

# Pregled algoritama upravljanja semaforiziranim raskrižjima

---

**Stepić, Antonio**

**Undergraduate thesis / Završni rad**

**2020**

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

*Permanent link / Trajna poveznica:* <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:119:749108>

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

*Download date / Datum preuzimanja:* **2025-02-06**



*Repository / Repozitorij:*

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



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET PROMETNIH ZNANOSTI

ANTONIO STEPIĆ

Pregled algoritama upravljanja  
semaforiziranim raskrižjima

ZAVRŠNI RAD

Zagreb, rujan, 2020.

Zagreb, 26. ožujka 2020.

Zavod: **Zavod za inteligentne transportne sustave**  
Predmet: **Cestovna telematika**

## ZAVRŠNI ZADATAK br. 5619

Pristupnik: **Antonio Stepić (0135230486)**  
Studij: **Inteligentni transportni sustavi i logistika**  
Smjer: **Inteligentni transportni sustavi**

Zadatak: **Pregled algoritama upravljanja semaforiziranim raskrižjima**

### Opis zadatka:

Kroz ovaj rad potrebno je opisati funkcionalno područje upravljanja prometom prema ITS arhitekturi, definirati i opisati upravljačke strategije na semaforiziranim raskrižjima. Dati pregled postojećih algoritama upravljanja semaforiziranim raskrižjima, te opisati koncept kooperativnih sustava u gradskom okruženju.

Mentor:

Predsjednik povjerenstva za  
završni ispit:

---

doc. dr. sc. Miroslav Vujić

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET PROMETNIH ZNANOSTI

## ZAVRŠNI RAD

PREGLED ALGORITAMA UPRAVLJANJA SEMAFORIZIRANIM  
RASKRIŽJIMA

THE REVIEW OF SIGNALIZED INTERSECTIONS CONTROL  
ALGORITHMS

Mentor: dr.sc. Miroslav Vujić

Student: Antonio Stepić, 0135230486

Zagreb, rujan, 2020.

# SAŽETAK

Sustavi upravljanja prometom i algoritmi koji su implementirani u te sustave osnovna su tematika ovog završnog rada, koncept rada, prednosti takvih sustava te kako oni utječu na funkcioniranje prometne mreže. Opisano je funkcionalno područje upravljanja prometom prema ITS arhitekturi, upravljačke strategije koje su u primjeni diljem svijeta na semaforiziranim raskrižjima navedene su te isto tako i opisane. Navode se razlozi zašto je došlo do implementacije algoritama, opisani su najčešće korišteni algoritmi korišteni na semaforiziranim raskrižjima i navedene su prednosti istih. Opisan je koncept kooperativnih sustava u gradskim sredinama te su prikazane njegove prednosti i mogućnosti koje će doći s implementacijom takvih sustava.

**KLJUČNE RIJEČI:** inteligentni transportni sustavi (ITS), adaptivno upravljanje prometom, algoritmi upravljanja semaforiziranim raskrižjima, kooperativni sustavi, sustavi upravljanja prometom

## ABSTRACT

Traffic control systems and algorithms which are implemented in those systems are the main focus of this final paper, work concept, the advantages given by those systems and the effect which they have on the functioning of the traffic network. The functional area of traffic management according to ITS architecture is described, the management strategies that are applied worldwide at intersections controlled by traffic lights are listed and also described. Reasons for implementing algorithms are stated, the most frequently used algorithms used at a traffic light controlled intersections are described and the advantages of the same are stated. The concept of cooperative systems in urban areas is described and its advantages and possibilities that will come with the implementation of such systems are presented.

**KEYWORDS:** intelligent transport systems (ITS), adaptive traffic control, control algorithms for signalized intersections, cooperative systems, traffic control systems

# SADRŽAJ

1. UVOD .....	1
2. FUNKCIONALNO PODRUČJE UPRAVLJANJA PROMETOM .....	3
2.1. Arhitektura ITS-a .....	4
2.1.1. Logička, fizička i komunikacijska arhitektura .....	5
2.1.2. Načela dobre arhitekture .....	6
2.2. Funkcionalna područja i usluge ITS-a .....	7
3. UPRAVLJAČKE STRATEGIJE NA SEMAFORIZIRANIM RASKRIŽJIMA .....	10
3.1. Osnovni model upravljanja prometom.....	11
3.2. Adaptivno upravljanje prometom.....	13
3.3. Strategije dodjele prioriteta .....	17
3.3.1. Pasivne strategije.....	18
3.3.2. Aktivne strategije .....	19
3.3.3. Adaptivne strategije .....	21
4. ALGORITMI UPRAVLJANJA SEMAFORIZIRANIM RASKRIŽJIMA.....	22
4.1 Podržano učenje .....	24
4.2 Neizrazita logika .....	26
4.3 Umjetna neuronska mreža.....	27
5. KONCEPT KOOPERATIVNIH SUSTAVA U GRADSKOM PROMETU .....	28
6. ZAKLJUČAK .....	32
LITERATURA.....	33
POPIS SLIKA .....	37
POPIS TABLICA.....	38
POPIS GRAFOVA.....	39

# 1. UVOD

Prometno zagušenje kako u gradskim sredinama tako i izvan njih kritičan je problem današnjeg modernog društva koje je usmjereno ka i ovisno o vozilima. Klasične metode rješavanja tog problema su povećanje kapaciteta ceste, širenja prometne mreže, itd. međutim one imaju određena ograničenja ili više nisu ni moguća, isto tako uz nedostatak raspoloživosti zemljišta dolazimo i do potrebe za velikim kapitalnim ulaganjem. Zagušenje prometa u gradovima isto tako i izvan gradova dovodi do opadanja razine uslužnosti što se može izbjeći odgovarajućim mjerama kontrole i određenim strategijama. Sintagma „Učiniti više s postojećom opremom“ je osnova inteligentnih transportnih sustava (ITS). Uspješnom implementacijom ITS-a dolazi do značajnog poboljšanja razine performanse prometnog sustava. Implementacija ITS-a i pružanje odgovarajućih usluga nisu ograničeni samo na sektor cestovnog prometa. već uključuju i druge domene poput željeznice, zrakoplovstva i pomorstva [1] [2].

Poboljšanje transporta kao cilj razvijanja i primjene inteligentnih transportnih sustava uključuje [1] [3]:

- smanjenje zagušenja u prometu,
- smanjenje kapitalnih i operativnih troškova,
- poboljšanje sigurnosti,
- povećanje produktivnosti transportne infrastrukture,
- smanjenje potrošnje energenata, smanjenje zagađenja,
- poticaj novim poslovima i zapošljavanju,
- podizanje tehnološkog imidža grada i regije.

Stalno i sustavno optimiziranje signalnih planova u većini prometnih sustava predstavlja bitan kontinuirani element upravljanja sustavom prometne kontrole. Takvo stalno optimiziranje za mnoge postojeće sustave je zahtjevna i financijski iscrpna metoda. Rezultat toga je mali broj i mala učestalost ažuriranja signalnih planova. Kao rješenje tih problema postoje sustavi koje nazivamo adaptivnim. Oni imaju mogućnost automatske promjene signalnih planova kao odgovor na kratkoročne i dugoročne varijacije u prometu. Adaptivni sustavi ne samo da omogućuju učinkovitiju kontrolu prometa, već također zahtijevaju manje ljudskih i financijskih resursa za ažuriranje istih [4].

Adaptivno upravljanje ima za cilj maksimalno iskoristiti propusnost vozila kroz prometne mreže pritom smanjujući vrijeme putovanja, minimizirati vrijeme čekanja na raskrižjima i izbjeći moguće sudare. Postoji i niz poželjnih podciljeva, kao što su smanjenje onečišćenja okoliša tako da se smanji vrijeme putovanja, smanjenje troška benzina skraćivanjem praznog hoda vozila, smanjenje stresa vozača, itd. [5].

Suočeni s nedostatkom opcija, strategije upravljanja tranzitnim prometom postaju potreba, povećanje potražnje uz fiksni kapacitet postojeće infrastrukture usmjerava prometne inženjere da razvijaju i poboljšavaju postojeći sustav. Dodjela prioriteta na semaforiziranim raskrižjima je popularna strategija koja se koristi za poboljšanje performansi tranzitnih vozila promjenom logike upravljanja signalnim planom kako bi se udovoljilo potrebama tranzitnih vozila [6]. Dobro dizajniran sustav tranzitnog upravljanja prometom dovodi do značajnih pozitivnih učinaka na promet tranzitnih vozila, kao što su: smanjenje kašnjenja vozila javnog prijevoza isto tako i čekanja putnika na stajalištima, smanjenje voznog parka, povećanje točnosti rasporeda vožnje. Važno je spomenuti da postoje i negativni učinci, produljenjem zelenog svjetla kako bi se prioritiziralo tranzitno vozilo neminovno smanjuje trajanje zelenog svjetla drugim vozačima što kao posljedicu ima kašnjenje vozila bez prioriteta, dok bi vozila koja nailaze na križanje iz istog smjera kao i prioritizirano vozilo također uživala u tom prioritetu što bi za posljedicu moglo izazvati zagušenja na nadolazećim raskrižjima [7].

Veliki izazov u današnjem društvu predstavlja upravljanje velike količine vozila koji prolaze kroz prometnu mrežu, također na manjoj razini kroz križanja na toj prometnoj mreži. Semafori se često koriste kako bi se kontrolirao protok vozila kroz raskrižja, ali i ni sami semafori nisu više dovoljni kako bi se promet odvijao što je efikasnije moguće. Implementirajući razne vrste algoritama u sustave semaforiziranih raskrižja bliže smo optimalnijem odvijanju prometa kako kroz raskrižja tako i kroz prometnu mrežu. Različiti algoritmi pružaju bolje rezultate u različitim prometnim uvjetima iz tog razloga teško je reći koji od postojećih algoritama je najoptimalniji [8].

Danas, ITS i njegovo brzo razvijanje dovodi do idućeg stadija, kooperativnih sustava, gdje umjesto da se vozilo, infrastruktura i ostali sudionici u prometu gledaju zasebno te da operiraju zasebno omogućeno je da ih se gleda kao sustav i da djeluju kao sustav. Koordinacija prometa u raskrižjima vrlo je proučena i izazovna tema.

Pregled algoritama upravljanja semaforiziranim raskrižjima naziv je teme ovog rada, kroz četiri poglavlja predstavljeni su pojmovi vezani za upravljanje prometom poglavito na semaforiziranim raskrižjima, predstavljeni su sustavi upravljanja koji se najčešće koriste i predstavljeni su algoritmi koji to i omogućuju, također su opisane i mogućnosti upravljanja prometom koji će biti u primjeni u skoroj budućnosti. U prvom poglavlju „Funkcionalno područje upravljana prometom“ opisana je temeljna struktura ITS-a, u drugom poglavlju „Upravljačke strategija na semaforiziranim raskrižjima“ predstavljeni su modeli upravljanja prometom, njihove prednosti i mane. Treće poglavlje „Algoritmi upravljanja semaforiziranim raskrižjima“ navedeni su sustavi i algoritmi koji se koriste te razlog njihovog korištenja. Četvrto poglavlje predstavlja „Koncept kooperativnih sustava u gradskom prometu“ gdje su vidljive nove tehnologije i kako će one omogućiti bolju funkcionalnost u gradskoj prometnoj mreži.



## 2. FUNKCIONALNO PODRUČJE UPRAVLJANJA PROMETOM

Općenita definicija koja opisuje promet govori kako je to sustav i/ili proces čija je glavna svrha prijevoz i/ili prijenos transportnih entiteta određenim prometnim sredstvima zauzimajući dijelove kapaciteta prometnice pritom poštujući utvrđene propise i pravila. Upravljanje prometom ima svoj slijed razvoja, tako da nakon određivanja potrebe i njenih specifikacija potrebno je razraditi arhitekturu sustava, ITS arhitektura nam služi kako bi definirali funkcionalno područje upravljanja prometom. Nakon toga slijedi detaljni dizajn sustava, njegovo testiranje te implementacija sustava.. Takve kompleksne sustave važno je promatrati s više gledišta uz odgovarajuću dekompoziciju i to je jedan od najvažnijih razloga zašto se primjenjuje arhitektura kao svojevrsan predložak po kojem će se sustav dizajnirati [9], [].

Da bi kretanje na nekoj prometnoj mreži i pripadajućim sučeljima bilo što efikasnije potrebno je preventivno i korektivno upravljati prometom, upravljanje prometom je dinamički i upravljačko-informacijski proces kojim djelujemo na odvijanje prometa [9].

Upravljanjem prometom utječemo na to kako će se promet odvijati, njegovim praćenjem i kontroliranjem možemo planirati kako utjecati na promet. Cilj upravljanja prometom je maksimalno iskorištavanje postojeće infrastrukture, također, osiguranje da se promet odvija pouzdano i sigurno, rješavanje ciljeva zaštite okoliša te osiguravanje ujednačene podjele infrastrukture između korisnika.

Kako bi se promet odvijao što optimalnije potrebno je njime upravljati. Svrha i ciljevi vođenja prometa prema [10] u osnovi jesu:

- utvrđivanje optimalne trase i cestovnog pravca (razina uslužnosti ceste, vrijeme putovanja, udaljenost između polazišta i odredišta putovanja i dr.),
- pronalaženje željenog odredišta,
- određivanje položaja vozača na mreži cesta i prostoru,
- osiguravanje ravnomjernog i sigurnog toka prometa,
- usmjeravanje prometa i željena distribucija prometnog toka na određenoj razini mreže,
- sigurnost u prometu.

## 2.1. Arhitektura ITS-a

ITS arhitektura je opći okvir, odnosno zamisao kako će struktura i/ili ponašanje sustava koji se integriraju biti definirani te je vrlo važna ukoliko želimo efektivno dizajnirati sustav. Arhitektura daje opći predložak (engl. *general framework*) prema kojem se planira, dizajnira i postavlja integrirani sustav u stvarni prometni sustav, također pokazuje ITS komponente i njihove međusobne veze, pruža okvir za planiranje, definiranje, implementaciju i integraciju ITS sustava [9] [11] [12].

Prateći predložak arhitekture omogućeno je sustavima da mogu međusobno djelovati i funkcionirati, omogućen je nesmetan protok informacija između istih, standardizacija opreme, mogućnost nabave novih tehnologija od više dobavljača te maksimalna korist od ranije naučenih lekcija [13].

U razvoju ITS arhitekture postoje određeni koraci koje pratimo kako bi pravilno definirali arhitekturu. Korak koji poduzimamo prvi je definiranje zahtjeva interesnih skupina tj. korisnika, slijedi istraživanje funkcionalnog aspekta kojim se definiraju funkcije koje su prijeko potrebne kako bi se zadovoljili zahtjevi i ostvarile veze [9].

Razne arhitekture mogu se stvoriti od gradske pa do nacionalne razine ili se mogu odnositi samo na određene sektore, važno ih je razvijati prema definiranoj strukturi jer prema [11] tako osiguravamo nastajanje ITS implementacija koje:

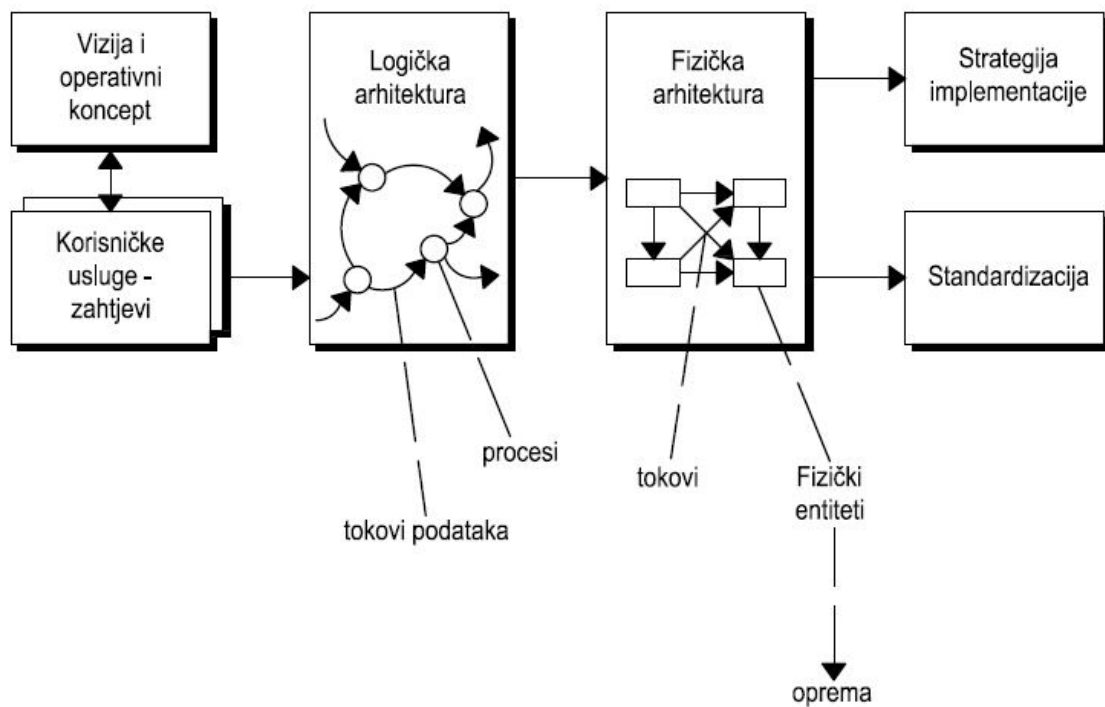
- se mogu planirati na logičan način,
- mogu biti uspješno ujedinjene s drugim sustavima,
- zadovoljavaju željene razine izvedbe,
- imaju željeno ponašanje,
- su lako upravljive,
- su lagane za održavanje,
- je lako proširiti,
- zadovoljavaju korisnička očekivanja.

Zemljama je generalno praktično razvijati vlastite arhitekture u skladu s nacionalnim potrebama, međutim u situacijama kakva je u Europskoj Uniji, gdje postoji tržište i više ili manje slobodno kretanje ljudi i robe u interesu mnogih je postojanje arhitekture na visokoj razini, kako bi se ITS usluge kao što je elektronička naplata cestarine mogle objediniti. Bez arhitekture koja omogućuje pravilan razvoj sustava, taj isti sustav postaje sklon čestim pogreškama, dodatnim troškovima, prekoračenjima vremenskih rokova te je i sigurnost sustava smanjena. Početno ulaganje u razvoj arhitekture sustava trebalo bi biti vraćeno smanjenjem rizika i troškova te vremenskih kazni [14].

### 2.1.1. Logička, fizička i komunikacijska arhitektura

Uz arhitekturu ITS-a koji služi za usmjeravanje razvoja rješenja i projekata, postoje i opći okviri koji razmatraju logičku, fizičku i komunikacijsku arhitekturu koja je prilagođena zahtjevima korisnika i dionika. Oni su potrebni jer kompleksni sustavi koji se razvijaju u sklopu ITS-a se ne mogu razvijati na klasičan način te je potrebno pristupati problemu tako da se gleda rješenje i problematika u cjelini, a ne samo tehnologija koja nam omogućuje rješavanje problema [9].

**Slika 1** prikazuje arhitekturu ITS-a i tijek njenog razvoja uz prikaz značajki i odnosa između logičke i fizičke arhitekture.



**Slika 1** Tok razvoja arhitekture

[izvor: Bošnjak, I.: *Inteligentni transportni sustavi 1*, Sveučilište u Zagrebu, Fakultet prometnih znanosti, Zagreb, 2006.]

Logička arhitekturu prikazuje mnoge razine detalja ITS sustava, a izvodi se iz specifično zadanih korisničkih zahtjeva. Cilj logičke arhitekture je objašnjenje konfiguracije usluge ne zamarajući se načinom na koji će to biti učinjeno. Nevisna je o tehnologijama i implementacijama, a prikazuje različite procese koji su potrebni kako bi pružili korisničku uslugu, odnosno kako bi zadovoljili zahtjeve korisnika [9] [12] [15].

Fizička arhitektura je fizički prikaz važnih ITS sučelja i glavnih komponenti sustava, ona definira i opisuje na koje načine se mogu povezati dijelovi funkcionalne arhitekture tako da tvore fizičke entitete, koji su uz tokove arhitekture glavni elementi fizičke arhitekture. Fizički entiteti mogu biti realizirani fizički i mogu pružati jednu ili više usluga zahtjevanih od korisnika [9] [12].

Odvojeno od fizičke arhitekture može se promatrati komunikacijski aspekt sustava i tada je riječ o komunikacijskoj arhitekturi, kojom je opisano kako i na koje načine se fizički razmjenjuju podaci između sustava i podsustava. Komunikacijska ITS arhitektura je definirana unutar fizičke ITS arhitekture i služi za definiranje oblika komunikacija između određenih entiteta. Postoje 3 osnovna područja gdje primjenjujemo komunikacijsku arhitekturu a to su [16]:

- sigurnost u prometu (engl. *traffic safety*)
- prometna učinkovitost (engl. *traffic efficiency*)
- usluge dodane vrijednosti (engl. *value added services*)

### **2.1.2. Načela dobre arhitekture**

Prema [9] postoji nekoliko načela koja definiraju "dobru arhitekturu", a to su:

1. konzistentnost
2. ortogonalnost
3. umjesnost
4. transparentnost
5. općenitost
6. otvorenost
7. kompletnost

Gdje je značenje načela konzistentnosti to da je uz parcijalno poznavanje sustava moguće pretpostaviti ostali dio sustava. Načelo ortogonalnosti zahtijeva razdvajanje međusobno neovisnih funkcija u specifikaciji. Načelo umjesnosti znači da uporabne funkcije neće biti sadržane u dobroj arhitekturi. Načelo transparentnosti podrazumijeva da su funkcije sustava u potpunosti jasne korisnicima. Općenitost znači da se funkcije mogu koristiti više puta. Otvorenost znači da postoji mogućnost drugačijeg korištenja sustava. Načelo kompletnosti podrazumijeva visoku razinu zadovoljenja korisničkih potreba uz zadana ograničenja [9].

## 2.2. Funkcionalna područja i usluge ITS-a

Funkcionalna područja i usluge se grade na postojećim američkim, europskim, japanskim i drugim međunarodnim i nacionalnim taksonomijama, a mogu poslužiti i kao zajednička opisna osnova za usporedbu tih istih taksonomija kao i svih ostalih koje su u razvoju diljem svijeta [14].

Prema međunarodnoj organizaciji za normizaciju ISO (engl. *International Organization for Standardization*) [17] definirano je 11 funkcionalnih područja ITS-a:

1. informiranje putnika (engl. *traveler information*),
2. upravljanje prometom i operacijama (engl. *traffic management and operations*),
3. usluge u vozilima (engl. *vehicles services*),
4. prijevoz tereta (engl. *freight transport*),
5. javni prijevoz (engl. *public transport*),
6. izvanredna stanja (engl. *emergency*),
7. elektronička plaćanja u transportu (engl. *transport related electronic payment*),
8. osobna sigurnost u cestovnom prijevozu (engl. *road transport related personal safety*),
9. nadzor vremenskih uvjeta i okoliša (engl. *weather and environmental conditions monitoring*),
10. upravljanje i koordinacija odziva u slučaju nesreća (engl. *disaster response management and coordination*),
11. nacionalna sigurnost (engl. *national security*).

Kako bi razvili dosljednu referentnu arhitekturu, i kako bi uspostavili veze i međusobnu ovisnost različitih ITS usluga, korisno je prvo odrediti koje su temeljne ITS usluge. Svrha međunarodnog standarda je ta da indentificira ITS usluge i područja unutar kojih se te skupine usluga nalaze [14].

Svih 11 prethodno navednih funkcionalnih područja u sebi sadrže usluge koje su međusobno povezane, koja funkcionalna područja sadrže koje usluge prikazano je u **tablici 1**.

**Tablica 1 Funkcionalna područja i njihove usluge**

Funkcionalno područje	Usluge
1. Informiranje putnika	1.1 predputno informiranje (engl. <i>pre-trip information</i> ) 1.2 putno informiranje (engl. <i>on-trip information</i> ) 1.3 usluge putnog informiranja (engl. <i>travel services information</i> ) 1.4 predputni rutni vodič i navigacija (engl. <i>route guidance and navigation pre-trip</i> ) 1.5 putni rutni vodič i navigacija (engl. <i>route guidance and navigation on-trip</i> ) 1.6 podrška planiranju putovanja (engl. <i>trip planning support</i> )
2. Upravljanje prometom i operacijama	2.1 kontrola i upravljanje prometom (engl. <i>traffic management and control</i> ) 2.2 upravljanje incidnetima u prometu (engl. <i>transport-related incidnet managment</i> ) 2.3 upravljanje potražnjom (engl. <i>demand management</i> ) 2.4 upravljanje održavanja prometne infrastrukture (engl. <i>transport infrastructure maintenance managment</i> ) 2.5 provođenje regulacije prometa (engl. <i>policing/enforcing traffic regulations</i> )
3. Usluge u vozilima	3.1 poboljšanje vidljivosti u prometu (engl. <i>transport related vision enhancement</i> ) 3.2 automatizirane operacije u vozilima (engl. <i>automated vehicle operation</i> ) 3.3 izbjegavanje sudara (engl. <i>collision avoidance</i> ) 3.4 sigurnosna pripravnost (engl. <i>safety readines</i> ) 3.5 aktiviranje mjera prije sudara (engl. <i>pre-crash restraint deployment</i> )
4. Prijevoz tereta	4.1 odobrenje za komercijalna vozila (engl. <i>commercial vehicle pre-clearance</i> ) 4.2 administrativni procesi kod komercijalnih vozila (engl. <i>commercial vehicle administrative processes</i> ) 4.3 automatizirana cestovna inspekcija sigurnosti (engl. <i>automated roadside safety inspection</i> ) 4.4 nadzor sigurnosti u komercijalnim vozilima (engl. <i>commercial vehicle on-board safety monitoring</i> ) 4.5 upravljanje teretnim voznim parkom (engl. <i>freight transport fleet management</i> ) 4.6 intermodalno upravljanje informacijama (engl. <i>intermodal information managment</i> ) 4.7 upravljanje i kontrola intermodalnih centara (engl. <i>managment and control of intermodal centers</i> ) 4.8 upravljanje opasnim teretom (engl. <i>managment of dangerous freight</i> )
5. Javni prijevoz	5.1 Upravljanje javnim prijevozom (engl. <i>public transport managment</i> ) 5.2 dijeljeni javni prijevoz i prijevoz ovisan o potražnji (engl. <i>demand responsive and shared public transport</i> )

6. Izvanredna stanja	6.1 obavijesti o izvanrednim stanjima u prometu vezane uz osobnu sigurnost (engl. <i>transport related emergency notification and personal security</i> ) 6.2 upravljanje vozilima žurnih službi (engl. <i>emergency vehicle management</i> ) 6.3 opasni tereti i obavijesti o incidentima (engl. <i>hazardous materials and incident notification</i> ) 6.4 vraćanje vozila nakon krađe (engl. <i>after theft vehicle recovery</i> ) 6.5 podaci vozila žurnih službi (engl. <i>emergency vehicle data</i> )
7. Elektronička plaćanja u transportu	7.1 elektroničke transakcije u prometu (engl. <i>transport related electronic financial transactions</i> ) 7.2 integracija usluga elektroničkog plaćanja u prometu (engl. <i>integration of transport related electronic payment services</i> )
8. Osobna sigurnost u cestovnom prijevozu	8.1 sigurnost u javnom prijevozu (engl. <i>public travel security</i> ) 8.2 poboljšanje sigurnosti za "ranjive" korisnike prometnica (engl. <i>safety enhancements for vulnerable road users</i> ) 8.3 poboljšanje sigurnosti za korisnike prometnica s poteškoćama (engl. <i>safety enhancement for disabled road users</i> ) 8.4 sigurnost za pješake koristeći inteligentna raskrižja i prometnice (engl. <i>safety provisions for pedestrians using intelligent junctions and links</i> )
9. Nadzor vremenskih uvjeta i okoliša	9.1 nadzor vremenskih uvjeta (engl. <i>weather monitoring</i> ) 9.2 nadzor stanja okoliša (engl. <i>environmental conditions monitoring</i> )
10. Upravljanje i koordinacija odziva u slučaju nesreća	10.1 upravljanje podacima o nesrećama (engl. <i>disaster data management</i> ) 10.2 upravljanje odzivom na nesreće (engl. <i>disaster response management</i> ) 10.3 koordinacija žurnih službi (engl. <i>coordination with emergency agencies</i> )
11. Nacionalna sigurnost	11.1 nadzor i kontrola "sumnjivih" vozila (engl. <i>monitoring and control of suspicious vehicles</i> ) 11.2 nadzor komunalnih i komunikacijskih vodova (engl. <i>utility or pipeline monitoring</i> )

[izvor: ISO 14813-1:2007 – Intelligent transport systems – Reference Model Architecture for the ITS sector – Part 1: ITS Service Domains, Service Groups and Services, 2007]

### 3. UPRAVLJAČKE STRATEGIJE NA SEMAFORIZIRANIM RASKRIŽJIMA

Jedna od posljedica industrijske revolucije i širenja gradskih sredina je i potreba za regulacijom prometa. Sve veći broj stanovnika u gradskim sredinama značio je i sve veći broj sudionika u prometu te je potreba za regulacijom ponašanja istih postala jedna od glavnih briga. Podrijetlo kontroliranja prometa ručno upravljanim svjetlosnim signalima datira iz 1868. u Londonu [18] kada možemo reći da se javlja jedno od rješenja, odnosno javlja se prva telematička naprava, koja uz daljnji razvoj je nama danas poznata kao semafor.

Prema [19] uređaji za upravljanje prometom su svi znakovi, signali, oznake i drugi uređaji koji se koriste za regulaciju, upozoravanje ili usmjeravanje prometa. Govoreći konkretno za semafore, to su uređaji koji u osnovi svjetlosnim signalima zaustavljaju ili propuštaju promet. U prometu u gradskoj sredini uređaji za upravljanje prometom su najvidljiviji elementi za upravljanje prometom, a glavna uloga im je nametanje odluke kada se možemo kretati a kada trebamo stati [20].

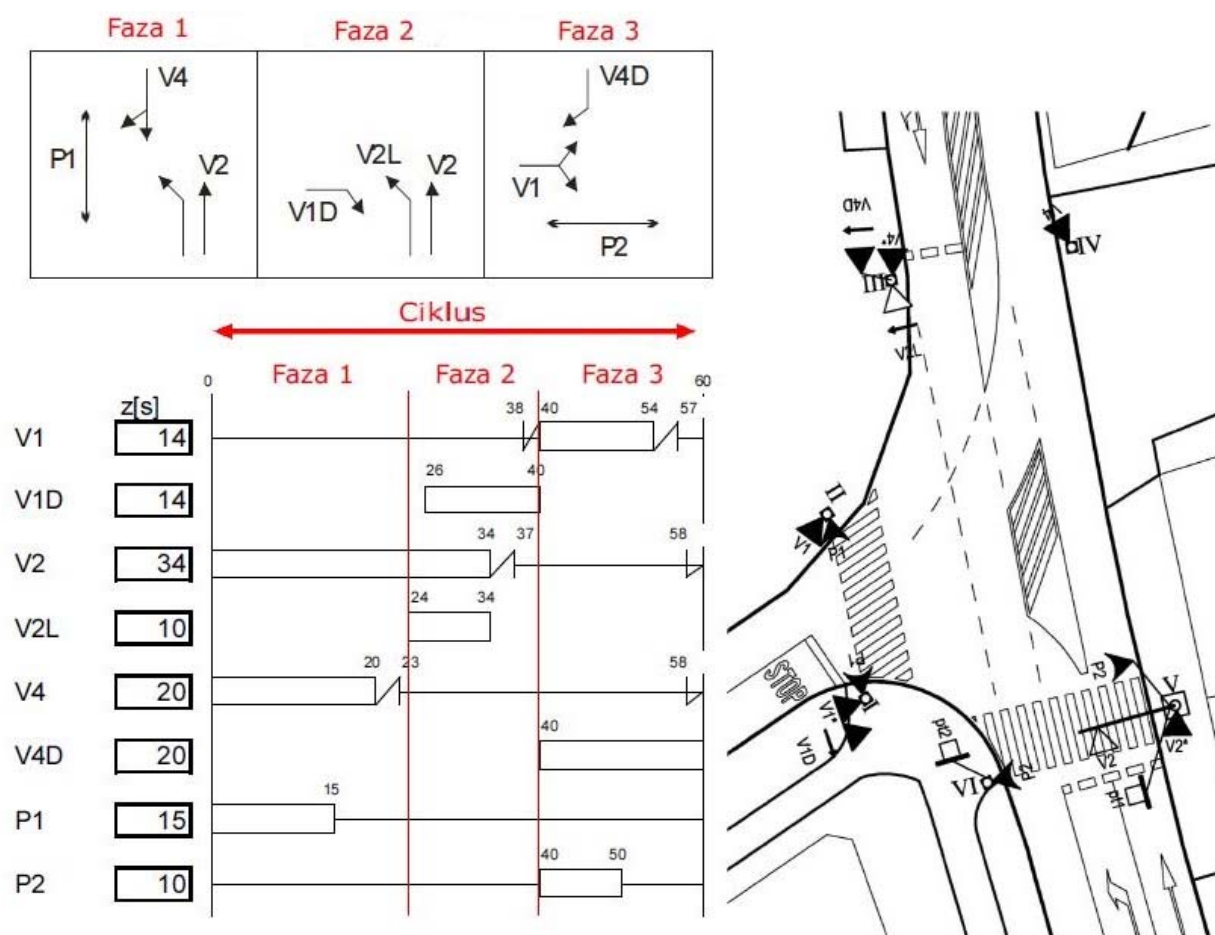
Iako su izvorno dizajnirani kao samostalni uređaji, gdje svaki od njih ima vlastiti raspored izmjene plana, semafori su postepeno razvijeni u složenije, nekad i umrežene sustave. Današnji semafori mogu pohranjivati više vremenskih planova, integrirati različite podatke iz senzora, čak i komunicirati s drugim križanjima kako bi što bolje koordinirali promet [21].

Kontrola prometnih signala pokazala se kao jedna od najisplativijih mjera za rješavanje problema koji nastaju procesom širenja grada i zagušenjima prometa što iziskuje potreba za radom postojećih prometnih sustava s maksimalnom učinkovitošću. Kontrolu prometa prilagođavanjem i koordiniranjem prometne signalizacije na raskrižjima, nadzor nadgledanjem stanja u prometu koristeći kamere i detektore daje upraviteljima prometa mogućnost da smanje broj i vrijeme zaustavljanja i ukupno vrijeme kašnjenja vozila, odnosno omogućuju postizanje maksimalnog propusnog toka. Razina kompleksnosti kontrole prometnih signala varira, od sustava koji su jednostavniji jer koriste povijesne podatke za postavljanje fiksnih vremenskih planova do prilagodljive kontrole signalnih planova koja kontrolira s obzirom na stvarno-vremensko stanje [22].



### 3.1. Osnovni model upravljanja prometom

Na klasičnom raskrižju, prilikom korištenja jednog prometnog toka kretanje poprečnog toka je obustavljeno, kako bi obustavljanje prometa bilo što kraće i sigurnije, promet je potrebno regulirati. U gradskim sredinama upravljanje prometom se u osnovi izvodi prometnim svjetlima, odnosno semaforima, na taj način regulacija prometa na raskrižjima je vrlo učinkovita te je sigurnost znatno povećana. Semaforizirana raskrižja imaju svoje signalne planove, što znači da imaju svoj plan izmjene signala, odnosno trajanja svjetlosnih pojmova (crveno, žuto i zeleno svjetlo), trajanje jednog signalnog plana nazivamo ciklus. Ciklus se sastoji od faza koje označavaju da pojedini prometni tokovi imaju istovremeno slobodan prolaz. U signalni plan spada i zaštitno međuvrijeme, to je vrijeme između dvije konfliktne signalne skupine koje slijede uzastopno [23] [24].



**Slika 2** Signalni plan raskrižja

[izvor: Prezentacije s predavanja: Zdenko Lanović, Signali plan, Fakultet Prometnih Znanosti, Zagreb]

Na **slici 2** prikazan je signalni plan za "T" raskrižje, gdje možemo vidjeti slijed i duljinu trajanja faza. Navedene su signalne grupe (V1, V1D, V2, itd.), ravne linije predstavljaju crveno svjetlo, pravokutnici zeleno svjetlo a crveno-žuto svjetlo je označeno kosom linijom.

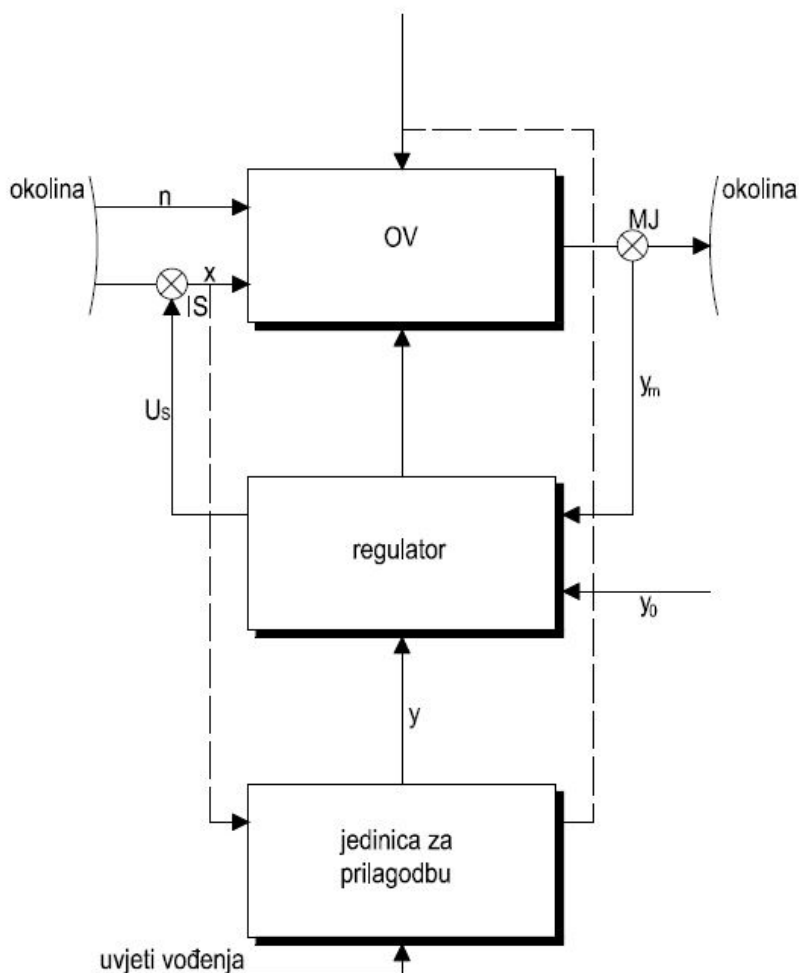
Kod klasičnih sustava trajanje i slijed pojedinih faza te ciklusa su fiksni, odnosno unaprijed su programirani, zelene i crvene faze za svaki ciklus su konstantne, ovakav jednostavan način rada ima loše performanse kod gustog prometa [25]. Kod fiksno programiranih uređaja prednost je jednostavnost održavanja i manja cijena ali signalni plan je predeterminiran i ne mijenja se bez obzira na trenutno stanje u prometu dok kod adaptivnih uređaja to nije slučaj te se njihovi signalni planovi mijenjaju s obzirom na trenutno stanje.

Dok neki sustavi upravljaju cijelom prometnom mrežom kontrolirajući pritom nekoliko križanja neki kontroliraju samo jedno. Kod upravljanja prometom semaforima na jednom raskrižju možemo sustave upravljanja podijeliti na tri glavne vrste pomoću kojih to činimo. Sustavi koji koriste fiksne vremenske cikluse za kontrolu prometa. Što znači da je jedna faza aktivna sve dok sustav ne učini drugu fazu aktivnom, trajanje faza je fiksno. Nakon što sve faze budu aktivne, postupak se ponavlja. Druga vrsta sustava su djelomično upravljani sustavi koji koriste senzore na sporednim cestama na križanju. Na glavnoj prometnici traje faza zelenog svjetla dok senzori sa sporedne ceste ne detektiraju vozilo koji dolazi prema raskrižju, aktivira se ciklus koji dopušta prolaz vozila sa sporedne ceste sve dok tamo više nema vozila ili dok ne dostigne maksimalno određeno vrijeme. Nakon toga kreće ciklus gdje glavna cesta ponovno ima zelenu fazu. Treći odnosno potpuno upravljani sustavi slični su djelomično upravljanim sustavima s razlikom što oni koriste senzore za svaku cestu na raskrižju. Gdje se faze unutar ciklusa mijenjaju na takav način kakav zahtjeva trenutna prometna situacija. Djelomično i potpuno upravljani sustavi općenito bolje reagiraju na prometne tokove u odnosu na fiksne, razlog tomu je to što fiksni sustavi ne analiziraju promet na raskrižju i ne prilagođavaju se okruženju kao što to čine djelomično i potpuno upravljani sustavi [8].

## 3.2. Adaptivno upravljanje prometom

Adaptirati, odnosno prilagoditi se, označava mogućnost promjene ponašanja, jednu vrstu odgovora na novonastalu situaciju, tj. prilagodba na vanjske utjecaje i događaje unutar sustava. Adaptivni sustav je takav sustav koji može promijeniti svoje ponašanje kako bi reagirao na promjene u dinamičnom okruženju [26]. Osnovni prikaz adaptivnog sustava prikazan je na slici 3, gdje je [3]:

- OV – objekt vođenja,
- IS – izvršna sprava
- MJ – mjerni uređaj
- U – upravljački signal
- $y$  – željene vrijednosti vođene veličine
- $y_m$  – mjerene vrijednosti vođene veličine



Slika 3 Osnovni prikaz adaptivnog sustava

[izvor: Bošnjak, I.: *Inteligentni transportni sustavi 1*, Sveučilište u Zagrebu, Fakultet prometnih znanosti, Zagreb, 2006.]

S obzirom na to da u gradskim sredinama ne postoji uvijek mogućnost fizičke promjene postojeće infrastrukture kako bi se povećao kapacitet prometnice došlo je do potrebe za drugačijim pristupom u rješavanju problema koji nastaju odvijanjem prometa. Primjenjivanjem informacijsko-komunikacijskih tehnologija ostvarujemo nove mogućnosti utjecanja na prometni tok čime održavamo zadovoljavajuću razinu uslužnosti na prometnoj mreži. Adaptivno upravljanje prometom spada u ITS rješenja koje izravnim djelovanjem na signalni ciklus, odnosno stalno prilagođava redoslijeda odlučivanja i trajanja ciklusa stvarnovremenskoj situaciji. Pomoću kamera, senzora, detektora, itd., prikupljaju se podaci o novonastalim uvjetima i potrebama koji nastaju na prometnoj mreži, ti podaci se obrađuju te se implementiraju potrebne promjene, sustav se prilagođava i time se izbjegavaju nepotrebna zaustavljanja i prekidanja prometnih tokova koja su česti slučaj kada su raskrižja regulirana neadaptivno i nekoordinirano [3] [27].

Prekidi i nepotrebna zaustavljanja prometnih tokova učestala su pojava na prometnim mrežama gdje je promet reguliran klasičnim odnosno neadaptivnim sustavima. U dinamičnom sustavu potrebe korisnika prometnog toka se neprestano mijenjaju, iz toga razloga potrebno je adaptivno vođenje prometnog toka, odnosno prilagođavanje vremena trajanja i redoslijeda određenih ciklusa kako bi se povećala propusna moć prometnog toka. Takav jedan sustav iako kompleksniji bitno je učinkovitiji od klasičnih sustava s predefiniranim načinom rada, iz razloga što se signalni planovi mijenjaju, odnosno prilagođavaju na temelju stvarne potražnje prometa, nisu unaprijed određeni po rasporedu koji je temeljen na prethodno ispitanim prometnim uvjetima. Učinkovitost adaptivnih sustava može se mjeriti kroz smanjenje ukupnih vremenskih gubitaka, te ostalim pokazateljima kvalitete sustava kao što su veličina reda čekanja, prosječno vrijeme čekanja, rizik od nastajanja prometnih nesreća, itd. [3] [28].

Kombiniranjem adaptivnog upravljanja prometnim tokom s drugim ITS rješenjima kao što su predputno i putno informiranje vozača, upravljanje potražnjom, upravljanje javnim prijevozom, upravljanje žurnim službama postizemo dodatne pozitivne učinke. Kako bi se koristi adaptivnog vođenja prometa dodatno povećali, kao što možemo vidjeti u **tablici 2** gdje su vidljivi rezultati učinaka, sustav adaptivnog vođenja prometa moguće je kombinirati s nekim drugim ITS rješenjima [3].

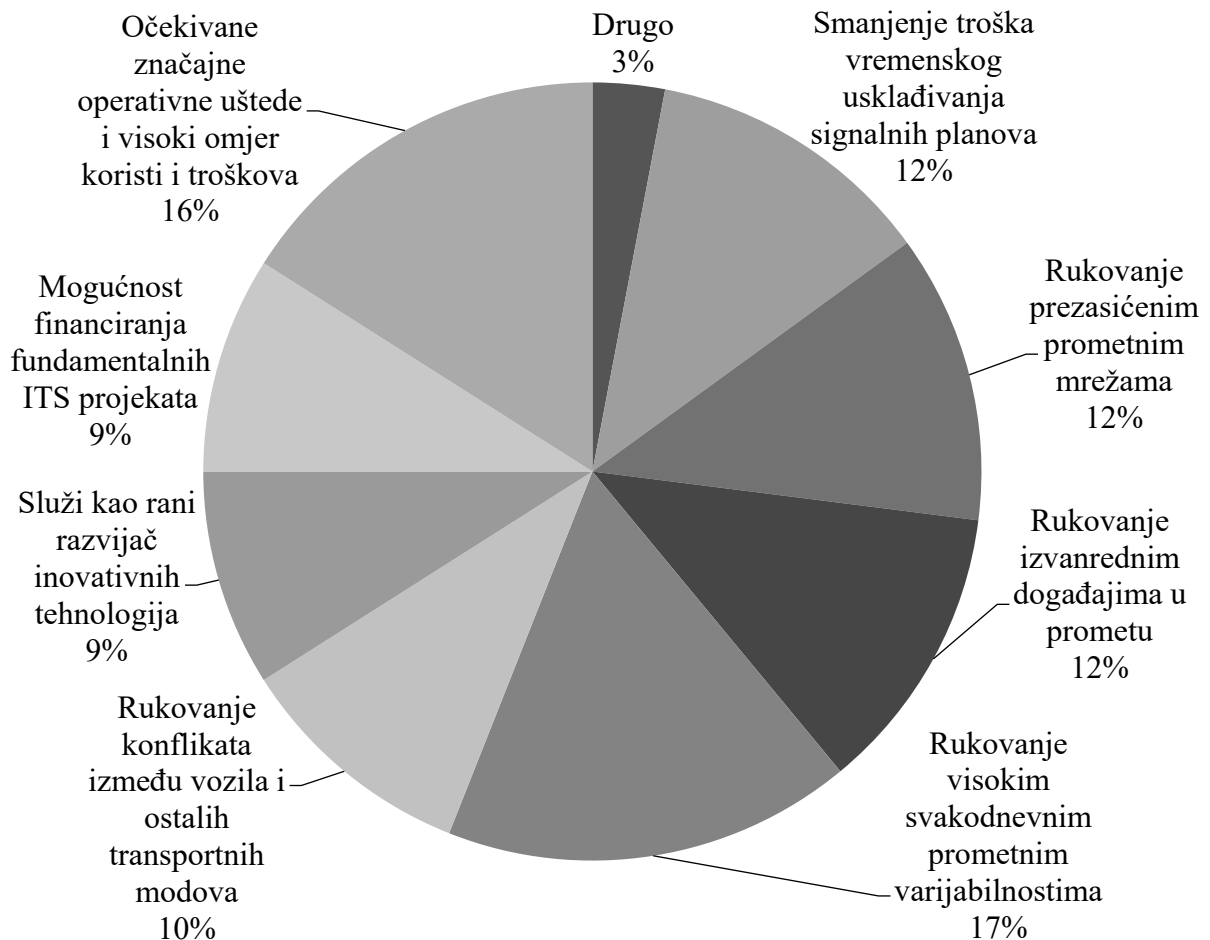
**Tablica 2 Koristi integracije ITS rješenja**

	Adaptivno vođenje prometa (ATC)	ATC + informiranje vozača (DRI)	ATC+DRI+upravljanje potražnjom (DM)
uštede vremena za osobna vozila	do 20%	do 22% (na čitavom putu)	>22%
uštede vremena javnog prijevoza	do 15%	do 20%	>20%
smanjenje onečišćenja okoliša	5-7% lokalno	do 18% lokalno do 8% globalno	do 21% lokalno do 11% globalno

[izvor: Bošnjak, I.: *Inteligentni transportni sustavi 1, Sveučilište u Zagrebu, Fakultet prometnih znanosti, Zagreb, 2006.*]

Mnogo je razloga zašto se odlučiti za implementaciju adaptivnih sustava upravljanja prometom, dok je jedan od glavnih razloga prema istraživanju sustav kontrole koji će se moći nositi s velikim varijacijama u dnevnom prometu neki od razloga mogu biti puno jednostavniji, kao npr. smanjenje troška. Neke od drugih razloga prema [29] možemo vidjeti u grafu 1.

**Graf 1 Glavni razlozi implementiranja sustava adaptivnog upravljanja prometom**



[izvor: Stevanovic, A.: Adaptive Traffic Control Systems: Domestic and Foreign State of Practice A Synthesis of Highway Practice NATIONAL COOPERATIVE HIGHWAY RESEARCH PROGRAM, 2010.]

Pregled najčešće korištenih adaptivnih sustava upravljanja prometom pokazuje da ti različiti sustavi koriste u suštini slične strategije kako bi se nosili s oscilacijama na prometnim mrežama, odnosno s promjenama u raspodjeli i potražnji prometa na istim. Iako slični svaki sustav se ipak razlikuje od drugih i jedino direktnom usporedom algoritama i adaptivne logike moguće ih je usprediti. Također sredine gdje se sustavi implementiraju su jedinstvene i sama evaluacija istih je skupa i stoga nepraktična, zbog tih razloga vrlo je malo studija koji pružaju dokaze da je jedan sustav adaptivnog upravljanja prometom bolji od drugog [29].

Sustavi adaptivnog upravljanja prometom koji su implementirani u mnogim zemljama uspješno funkcioniraju, neki od njih su RHODES (engl. *Real Time Hierarchical Optimized Effective System*), OPAC (engl. *Optimization Policies for Adaptive Control*), itd., dok dva sustava koja su implementirana najčešće su SCATS (engl. *Sydney Coordinated Adaptive Traffic System*) i SCOOT (engl. *Split Cycle and Offset Optimization Technique*), [30].

RHODES (engl. *Real-Time Hierarchical Optimized Effective System*) je sustav upravljanja koji se prilagođava stvarno-vremenskoj situaciji u prometu s hijerarhijskom strukturom. RHODES ulazne podatke prima i obrađuje od različitih detektora i na temelju tih ulaznih podataka stvara se slika o najizglednijim prometnim uvjetima generira optimizirane signalne planove [31].

OPAC (engl. *Optimization Policies for Adaptive Control*) je distribuirana upravljačka strategija koja sadrži algoritam dinamičke optimizacije koji planira vremena signalnih planova tako da ukupna vremena kašnjenja i zaustavljanja na raskrižjima bude minimalna [31].

SCATS (engl. *Sydney Coordinated Adaptive Traffic System*) je gradski sustav za kontrolu prometa koji je sastavljen od hardvera, softvera i jedinstvene logike kontrole prometa u stvarnom vremenu. Djeluje na način da podešava vremena signalnih planova kako bi se prilagodio na varijacije i prometne potražnje na prometnoj mreži. SCATS upravlja skupinama raskrižja koji se nazivaju „podsustavi“, gdje se svaki taj podsustav uobičajeno sastoji od jednog do deset raskrižja, a jedno od tih raskrižja je označeno kao upravljačko. Prilagođavajući i koordinirajući raskrižja unutar podsustava ostvaruje se podjela prometa na glavnim cestama u manje grupe vozila kojima je omogućeno dovoljno vremena da prođu kroz sustav [29].

SCOOT (engl. *Split Cycle and Offset Optimization Technique*) je sustav za kontrolu koji optimizira promet korištenjem malih i redovitih promjena signalnih planova kako bi se izbjegli veći poremećaji na prometnoj mreži. Usredotočen na prilagodbu signalnog plana s obzirom na podatke koji su prikupljeni sensorima na prometnicama odgovara na fluktuacije u prometu, poput onih koji se redovito dešavaju tijekom putovanja. Učinkovitost SCOOT-a značajno se oslanja na podatke o stanju u prometu koje dobiva od strane detektora, Sustav zahtijeva velik broj detektora smještenih na unaprijed određenim mjestima [5] [29] [31].

### 3.3. Strategije dodjele prioriteta

Dodjeljivanje prioriteta tranzitnim vozilima je mjera inteligentnih transportnih sustava koja mijenja inače „normalan“ rad signalnog plana na taj način da ga bolje prilagodi tranzitnim vozilima [32]. Prioritet na raskrižjima možemo dodjeljivati vozilima žurnih službi, vozilima javnog gradskog prijevoza (JGP), vozilima za prijevoz specijalnog ili opasnog tereta itd.. Najčešće se strategije dodjele prioriteta koriste i razvijaju kako bi optimizirali promet JGP-a. Loša pouzdanost usluge povećava vrijeme čekanja, gužve, operativne troškove a korisnici smatraju to jednim od najvećih izvora nezadovoljstva, tako je poboljšanje točnosti i redovitosti odnosno pouzdanosti usluge postao jedan od vodećih problema tranzitne industrije [33].

Prema [33] strategije dodjele prometa mogu biti kategorizirane u tri skupine; skupinu aktivnih i pasivnih prioriteta, druga skupina je podjeljena na davanje potpunog, parcijalnog i relativnog prioriteta, dok je treća skupina izbor između uvjetnog i bezuvjetnog prioriteta.

- Podjela na aktivne i pasivne prioriteta znači da kod aktivnog prioriteta sustav detektira i reagira na vozila u realnom vremenu dok su kod pasivnog uključene mjere povoljnog utjecanja na segmente u signalnim planovima koji budu izvršeni u određena vremena.
- Kod potpunog prioriteta sustav daje tranzitnim vozilima pravo prolaska bez odgode (engl. *zero-delay*). Najmanje disruptivne taktike davanja prioriteta djeluju kod parcijalnog davanja prioriteta odnosno taktike koje imaju minimalan utjecaj na odvijanje prometa, što znači da se primjenjuje taktike koje uključuju produljenje faze zelenog svjetla i raniji početak zelene faze i to obično s prilično striktnim ograničenjima na dužinu vremena produljenja.
- Bezuvjetan prioritet daje svakom tranzitnom vozilu prioritet dok kod uvjetovnog prioriteta da vozilo dobiva prioritet samo u slučaju da kasni, dobar primjer bi bilo kašnjenje vozila JGP-a.

Strategije dodjele prioriteta odavno su prepoznate kao potencijalno rješenje za poboljšanje performansi u prometu za tranzitna vozila, te strategije dovode poboljšanje pouzdanosti rasporeda, smanjenja operativnih troškova i većeg broja korisnika. U početku sustav dodjele prioriteta se prvenstveno koristio kao sredstvo čiji je cilj povećati brzinu prolaska kroz prometnu mrežu, što zauzvrat smanjuje operativne troškove i vrijeme koje putnik provede u vožnji, iz toga razloga koristio se bezuvjetni prioritet kako bi se to ostvarilo. Smanjenjem kašnjenja na križanjima, koje je ujedno najveći faktor slučajnosti, pouzdanost usluge je porasla [33] [34].

Najčešća podjela strategija dodjele prioriteta je podjela na aktivne, pasivne i adaptivne strategije.

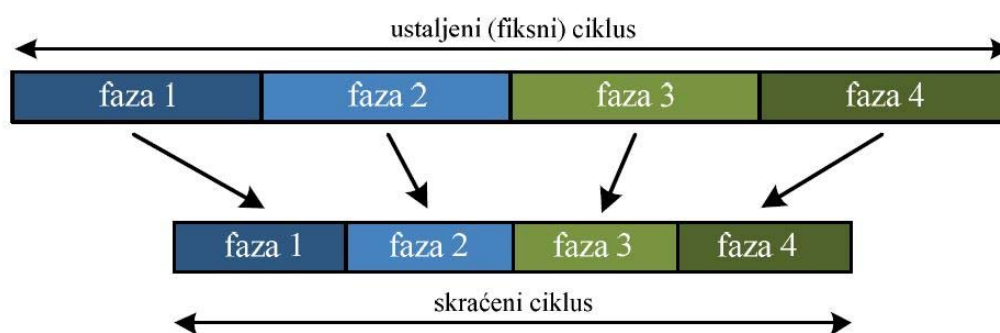
### 3.3.1. Pasivne strategije

Koristeći podatke iz prethodno obavljenih analiza tranzitnih ruta i potražnja tranzitnih ruta, pasivne strategije se razvijaju oslanjajući se na te iste podatke kako bi se razvili određeni signalni planovi. Kod ovakvih strategija ne postoji potreba za sustavima koji bi nadzirali odvijanje prometa, isto tako ne zahtijevaju sustave detekcije tranzitnih vozila s obzirom da su signalni planovi preodređeni kako bi pružili pogodnosti za tranzitna vozila. Oslanjaju se na smanjenje signalnog ciklusa ili izmjenom redoslijeda pojedinih faza u namjeni da prioritiziraju tranzitna vozila dajući im tako češće zeleno svjetlo kako bi vozila uz što manje smetnje prošla svoju rutu [27] [32].

Takve metode uobičajeno pretpostavljaju dolazak tranzitnog vozila, pretpostavka je temeljena na prethodno dobivenim podacima te mogu biti učinkovite u okruženju gdje je potražnja za npr. autobusom velika. Grad London je primjer gdje pasivne strategije dodjele prioriteta imaju bolje rezultate, kako bi stavili stvari u perspektivu važno je napomenuti da broj autobusa nadilazi 60 po satu [7].

Neke od najčešće korištenih pasivnih strategija su smanjenje trajanja ciklusa i razdvajanje faza, navedene su detaljnije objašnjene u nastavku.

Uobičajeno je da duže trajanje ciklusa omogućuje maksimalni protok vozila kroz križanje jer se smanjuje ukupno izgubljeno vrijeme, međutim smanjenje trajanja ciklusa (engl. *cycle length adjustment*) smanjuje vrijeme u mirovanju kako za tranzitna vozila tako i za ostala vozila. Također, vrijeme čekanja vozila smanjeno je za vrijeme smanjenja cijelog ciklusa. Za razliku od nekih drugih strategija ova ne „kažnjava“ vozila na poprečnim ulicama tako da je ovakva strategija efektivna i bez tranzitnih vozila. Beneficije koje donosi skraćeni ciklus treba usporediti s gubitkom kapaciteta dužinom prometnice [7] [27] [32].

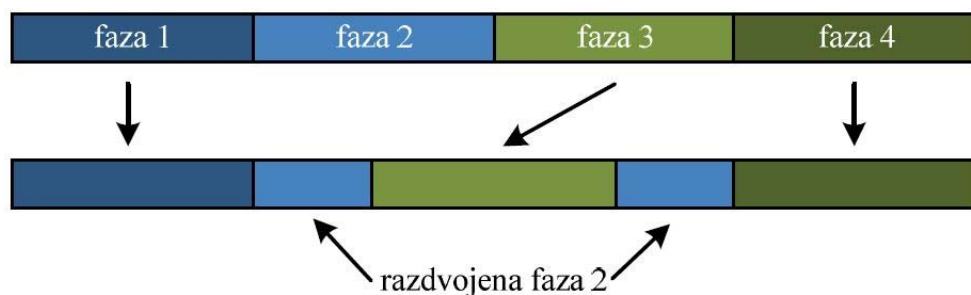


Slika 4 Grafički prikaz strategije smanjenja trajanja ciklusa

[izvor: Vujić, M.: Sustav dinamičkih prioriteta za vozila javnog gradskog prijevoza u automatskom upravljanju prometom – doktorska disertacija, Fakultet prometnih znanosti, Zagreb, 2013.]



Strategija razdvajanja faza (engl. *splitting phases*) djeluje tako da se faza kada je svjetlo zeleno razdvoji u više manjih kraćih faza u jednom ciklusu. Na ovaj način ova strategija može smanjiti kašnjenje vozila ponavljajući prioritetnu fazu bez mijenjanja dužine trajanja ciklusa, međutim može povećati ukupuno izgubljeno vrijeme zbog česte tranzicije između signalnih faza. Iz razloga što se trajanje ciklusa ne mora mijenjati ova strategija je pogodna za raskrižja gdje dodjela prioriteta ne smije utejcati na protok ostalog prometa. Kod ove strategije postoji i mogućnost da neće biti vremena za pješake odnosno za njihov prijelaz preko pješačkog prijelaza [7] [27].



**Slika 5** Grafički prikaz strategije razdvajanja ciklusa

[izvor: Vujić, M.: Sustav dinamičkih prioriteta za vozila javnog gradskog prijevoza u automatskom upravljanju prometom – doktorska disertacija, Fakultet prometnih znanosti, Zagreb, 2013.]

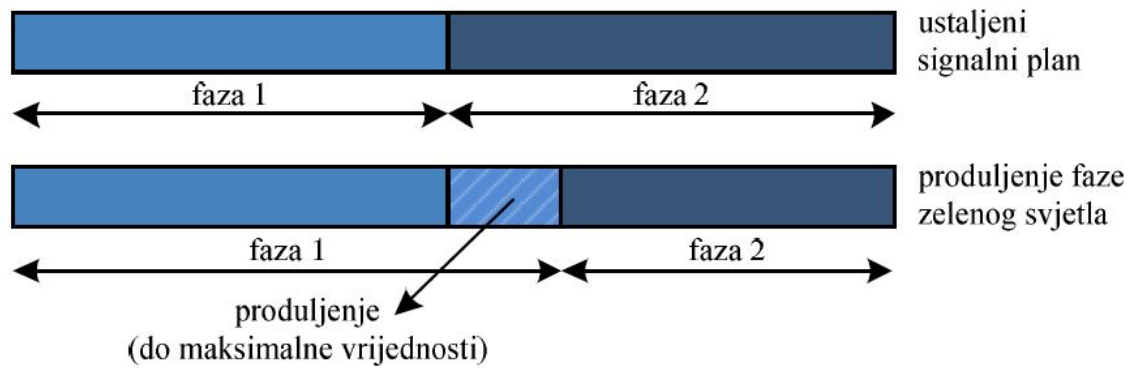
### 3.3.2. Aktivne strategije

U odnosu na pasivne strategije, sustavi aktivnih strategija koriste prednosti detekcije, odnosno identifikacije tranzitnih vozila koje nailaze na raskrižje pomoću sustava detekcije, ovaj način dodjele prioriteta trenutno je najčešće korišten. Nakon detekcije određuje koju od aktivnih strategija će upotrijebiti za preodređeno ili promjenjivo trajanje kako bi vozilo prošlo svoju rutu što je moguće efikasnije, da vrijeme čekanja tranzitnog vozila bude što je moguće kraće [7].

Postoje četiri vrste aktivnih strategija dodjele prioriteta [32]:

- produljenje trajanja zelenog svjetla (engl. green extension),
- skraćivanje crvenog/ranije zeleno svjetlo,
- specijalna faza za autobusna vozila,
- selektivna strategija.

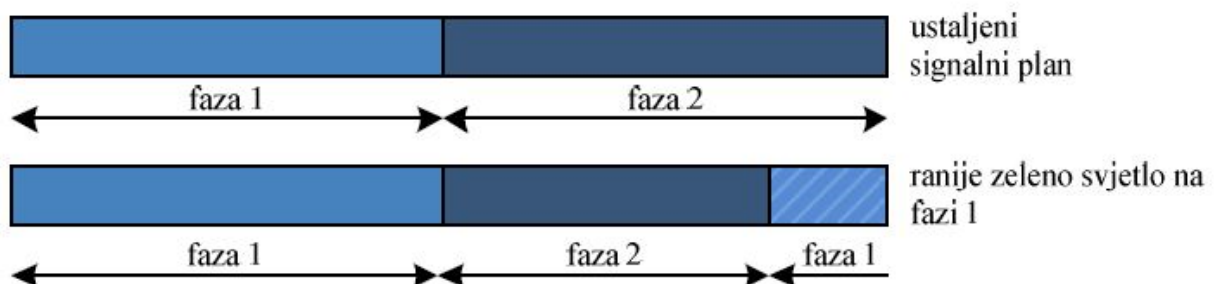
Strategija produljenja trajanja zelenog svjetla funkcioniše na način da se prilikom detekcije tranzitnog vozila koje prilazi raskrižju na kojem je trenutno zeleno svjetlo, produljuje zelena faza kako bi vozilo bez zaustavljanja i čekanja prošlo raskrižjem. Uobičajeno zeleno svjetlo se produljuje sve dok tranzitno vozilo ne prođe raskrižje ili sve dok trajanje zelenog svjetla ne dosegne svoj preodređeni maksimum, maksimum je potreban i postoji iz razloga kako bi se prekid ostalih privoza na raskrižju kontrolirao [32].



**Slika 6** Grafički prikaz strategije produljenja zelenog svjetla

[izvor: Vujić, M.: Sustav dinamičkih prioriteta za vozila javnog gradskog prijevoza u automatskom upravljanju prometom – doktorska disertacija, Fakultet prometnih znanosti, Zagreb, 2013.]

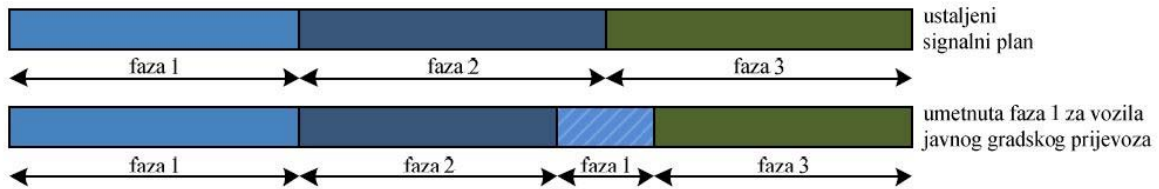
Suprotno strategiji zelenog svjetla, strategija skraćivanja crvenog/ranije zeleno svjetlo pokreće se kada sustav detektira tranzitno vozilo koje prilazi raskrižju na kojem je trenutno svjetlo crveno. Prilikom detekcije vozila ranije se pali zeleno svjetlo što omogućuje nesmetan prolaz kroz raskrižje, paljenje zelenog svjetla postiže se ili skraćivanjem ili preskakanje svih ili određenih faza [32].



**Slika 7** Grafički prikaz strategije skraćivanja crvenog/ ranije zeleno svjetlo

[izvor: Vujić, M.: Sustav dinamičkih prioriteta za vozila javnog gradskog prijevoza u automatskom upravljanju prometom – doktorska disertacija, Fakultet prometnih znanosti, Zagreb, 2013.]

Specijalne faze za autobusna vozila je strategija kojom se umeće kratka faza između postojećih faza, ta faza se koristi samo za vozila javnog gradskog prijevoza. Ova strategija može se upotrijebiti samo kada u signalnom planu postoje više od dvije faze [32].



**Slika 8** Grafički prikaz strategije specijalne faze za autobusna vozila

[izvor: Vujić, M.: Sustav dinamičkih prioriteta za vozila javnog gradskog prijevoza u automatskom upravljanju prometom – doktorska disertacija, Fakultet prometnih znanosti, Zagreb, 2013.]

Izborom aktivne strategije dodjele prioriteta koja će biti najoptimalnija za nadolazeće tranzitno vozila, uzimajući u obzir pritom predviđeno vrijeme dolaska istog vozila, uloga je selektivne strategije.

### 3.3.3. Adaptivne strategije

Glavna svrha ove strategije je davanje prioriteta tranzitnim vozilima ali radeći to na takav način tako da se održi sveukupna razina uslužnosti na raskrižju ali isto tako i na prometnoj mreži. Ova strategija ne koristi unaprijed određene strategije prioriteta kao što su produljivanje zelenog ili skraćivanje crvenog svjetla već se temelji na ulaznim podacima ili nekim algoritmom odlučivanja koji je prethodno definiran. Ulazni podaci na kojima se temelji odluka o dodjeli prioriteta dobiveni su iz stvarnovremenskih situacija na prometnoj mreži [32].

Prema načinu optimizacije adaptivnih strategija, navode se tri glavna pristupa [32]:

- optimizacijski model,
- genetski algoritam i neuronske mreže,
- algoritam neizrazite logike.

## 4. ALGORITMI UPRAVLJANJA SEMAFORIZIRANIM RASKRIŽJIMA

Veliki i nagli rast je ono što čini veliku razliku između prometa i ostalih društvenih pojava, povećanje populacije i sve lakši pristup vozilima uzrokuju sve veće probleme u prometu, ponavljajuće probleme u svim svjetskim metropolama. Istraživanje [35] pokazuje da motorna vozila tijekom perioda zagušenja prometnica potroše i do 80% više goriva u usporedbi kad se slobodno kreću i tako znatno utječu na zagađenje okoliša, što paralelno utječe na kvalitetu zraka koja utječe na zdravlje populacije. Također prema izvješću [36] Inrix kompanije vozači u Los Angeles-u, Moskvi, Londonu i Parizu potroše oko 102, 91, 74 i 69 sati tijekom godine zbog prometnih zagušenja.

Pretjeranom upotrebom motoriziranih vozila koje koristimo za prijevoz ljudi i robe dolazimo do velike količine vozila na prometnim mrežama, broj istih predstavlja velik problem danjašnjem društvu, naročito u gradskim sredinama. Križanja pridonose problemu jer se prometni tokovi tu isprepliću, jedan prometni tok mora čekati drugi i obrnuto. Konfliktni prometni tokovi kontrolirani su semaforima čija je zadaća povećati sigurnost na raskrižjima i da pritom vrijeme čekanja bude minimalno, ali i semaforizirani sustavi imaju svoje neučinkovitosti jer npr. različite vrste algoritama koji se koriste za upravljanje raskrižjima ne prilagođavaju se savršeno situacijama u prometu. Prometom inženjeru kontrola prometa na raskrižju predstavlja krucijalan problem, sva prometna raskrižja moraju služiti zahtjevima konkurentnih prometnih tokova a učinkovita razina uslužnosti raskrižja je nužna kako isto ne bi postalo područje zagušenja [8] [37] [38].

Prometna zagušenja velikim dijelom nastaju zbog neučinkovitog načina kojim se upravlja prometom na prometnoj mreži. Semaforizirana raskrižja imaju veliku ulogu u upravljanju, međutim način na koji oni operiraju nije se značajno promjenio unazad nekoliko desetljeća unatoč velikom razvoju u elektronici i komunikacijskim tehnologijama. Koristi se nekoliko različitih sustava koji semaforima upravljaju prometom, dok neki kontroliraju promet na samo jednom raskrižju drugi kontroliraju na njih nekoliko. Postoje razni pristupi u rješavanju, odnosno smanjenju vremena čekanja za vozila na semaforiziranim raskrižjima, neka od tih rješenja su povećanje kapaciteta prometnice ili izgradnja kružnih tokova, međutim takva rješenja su skupa i često nemoguća za implementaciju iz raznih strukturalnih i ekonomskih razloga [8] [39].

Raskrižja možemo podijeliti u dvije skupine, ona na kojima se promet odvija bez smetnji gdje se trake presijecaju ali je svaka vremenski odvojena od ostalih, te dok je jedna slobodna za prolaz druge nisu. Primjer takvoga raskrižja je ono gdje se isprepliću dvije trake, jedna je horizontalna dok je druga vertikalna, i dok je faza svjetla zelena na horizontalnoj traci na vertikalnoj je crvena i obrnuto što znači da između njih nema smetnji. Ovakva vrsta raskrižja

je prilično rijetka, češća verzija raskrižja je ona gdje se trake međusobno ometaju. Primjer jednoga takvoga raskrižja je ono gdje automobili koji žele obaviti radnju skretanja ulijevo moraju propustiti automobile koji dolaze iz suprotnog smjera ali kreću se ravno. Zbog učinkovitosti većina raskrižja je dizajnirana s prioritetima i na temelju vjerojatnosti. Upravljački raskrižjem potrebno je ostvariti kompromis u smislu da se osigura što veća sigurnost a da se pritom što manje ometa odvijanje prometa [40].

Povećanje kapaciteta prometnica i daljni razvoj prometne mreže kroz gradnju u gradovima gdje gustoća postojećih zgrada te sam položaj istih u većini gradskih sredina jednostavno nije moguća zahtjeva drugačiji pristup. Iako implementacija ITS rješenja koja uključuje i algoritme upravljanja je učinkovito rješenje isto tako je i cjenovno zahtjevno stoga implementacija takvih rješenja zahtjeva preciznost i pravilno planiranje. Prometna mreža u gradskoj sredini dinamičan je sustav neizvjesne prirode, sustav s velikom brojem varijabli uključujući brzinu protoka vozila, duljinu linija i raspored faza. S obzirom na složenost, upotreba „pametnih“ algoritama upravljanja ključna je za optimizaciju performansi semaforiziranih raskrižja [41].

Semafori se postavljaju na raskrižja gdje sam obujam prometa može spriječiti učinkovitu i sigurnu upotrebu raskrižja. Za određivanje performansi semafora mogu se poduzeti tri mjere, a to su: mjere s fiksnim vremenom, predeterminirane mjere i mjere koje reagiraju s obzirom na prometnu situaciju [42]. Isplativa strategija za ublažavanje prometnih zagušenja je optimizacija tih semaforiziranih raskrižja, odnosno signalnih planova na tim raskrižjima čime ostvarujemo poboljšanje razine usluge (engl. *Level Of Service - LOS*) tako što se vremena kašnjenja raspodjeljuju između svih vozila na raskrižju [43].

Problemi nastaju kada uobičajeni sustavi semafora koji koriste konvencionalne metode predeterminiranih signalnih planova na temelju povijesne statistike prometa ne ispunjavaju sve veće zahtjeve prometne mreže. Potrebno je učenje i prilagođavanje prema dinamičkoj karakteristici prometnih tokova, tu nastupa adaptivno upravljanje prometom koje je razvijeno kako bi pomoću tog sustava bilo moguće savladati probleme koje ograničeni ustaljeni sustavi nisu u mogućnosti. Iz tog razloga raznovrsni algoritmi se koriste kako bi se optimizirali signalni planovi na semaforiziranim raskrižjima, neki od tih algoritama su: podržano učenje (engl. *reinforcement learning*), neizrazita logika (engl. *fuzzy logic*) i umjetna neuronska mreža (engl. *artificial neural network*) [43] [44].

## 4.1 Podržano učenje

Termin podržano učenje (engl. *Reinforcement learning*) opisuje skupinu algoritama koji imaju sposobnost učiti kroz iskustvo. Takav jedan algoritam se obično pušta u pogon u okolinu bez ikakvog predznanja o tome kako da se ponaša. Algoritam kroz interakciju s okolinom prima povratne informacije te prilagođava svoje ponašanje do najoptimalnijeg mogućeg ishoda [45].

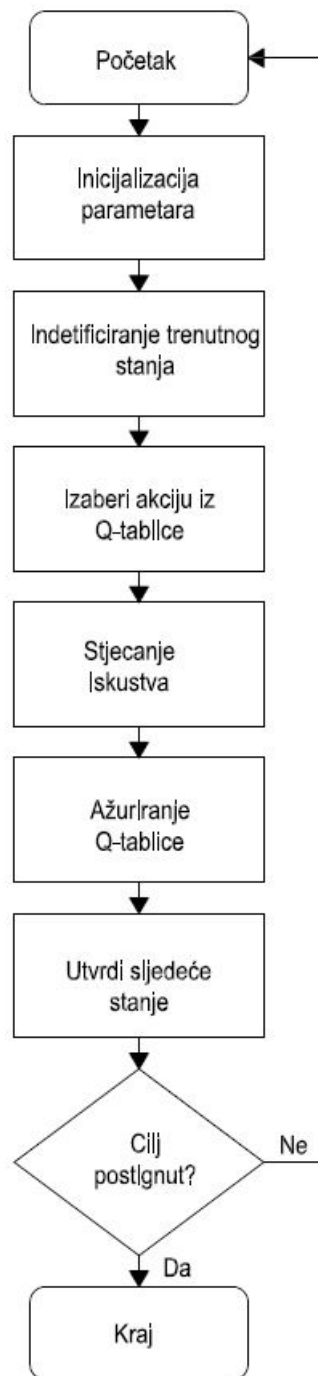
Kod korištenja podržanog učenja za upravljanje prometom, uobičajeno je da svako raskrižje kontrolira jedan algoritam. Svaki taj algoritam ima zadaću da odredi kakav će biti signalni plan na raskrižju u kojem operira. Brojne prednosti, sposobnost kontinuiranog učenja na prometnoj mreži kao i lako prilagođavanje na promjene u prometnoj mreži dokazuju da je podržano učenje obećavajući pristup upravljanja prometom u gradskim sredinama. Problemi u kontroli prometa vrlo su atraktivna okruženja za nove pristupe podržanog učenja i predstavljaju niz ne-trivijalnih izazova kao što je razvijanje strategija za koordinaciju i razmjenu informacija između pojedinih algoritama na raskrižjima [45].

Ovaj algoritam ima sposobnost da se poboljša kroz proces učenja, Q-učenje (engl. *Q-learning*) jedna je od najčešćih metoda dostupnih u podržanom učenju. U Q-učenju, istraživačko sredstvo istražuje u složenom i nedeterminističkom okruženju pristupom pokušaja i pogrešaka nakon čega provodi radnju koja je utvrđena kao najbolje rješenje na temelju iskustva. Kazne ili nagrade steći će se kroz prethodne radnje metodom pokušaja i pogrešaka i biti će pohranjene u memoriju kao iskustva za buduće reference. Algoritam Q-učenja poboljšava performanse s iskustvom stečenim u prošlosti [46].

Q-tablica glavna je komponenta algoritma Q-učenja, to je tablica u koju se pohranjuju različiti podaci stečeni kroz rad algoritma u sustavu. Svaki element u Q-tablici je indetificiran kao Q-vrijednost od kojih svaka predstavlja vrijednost za određenu akciju. Za svaku poduzetu akciju u trenutnom stanju biti će dodijeljena ili nagrada ili kazna, zatim će u Q-tablicu biti pohranjena vrijednost nagrade za tu akciju. Radnje koje će poduzeti algoritam Q-učenja su određene prema vrijednosti nagrade ili prirodni slučajnosti. Proces selekcije prema vrijednosti nagrade je prilično jednostavan i sastoji se od pronalažanje nagrade s najvećom vrijednosti za akciju, slučajna selekcija ne dozvoljava da se proces selekcije zadovolji s lokalnim maksimumom ili minimumom, tu nastupa algoritam pohlepe. Algoritam pohlepe dozvoljava Q-učenju da slučajnim odabirom odabere akciju koja nema najveću Q-vrijednost što omogućava da se u novom okruženju steknu još veće vrijednosti nagrade [46].

Na **slici 9** prikazan je dijagram toka, algoritam Q-učenja počinje tako što nakon inicijalizacije parametara indetificira trenutno stanje zatim izabire akciju iz Q-tablice, to će biti učinjeno ili procesom selekcije najveće vrijednosti nagrade ili aktiviranjem algoritma pohlepe. Stječe nova iskustva, te nove vrijednosti unosi u Q-tablicu nakon čega algoritam utvrđuje da li

je sljedeće stanje zadovoljilo cilj, ukoliko je odgovor da proces završava ukoliko je taj odgovor ne proces se nastavlja sve dok se ne ispune kriteriji [46].



**Slika 9** Dijagram toka algoritma Q-učenja

[izvor: Chin, Y.K., Bolong, N., Kiring, A., Yang, S.S., Teo, K.T.K.: *Q-Learning Based Traffic Optimization in Management of Signal Timing Plan, Modelling, Simulation & Computing Laboratory, School of Engineering and Information Technology, Universiti Malaysia Sabah, Kota Kinabalu, Malaysia, 2011., str. 31*]

## 4.2 Neizrazita logika

Neizrazita logika (engl. *Fuzzy logic*) prepoznata je u računalnoj industriji kao logika slična ljudskoj. Današnji konvecionalni algoritmi, koji su razvijeni prema povijesnim podacima kako bi optimizirali signalne planove nisu više zadovoljavajuće rješenje zbog velikih oscilacija na prometnoj mreži gdje se događaju nepredvidive situacije koje se razlikuju iz dana u dan. Algoritmi koji bi ih zamjenili imaju mogućnost spoznati jednak način ljudskog razmišljanja osmišljeni su koristeći neizrazitu logiku. Prometni tok karakteriziran je kao slučajan i nepredvidljiv stoga razvijanje inteligentnih sustava upravljanja da zamjene predeterminirane sustave zvuči kao logičan izbor a neizrazita logika implementirana u takve sustave pokazuje se kao dobar izbor, [47] [48].

Korištenje i razvijanje novih algoritama u svrhu kontrole prometa radi se poglavito kako bi se razvili sustavi upravljanja prometa koji mogli konstantno prilagođavati signalne planove prema podacima iz stvarnog vremena koji su dobiveni sensorima i/ili detektorima kako bi se smanjila prometna zagušenja koja su uzrok većine problema na prometnim mrežama pogotovo na raskrižjima [47].

Suvremene tehnologije koje su u uporabi u današnjoj kontroli prometa koriste se visoko sposobnim mikroprocesorskim algoritmima kako bi kontrolirali protok vozila kroz raskrižje. Korištenje neizrazite logike s konvecionalnim predeterminiranim signalnim planovima omogućilo je poboljšani način manipulacije prometom smanjenjem vremena čekanja i broja zaustavljanja. Neizrazita logika pokazala se kao dominantna u kontroli signalnih planova na raskrižjima, čak i onim koja su kompleksna. Iako dobar posao u kontroli prometa može se realizirati i bez neizrazite logike ne postoji sigurnost da će isto tako biti kada se u raskrižju dogodi situacija gdje je broj vozila puno veći od očekivanog ili nekakva druga nepredviđena situacija [47].

U predeterminiranom signalnom planu zeleno svjetlo se ne produžava bez obzira na gustoća prometa odnosno broj vozila koja prolaze kroz raskrižje dok to nije slučaj kada se koristi neizrazita logika gdje vrijeme produljenja nema fiksnu vrijednost. Broj vozila dobiva se pomoću senzora u stvarnom vremenu i te vrijednosti se koriste kako bi se optimizirao signalni plan. Kako neizrazita logika dolazi do zaključaka na način kako bi to učinio i čovjek možemo reći da je način zaključivanja te donošenja odluka u smislu odgovora na trenutnu prometnu situaciju sličan onome kako bi to obavljao i prometni policajac da upravlja prometom u raskrižju [48] [49].



## 4.3 Umjetna neuronska mreža

Umjetna neuronska mreža (engl. *Artificial Neural Network*) nudi inteligentne funkcije obrade, pamćenje i predviđanje, dok istovremeno se nosi s neizvješnošću i nelinearnošću, to je mreža međusobno povezanih procesnih elemenata čije je ponašanje slično ponašanju biološkog neurona. Kako trenutni sustavi upravljanja na semaforiziranim raskrižjima uobičajeno nisu u mogućnosti reagirati na trenutno stanje u prometu, odnosno stvarno-vremensko stanje ostavljeno je mjesto za napredak. Umjetna neuronska mreža nam omogućuje da se nosimo s kompleksnošću prometa u gradskim sredinama na način da sustav postane samostalan, sposoban prilagođavati se stalnim promjenama u okruženju a isto tako nosi se i s nepredviđenim situacijama kao što su prometne nesreće [50] [51].

Jedna takva mreža može na osnovu podataka prilagoditi svoj način rada, uči iz iskustva i može procijeniti kompleksnost situacije. Arhitektura se sastoji od tri sloja; ulazni sloj, skriveni sloj i izlazni sloj, ulazni sloj se sastoji od svih ulaznih podataka koji su prikupljeni iz okoline, svi podaci iz ulaznog sloja obrađuju se u skrivenom sloju zatim izlazni sloj predaje rezultate okolini na temelju obrađenih podataka [52].

Kašnjenja i zaustavljanja na raskrižjima često uzrokuju niz negativnih posljedica kao što su veći utrošak goriva s čim paralelno dolazi do većeg zagađenja okoliša, gubitak vremena, itd., iz toga razloga točna procjena kašnjenja i broja zaustavljanja vrlo je važna kako bi se ocjenila razina usluge nekog raskrižja. U umjetnoj neuronskoj mreži prvi i najvažniji korak je „treniranje“, to je proces u kojem su ulazne informacije predstavljene mreži zajedno sa željenim izlaznim rezultatom. Uobičajeno je da sustav s umjetnom neuronskom mrežom kreće u rad bez ikakvih znanja, te mora naučiti potrebno kako bi rješavao problem zbog kojeg je sustav i implementiran. Kada sustav nauči tj. kada dosegne zadovoljavajući stupanj performanse počinje, proces učenja staje a sustav počinje koristiti naučeno u svrhu donošenja odluka [52].

## 5. KONCEPT KOOPERATIVNIH SUSTAVA U GRADSKOM PROMETU

Sve veće opterećenje na prometnim mrežama diljem svijeta, naročito u gradskim područjima dovodi do jasnog zaključka, potrebna je optimizacija. Kao rješenje smatraju se ITS-i, koji pružaju različite inovativne usluge za različite načina transporta i upravljanja prometom i tako daju sposobnost sustavu da reagira što efikasnije. Većina ITS sustava koji su danas implementirani su autonomni, kao takvi oni su samostalni i namjenski sustavi (semaforizirana raskrižja, pametni kočioni sustavi u vozilu, itd.). Sljedeći korak je povezivanje ovih sustava putem komunikacije i na taj način ostvarivanje kooperativnih sustava [53]

Sustave koji omogućuju vozilu da bežično komunicira pomoću tehnologija koje omogućavaju dvosmjernu komunikaciju s drugim vozilima (V2V – vozilo s vozilom), infrastrukturom (V2I – vozilo s infrastrukturom) i drugim korisnicima u prometu (V2U – vozilo s ostalim korisnicima) nazivamo kooperativnim sustavima. Ti sustavi imaju potencijal da značajno utječu na sigurnost, duljinu putovanja, potrošnju energije te da smanje broj prometnih nesreća i sudara [54] [55].



Slika 10 Koncept kooperativnih sustava

[izvor: <http://www.vintageroadhaulage.com.au/faq/c-its/>]

Kao krajnji cilj kooperativni sustavi imaju postizanje koristi za mnoga područja upravljanja prometom i sigurnost u prometu. Pojednostavljeno, osnovna ideja je da vozila i infrastruktura budu opremljeni s uređajima za slanje i primanje podataka te obradu i prikaz istih vozaču i/ili putnicima, također istim uređajima komunicirati informacije s drugim vozilima i infrastrukturom. Prijenos informacija moguć je bežično putem različitih komunikacijskih uređaja, kratkog ili dugog dometa. Primjer jedne takve „komunikacije“ koja je u upotrebi je komunikacija vozila JGP-a s semaforima, gdje prilazeći raskrižju vozilo javlja svoj dolazak zatim semafor odlučuje hoće li mijenjati trenutno stanje ili ne, primjer je kooperativan jer se odvija komunikacija vozila s infrastrukturom [56].

[56] navodi sljedeće kao prednosti koje se ostvaruju kooperativnim sustavima:

- poboljšana kvaliteta prometnih informacija u stvarnom vremenu,
- poboljšano upravljanje i kontrola na prometnoj mreži (gradskih i međugradskih),
- povećana učinkovitost javnog prijevoza,
- smanjenje emisija i zagađenja,
- poboljšana sigurnost prometa za sve sudionike u prometu,
- manji broj zastoja,
- bolji i učinkovitiji odgovor na nesreće, opasnosti i incidente,
- kraća i predvidljivija vremena putovanja,
- niži operativni troškovi vozila.

Na **slici 11** možemo vidjeti primjer komunikacije vozila s infrastrukturom, Volkswagen i Siemens razvijaju sustav gdje senzor na raskrižju detektira biciklistu zatim upozorava vozača automobila koji bi prilikom skretanja nepažnjom mogao oduzeti prednost biciklistu. .

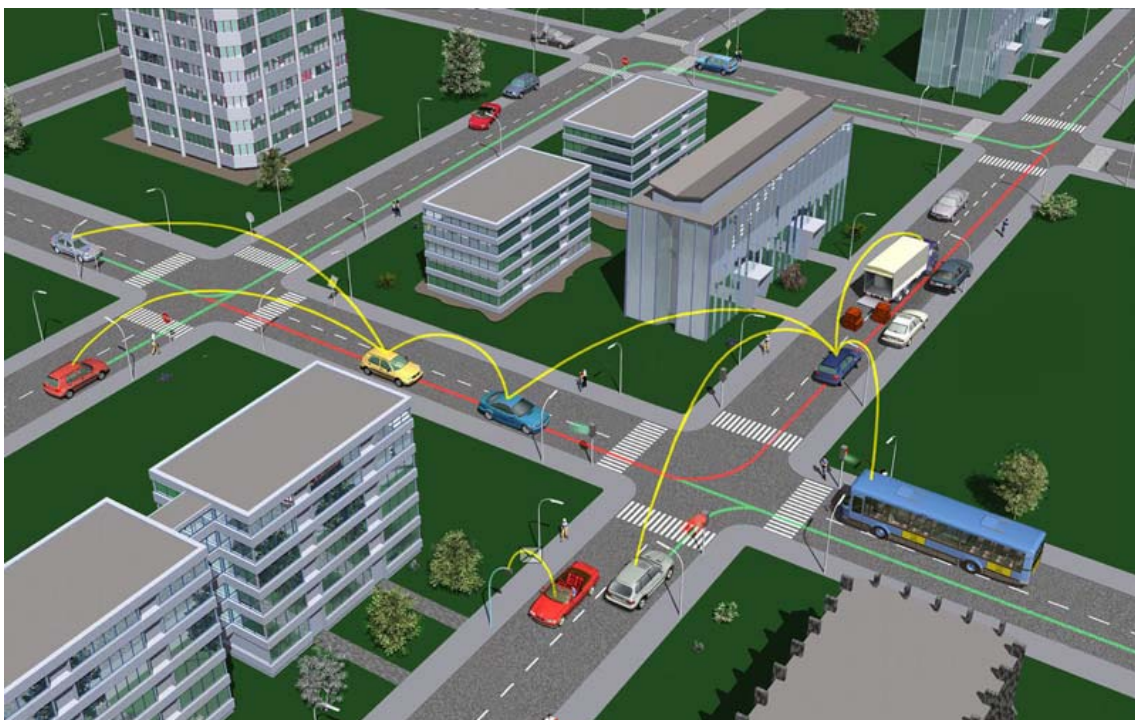


**Slika 11** Primjer komunikacije V2I

[izvor: <https://www.volkswagenag.com/de/news/2018/10/volkswagen-and-siemens-make-crossroads-safer.html/>]

Komunikacije V2V i V2I dobivaju sve veću važnost u području automobilnog istraživanja i inženjeringa. Zadaća ovakvih komunikacija je ta da se poboljša sigurnost vozača (upozorenje na mogućnost sudara na nepreglednom području, npr. oštar zavoj) i udobnost (npr. preusmjeravanje prometa radi izbjegavanja zagušenja). Ove komunikacijske sheme su još u ranom razvoju istraživanja i razvoja međutim do popularnosti istih dovesti će standardizacija sučelja i protokola [57].

Nekoliko inicijativa imalo je snažan utjecaj na način kojim se upravlja cestovnim prometom i način na koji se postiže sigurnost u prometu. Neprekidni razvoj tehnologije koja omogućava prikupljanje podataka te obradu istih, isto tako i razvoj komunikacijskih tehnologija omogućava kako upraviteljima prometa tako i korisnicima mogućnost da povećaju svoju svijest o prometnom okruženju. Povećana svijest o prometnoj okolini pokazuje se kao učinkovit alat za poboljšanje sigurnosti i razine uslužnosti prometa ali to podrazumijeva razmjenu informacija između aktivnih sudionika u prometu što je ujedno i glavni razlog za koncept ITS-a i kooperativnih usluga [58].



**Slika 12** Primjer V2V komunikacije u gradskom području

[izvor: <https://www.extremetech.com/extreme/176093-v2v-what-are-vehicle-to-vehicle-communications-and-how-does-it-work/>]

Na **slici 12** možemo vidjeti kako bi V2V komunikacija upozorila ostale vozače u blizini da je došlo do zastoja u prometu, na taj način ostali vozači imaju opciju izabrati neku drugu rutu do svoga odredišta čime se izbjegavaju svi problemi koj bi u suprotnom nastali.

**Tablica 3** Usporedba bežičnih komunikacijskih tehnologija

Standard	ZigBee	Bluetooth	Wi-Fi	CALM
ITS aplikacija (eng. ITS application)	u vozilu i V2I	u vozilu i povezivanje uređaja	V2V i V2I	V2V i V2I
Raspon mreže (eng. network range)	do 100m	do 70m	do 100m	do 100m
Mrežna metoda (eng. network method)	Mesh	P2P	P2P	P2P
Širina pojasa (eng. bandwidth)	250 kbps	12 Mbps	54 Mbps	54 Mbps
Frekvencija (eng. frequency)	2,4 GHz	2.4 GHz	2.4 GHz	5.8 GHz
Prednosti (eng. advantages)	mala snaga i kašnjenje, mnoštvo uređaja	dominirajući PAN, jednostavna sinkronizacija	dominirajući WAN, široka dostupnost	široka pokrivenost
Nedostatci (eng. disadvantages)	mali raspon mreže	srednja potrošnja energije	velika potrošnja energije	velika potrošnja energije

[izvor: Selvarajah, K., Arief, B., Tully, A., Blythe, P., *Deploying Wire-less Sensor Devices in Intelligent Transportation System Applications*, ISBN 978-953-51-0347-9, Published: March 16, 2012.]

Snažne komunikacijske veze vrlo su važne za kooperativne sustave naročito u gradskim sredinama gdje smetnje signalu predstavljaju veliki problem, a potrebne su kako bi se ostvarila brza i pouzdana razmjena informacija. U **tablici 3** možemo vidjeti kako su razne komunikacijske tehnologije pogodne za različite komunikacijske scenarije [59].

## 6. ZAKLJUČAK

Ublažavanje zagušenja gradskog prometa trenutno je najveći izazov prometnih inženjera i stručnjaka jer prometno zagušenje je problem s kojim se svakodnevno susrećemo. Konvencionalne metode građenja, dograđivanja u gradskim sredinama nisu uvijek rješenje a isto tako nisu uvijek ni moguće te financijski prihvatljive, toleriranje povremenih gužvi pretvorilo se u toleriranje gužvi koje se pretvara u problem koji nas sputava u obavljanju svakodnevnih radnji. Kako bi se nosili s tim problemom važno je razvijati sustave prometne kontrole. Veliku ulogu u tim sustavima imaju algoritmi koji imaju za cilj smanjiti prosječno kašnjenje na semaforiziranim raskrižjima pod zasićenim uvjetima, omogućiti brži protok javnom gradskom prijevozu a isto tako i vozilima žurnih službi.

Iako mogućnost da se problem riješi kada on nastane u stvarnom vremenu, odnosno kada nastane zagušenje je prihvatljivije od pasivnosti, postaje važno i da se problem predvidi i prije nego nastane, senzori koji broje promet u stvarnom vremenu na ulazima u prometnu mrežu mogu nam omogućiti da pretpostavimo gdje bi moglo doći do zagušenja te alternativnim pravcima izbjegnemo da dođe do toga. Komunikacija vozila s vozilom, vozila s infrastrukturom i obrnuto uz kombinaciju algoritama omogućuju nam da sam problem riješimo prije nego on nastane.

# LITERATURA

1. Jolić, N.: Logistika i ITS, Sveučilište u Zagrebu, Fakultet prometnih znanosti, Zagreb, 2006.
2. Han, E., Pil Lee, H., Park, S., So, J., Yun, I.: Optimal Signal Control Algorithm for Signalized Intersections under a V2I Communication Environment, Research Article, 2019.
3. Bošnjak, I.: Inteligentni Transportni Sustavi 1, Sveučilište u Zagrebu, Fakultet prometnih znanosti, Zagreb, 2006.
4. Dunn Engineering Associates: Traffic Control Systems Handbook, Federal Highway Administration, Office of Transportation Management, 2005.
5. Dunn Engineering Associates: Traffic Control Systems Handbook, Federal Highway Administration, Office of Transportation Management, 2005.
6. Ekeila, W., Sayed, T., El Esawey, M.: Development of a Dynamic Transit Signal Priority Strategy, University of British Columbia, 2009.
7. Lin, Y., Yang, X., Zou, N., Franz, M.: Transit Signal Priority Control at Signalized Intersections: A Comprehensive Review. Transportation Letters The International Journal of Transportation Research, 2014.
8. Björck, E., Omstedt, F.: A comparison of algorithms used in traffic control systems, School of Electrical Engineering and Computer Science, Stockholm, Sweden, 2018.
9. Bošnjak, I., Badanjak, D.: Osnove prometnog inženjerstva, Sveučilište u Zagrebu, Fakultet prometnih znanosti, Zagreb, 2005.
10. Naputak o prometno – tehničkim pravilima i uvjetima za daljinsko usmjeravanje i vođenje prometa na državnim cestama, članak 2., Narodne novine, broj 54/03.
11. <http://frame-online.eu/first-view/what-is-an-its-architecture>
12. Yokota, T., Weiland, R.J.: ITS System Architectures For Developing Countries, Transport and Urban Development Department 2004.
13. Walton, J.R., Crabtree, J.D., Osborne, M.L., Pigman, J.G., Weber, J.M., Grossardt, T.H., Hartman, D.G.: Intelligent Transportation Systems Strategic Plan, University of Kentucky, 2000.
14. Williams, B.: Intelligent Transport Systems Standards (Intelligent Transportation Systems) 1st Edition, 2008.
15. Gordon, R.L., Tighe, W.: Traffic Control System Handbook, Federal Highway Administration, Office of Transportation Management, 2005.
16. Prezentacije s predavanja: Miroslav Vujić, Komunikacijska ITS arhitektura, Fakultet Prometnih Znanosti, Zagreb

17. ISO 14813–1:2007 – Intelligent Transport Systems – Reference Model Architecture for the ITS sector – Part 1: ITS Service Domains, Service Groups and Services, 2007.
18. Kittelson & Associates, Inc.: Traffic Signal Timing Manual, Federal Highway Administration, U.S. Department of Transportation, 2008.
19. Manual on Uniform Traffic Control Devices for Streets and Highways, Federal Highway Administration, U.S. Department of Transportation, 2009.
20. McShane, C.: The Origins and Globalization of Traffic Control Signals, Vol 25, Issue 3, Northeastern University, 1999.
21. Ghena, B., Beyer, W., Hillaker, A., Pevarnek, J., Halderman, J.A.: Green Lights Forever: Analyzing the Security of Traffic Infrastructure, Electrical Engineering and Computer Science Department, University of Michigan, 2014.
22. 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.
23. Prezentacije s predavanja: Zdenko Lanović, Signali plan, Fakultet Prometnih Znanosti, Zagreb
24. Cerovac, V.: Tehnika i sigurnost prometa, Sveučilište u Zagrebu, Fakultet prometnih znanosti, Zagreb, 2001.
25. 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.
26. Åström, K.J., Wittenmark B.: Adaptive Control: Second Edition, Lund Institute of Technology, 2008.
27. Vujić, M.: Sustav dinamičkih prioriteta za vozila javnog gradskog prijevoza u automatskom upravljanju prometom – doktorska disertacija, Fakultet prometnih znanosti, Zagreb, 2013.
28. Ketabdari, M., Marchionni, G., Studer, L.: Analysis of Adaptive Traffic Control Systems and Design of a Decision Support System for better choice, Facoltà di Ingegneria Civile, Ambientale e Territoriale, 2012./2013.
29. Stevanovic, A.: Adaptive Traffic Control Systems: Domestic and Foreign State of Practice A Synthesis of Highway Practice, National Cooperative Highway Research Program, 2010.
30. Fehon, K., Peters J.: Adaptive Traffic Signals, Comparison and Case Studies, Oakland, CA: DKS Associates, 2010.
31. 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.
32. Ngan, V.W.K., A Comprehensive Strategy For Transit Signal Priority, The University of British Columbia, 2002.



33. 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.
34. Skabardonis, A.: Control Strategies for Transit Priority. *Transportation Research Record*, 2000.
35. Cramton, P., Geddes, R. R., Ockenfels, A.: Set road charges in real time to ease traffic, *Nature*, vol. 560, no. 7716, p. 23, Aug. 2018.
36. INRIX, "INRIX Global Traffic Scorecard," INRIX - INRIX. [Online]. Available: <http://inrix.com/scorecard/>. [Pristupljeno: 12.06.2020.].
37. Chen, S.,W., Yang, C.,B., Peng, Y.,H.: Algorithms for the Traffic Light Setting Problem on the Graph Model, Department of Computer Science and Engineering National Sun Yat-sen University, Kaohsiung, Taiwan, 2007.
38. Dunne, M., Potts, R.: Algorithm for Traffic Control. *Operations Research*, pp. 870-881., 1964.
39. Skabardonis, A., Shladover, S., Zhang, W.,B., Zhang, L., Li, J.,Q., Zhou, K.: Advanced Traffic Signal Control Algorithms, Institute of Transportation Studies, University of California, Berkeley, 2014.
40. Roegel, D.: Simple algorithms for preemptive traffic control, and an appraisal of their quality, *Research Report*, pp.22., 2005.
41. S. Touhbi et al., "Adaptive Traffic Signal Control : Exploring Reward Definition For Reinforcement Learning," *Procedia Comput. Sci.*, vol. 109, pp. 513–520, Jan. 2017.
42. Shahgholian, M., Gharavian, D.: Optimal control of signalized intersection using hierarchical fuzzy-real control, Department od Electrical and Computer Engineering, Shahid Beheshti University, Teheran, Iran, 2020.
43. Tan, M. K., Chuo, H. S. E., Chin, R.K.Y., Yeo, K.B., Teo, K.T.K.: Optimization of Urban Traffic Network Signalization using Genetic Algorithm, *Modelling, Simulation & Computing Laboratory Faculty of Engineering, Universiti Malaysia Sabah, Kota Kinabalu, Malaysia*, 2016.
44. Teo Y.K. Chin, L.K. Lee, N. Bolong, S.S. Yang, and K.T.K., "Exploring Q-learning optimization in traffic signal timing plan management," *Proc. 3rd International Conference on Computational Intelligence, Communication Systems and Networks*, Bali, Indonesia, pp. 269-274, 2011, doi: 10.1109/CICSyN.2011.
45. P. Mannion, J. Duggan, and E. Howley, "Parallel reinforcement learning for traffic signal control," *Procedia Computer Science*, vol. 52, pp. 956-961, 2015, doi: 10.1016/j.procs.2015.05.172.
46. Chin, Y.K., Bolong, N., Kiring, A., Yang, S.S., Teo, K.T.K.: Q-Learning Based Traffic Optimization in Management of Signal Timing Plan, *Modelling, Simulation & Computing Laboratory, School of Engineering and Information Technology, Universiti Malaysia Sabah, Kota Kinabalu, Malaysia*, 2011.

47. Jha, M., Shukla, S.: Design Of Fuzzy Logic Traffic Controller For Isolated Intersections With Emergency Vehicle Priority System Using MATLAB Simulation, Department of Electircal Engineering Jabapalur Engineering College, M.P., India, 2014.
48. Homaei, H., Hejazi, S.R., Dehghan, S.A.M.: A New Traffic Light Controller Using Fuzzy Logic for a Full Single Junction Involving Emergency Vehicle Peemption, Department, Journal of Uncertain Systems Vol.9, No.1, pp.49-61, 2015.
49. Khiang, Kok & Khalid, Marzuki & Yusof, Rubiyah. (1997). Intelligent Traffic Lights Control By Fuzzy Logic. Malaysian Journal of Computer Science. 9. 29-35.
50. Passow, B.N., Elizondo, D.A., Goodyer, E., Chiclana, F., Witheridge, S.: Adapting traffic simulation for traffic management: A neural network approach, 16th International IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC 2013), The Hague, 2013, pp. 1402-1407.
51. Sommer, M., Tomforde, S., Hahner, J.: Using a Neural Network for Forecasting in an Organic Traffic Control Management System, University of Augsburg, Organic Computing Group, Eichleitnerstr. 30, 86159 Augsburg, Germany
52. Dođan, Erdem & Akgüngör, Ali & Arslan, Turan. (2015). Estimation of delay and vehicle stops at signalized intersections using artificial neural network. Engineering Review. 36. 157-165.
53. Silva, R., Noguchi, S., Ernst, T., De La Fortelle, A., Godoy Junior, W.: Standards for Cooperative Intelligent Transportation Systems: a Proof of Concept, The Tenth Advanced International Conference on Telecommunications (AICT), 2014.
54. Mandžuka, S., Ivanjko, E., Škorput, P., Vujić, M., Gregurić, M., Čelić, J.: Primjena koopearativnog pristupa u upravljanju prometom – iskustva projekta ICSI, Sveučilište u Zagrebu, Fakultet prometnih znanosti, Zagreb, 2015.
55. Tallapragada, P., Cortés, J.: Coordinated intersection traffic management, Department of Mechanical and Aerospace Engineering, University of California, 2015.
56. Cooperative Urban Mobility, Cooperative Vehicle-Infrastructure Systems (CVIS)
57. Ghosal, A., Bai, F., Debouk, R., Zeng, H.: Reliability and Safety/Integrity Analysis for Vehicle-to-Vehicle Wireless Communication, General Motors Company, 2011.
58. Alfonso, J., Sánchez, N., Menéndez, J.,M., Cacheiro, E.: Cooperative ITS communications architecture: the FOTsis project approach and beyond, 2015.
59. Vujić, M., Škorput, P., Čelić, J.: Wireless communication in cooperative urban traffic management, Multidisciplinarni znanstveni časopis Pomorstvo, Rijeka, 2015.

## POPIS SLIKA

Slika 1 Tok razvoja arhitekture .....	5
Slika 2 Signalni plan raskrižja.....	11
Slika 3 Osnovni prikaz adaptivnog sustava.....	13
Slika 4 Grafički prikaz strategije smanjenja trajanja ciklusa .....	18
Slika 5 Grafički prikaz strategije razdvajanja ciklusa.....	19
Slika 6 Grafički prikaz strategije produljenja zelenog svjetla .....	20
Slika 7 Grafički prikaz strategije skraćanja crvenog/ ranije zeleno svjetlo .....	20
Slika 8 Grafički prikaz strategije specijalne faze za autobusna vozila .....	21
Slika 9 Koncept kooperativnih sustava .....	28
Slika 10 Primjer komunikacije V2I.....	29
Slika 11 Primjer V2V komunikacije u gradskom području .....	30

## **POPIS TABLICA**

Tablica 1 Funkcionalna područja i njihove usluge.....	8
Tablica 2 Koristi integracije ITS rješenja .....	14
Tablica 3 Usporedba bežičnih komunikacijskih tehnologija .....	31

## **POPIS GRAFOVA**

Graf 1 Glavni razlozi implementiranja sustava adaptivnog upravljanja prometom ..... 15



Sveučilište u Zagrebu  
Fakultet prometnih znanosti  
10000 Zagreb  
Vukelićeva 4

## IZJAVA O AKADEMSKOJ ČESTITOSTI I SUGLASNOST

Izjavljujem i svojim potpisom potvrđujem kako je ovaj \_\_\_\_\_ završni rad

isključivo rezultat mog vlastitog rada koji se temelji na mojim istraživanjima i oslanja se na objavljenu literaturu što pokazuju korištene bilješke i bibliografija.

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

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

Svojim potpisom potvrđujem i dajem suglasnost za javnu objavu \_\_\_\_\_ završnog rada  
pod naslovom **Pregled algoritama upravljanja semaforiziranim raskrižjima**

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

U Zagrebu, 7.9.2020

Student/ica:

  
(potpis)