

Koordinirano upravljanje sustavom semafora na raskrižjima

Hršak, Patrik

Undergraduate thesis / Završni rad

2022

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

Permanent link / Trajna poveznica: <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:119:647180>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2025-01-31**



Repository / Repozitorij:

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



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET PROMETNIH ZNANOSTI

Patrik Hršak

KOORDINIRANO UPRAVLJANJE SUSTAVOM SEMAFORA NA
RASKRIŽJIMA

ZAVRŠNI RAD

Zagreb, 2022.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET PROMETNIH ZNANOSTI
ODBOR ZA ZAVRŠNI RAD

Zagreb, 5. svibnja 2022.

Zavod: **Zavod za inteligentne transportne sustave**
Predmet: **Automatsko upravljanje u prometu i transportu**

ZAVRŠNI ZADATAK br. 6860

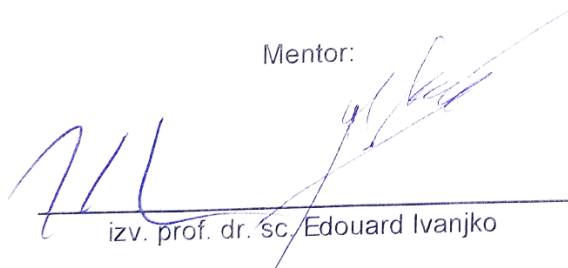
Pristupnik: **Patrik Hršak (0135255837)**
Studij: **Inteligentni transportni sustavi i logistika**
Smjer: **Inteligentni transportni sustavi**

Zadatak: **Koordinirano upravljanje sustavom semafora na raskrižjima**

Opis zadatka:

U gradovima se nalaze složene mreže cestovnih prometnica odgovorne za usluživanje dnevne prijevozne potražnje u tim gradovima. Prometni zahtjevi su visoki, dinamični i s rastućom prijevoznom potražnjom. Za upravljanje prometom na raskrižjima koriste se semafori, a poseban je izazov koordinirano upravljati mrežom bliskih raskrižja sa semaforima. U ovom završnom radu potrebno je opisati značajke raskrižja sa semaforima te implementirati jednu odabranu strategiju koordiniranog upravljanje mrežom raskrižja sa semaforima. Također je potrebno analizirati prednosti i nedostatke implementirane strategije koordiniranog upravljanja.

Mentor:



izv. prof. dr. sc. Edouard Ivanjko

Predsjednik povjerenstva za
završni ispit:

Sveučilište u Zagrebu
Fakultet prometnih znanosti

ZAVRŠNI RAD

KOORDINIRANO UPRAVLJANJE SUSTAVOM SEMAFORA NA
RASKRIŽJIMA

Coordinated Traffic Signal Control at Intersections

Mentor: izv. prof. dr. sc. Edouard Ivanjko

Student: Patrik Hršak

JMBAG: 0135255837

Zagreb, rujan 2022.

SAŽETAK

Naslov: Koordinirano upravljanje sustavom semafora na raskrižjima

Kratki sadržaj

Povećanjem prijevozne potražnje u gradskim sredinama pojavljuje se sve više zagušenja, posebno u vršnim satovima. Uključivanjem rješenja iz inteligentnih transportnih sustava moguće je smanjiti zagušenja, te postići koordinirano djelovanje semaforских uređaja. Najjednostavniji sustavi upravljanja raskrižjima sa semaforima su ubacivanjem fiksnih (ustaljenih) signalnih planova. Najsloženiji, a i najefektivniji sustavi upravljanja jesu adaptivni sustavi koji smanjuju zagušenja ovisno o trenutnoj situaciji na prometnoj mreži. Primjenom mikroskopskog simulacijskog alata PTV VISSIM simuliran je prometni model, na kojem su ispitana djelovanja adaptivnog sustava upravljanja za slučaj biše raskrižja. Simulacijom je prikazano da je moguće ispitati učinak djelovanja adaptivnih sustava.

Ključne riječi: Inteligentni transportni sustavi, raskrižja sa semaforima, signalni plan, adaptivno upravljanje prometom.

ABSTRACT

Title: Coordinated Traffic Signal Control at Intersections

By increasing traffic demand in urban areas, there are more congestions, especially during peak hours. By using the solutions from Intelligent Transport Systems it is possible to reduce congestions and to achieve coordinated traffic signal control. The simplest intersection control systems are systems controlled with fixed signal programs. The more complex and effective control systems are adaptive systems that reduce congestions depending on the current situation on the traffic network. Using the microscopic simulation tool PTV VISSIM, a traffic model was simulated, on which the actions of the adaptive control systems were tested. The simulation showed that it is possible to test the effect of the adaptive systems.

Keywords: Intelligent transport systems, signalized intersections, signal program, adaptive traffic control

SADRŽAJ

1. UVOD	1
2. ZNAČAJKE RASKRIŽJA SA SEMAFORIMA	3
2.1 Osnovni pojmovi prometnog inženjerstva	3
2.1.1 Prometni sustav.....	3
2.1.2 Poopćeni model prometnog sustava.....	4
2.1.3 Inteligentni transportni sustavi	5
2.2 Osnovni pojmovi cestovne telematike	6
2.2.1 Signalni ciklus.....	6
2.2.2 Signalna faza.....	6
2.2.3 Signalni pojam	7
2.2.4 Zaštitno međuvrijeme	7
2.2.5 Signalni plan.....	8
3. SIMULACIJSKO OKRUŽENJE	10
4. STRATEGIJE UPRAVLJANJA MREŽE RASKRIŽJA SA SEMAFORIMA	13
4.1 Osnovni model upravljanja prometom	13
4.2 Prometno ovisno upravljanje	14
4.3 Adaptivni sustavi	15
5. IMPLEMENTACIJA KOORDINIRANOG UPRAVLJANJA MREŽOM RASKRIŽJA SA SEMAFORIMA .	20
6. SIMULACIJSKI REZULTATI	22
5.1 Opis korištenog modela.....	22
5.2 Prikaz i analiza rezultata simulacije	28
7. ZAKLJUČAK	31
POPIS LITERATURE	32
POPIS ILUSTRACIJA	34
POPIS TABLICA	35
POPIS GRAFIKONA	36

1. UVOD

Zbog naglog razvoja motoriziranog prometa došlo je do eksponencijalnog rasta broja prometnih entiteta na prometnicama. Povećanjem prijevozne potražnje došlo je do negativnih posljedica zagušenja prometa i smanjenja sigurnosti u prometu. Zbog tih posljedica, sve se više pažnje pridavalo ograničenjima i pravilima za ponašanje sudionika u prometu, te i zahtjevu za uspostavu uređaja za regulaciju prometa. Prometna svjetla ili semafori organizacijom i regulacijom prometa služe za poboljšanje propusne moći i sigurnosti na prometnoj mreži.

Zbog svoje složenosti, s gledišta tehničkih, tehnoloških, organizacijskih i društvenih čimbenika, na promet se ne može gledati kao na sustav kojim se može jednostavno upravljati. Zbog ekonomskog utjecaja prometa na razvoj određenih gospodarskih djelatnosti ponekad se na promet gleda kao na posebnu gospodarsku djelatnost. Povećanjem prijevozne potražnje, dolazi do širenja prometne infrastrukture, pa zato dolazi do potrebe za implementaciju pametnijeg sustava upravljanja. Za rješavanje problema zagušenja prometnica koriste se inteligentni transportni sustavi (*engl. Intelligent Transport Systems*), koji proširuju moguća rješenja. Prema [1], ITS se može definirati kao holistička, upravljačka i informacijsko-komunikacijska (kibernetička) 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.

ITS je bio u početku razvijan s istim ciljem u Europi, SAD-u i Japanu, no početne su se taksonomije ITS usluga u tim zemljama dijelom razlikovale zbog različitosti ponuda i potražnja za ITS uslugama. Najviše se razlikuju tržišni paketi u navedenim zemljama, koji su početno bili prilagođeni zahtjevima ITS usluga u SAD-u. Zbog tih razlika Međunarodna organizacija za standardizaciju (ISO) ulaže velike napore da definira početnu ITS taksonomiju. U početnom referentnom modelu (ISO TR 14813-1) iz 1990. godine, ISO je sastavio početnu normizaciju ITS usluga ciljanih na cestovni promet, te je definirano 8 funkcionalnih područja, te 32 usluge [1]. Broj funkcionalnih područja se povećavao, tako je 1999. godine povećan na jedanaest, a 2015. godine povećan na sadašnjih trinaest funkcionalnih područja [2].

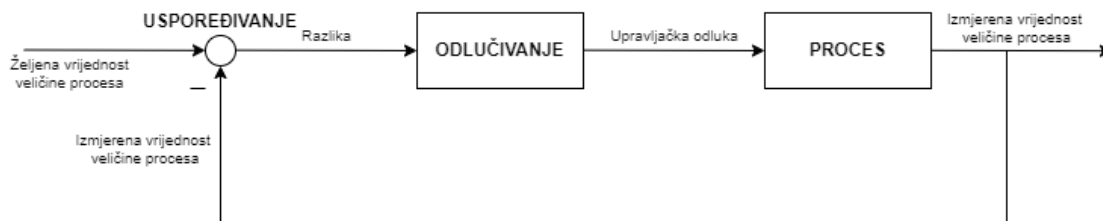
Temeljna zadaća ITS-a je identificirati i analizirati prometni sustav, te ga prilagoditi da bude učinkovitiji, sigurniji, ekonomičniji, udobniji i ekološki prihvatljiviji za prijevoz ljudi i prijenos roba uporabom odgovarajućih tehničkih sredstva, prometnica i sustava cjelovitog upravljanja prometom. Dok se prometni inženjeri u analizama najčešće koriste sa prosječnim veličinama u dinamičkom modeliranju u ITS okruženju nužno je poznavanje trenutnih vrijednosti prometnih parametara i djelovanje u što kraćem vremenskom periodu [3].

Ovaj je rad sastavljen od 6 poglavlja. U uvodnom poglavlju je opisana struktura rada. U drugom poglavlju su opisani i definirani osnovni pojmovi prometnog inženjerstva i cestovne telematike. U trećem poglavlju je opisan programski alat PTV VISSIM. U četvrtom poglavlju su

opisane strategije upravljanja mreža raskrižja sa semaforima. U petom poglavlju je prikazana arhitektura sustava i princip rada sustava. U šestom poglavlju je opisan simulacijski model, s pripadajućim signalnim planovima i prometnom tokovima, te su prikazani simulacijski rezultati. U zadnjem poglavlju je iznesen zaključak shodno dobivenim rezultatima i prethodno navedenim poglavljima.

2. ZNAČAJKE RASKRIŽJA SA SEMAFORIMA

U ovom su poglavlju opisani pojmovi prometnog inženjerstva i cestovne telematike u cilju razumijevanja postavljene problematike. Također je potrebno spomenuti povratnu vezu, koja je osnova automatske regulacije. Povratna veza služi za uspoređivanje vrijednosti neke veličine koja se mjeri u reguliranom procesu s veličinom koja se želi postići, te se na temelju razlike te dvije veličine donosi odluka kako će se proces preusmjeriti. Na slici 1 se nalazi regulacijska petlja. Ovakav sustav nudi prednosti što može smanjiti utjecaj vanjskih poremećaja i promjena svojstva samog sustava na proces, čime može stabilizirati sustav. Također ako je sustav sastavljen od lošijih komponenata s povratnom vezom može davati bolje rezultate, a mogu se i postići željeno ponašanje sustava, koje se nekad i ne može postići bez povratne veze [4].



Slika 1: Regulacijska petlja [4]

2.1 Osnovni pojmovi prometnog inženjerstva

Najprije je potrebno definirati prometni sustav, poopćeni model i inteligentne transportne sustave, kako bi se krenulo u izradu simulacijskog modela.

2.1.1 Prometni sustav

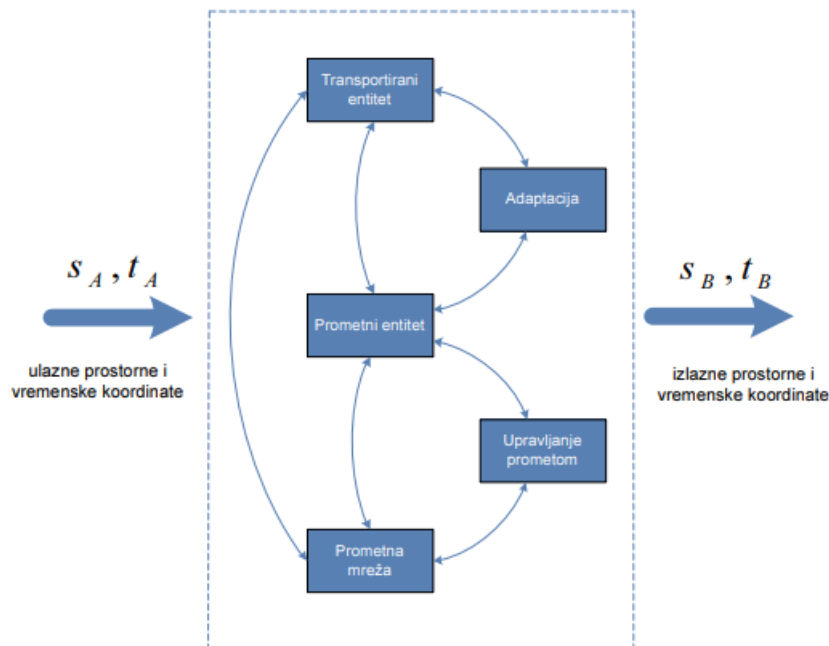
Promet se definira kao sustav i proces čiji je cilj obaviti prijevoz i/ili prijenos roba, ljudi i informacija u adekvatnim prometnim entitetima uz zauzimanje dijela prometnice prema prethodno utvrđenim pravilima i protokolima. Prometni problem je čvrsto vezan uz interakciju komponenata prometnog sustava koje određuju strukturu i ponašanje spomenutog prometnog sustava. Za rješavanje prometnog problema potrebno se koristiti odgovarajućom metodologijom prometnih problema i potrebno je koristiti sustavski pristup. Sustavski pristup za prometni problem izgrađuje apstraktni sustav pomoću kojeg se rješavaju problemi u „realnim“ sustavima pomoću sustavskih znanja, metoda i pomagala [3].

2.1.2 Poopćeni model prometnog sustava

Poopćeni model služi kao početni model za definiranje koncepta i djelovanja nekog prometnog sustava, te su u njemu definirani sljedeći temeljni sustavi [3]:

1. Prometni entiteti;
2. Transportni entiteti;
3. Adaptacije transportnih entiteta na prometni entitet;
4. Prometne mreže;
5. Upravljanja prometom.

Proces na slici 2 se može opisati kao transformacija prostorno-vremenskih koordinata prometnog entiteta uz uvjet očuvanja transportnih entiteta koji se prenose ili prevoze na odredište. Temeljni zahtjevi u odvijanju prometne transformacije su da vrijeme prijevoza ili prijenosa prihvatljivo, sadržaj entiteta bude sačuvan, troškovi u zadanim okvirima, ekološke posljedice minimalne, itd.



Slika 2: Poopćeni model prometnog sustava [3]

Na prometne entitete (automobil, vozilo javnoga gradskog prijevoza, itd.) adaptiraju se transportni entiteti (ljudi, informacije, roba, itd.) ovisno o zahtjevima tih entiteta i uvjetima putovanja. Vrijeme putovanja iznosi razliku vremena dolaska na odredište i vremena polaska,

a na vrijeme putovanja utječe i topologija mreže, kapaciteti, veličina toka, upravljanje mrežom i utjecaj incidentnih situacija, pa se vrijeme putovanja iskazuje sljedećim funkcijama [5]:

$$t_p = t_{eD} - t_{eA}, \quad (1)$$

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

gdje je:

t_p – vrijeme putovanja [s];

t_{eD} – vrijeme dolaska na odredište [s];

t_{eA} – vrijeme polaska [s];

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

TM – topologija mreže;

Φ – veličina prometnog toka;

C_i – kapacitet i-tog mrežnog elementa;

NM – način upravljanja mrežom;

I_s – utjecaj incidentnih situacija.

2.1.3 Inteligentni transportni sustavi

Kao što je navedeno u uvodu, ITS je upravljačka i informacijsko-komunikacijska nadogradnja klasičnog prometa koja bitno poboljšava performanse klasičnog sustava i kvaliteta usluga za krajnjeg korisnika [1]. Atribut „inteligentni“ označuje da sustav ima sposobnost adaptivnog djelovanja u stvarnom vremenu, pa je potrebno prikupljati podatke i obrađivati ih u realnom vremenu. Da bi prometni sustav dosegao razinu inteligentnog ponašanja potrebno je pri stratezijskom planiranju, projektiranju i gradnji prometne infrastrukture koristiti gradi + ITS (engl. *build + ITS*) pristup umjesto ranije korištenog samo gradi (engl. *build only*) pristupa. ITS rješenje može poboljšati performanse u odnosu na klasično prometno rješenje uz istu razinu investiranja tako da vrijede sljedeće relacije [1]:

$$PI_{ITS} > PI_{KL}, \quad (3)$$

$$QoS_{ITS} > QoS_{KL}, \quad (4)$$

gdje je:

PI_{ITS} - indeks performansi inteligentnog prometnog sustava;

PI_{KL} - indeks performansi klasičnog (pred-ITS) prometnog sustava;

QoS_{ITS} - kvaliteta usluga inteligentnog prometnog sustava;

QoS_{KL} - kvaliteta usluga klasičnog (pred-ITS) prometnog sustava.

2.2 Osnovni pojmovi cestovne telematike

Raskrižja sa semaforima predstavljaju presijecanje prometnih tokova u istoj razini gdje je prolaz vozila kontroliran vertikalnom svjetlosnom signalizacijom. U ovom su potpoglavlju definirani osnovni pojmovi vezani uz signalne planove.

2.2.1 Signalni ciklus

Signalni ciklus predstavlja vremenski period koji je potreban za obavljanje izmjene cijele sekvence određenih signalnih faza, odnosno ciklus označava vrijeme trajanja jednostrukog isteka definiranog signalnog plana [6]. Trajanje signalnog ciklusa je uvjetno podijeljena prema broju faza definiranih na jednom raskrižju sa semaforima [5]. Vrijednosti duljine ciklusa u ovisnosti o broju faza su prikazane u tablici 1.

Tablica 1: Ovisnosti duljine ciklusa o broju faza [7]

Broj faza	Trajanje ciklusa [s]	Napomena
2	(30) 40-70	Minimalno trajanje za pješačke prijelaze
3	70-90	Maksimalno trajanje koje se rijetko koristi
4	90-120	Obično iznad 100 [s]
5	≥ 110	Peta faza se obično dobije kraćenjem drugih faza

2.2.2 Signalna faza

Signalna faza je definirana kao dio signalnog ciklusa u kojem određeni prometni tokovi imaju istodobno neometan prolaz, pri čemu je može činiti samo jedna ili više signalna grupa [6]. Pravilnim definiranjem faza na određenom raskrižju smanjuju se konflikti između određenih prometnih tokova. Povećanjem broja faza na određenom raskrižju povećava se i

trajanje signalnog ciklusa zbog potrebe za duže trajanje minimalnog zelenog svjetla svake faza, a faza može obuhvaćati jedan ili više [5]:

- prometni tok,
- tok kretanja pješaka raskrižjem,
- kombinaciju prometnih i pješačkih tokova.

2.2.3 Signalni pojam

Signalni pojam je definiran kao prikaz stanja signalnog objekta odnosno semafora, a Zakonom o sigurnosti prometa na cestama [8] definirani su sljedeći signalni pojmovi: crveno svjetlo, žuto svjetlo, zeleno svjetlo, crveno-žuto svjetlo, te treptajuće žuto svjetlo. Skori početak dolaska zelenog svjetla za određenu signalnu grupu označava se istodobnim paljenjem crvenog i žutog svjetla, te je propisano trajanje od dvije sekunde, uz tendenciju smanjenja trajanja u posljednje vrijeme na jednu sekundu [7]. Skori dolazak crvenog svjetla označava se žutim svjetlom, a trajanje žutog svjetla određeno je maksimalnoj dozvoljenoj brzini na promatranom dijelu prometnice pred raskrižjem, što je prikazano u tablici 2.

Tablica 2: Trajanje žutog svjetla u ovisnosti o dozvoljenoj brzini [7]

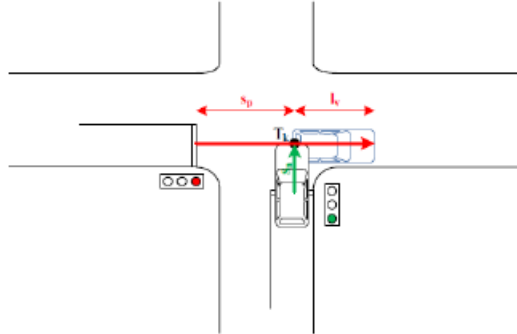
Dozvoljena brzina [km/h]	Trajanje žutog svjetla [s]
50	3
60	4
70	5
>70	x
x – ovisno o vremenu zaustavljanja kod dozvoljene brzine pri naglom kočenju	

2.2.4 Zaštitno međuvrijeme

Zaštitno međuvrijeme je definirano kao vremenska razlika dviju konfliktnih signalnih grupa koje dolaze zaredom [6], te ovise o tri vremenske komponente:

1. Provozno vrijeme (t_k) – predstavlja vremenski period od završetka trajanja zelenog svjetla, pa sve dok ne počne vrijeme pražnjenja (ulazak vozila u raskrižje dok traje žuto svjetlo i/ili početkom paljenja crvenog svjetla);
2. Vrijeme pražnjenja (t_p) – predstavlja vremenski period potreban vozilu da prijeđe označenu točku kolizije (T_k) brzinom pražnjenja (v_p);

3. Vrijeme naleta (t_n) – predstavlja vremenski period potreban vozilu kojem se upalilo zeleno svjetlo da prijeđe put naleta (s_n), brzinom naleta (v_n).



Slika 3: Komponente potrebne za izračun zaštitnog međuvremena [5]

Na slici 3 su prikazani navedeni parametri potrebni za izračun zaštitnog međuvremena, a ono se izračunava prema formuli:

$$t_z = t_k + t_p - t_n = t_k + \frac{s_p + l_v}{v_p} - \frac{s_n}{v_n}, \quad (5)$$

gdje je:

t_z – zaštitno međuvrijeme [s];

t_k – provozno vrijeme [s];

t_p – vrijeme pražnjenja [s];

t_n – vrijeme naleta [s];

s_p – put pražnjenja [m];

l_v – duljina vozila [m];

v_p – brzina pražnjenja [m/s];

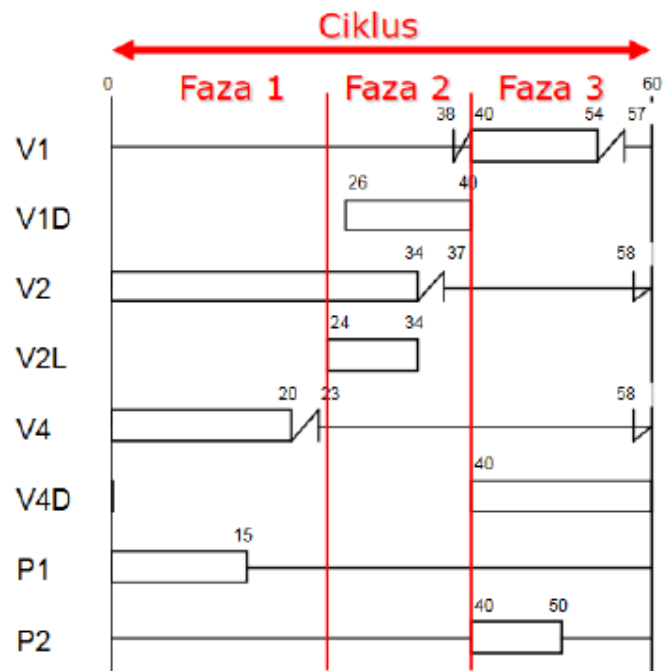
s_n – put naleta [m];

v_n – brzina naleta [m/s].

2.2.5 Signalni plan

Signalni plan predstavlja plan trajanja definiranih signalnih pojmova. Na slici 4 je prikazan jedan fiksni signalni plan na kojem su označeni prethodno definirani pojmovi. Zeleno svjetlo predstavljaju pravokutnici, žuto svjetlo odnosno žuto-crveno svjetlo predstavljaju kose

crte, dok je crveno svjetlo označeno ravnim linijama. Lijevo su označene signalne grupe koje ovise o signalnom planu. Slovo V za vozačke signalne grupe odnosno vozila, P za pješake i T za tramvajske signalne grupe [6].



Slika 4: Primjer signalnog plana [9]

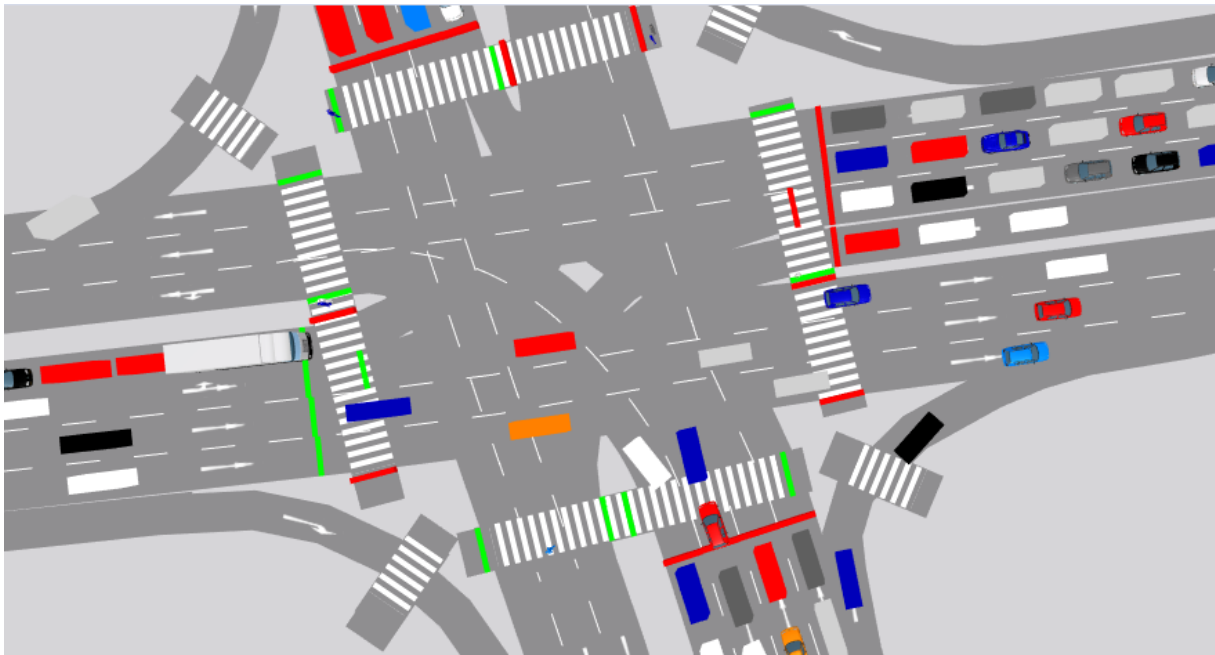
3. SIMULACIJSKO OKRUŽENJE

PTV VISSIM je u ovom radu korišten mikroskopski simulacijski alat za analiziranje, simulaciju i optimizaciju prometnih tokova. U mikroskopskoj simulaciji svaki pojedini agent reagira na trenutno okruženje, odnosno udaljenosti i razlike u brzini od obližnjih agenata. Agenti su u ovom kontekstu vozila različitog tipa odnosno pješaci. Gibanje agenata se kontinuirano modelira u vremenu i prostoru. Odluke o promjeni brzine i smjera se događaju u malim vremenskim koracima (obično manjim od jedne sekunde). Ukupno prometno stanje izlazi iz pojedinačnih odluka agenata. Model simulacije transporta pomaže u boljem razumijevanju složenog sustava. U gradovima se pješaci, biciklisti, javni prijevoz i motorna vozila susreću na vrlo uskom prostoru. Simulacijski modeli omogućuju planerima prometa da razumiju vrlo složen i dinamičan sustav i razviju učinkovite strategije za rješavanje trenutnih i budućih problema u prometu. Modeliranje i simulacija prometnog toka omogućuju planerima da oponašaju stvarni cestovni promet. U ovom virtualnom simulacijskom okruženju mogu se testirati različite ideje kako bi se dobile vrijedne informacije o učincima planiranja mjera na ukupni protok prometa i mogućim poboljšanjima. To ne pomaže samo u dobivanju pregleda i odgovaranju na pitanja planiranja, već i postavljaju određena pitanja. Eksperimentiranje u stvarnom svijetu također je skupo, jer nosi niz potencijalnih troškova. To se može izbjeći ako se infrastrukturni projekti praktički testiraju i optimiziraju prije njihove provedbe. Potrebno je unijeti tri vrste ulaznih podataka [10]:

1. Prometna mreža (ceste, raskrižja, željezničke pruge, prohodna tla, itd.);
2. Prometna potražnja (koliko agenata koje vrste želi dobiti od kojeg podrijetla i do kojeg odredišta);
3. Upravljanje raskrižja (pravila prednosti, stop znakovi i kontrola prometne signalizacije).

VISSIM nudi mogućnost razmjene podataka s drugim aplikacijama preko sučelja, preko kojih je moguće preuzeti upravljanje nad simuliranom prometnom mrežom. Također postoje i tzv. jezgri (engl. core) moduli kojih korisnici ne mogu mijenjati. VISSIM ima sljedeće jezgrene module [2]:

1. Generiranje slučajnih brojeva: kreira slučajne brojeve za uporabu u raznim metodama koje se odražavaju na simulaciju;
2. Atributi vozila i vozača: opisuje attribute i karakteristike vozača i vozila koji će ući u mrežu;
3. Generiranje vozila: određuje gdje i kada vozilo ulazi u mrežu;
4. Praćenje vozila: opisuje ubrzanje, usporenje i praćenje pojedinog vozila u odnosu na druga vozila;
5. Mijenjanje prometne trake: opisuje kada i kako vozilo mijenja prometnu traku;
6. Signalni uređaj: raspoložuje signalnim planovima u mreži;
7. Animacija: vizualizira vozila u mreži (slika 5.)

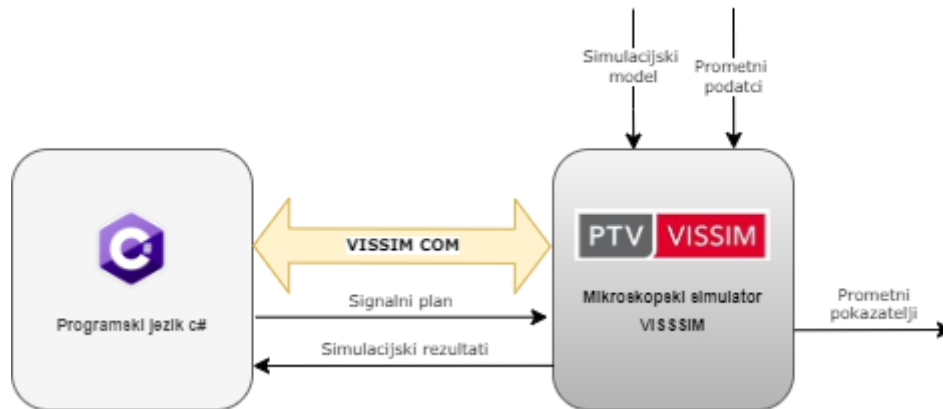


Slika 5: Prikaz rada animacijskog modula unutar PTV VISSIM-a

Na slici 6 je prikazano simulacijsko okruženje za koje su primijenjeni mikroskopski simulator PTV VISSIM i programski jezik C#. VISSIM je implementirao Microsoftov Component Object Model (COM) kao programsko sučelje koje omogućava rad s programskim jezicima. COM sučelje omogućava pristup [10]:

- modeliranoj cestovnoj mreži sa svim svojim atributima,
- signalnim planovima,
- evaluaciji,
- svim vozilima u simulaciji i njihovim atributima,
- upravljanju simulacije tj. može pokrenuti i zaustaviti simulaciju, te može čitati i mijenjati sve parametre.

Dakle, COM sučelje omogućuje uključivanje VISSIM-a u druge aplikacije, npr. ako korisnik želi napisati vlastito korisničko sučelje za skup posebnih simulacija ili želi utjecati na ponašanje unutar simulacije. Ovo sučelje može pokrenuti simulaciju po vremenskim koracima, čime se omogućuje modifikacija stanja vozila, dijela mreže ili nekog drugog objekta u nekom određenom trenutku. Za neke module odlučivanja u VISSIM-u (npr. podjela rute) nude se povratne funkcije dostupne putem COM sučelja, tako da korisnik može koristiti vlastite funkcije umjesto već ugrađenih. COM sučelje se također široko koristi za pojednostavljenje i dokumentiranje ponavljajućih zadataka simulacije. Automatizacija projekta pomoću skripti je dokazala smanjenje pogrešaka za složeni zadatak simulacije, jer se zadatci bilježe i kasnije koriste za različite scenarije koje treba modelirati [11].



Slika 6: Simulacijsko okruženje

Za praćenje vozila VISSIM se služi Wiedmannov psihofizičkim modelom ponašanja vozila razvijenog od strane Rainera Wiedemanna 1974. godine na Sveučilištu u Karlsruhe-u. Wiedemann je svoj model razvio temeljem ljudskih percepcija i ponašanja. VISSIM se koristi sa dvaju različita Wiedemannova modela ponašanja vozača. Tako je razvijen Wiedemann 74 koji je prilagođen za urban promet, dok se Wiedemann 99 koristi za brzi promet na autocestama. Navedeni modeli su slični, te su oba osnivaju svoj rad na temelju ljudskih percepcija i ponašanja, no razlika je u atributima koji ih opisuju [12]. Za ovaj je rad korišten model Wiedemann 74, zbog potrebe simuliranja gradske prometne mreže.

4. STRATEGIJE UPRAVLJANJA MREŽE RASKRIŽJA SA SEMAFORIMA

Najisplativije mjere rješavanja problema nastalih zbog širenja gradova i zagušenja prometa su upravljanje prometnih signala. Prilagođavanjem i koordiniranjem prometne signalizacije na raskrižjima se može smanjiti vrijeme zaustavljanja, broj zaustavljanja, te sveukupno kašnjenje vozila, čime se može omogućiti postizanje maksimalnog propusnog toka. Upravljanje prometne signalizacije se mijenja u složenosti, od jednostavnih sustava s fiksnim signalnim planovima, do adaptivnih sustava koji optimiziraju signalne planove prema prometnim uvjetima u stvarnom vremenu [13].

Za razvoj i razumijevanje adaptivnog upravljanja raskrižjima, bitno je objasniti osnovne operacionalne i implementacijske koncepte upravljanja raskrižjima sa semaforima u gradskim sredinama. U gradskim sredinama prema razinama upravljanja razvijeni su osnovni principa upravljanja raskrižjima sa semaforima [5]:

1. Upravljanje izoliranim raskrižjem – primjenjuje se samo na jedno izolirano raskrižje, pri čemu se zanemaruju susjedna raskrižja;
2. Upravljanje raskrižjima na malom prostoru – upravljaju se dva susjedna raskrižja na relativno maloj udaljenosti, pri čemu imaju ovisan prometni tok i u većini slučaja se koristi samo jedan semafor;
3. Upravljanje arterijalnim koridorima – upravljanje koordiniranim signalnim uređajima na bitnim dijelovima gradske mreže s povećanim prometnim opterećenjem;
4. Upravljanje zatvorenom mrežom – upravljanje se provodi s segmentom gradske mreže koja se promatra kao odvojena prometna mreža;
5. Upravljanje širim područjem – upravlja se čitavom gradskom mrežom, te se na nju gleda kao jedinstveni prometni sustav, pri čemu postoji hijerarhijska podjela s već postojećim nižim razinama upravljanja.

4.1 Osnovni model upravljanja prometom

Kod osnovnog modela koriste se fiksni odnosno ustaljeni signalni planovi. Da bi se izvršio izračun ustaljenih signalnih planova potrebno je prethodno izvršiti brojanje prometa. Broje se vozila koja prođu raskrižje u utvrđenom vremenskom intervalu, pri čemu je bitna klasifikacija prema vrsti vozila. Prema prethodno prikupljenim podacima kreće se u izradu optimalnog signalnog plana. Ustaljeni signalni plan je uvijek istog trajanja i ne mijenja se s obzirom na stvarnu situaciju u prometu, odnosno na raskrižju. Trajanje ciklusa, a time i faza i grupa je jednoznačno i unaprijed određeno. Složenija i veća raskrižja imaju prethodno definirano više ustaljenih signalnih planova, koji se aktiviraju ovisno o dobu dana. Postoje tako

jutarnji, popodnevni, noćni, vikend signalni plan, itd. Ovi signalni planovi su nastali na osnovi studija dnevnih promjena prometa, te trendova tih promjena, te su na osnovi tih podataka nastali optimalni signalni planovi za određeno doba dana. Nedostatak ovog modela je što se jednostavnim načinom rada stvaraju nepovoljne značajke kod frekventnog prometa, pošto su crvene i zelene faze za svaki ciklus nepromijenjene. Međutim ovaj sustav ima prednost jednostavnog održavanja, te je cjenovno jeftiniji [14], [15].

4.2 Prometno ovisno upravljanje

Ovo se upravljanje zasniva na detekciji prisustva vozila na pojedinim privozima na raskrižju. Ne koristi se ustaljeni signalni plan, ali se signalnom uređaju daju ograničena djelovanja. Koriste se unaprijed razrađeni algoritmi koji su zasebni za svaki tip raskrižja, a izrađeni su prema prikladnom poopćenom modelu. Takvi algoritmi imaju konačan broj rješenja, što znači da ova vrsta upravljanja nema svojstvo inteligencije. Ova vrsta upravljanja ima prednosti u odnosu na fiksne signalne planove što ima uvid u stvarnu situaciju na raskrižju odnosno dijelu prometne mreže. Ovo upravljanje se može prilagoditi kratkoročnim promjenama prometnog toka, čime se može smanjiti čekanje za prolazak raskrižjem (*engl. delay*) koji kao parametar utječe na razinu usluznosti (*engl. Level of Service*). Također se može utjecati na smanjenje kašnjenja na glavnim privozima s većom prijevoznom potražnjom. Moguće je koristiti generalne, poopćene algoritme koji su već razrađeni za određenu vrstu raskrižja, te s obzirom na prometnu potražnju i geometriju raskrižja moguće je prilagoditi određene parametre kao što su duljina vremena produljenja faze, koliko vozila u repu čekanja utječe na eventualno produljenje faze i slično. Ovakvo je upravljanje relativno jeftino, te ne zahtjeva dodatne prilagodbe sustava. Postoji podjela prometno ovisnog upravljanja prema načinu korištenja na djelomično prometno upravljanje, na potpuno prometno ovisno upravljanje i na upravljanje na osnovi protoka/gustoće [15].

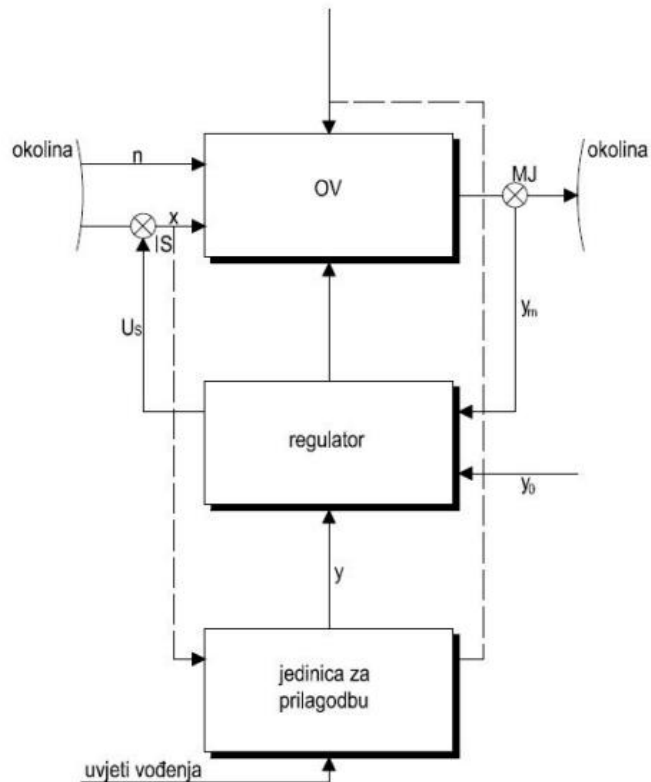
Djelomično prometno ovisno upravljanje se koristi kada postoji glavni prometni tok koji ima drastično veću prometnu potražnju u odnosu na sporedne privoze i gdje je prometno opterećenje na sporednim privozima relativno malo u odnosu na glavni prometni tok. Detektori se tada postavljaju na sporedne privoze, a faza na glavnom prometnom toku je aktivna svo vrijeme dok se na sporednim privozima ne detektira prisustvo jednog ili određenog broja vozila. Kada se zadovolji uvjet prisustva vozila na sporednim privozima, nakon zadovoljenja minimalnog trajanja zelenog svjetla na glavnom privozu mora se također poštovati minimalno trajanje zelenog svjetla na svakom od privoza. Ovakav je način upravljanja vrlo efikasan kod arterijalne topologije upravljanja, gdje je prepoznat glavni prometni tok s puno većim prometnim opterećenjem, pa se može uvelike smanjiti kašnjenje na glavnom toku. Glavni tok ima veliku iskorištenost prolaska vozila, odnosno maksimalno trajanje zelenog svjetla [15].

Potpuno prometno ovisno upravljanja je svojevrsna nadogradnja djelomičnog prometnog upravljanja koje se koristi na raskrižjima gdje je prometno opterećenje raspodijeljeno podjednako na svim privozima raskrižja, pa su i detektori postavljeni na sve privoze. Nema definiranog pravila redoslijeda izmjena faza i trajanja određenih faza odnosno ciklusa. Za algoritam su definirane minimalne i maksimalne granice određenih parametara. Ovo upravljanje je efikasno primijeniti za dvofazna i za složenija raskrižja, gdje postoji posebna faza za lijeve ili desne skretače, koja se može i preskočiti ukoliko nema prisustva vozila na navedenom privozu. Prednosti ovog načina upravljanja su što djeluje na smanjenje kašnjenja u odnosu na ustaljeni signalni plan, te je ovisno o trenutnom stanju na raskrižju. Ukoliko su detektori postavljeni na sve privoze, takva vrsta upravljanja omogućuje efikasnu raspodjelu ciklusa s izmjenama u svakom sljedećem ciklusu, te je također omogućeno preskakanje faza, pa se to neiskorišteno vrijeme za tu fazu može preraspodijeliti na ostale privoze gdje su vozila prisutna [15].

4.3 Adaptivni sustavi

Adaptivno odnosno prilagodljivo upravljanja ili vođenje prometa predstavlja sposobnost da se sustav prilagođava vanjskim utjecajima i zbivanjima unutar sustava tijekom rada sustava. Adaptivni sustav nudi mogućnost promjene djelovanja na novonastalu situaciju, odnosno može mijenjati svoje djelovanje da bi odgovorio na promjene u dinamičkom okruženju [1], [16]. Na slici 7 je prikazan osnovni prikaz adaptivnog sustava gdje su [1]:

- IS – izvršni član,
- MJ – mjerni uređaj,
- OV – objekt vođenja,
- Us – upravljački signal,
- y_0 – željene vrijednosti vođene veličine,
- y – mjerene vrijednosti vođene veličine.



Slika 7: Osnovni prikaz adaptivnog sustava [3]

Ovaj je osnovni prikaz adaptivnog sustava dobiven iz klasičnog regulacijskog kruga. Na prikazu se nalaze dva regulacijska kruga. Prvi regulacijski krug omogućuje automatsku stabilizaciju vođene veličine y , dok drugi regulacijski krug omogućuje prilagodbu režima rada prvoga, osnovnog kruga u promjenjivim uvjetima [1].

U gradskim sredinama najčešće ne postoji mogućnost fizičke promjene postojeće infrastrukture, pa je došlo do potrebe za drugačijim pristupom u svrhu rješavanja problema zagušenja. Nove mogućnosti utjecaja na prometni tok ostvarene su primjenom informacijsko-komunikacijskih tehnologija, kojima se može održati zadovoljavajuća razina uslužnosti prometne mreže. Adaptivni sustavi upravljanja izravnim djelovanjem na signalni ciklus mogu prilagođavati raspored trajanja ciklusa u stvarnom vremenu. Na prometnoj je mreži pomoću detektora, kamera, osjetila, itd., potrebno prikupiti podatke o trenutnim uvjetima i potrebama, te obraditi te iste podatke i primijeniti potrebne promjene, čime se sustav prilagođava, čime se izbjegavaju nepotrebna zaustavljanja prometnih tokova, koja se javljaju često u slučajevima neadaptivnog i nekoordiniranog reguliranja [17].

Ovi se sustavi također prilagođavaju trenutnoj situaciji na samom raskrižju prema trenutnoj prometnoj situaciji, prema prometnim zahtjevima i prema kapacitetu prometne mreže. Takav sustav koristi razrađene algoritme za prilagođavanje, pri čemu se prvenstveno prilagođava omjer trajanja zelenog signalnog pojma prema ciklusu (*engl. split*). Također se još

prilagođavaju i vremenski pomak signalnog plana (*engl. offset*), trajanje faza, te redoslijed faza. Glavni im je cilj optimizirati protok vozila kroz prometnu mrežu, te smanjiti čekanje za prolazak raskrižjem. Razlike između vodećih razvijenih sustava je u brzini odziva sustava na neku novu situaciju na raskrižju ili na prometnoj mreži, pristupu načina izrade algoritma, te na koji način detektiraju promjenu u prometnoj situaciji. Ovi su se sustavi počeli razvijati sedamdesetih godina prošlog stoljeća zbog stohastičke prirode prometa i neefikasnosti korištenja jednog unificiranog signalnog plana za sva raskrižja u prometnoj mreži [15].

Povećanjem broja vozila u prometnom toku dolazi do potrebe za češćom izmjenom signalnih planova, pa ovaj sustav omogućuje smanjenje troškova za reprogramiranje signalnih planova koji se obično provode svakih tri do pet godina. Razlog uvođenja ovog upravljačkog sustava je što može zadovoljiti velike i neočekivane dnevne promjene prometa, te ovi sustavi također omogućuju upravljanje konfliktima između više modova prometa, kao npr. cestovnog i tramvajskog prometa. Također ovaj sustav ima prednost smanjenja ukupnih troškova prometnog sustava kao održavanje infrastrukture, te ovaj sustav može upravljati prometom u izvanrednim situacijama i mogu pogodovati određenom načinu prijevoza. Najvažniji cilj ovog sustava upravljanja je povećanje kvalitete prometnog sustava u cjelini kroz poboljšanje mjerljivih prometnih parametara bitnih krajnjem korisniku, a to su prvenstveno smanjenje vremena putovanja kroz mrežu čime se povećava prosječnu brzinu putovanja, te smanjiti kašnjenje na raskrižjima. Za izgradnju ovakvog sustava potrebna su vrlo velika ulaganja pošto je potrebno zamijeniti stare semaforne uređaje, te uspostaviti komunikaciju između istih, te s glavnim prometnim upravljačkim centrom. Također povećavaju se i troškovi održavanja infrastrukture, zbog ugradnje većeg broja detektora u vidu induktivnih petlji koje imaju manji vijek trajanja. Proces implementacije i umjeravanja sustava je otežan, te je potreban sposoban i obučeni stručni kadar [15].

Zanimanje za adaptivno prometno upravljanje raste, te je već implementirano u mnogim zemljama, gdje uspješno funkcionira. Dva najpoznatija, koja su i najčešće implementirana su SCATS (*engl. Sydney Coordinated Adaptive Traffic System*) i SCOOT (*engl. Split Cycle and Offset Optimization Technique*), dok su još bitni i RHODES (*engl. Real Time Hierarchical Optimized Effective System*) te OPAC (*engl. Optimization Policies for Adaptive Control*) [18].

SCATS je sustav upravljanja prometa dizajniran za optimizaciju prometnog toka, sastoji se od sklopovske te programske podrške i jedinstvene logike upravljanja prometa. Radi na osnovu inteligentnih algoritma koji obrađuju podatke u stvarnom vremenu za prilagodbu signalnih ciklusa koji reagiraju na neočekivane uvjete, predviđaju nadolazeće situacije i održavaju promet. Sustav upravlja grupama raskrižja koje se sastoje od jednog do deset raskrižja, od kojih je jedno postavljeno kao upravljačko. Sustav zatim koordinira i prilagođava grupe raskrižja tako da stvara podjelu prometa na glavnim prometnicama u manje grupe vozila kojima je osigurano dovoljno vremena da prođu kroz tu grupu raskrižja. Rezultat je smanjenje zagušenja, kraće vrijeme putovanja i povećana sigurnost i produktivnost [19], [20].

SCOOT služi za optimizaciju prometa korištenjem malih i učestalih promjena signalnih planova da bi se izbjegli veće nepravilnosti na prometnoj mreži. Sustav prilagođava signalne planove korištenjem podataka koje su prikupili senzori na prometnicama, te odgovara na oscilacije prometnog toka. Efikasnost ovog sustava značajno ovisi o podacima stanja u prometu dobivenih od strane detektora. Također zato ovaj sustav zahtjeva velik broj detektora [20], [21].

UTOPIA (*engl. Urban Traffic Optimisation by Integrated Automation*) je strategija upravljanja koja radi u stvarnom vremenu, te se koristi na velikim gradskim područjima. UTOPIA koristi distribuiranu arhitekturu na dvije razine. Gornja razina se sastoji od središnjeg podsustava zaduženog za srednjoročna i dugoročna predviđanja i za upravljanje cijelim promatranim područjem. Ovoj se razini šalje signalni plan, koji se dinamički optimizira, zajedno s kriterijima za adaptivnu koordinaciju. Ova je razina također zadužena za kontinuiranu dijagnostiku cijele mreže. Niža se razina sastoji od mreže međusobno povezanih multifunkcionalnih lokalnih upravljača, od kojih je svaki zadužen za jedno raskrižje. Lokalni upravljači određuju raspored i optimalne duljine faza pomoću kriterija dobivenih preko više razine, podataka dobivenih sensorima i informacija dobivenih od upravljača sa susjednih raskrižja. Glavne funkcije sustava upravljanja prometa UTOPIA su [22]:

- Praćenje – u svrhu predviđanja i upravljanja;
- Prioriteti javnom gradskom prijevozu – postoji funkcionalna integracija sustava automatskog praćenja sa lokalnim upravljačima;
- Dijagnostika – na namjenskom zaslonu se prikazuju razrađeni indeksi performansi;
- Upravljanje – dinamično i adaptivno upravljanje.

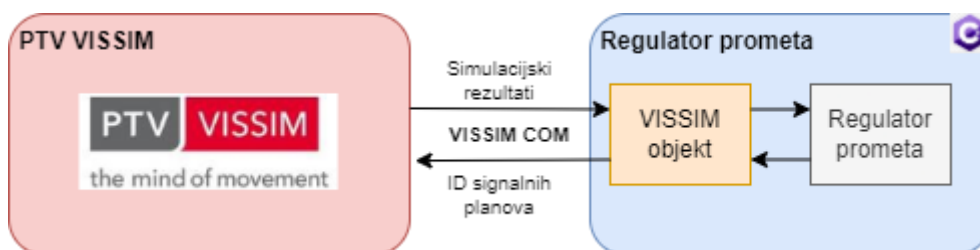
Posljednjih godina je u svrhu učinkovitog otkrivanja i smanjenje gustoće prometa razvijena nova arhitektura za sustav upravljanja gradskim prometom. Ona se koristi bežičnom mrežom osjetila (*engl. Wireless sensor networks - WSN*), nadzornim kamerama i konceptom Internet stvari (*engl. Internet of things - IoT*). Bežične mreže osjetila omogućuju povezivanje prometnica s Internetom preko osjetila, koji otkrivaju dolazak vozila, te šalju dobivene podatke u oblak (*engl. cloud*) na daljnju obradu. Pomoću podataka na oblaku, međuprogram može odlučiti koji je optimalan sljedeći signalni pojam semafora. Ova se odluka putem mreže prenosi na izvršne članove (svjetla za prikaz signalnih pojmova) ugrađene u semaforima na potrebnim raskrižjima. Prednost ovog sustava je što se koriste najnovije tehnologije kao što su bežični senzori koji mogu ograničiti troškove postavljanja sustava [23].

Korištenjem prethodno navedene tehnologije, odnosno bežične mreže osjetila, ispituju se učinci njenog djelovanja na prometne sustave s više raskrižja. Ovakav sustav raspoređuje zeleno svjetlo na više raskrižja ovisno o trenutnim podacima koja uključuju obujam prometa, vrijeme čekanja, broj stajanja, gustoću vozila i posebnim okolnostima. Optimalna duljina trajanja zelenog svjetla se izračunava pomoću lokalnih prometnih podataka i prometnih uvjeta na susjednim raskrižjima. Algoritam za određivanje slijeda zelenog svjetla

odlučuje kojem će od mogućih raskrižja dodijeliti zeleno svjetla prema prethodno navedenim podacima. Posebne okolnosti se odnose na slučajeve incidenta, gdje se zeleno svjetlo mora hitno aktivirati. Također se zeleno svjetlo može aktivirati kada se detektira prisutnost vozila za posebne potrebe odnosno žurnih službi ili se mora održavati crveno svjetlo u slučaju prometne nesreće, kako bi se promet preusmjerio. Nakon što se izračuna optimalno trajanje zelenog svjetla, ta se vrijednost šalje i na druga raskrižja, da bi se što manje vozila iz grupe koja trenutno prolazi raskrižjem zaustavila na nekom od raskrižja sa crvenim svjetlom. Ovakav sustav upravljanja je znatno povećao propusnost prema obujmu prometa i u odnosu na prometno ovisno sustave i na adaptivne sustave koji koriste neizrazitu (engl. fuzzy) logiku. Također sustav je smanjio vrijeme kašnjenja i broj stajanja na raskrižja u odnosu na navedene sustave [24].

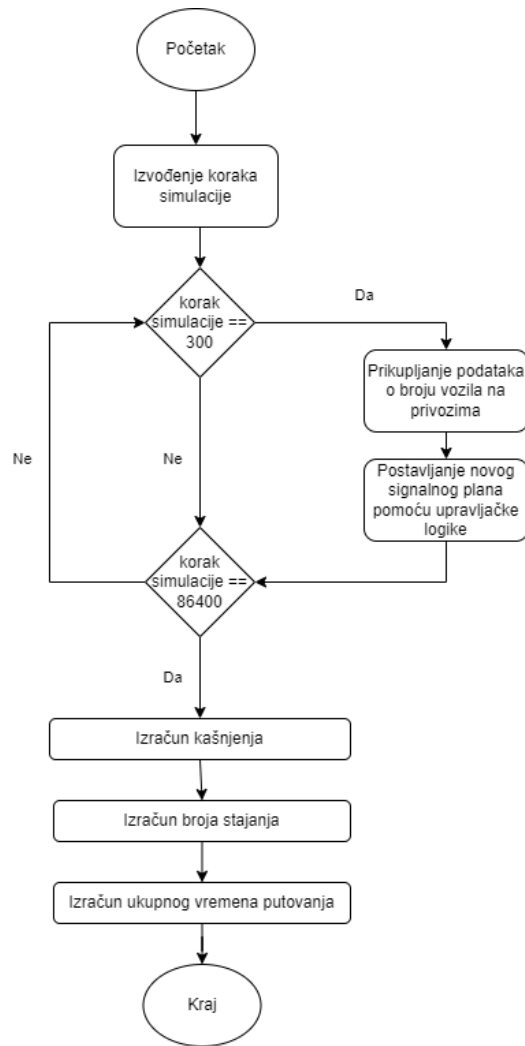
5. IMPLEMENTACIJA KOORDINIRANOG UPRAVLJANJA MREŽOM RASKRIŽJA SA SEMAFORIMA

Arhitektura sustava je prikazana na slici 8. Sustav se sastoji od dva modula, PTV VISSIM i regulator prometa (engl. Traffic controller). PTV VISSIM modul je već prije navedeni mikroskopski simulator, a modul regulatora prometa predstavlja C# programski jezik. Modul regulatora prometa služi za upravljanje sustavom, te se sastoji od dvije komponente, VISSIM objekta i samog regulatora prometa.



Slika 8: Arhitektura sustava

Upravljanje se provodi tako da se osjetilima mjeri broj vozila na svakom privozu, te se prema broju vozila aktivira jedan od definiranih signalnih planova. Ako broj vozila na jednom od privoza prelazi definiranu granicu broja vozila, aktivira se signalni plan koji pogoduje tom privozu, čime se smanjuje prometni tok na tom privozu. Ako pak prometna potražnja prelazi definiranu granicu na dva nasuprotna privoza, aktiviraju se signalni planovi koji produljuju faze na tim privozima. Ako pak prometna potražnja ne prelazi definiranu granicu na jednom od privoza, aktivira se osnovni signalni plan. Na slici 9 je prikazan dijagram toka upravljanja. Nakon pokretanja simulacije pokreće se i komunikacija modula regulatora prometa sa VISSIM-om. Svakih 300 [s] u simulaciji prikupljaju se podaci o broju vozila na privozima svakog raskrižja, koji se šalju regulatoru prometa modulu, koji upravlja simulacijom prema prethodno navedenoj upravljačkoj logici. Na kraju simulacije modul regulatora prometa pribavlja mjerene prometne parametre koji će biti navedeni i analizirani u sljedećem poglavlju rezultata.



Slika 9: Dijagram toka upravljanja

6. SIMULACIJSKI REZULTATI

U ovom su poglavlju prikazani i opisani model, signalni planovi, simulirani prometni tok, te rezultati simulacije.

5.1 Opis korištenog modela

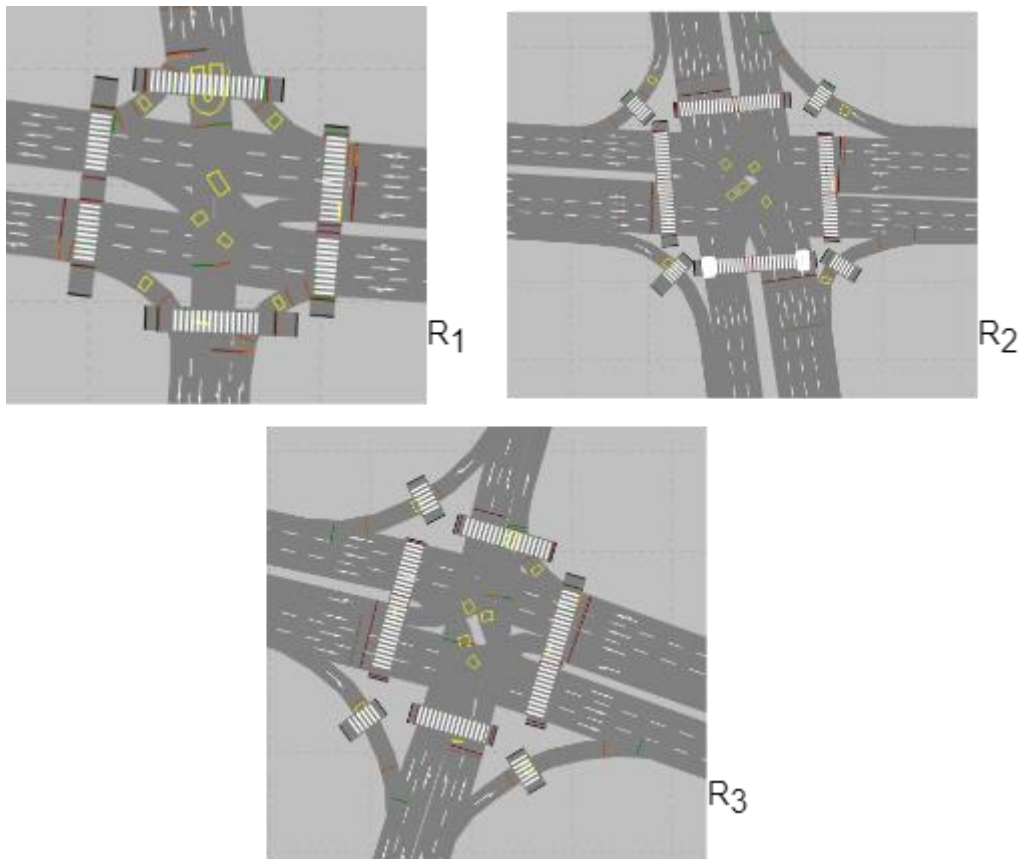
Korišteni model prometne mreže (slika 10) je sastavljen prema prometnoj mreži iz grada Skopja u Sjevernoj Makedoniji. Glavni prometni tok se odvija na prometnici Boulevar Goce Delchev, na koju se nadovezuju sljedeća raskrižja (slika 11):

1. Ulica Stiv Naumov - Boulevar Goce Delchev - Phillip II of Macedon (R_1);
2. Boulevar Goce Delchev - Boulevard Krste Petkov Misirkov (R_2);
3. Boulevar Goce Delchev - Grigor Prlichev (R_3).

Udaljenost između prvog i drugog raskrižja iznosi 185 [m], dok između drugog i trećeg iznosi 340 [m]. Simulacija je bila konfigurirana na trajanje od 24 [h].



Slika 10: Korišten model



Slika 11: Korištena raskrižja

Sva raskrižja koriste sedam ustaljenih signalna planova prikazanih na slikama 12, 13 i 14. Trajanje ciklusa iznosi 130 [s]. Na lijevoj strani su označene signalne grupe za vozila i pješake. Na signalnom planu prvog raskrižja (osnovni plan – slika 12) vidljivo je da postoji pet signalnih grupa za vozila, te postoje tri faze. U prvoj fazi su propuštena sva vozila sa istočnog privoza. U drugoj su fazi propuštena vozila sa zapadnog i istočnog privoza koja prolaze ravno i skreću desno. U trećoj fazi su propuštena sva vozila sa sjevernog i južnog privoza.

Za signalni plan raskrižja R₂ prikazanog na slici 13 vidljivo je da postoji ukupno šesnaest signalnih grupa, od kojih je osam za motorna vozila, koje su podijeljene u četiri faze. U svakoj od četiri faze se propuštaju sva vozila sa samo jednog privoza, prema redoslijedu u prvoj fazi sa istočnog privoza, u drugoj fazi sa južnog privoza, u trećoj fazi sa zapadnog privoza i u četvrtoj fazi sa sjevernog privoza.

Na signalnom planu raskrižja R₃ (slika 14) ima ukupno dvanaest faza, te je njih šest namijenjeno za motorna vozila. Vozila se na tom raskrižju propuštaju u tri faze, u prvoj se fazi propuštaju vozila sa istočnog i zapadnog privoza koja prolaze ravno ili skreću desno. U drugoj fazi se propuštaju vozila sa istočnog i zapadnog privoza koja skreću lijevo na raskrižju, a u trećoj fazi se propuštaju sva vozila sa sjevernog i južnog privoza.

Osnovni signalni plan



Signalni plan istok

Signalni plan jug



Signalni plan zapad

Signalni plan sjever



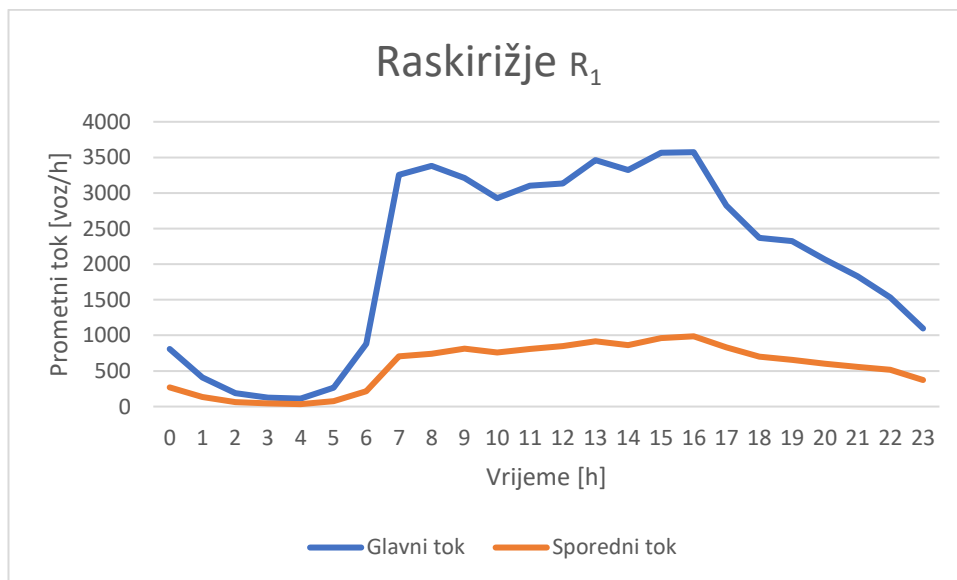
Signalni plan zapad – istok

Signalni plan sjever - jug

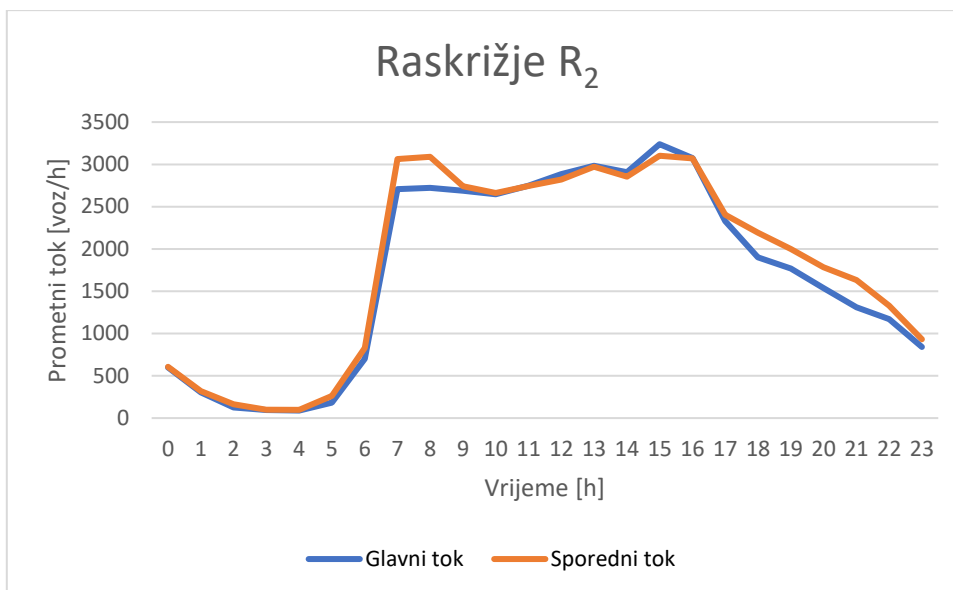


Slika 12: Signalni planovi prvog raskrižja (R1)

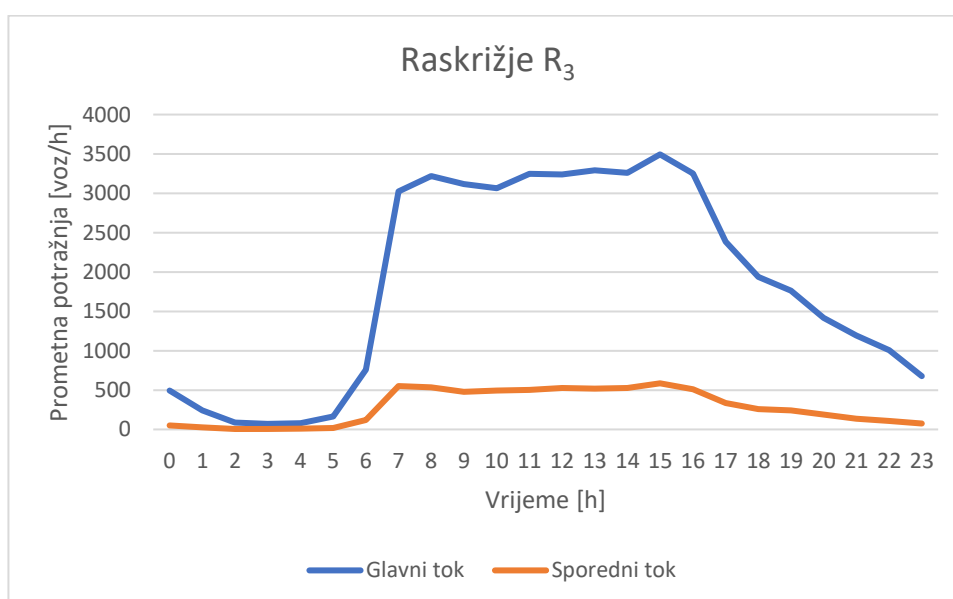
Na grafikonima 1, 2 i 3 prikazana je generiran prometni tok na prethodno spomenutim raskrižjima koji je promjenjiv. Glavni prometni tok (istočni i zapadni privoz) na grafikonu 1 ima daleko veće generirano prometno opterećenje od sporednog prometnog toka (sjeverni i južni privoz). Jutarnji vršni sat počinje u 7 [h], kada je generirano 3.257 [voz/h], te traje sve do 16 [h] kada počinje padati. Na sporednom toku je početkom jutarnjeg vršnog sata generirano 707 [voz/h], daleko manje nego na glavno toku. Na grafikonu 2 koji prikazuje prometnu potražnju raskrižja R₂ vidljivo je da je prometno opterećenje na sporednom toku za vrijeme jutarnjeg vršnog sata veće za 355 [voz/h], dok se kasnije povećava potražnja na glavnom toku do 3.239 [voz/h]. Na ovom raskrižju nema tako velikih odstupanja glavnog i sporednog toka kao na ostala dva raskrižja. Raskrižje R₃ ima također velika odstupanja na glavnom toku kao i R₁. Najveće prometno opterećenje iznosi 3.494 [voz/h] u 16 [h].



Grafikon 1



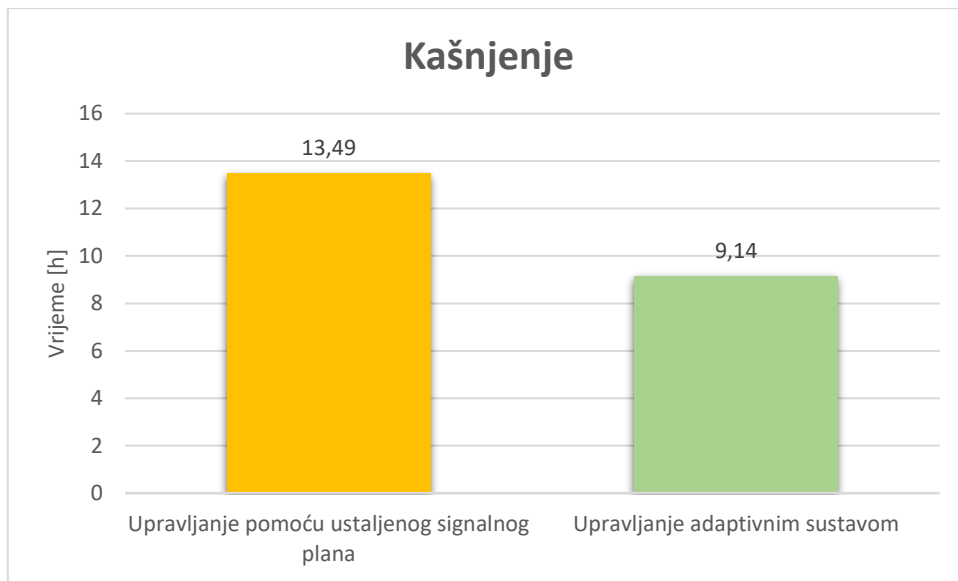
Grafikon 2



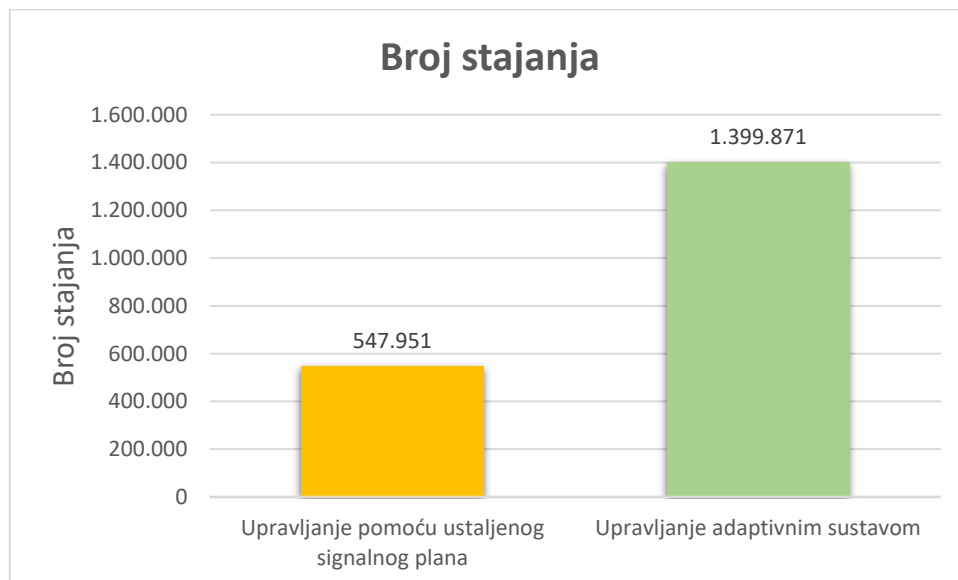
Grafikon 3

5.2 Prikaz i analiza rezultata simulacije

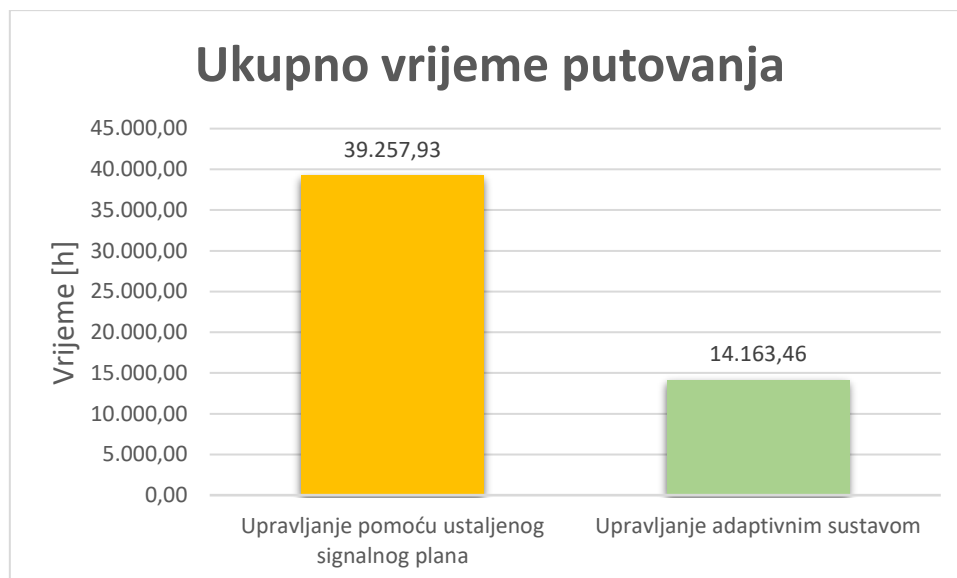
Kao rezultat simulacije, mjerena su sljedeća tri prometna pokazatelja: kašnjenje, broj zaustavljanja i ukupno vrijeme putovanja (*engl. total travel time*). Također je za usporedbu bilo potrebno simulirati slučaj bez upravljanja gdje je bio korišten ustaljeni signalni plan, te je takvih slučajeva bilo deset. Grafikoni 4, 5 i 6 prikazuju minimalne vrijednosti mjerenih prometnih pokazatelja dobivenih u simulaciji adaptivnog sustava u usporedbi sa prosječnim vrijednostima u simulaciji sa sustavom bez upravljanja.



Grafikon 4



Grafikon 5



Grafikon 6

Na grafikonima 4, 5 i 6, te u tablici 3 su prikazani rezultati dobiveni simulacijama. Vidljivo je da su ostvarena znatna poboljšanja kod dva mjerena prometna parametra. Kod sustava bez upravljanja prosječna vrijednost kašnjenja iznosila je 13,49 [h], a kod adaptivnog sustava najmanja vrijednost kašnjenja je iznosila 9,14 [h], što je čak 4,35 [h] manje. Adaptivnim upravljanjem je smanjeno kašnjenje za 32,25 %. Sa sustavom bez upravljanja prosječna vrijednost ukupnog vremena putovanja iznosila je 39.257,93 [h], dok je kod adaptivnog sustava ukupno vrijeme putovanja iznosilo 14.163,46 [h]. Ostvareno je smanjenje vremena putovanja 25.094,47 [h] ili poboljšanje od 63,92 %. No broj stajanja se znatno povećavao za čak 155,47 %, što je iz razloga što su se signalni planovi često mijenjali, pa je to prisililo više zaustavljanja vozila na raskrižjima. Smanjenjem ukupnog vremena putovanja, a povećanjem broja stajanja, zaključuje se da su vozila stajala manji vremenski period u odnosu na upravljanje sustavom sa ustaljenim signalnim planom [25].

Tablica 3: Usporedba prometnih parametara sustava bez upravljanja i adaptivnog sustava

Prometni parametar	Ustaljeni signalni plan	Adaptivni sustav	Poboljšanje [%]
Kašnjenje [h]	13,49	9,14	32,25 %
Broj stajanja	547.951	1.399.871	- 155,47 %
Ukupno vrijeme putovanja [h]	39.257,93	14.163,46	63,92 %

7. ZAKLJUČAK

Zbog čestih pojava zagušenja na raskrižjima sa semaforima, potrebno je naći rješenje kako bi se smanjila čekanja i povećao protok. Korištenjem ustaljenih signalnih planova ne koristi se uvid u stvarnu situaciju na prometnoj mreži, zbog čega ne može ni djelovati na smanjenje mogućeg zagušenja. Korištenjem sustava iz domene ITS-a koriste se adaptivni sustavi upravljanja, koji korištenjem osjetila, odnosno raznih detektora i kamera imaju uvid u trenutnu situaciju na prometnoj mreži. Ovi sustavi omogućuju koordinaciju između semaforских uređaja, čime se smanjuju zagušenja na više raskrižja.

Mikroskopska simulacija uvelike pomaže u dizajniranju i u unaprjeđenju sustava, te se simulacijom može odrediti učinkovitost upravljanja prometom. Ova metoda je daleko praktičnija nego testiranje na realnom prometnom sustavu. Za simulacijski alat je bitan model kojim sustav radi, jer on određuje ponašanje sustava, odnosno rezultat simulacije.

Vidljivo u rezultatima, koordinacijom sustava raskrižja sa semaforima postignuto je značajno smanjenje ukupnog vremena putovanja i kašnjenja. Postignuta su znatna smanjenja bitnih prometnih parametara kao što vrijeme putovanja od 63,92 % i kašnjenje od 32,25 % .

POPIS LITERATURE

- [1] Bošnjak, I. Inteligentni transportni sustavi 1, Sveučilište u Zagrebu, Fakultet prometnih znanosti, Zagreb, 2006.
- [2] Kapusta, B., Miletić, M. Analiza utjecaja adaptivnog upravljanja signalnim planovima semaforiziranog raskrižja na vrijeme putovanja vozila žurnih službi. Rektorova nagrada, Sveučilište u Zagrebu, Zagreb, 2017.
- [3] Bošnjak, I. Badanjak, D. Osnove prometnog inženjerstva. Sveučilište u Zagrebu, Fakultet prometnih znanosti, Zagreb, 2005.
- [4] Joško Petrić, Automatska regulacija: uvod u analizu i sintezu. Udžbenik, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Sveučilište u Zagrebu, 2012.
- [5] Vujić, M. Sustav dinamičkih prioriteta za vozila javnog gradskog prijevoza u automatskom upravljanju prometom. Doktorska disertacija, Fakultet prometnih znanosti, Sveučilište u Zagrebu, 2013.
- [6] Anžek, M., Divić, A., Lanović, Z. Smjernice za prometnu svjetlosnu signalizaciju na cestama. Ministarstvo pomorstva, prometa i veza, Zagreb, 2001.
- [7] Highway Capacity Manual - HCM2010. Transportation Research Board of the National Academies, 2010.
- [8] Zakon o sigurnost prometa na cestama. Narodne Novine, br. 67., pristupljeno 09.06.2008., čl. 59.
- [9] Lanović, Z. Cestovna telematika - Signalni plan - vježbe. Fakultet prometnih znanosti, Zagreb, 2016. [10] Mikroskopski simulator VISSIM, <https://www.myptv.com/en/application-areas/traffic-simulation> (pristupljeno: kolovoz, 2022.)
- [11] Barceló, Jaume, Fundamentals of Traffic Simulation Volume 145 || Microscopic Traffic Flow Simulator VISSIM, International Series in Operations Research & Management Science, 2010.
- [12] Miletić, M. Simulacija semaforizirane urbane prometne mreže korištenjem PTV VISSIM-a te MATLAB-a. Završni rad, Fakultet prometnih znanosti, Sveučilište u Zagrebu, 2017.
- [13] Singh, L., Tripathi, S., Arora, H.: Time Optimization for Traffic Signal Control Using Genetic Algorithm, International Journal of Recent Trends in Engineering, Vol. 2, No. 2, 2009.
- [14] Homaei, H., Hejazi, S.R., Dehghan, S.A.M.: A New Traffic Controller Using Fuzzy Logic for a Full Single Junction Involving Emergency Vehicle Preemption, 2013.

- [15] Miroslav Vujić, Strategije i taktike upravljanja prometom, Presentacije s predavanja, Fakultet Prometnih Znanosti, Zagreb
- [16] Åström, K.J., Wittenmark B.: Adaptive Control: Second Edition, Lund Institute of Technology, 2008.
- [17] Stepić, A. Pregled algoritama upravljanja semaforiziranim raskrižjima. Završni rad, Fakultet prometnih znanosti, Sveučilište u Zagrebu, 2020.
- [18] Fehon, K., Peters J.: Adaptive Traffic Signals, Comparison and Case Studies, Oakland, CA: DKS Associates, 2010.
- [19] Sustav SCATS, <https://www.scats.nsw.gov.au/> (pristupljeno: kolovoz, 2022.)
- [20] Stevanovic, A.: Adaptive Traffic Control Systems: Domestic and Foreign State of Practice A Synthesis of Highway Practice, National Cooperative Highway Research Program, 2010.
- [21] Zhao, Y., Tian, Z.: An Overview of the Usage of Adaptive Signal Control System in the United States of America, Applied Mechanics and Materials Vols. 178-181, 2012.
- [22] Pavleski Daniel, Koltovska-Nechoska Daniela, Ivanjko Edouard, Evaluation of adaptive traffic control system UTOPIA using microscopic simulation, IEEE 2017 International Symposium ELMAR – Zadar, 2017.
- [23] Adil Hilmani, Abderrahim Maizate, Larbi Hassouni, "Automated Real-Time Intelligent Traffic Control System for Smart Cities Using Wireless Sensor Networks", Wireless Communications and Mobile Computing, vol. 2020, Article ID 8841893, 2020. <https://doi.org/10.1155/2020/8841893>
- [24] B. Zhou, J. Cao and H. Wu, "Adaptive Traffic Light Control of Multiple Intersections in WSN-Based ITS," *2011 IEEE 73rd Vehicular Technology Conference (VTC Spring)*, 2011, pp. 1-5, doi: 10.1109/VETECS.2011.5956434.
- [25] Mladen Miletić, Edouard Ivanjko, Sadko Mandžuka, Daniela Koltovska-Nechoska, Combining Neural Gas and Reinforcement Learning for Adaptive Traffic Signal Control, 63rd International Symposium ELMAR-2021, Zadar, 2021.

POPIS ILUSTRACIJA

Slika 1: Regulacijska petlja [4]	3
Slika 2: Poopćeni model prometnog sustava [3]	4
Slika 3: Komponente potrebne za izračun zaštitnog međuvremena [5]	8
Slika 4: Primjer signalnog plana [9]	9
Slika 5: Prikaz rada animacijskog modula unutar PTV VISSIM-a	11
Slika 6: Simulacijsko okruženje	12
Slika 7: Osnovni prikaz adaptivnog sustava [3]	16
Slika 8: Arhitektura sustava	20
Slika 9: Dijagram toka upravljanja	21
Slika 10: Korišten model	22
Slika 11: Korištena raskrižja	23
Slika 12: Signalni planovi prvog raskrižja (R1)	24
Slika 13: Signalni planovi drugog raskrižja (R2)	25
Slika 14: Signalni planovi trećeg raskrižja (R3)	26

POPIS TABLICA

Tablica 1: Ovisnosti duljine ciklusa o broju faza [7]	6
Tablica 2: Trajanje žutog svjetla u ovisnosti o dozvoljenoj brzini [7]	7
Tablica 3: Usporedba prometnih parametara sustava bez upravljanja i adaptivnog sustava .	30

POPIS GRAFIKONA

Grafikon 1 : Prometna potražnja raskrižja R1	27
Grafikon 2 : Prometna potražnja raskrižja R2	28
Grafikon 3 : Prometna potražnja raskrižja R3	28
Grafikon 4 : Ukupno kašnjenje - usporedba	29
Grafikon 5 : Broj stajanja - usporedba.....	29
Grafikon 6 : Ukupno vrijeme putovanja - usporedba.....	30

Sveučilište u Zagrebu
Fakultet prometnih znanosti
Vukelićeva 4, 10000 Zagreb

IZJAVA O AKADEMSKOJ ČESTITOSTI I SUGLASNOSTI

Izjavljujem i svojim potpisom potvrđujem da je _____ završni rad
(vrsta rada)

isključivo rezultat mogega vlastitog rada koji se temelji na mojim istraživanjima i oslanja se na objavljenu literaturu, a što pokazuju upotrijebljene bilješke i bibliografija. Izjavljujem da nijedan dio rada nije napisan na nedopušten način, odnosno da je prepisan iz necitiranog rada te da nijedan dio rada ne krši bilo čija autorska prava. Izjavljujem, također, da nijedan dio rada nije iskorišten za bilo koji drugi rad u bilo kojoj drugoj visokoškolskoj, znanstvenoj ili obrazovnoj ustanovi.

Svojim potpisom potvrđujem i dajem suglasnost za javnu objavu završnog/diplomskog rada pod naslovom Koordinirano upravljanje sustavom semafora na raskrižjima, u Nacionalni repozitorij završnih i diplomskih radova ZIR.

Student/ica:

U Zagrebu, 5.9.2022.

Patrik Hršak, P.Hršak
(ime i prezime, potpis)