
- [14] Miroslav Vujić, Sustav dinamičkih prioriteta za vozila JGP-a u automatskom upravljanju prometom, Doktorski rad, Fakultet prometnih znanosti, Zagreb, 2014.
- [15] Furth, P.G., Muller, T.H.J.: Conditional Bus Priority at Signalized Intersections: Better Service Quality with Less Traffic Disruption, Transportation Research Record 1731, 2000.
- [16] Ngan, V.W.K.: A Comprehensive Strategy for Transit Signal Priority, Master of Applied Science, The University of British Columbia, 2002.
- [17] Gartner, N.H.: Development and implementation of an adaptive control strategy in traffic signal network: The virtual-fixed-cycle approach, Proceedings of the 15th International Symposium on Transportation and Traffic Theory, Adelaide, Australia, 2002.
- [18] Ekeila, W.: Dynamic Transit Signal Priority, Master Thesis, University of Sharjah, 2002.
- [19] Raj K. Kamalanathsharama., Kathleen L. Hancock: Congestion-Based Emergency Vehicle Preemption, Mid-Atlantic Universities Transport Center, kolovoz 2009.
- [20] Chang, J., Talas, M., Muthuswamy, S.: A simple methodology to estimate queue lengths at signalized intersections using detector data, Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, 14. studeni, 2012., doi: 10.3141/2355-04
- [21] Denis Roegel: Simple algorithms for preemptive traffic control, and an appraisal of their quality, [Research Report inria-00000658], pp. 22. 2005.
- [22] <http://vision-traffic.ptvgroup.com/en-us/products/ptv-vissim/> (pristupljeno: travanj 2017.)
- [23] Bryan Higgs, Montasir M. Abbas, Alejandra Medina: Analysis of the Wiedemann Car Following Model over Different Speeds using Naturalistic Data, 3rd International Conference on Road Safety and Simulation, rujan 2011.
- [24] Sandeep Menneni: Pattern recognition based microsimulation calibration and innovative traffic representations, A Dissertation at the University of Missouri-Columbia, 2008.
- [25] Tomislav Petković: Kratke upute za korištenje MATLAB-a, Zavod za elektroničke sustave i obradu informacija Fakulteta elektrotehnike i računalstva, Sveučilište u Zagrebu, travanj 2005.



- [26] Brian H. Hahn, Daniel T. Valentine: Essential MATLAB for Engineers and Scientists, third edition, 2007.
- [27] David Houcque: Introduction to MATLAB for engineering students, Northwestern University, kolovoz 2005.
- [28] Stefan Wedin, Microsoft's Component Object Model (COM), Department of Computer Engineering, Malardalens Hogskola, 2000.
- [29] Soldo, T.: „Distribuirano objektno programiranje - COM“, predavanja, Visoka škola za informacijske tehnologije, Zagreb, 2016.
- [30] Don Box, Charlie Kindel, Grady Booch: Essential COM, veljača 1998.
- [31] <http://www.zet.hr/default.aspx?id=291> (pristupljeno: travanj 2017.)

## Sažetak

Autori: Borna Kapusta, Mladen Miletić

Naslov rada: Analiza utjecaja adaptivnog upravljanja signalnim planovima semaforiziranog raskrižja na vrijeme putovanja vozila žurnih službi

Broj vozila u urbanim sredinama iz dana u dan raste i premašuje kapacitete prometnica. Zbog ograničenja prostora se prometnice u urbanim sredinama često ne mogu širiti. Povećanjem prometne potražnje u urbanim sredinama, vozila žurnih službi sve duže putuju i narušavaju sigurnost ostalih sudionika u prometu. Smanjenje vremena putovanja žurnih službi bitno utječe na smanjenje broja smrtnosti unesrećenih i dodatno stradalih nakon nesreće te uštedu novaca. Sa ciljem smanjenja vremena putovanja vozila žurnih službi moguće je implementirati sustav adaptivnog upravljanja semaforiziranim raskrižjima u sklopu ITS rješenja. Navedeno ITS rješenje omogućuje prilagodbu signalnog plana semaforiziranog raskrižja u svrhu smanjenja vremena putovanja vozila žurnih službi u urbanim sredinama te smanjenja negativnog utjecaja dodjele prioriteta vozilima žurnih službi na ukupno vrijeme putovanja vozila svih vozila u prometnoj mreži. Cilj ovog istraživanja je smanjenje vremena putovanja žurnih službi te negativnog utjecaja na vrijeme putovanja ostalih vozila u mreži. U ovom radu je predložen i analiziran algoritam adaptivnog upravljanja izoliranog raskrižja koji na temelju podataka o lokaciji vozila žurne službe i redu čekanja na privozima raskrižja, dinamički izmjenjuje signalni plan po potrebi. Predloženi algoritam je testiran u 4 scenarija za odabrano izolirano raskrižje korištenjem simulatora VISSIM i programskog paketa MATLAB te stvarnih prometnih podataka. Analizom dobivenih rezultata je ustanovljeno da se vrijeme putovanja vozila žurne službe može smanjiti do 13% uz smanjenje ili čak kompenzaciju negativnog utjecaja na ukupno vrijeme putovanja svih vozila u prometnoj mreži.

Ključne riječi: Inteligentni transportni sustavi, dodjela prioriteta vozilima žurnih službi, semaforizirana raskrižja, signalni plan, adaptivno upravljanje

## Summary

Authors: Borna Kapusta, Mladen Miletić

Title: Analysis of the Impact of Adaptive Traffic Light Control on Travel Time of Emergency Vehicles

Number of vehicles in urban areas is growing day by day and is surpassing road capacity. Due to space limitations, it is rarely possible to expand roads in urban areas. With increased traffic demand in urban areas, emergency vehicles travel longer to their destinations while also negatively affecting the safety of all participants in the traffic network. By reducing the travel times of emergency vehicles, the death rate and costs to the public can be lowered. It is possible to implement adaptive traffic light control as part of intelligent transport systems with the goal to reduce travel times of emergency vehicles. This allows for the adaptation of signal programs in an effort to reduce travel times of emergency vehicles in urban areas and reduction of negative effects on total travel times of all vehicles in the traffic network. The goal of this research is to reduce travel times of emergency vehicles and to reduce the negative impact on travel times of all vehicles in the network. This research presents and analyses a newly proposed adaptive traffic light control algorithm that based on the data of emergency vehicle location and queue lengths dynamically adapts the signal program of a signalized intersection. Proposed algorithm is tested in four different scenarios for the selected isolated intersection by using VISSIM simulation software, MATLAB software package and real traffic data. The analysis of the obtained results reveals that travel times of emergency vehicles can be reduced up to 13% with the reduction and sometimes even compensation of negative effects on the total travel time of all vehicles in the network.

Key words: Intelligent transport systems, priority control of emergency vehicles, signalized intersections, signal program, adaptive control

## Popis slika

Slika 1 Grafički prikaz vremenski ustaljenog signalnog plana [10].....	4
Slika 2 Prikaz dvostruke prstenaste strukture NEMA upravljača u osam faza [13].....	5
Slika 3 Grafički prikaz pasivne tehnike razdvajanja faze [13].....	8
Slika 4 Grafički prikaz pasivne tehnike smanjenja trajanja ciklusa [14] .....	9
Slika 5 Grafički prikaz pasivne tehnike „preskakanja“ repa čekanja [14] .....	10
Slika 6 Grafički prikaz tehnike ranijeg početka zelenog svjetla [14].....	11
Slika 7 Grafički prikaz tehnike umetanja faze za vozila JGP-a [14].....	12
Slika 8 Model centraliziranog upravljanja semaforiziranim raskrižjima .....	15
Slika 9 Prikaz dijagrama toka algoritma za dodjelu prioriteta prema cjelinama .....	19
Slika 10 Prikaz dijagrama toka algoritma povratka oduzetog vremena .....	21
Slika 11 Prikaz izvođenja simulacije raskrižja u VISSIM-u.....	24
Slika 12 Metoda izračuna udaljenosti od raskrižja poznavanjem duljine spojnice i položaja na spojnici.....	24
Slika 13 Podešavanje parametara Wiedemann 74 modela unutar PTV VISSIM-a.....	26
Slika 14 COM veza između klijenta i poslužitelja [29] .....	28
Slika 15 Blok shema upravljanja simulatorom VISSIM uz pomoć MATLAB-a.....	29
Slika 16 Model raskrižja „Ulica kralja Zvonimira - Harambašićeva ulica“ .....	31
Slika 17 Prikaz signalnog plana raskrižja „Ulica kralja Zvonimira - Harambašićeva ulica“ .....	31
Slika 18 Prikaz smjera dolaska (zeleno) i povratka (crveno) vozila žurne službe: a) Scenarij 1 i 2; b) Scenarij 3 i 4. ....	33

## Popis tablica

Tablica 1 Usporedba postojećih sustava dodjele prioriteta [5], [6].....	13
Tablica 2 Pregled i pojašnjenje korištenih varijabli.....	18
Tablica 3 Zadano prometno opterećenje u ovisnosti o prometnom scenariju.....	32
Tablica 4 Zbirni rezultati simulacija prema scenarijima.....	55

## Popis grafikona

Grafikon 1 Utjecaj algoritma na trajanje faza na primjeru signalnog plana izvedenog u dvije faze.....	22
Grafikon 2 Ukupno vrijeme putovanja vozila žurne službe za prvi scenarij .....	35
Grafikon 3 Ukupni broj zaustavljanja vozila žurne službe za prvi scenarij .....	35
Grafikon 4 Ukupno izgubljeno vrijeme vozila žurne službe za prvi scenarij .....	36
Grafikon 5 Ukupno vrijeme stajanja vozila žurne službe za prvi scenarij .....	37
Grafikon 6 Ukupno vrijeme putovanja svih vozila za prvi scenarij.....	38
Grafikon 7 Ukupno vrijeme putovanja vozila JGP-a za prvi scenarij.....	38
Grafikon 8 Ukupno vrijeme putovanja vozila žurne službe za drugi scenarij .....	39
Grafikon 9 Ukupan broj zaustavljanja vozila žurne službe za drugi scenarij .....	40
Grafikon 10 Ukupno izgubljeno vrijeme vozila žurne službe za drugi scenarij .....	40
Grafikon 11 Ukupno vrijeme stajanja vozila žurne službe za drugi scenarij .....	41
Grafikon 12 Ukupno vrijeme putovanja svih vozila za drugi scenarij.....	42
Grafikon 13 Ukupno vrijeme putovanja vozila JGP-a za drugi scenarij.....	42
Grafikon 14 Ukupno vrijeme putovanja vozila žurne službe za treći scenarij.....	43
Grafikon 15 Ukupan broj zaustavljanja vozila žurne službe za treći scenarij.....	44
Grafikon 16 Ukupno izgubljeno vrijeme vozila žurne službe za treći scenarij.....	44
Grafikon 17 Ukupno vrijeme stajanja vozila žurne službe za treći scenarij .....	45
Grafikon 18 Ukupno vrijeme putovanja svih vozila za treći scenarij .....	46
Grafikon 19 Ukupno vrijeme putovanja vozila JGP-a za drugi scenarij.....	46
Grafikon 20 Ukupno vrijeme putovanja vozila žurne službe za četvrti scenarij.....	47
Grafikon 21 Ukupni broj zaustavljanja vozila žurne službe za četvrti scenarij .....	48
Grafikon 22 Ukupno izgubljeno vrijeme vozila žurne službe za četvrti scenarij.....	48
Grafikon 23 Ukupno vrijeme stajanja vozila žurne službe za četvrti scenarij .....	49
Grafikon 24 Ukupno vrijeme putovanja svih vozila za četvrti scenarij.....	50
Grafikon 25 Ukupno vrijeme putovanja vozila JGP-a za četvrti scenarij.....	50
Grafikon 26 Prosječno vrijeme putovanja vozila žurne službe.....	51
Grafikon 27 Prosječni broj zaustavljanja vozila žurne službe .....	52
Grafikon 28 Prosječno izgubljeno vrijeme vozila žurne službe.....	52
Grafikon 29 Prosječno vrijeme stajanja vozila žurne službe .....	53
Grafikon 30 Prosječno ukupno vrijeme putovanja svih vozila .....	53
Grafikon 31 Prosječno ukupno vrijeme putovanja vozila JGP-a .....	54