

# Sustav upravljanja priljevnim tokovima na urbanim autocestama

---

Šehagić, Dino

Undergraduate thesis / Završni rad

2017

*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:119:240262>

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

*Download date / Datum preuzimanja:* **2024-12-19**



*Repository / Repozitorij:*

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



**SVEUČILIŠTE U ZAGREBU**  
**FAKULTET PROMETNIH ZNANOSTI**

Dino Šehagić

**UPRAVLJANJE PRILJEVNIM TOKOVIMA NA URBANIM**  
**AUTOCESTAMA**

**ZAVRŠNI RAD**

Zagreb, 2017.



Sveučilište u Zagrebu

FAKULTET PROMETNIH ZNANOSTI

Vukelićeva 4, 10000 Zagreb

**Preddiplomski studij**

## **P O T V R D A**

kojom se potvrđuje da je student

**Dino Šehagić**

---

izradio završni rad pod naslovom (naziv rada na hrv. i engl. jeziku)

**Sustav upravljanja priljevnim tokovima na urbanim autocestama**

---

**The Management System of the Inflow Streams in Urban Highways**

---

---

---

u skladu sa zadanim zadatkom, tezama i pravilima struke, te može pristupiti  
tiskanju rada.

Nadzorni nastavnik:

Zagreb, 04.09.2017

---

---

Sveučilište u Zagrebu  
Fakultet prometnih znanosti

**ZAVRŠNI RAD**

**SUSTAV UPRAVLJANJA PRILJEVNIM TOKOVIMA NA  
URBANIM AUTOCESTAMA**

**INFLOW STREAM MANAGEMENT SYSTEM FOR  
URBAN HIGHWAYS**

Mentor: dr. sc. Pero Škorput

Student: Dino Šehagić

JMBAG: 0135215701

Zagreb, lipanj 2017.

## **SAŽETAK**

Implementacijom sustava za upravljanje priljevnim tokovima uravnotežuje se prometni tok na autocestama, smanjuju se mogućnosti prometnih nesreća i nezgoda, smanjuje se ukupno vrijeme putovanja te se smanjuje onečišćenje okoliša. Korištenjem različitih algoritama sustav je u mogućnosti adaptivno upravljati priljevom vozila na prometnice višeg stupnja te na taj način osigurati maksimalnu iskorištenost kapaciteta prometnica. U ovom radu opisani su koraci razvoja sustava za upravljanje priljevnim tokovima, način rada takvih sustava, najčešće korišteni algoritmi te scenariji u slučaju incidentnih situacija.

**KLJUČNE RIJEČI:** Sustavi upravljanja priljevnim tokovima, inteligentni transportni sustavi, algoritmi sustava upravljanja priljevnim tokovima.

## **SUMMARY:**

The implementation of inflow stream management system balances traffic flows on highways, reduces traffic accidents, total travel time and environmental pollution. By using different algorithms, inflow management system is able to adaptively control the inflow stream of vehicles on highways, thus ensuring maximum utilization of highway capacity. This paper describes steps of developing inflow stream management system, operational work, most commonly used algorithms and incidents situation scenarios.

**KEYWORDS:** Inflow management system, intelligent transportation system, algorithm of ramp metering.

# SADRŽAJ

1. UVOD .....	1
2. INTELIGENTNI TRANSPORTNI SUSTAVI .....	2
2.1. Sustav upravljanja priljevnim tokovima kao ITS usluga.....	2
2.2. Arhitektura ITS-a.....	4
2.2.1. Fizička ITS arhitektura.....	5
2.2.2. Logička ITS arhitektura .....	6
2.2.3. Komunikacijska ITS arhitektura .....	6
3. METODOLOGIJA RAZVOJA ITS SUSTAVA UPRAVLJANJA PRILJEVNIM TOKOVIMA .....	8
3.1. Sustavski pristup u inteligentnim transportnim sustavima .....	8
3.2. Sustavski pristup u razvoju sustava upravljanja priljevnim tokovima .....	9
3.3. Specifikacija zahtjeva sustava upravljanja priljevnim tokovima.....	10
3.4. Elementi ITS metodologije.....	12
3.5. Metode sustavske analize .....	15
3.5.1. Objektogram.....	16
3.5.2. Funkciogram.....	17
4. IZRAŽAVANJE I MJERENJE KOMPLEKSNOSTI SUSTAVA.....	19
4.1. Kompleksni sustavi.....	20
4.2. Kompleksni adaptivni sustavi.....	20
5. SUSTAVI UPRAVLJANJA PRILJEVNIM TOKOVIMA .....	22
5.1. Komponente sustava upravljanja priljevnim tokovima .....	23
5.2. Najčešće korišteni algoritmi u sustavu upravljanja priljevnim tokovima .....	25
5.2.1. Algoritmi za filtraciju podataka .....	27
5.2.2. Algoritam za isključivanje i uključivanje sustava .....	27
5.2.3. Algoritam za kontrolu redova na prilazima.....	28
5.2.4. Algoritmi za sprječavanje prerastanja redova čekanja na prilazu .....	28
5.2.5. Arbitracijski algoritam .....	29
5.2.6. Algoritam BOTTLENECK .....	30
5.2.7. Algoritam ALINEA.....	31
5.3. Izračun signalnih planova sustava upravljanja priljevnim tokovima .....	32
5.4. Scenariji rada sustava upravljanja priljevnim tokovima.....	35
5.5. Primjeri implementacije sustava upravljanja priljevnim tokovima.....	36

6. ZAKLJUČAK.....	38
LITERATURA.....	39
POPIS SLIKA I TABLICA.....	41
POPIS KRATICA .....	42

# 1. UVOD

Primjenom rješenja iz domene inteligentnih transportnih sustava (ITS) nastoji se ići u korak sa sve većim porastom cestovnog prometa. Dosadašnja rješenja prometnog problema fizičkom nadogradnjom, odnosno proširenjem prometnica više nisu dostatna te ih je potrebno nadograditi ITS rješenjima, odnosno informacijskom i komunikacijskom nadogradnjom klasičnog sustava prometa.

Kroz ovaj rad prikazano je jedno od rješenja iz područja ITS-a vezano uz stupanj uslužnosti autoceste, točnije sustav upravljanja priljevnim tokovima (engl. Ramp Metering) na urbanim autocestama, čijom se implementacijom postižu brojni pozitivni učinci. Sustav se zasniva na stvarnovremenskom mjerenju prometnih parametara te adaptivnom upravljanju prometnim tokom a za ciljeve ima smanjenje prometnog zagušenja, ukupnog vremena putovanja, onečišćenja okoliša, broja prometnih nesreća i nezgoda te povećanje sigurnosti i udobnosti putovanja. Sustav upravljanja priljevnim tokovima za svoj rad koristi različite algoritme od kojih su najčešće korišteni opisani u nastavku rada.

Ovaj rad koncipiran je kroz 6 poglavlja. U drugom poglavlju „Inteligentni transportni sustavi“ definirani su pojmovi potrebni za razumijevanje ITS-a, funkcionalna područja i usluge ITS-a kao i arhitektura ITS-a. Treće poglavlje „Metodologija razvoja ITS sustava upravljanja priljevnim tokovima“ pruža opise prikupljanja korisničkih zahtjeva te sustavski pristup u razvoju sustava za upravljanje priljevnim tokovima. Kroz četvrto poglavlje opisano je mjerenje kompleksnosti sustava, dok peto poglavlje opisuje sustave za upravljanje priljevnim tokovima, najčešće korištene algoritme te neke od mogućih scenarija rada navedenih sustava. U šestom poglavlju izveden je zaključak a u daljnjem dijelu rada navedena je korištena literatura, popis slika i tablica te popis kratica.



## **2. INTELIGENTNI TRANSPORTNI SUSTAVI**

Inteligentni transportni sustav (u nastavku ITS) označuje napore za dodavanje informacijske i komunikacijske tehnologije za tehnologiju prijevoza i vozila u nastojanju da će se upravljati čimbenicima koji su obično u sukobu jedni s drugima, kao što su vozila, opterećenja i rute za poboljšanje sigurnosti [1]. Zagušenje prometa je u porastu u cijelom svijetu kao rezultat povećane motorizacije, urbanizacije, porasta broja stanovnika te promjene u naseljenosti sela i grada pa zagušenje smanjuje učinkovitost prometne infrastrukture i povećava vrijeme putovanja, zagađenje zraka i potrošnju goriva, zbog čega se sve više ulaže u područje ITS-a kako bi se spomenuto moglo izbjeći [2].

Opća definicija ITS-a glasi da je to holistička, upravljačka i informacijsko-komunikacijska nadgradnja klasičnog sustava prometa i transporta kojim se postiže znatno poboljšanje odvijanja prometa, učinkovitiji prijevoz putnika i roba, poboljšanje sigurnosti u prometu, udobnost i zaštita putnika, manje onečišćenje okoliša i slično [3].

Prema R. Reddyjuu inteligentni sustav je svaki sustav koji pokazuje sedam osnovnih svojstava. Prvo je svojstvo da pokazuje prilagodljivo ciljno usmjereno ponašanje (engl. goal-oriented behavior) što znači da ukoliko neki od podciljeva potrebnih za konačno rješenje nisu ostvarivi, sustav traži alternativni put prema konačnom cilju sustava. Drugo svojstvo podrazumijeva da sustav uči na temelju iskustava što znači da može prikupljati, prikazivati i upotrebljavati prikupljeno znanje. Treće svojstvo nadovezuje se na prethodno te podrazumijeva da sustav posjeduje velike količine znanja, slične količini znanja koju posjeduje čovjek da bi riješio takav problem. Nadalje, pokazuje svojstva svjesnosti jer ima sposobnost objašnjavanja svojeg ponašanja, nadgledanja i dijagnoze stanja i oporavka u slučaju pogreške te komunicira s čovjekom prirodnim jezikom i govorom. Posljednja dva svojstva su tolerancija na pogreške i nejasnoće u komunikaciji te odgovaranje u stvarnom vremenu.

### **2.1. Sustav upravljanja priljevnim tokovima kao ITS usluga**

ISO (engl. International Standardization Organization) je postavio početnu normizaciju ITS usluga fokusiranih na cestovni promet. U početnom referentnom modelu za ITS sektor definirano je 8 funkcionalnih područja i 32 usluge. ISO je korigirao referentne modele arhitekture za ITS sektor 1999. godine, te je u novoj taksonomiji definirano 11 funkcionalnih područja:

1. Informiranje putnika (engl. Traveler Information)
2. Upravljanje prometom i operacijama (engl. Traffic Management and Operations)
3. Vozila (Vehicles)
4. Prijevoz tereta (engl. Freight Transport)
5. Javni prijevoz (engl. Public Transport)
6. Žurne službe (engl. Emergency)
7. Elektronička plaćanja vezana za transport (engl. Transport Related Electronic Payment)
8. Sigurnost osoba u cestovnom prijevozu (engl. Road Transport Related Personal Safety)
9. Nadzor vremenskih uvjeta i okoliša (engl. Weather and Environmental Monitoring)
10. Upravljanje odzivom na velike nesreće (engl. Disaster Response Management and Coordination)
11. Nacionalna sigurnost i zaštita (engl. National Security)[3]

Svako od područja sadrži svoje usluge, a sustav upravljanja priljevnim tokovima nalazi se u ITS domeni pod nazivom upravljanje prometom i operacijama zajedno sa još nekoliko usluga:

- Vođenje prometa
- Upravljanje incidentnim situacijama u prometu
- Upravljanje potražnjom
- Upravljanje i održavanje transportne infrastrukture
- Identifikacija prekršitelja

Usluga vođenja prometa odnosi se na upravljanje prometnim tokovima, kako u mreži gradskih prometnica tako i izvan gradova (na autocestama i dr.). Primjeri tih usluga su:

- Adaptivno upravljanje prometnim svjetlima odnosno semaforima
- Promjenjive prometne poruke
- Kontrola pristupa na autocestu
- Kontrola brzine
- Upravljanje parkiranjem [3]

Sustav upravljanja priljevnim tokovima na autocestama objedinjuje nekoliko usluga vođenja prometa kao što su adaptivno upravljanje semaforima, promjenjive prometne poruke, kontrola pristupa na autocestu te kontrola brzine i upravljanje incidentnim situacijama.

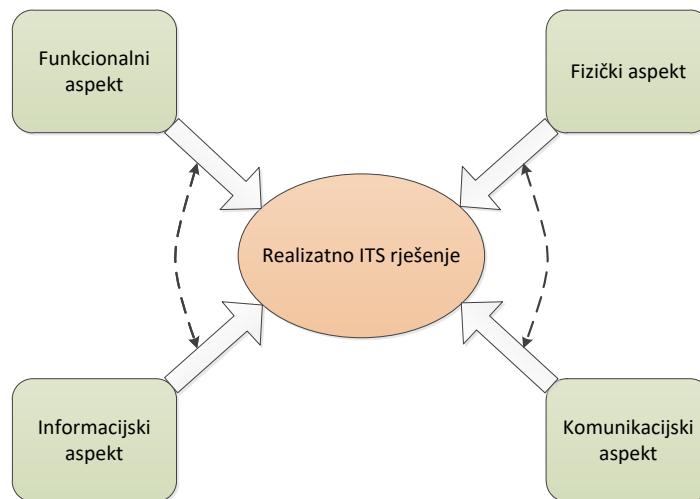
Upravljanje incidentima u cestovnom prometu funkcionalni je dio cjelovitog pristupa rješavanju prometnih problema poznatih pod pojmom Inteligentni transportni sustav - ITS. Napredni razvoj komunikacijskih i navigacijskih tehnologija i njihova primjena u različitim fazama upravljanja incidentima može značajno smanjiti posljedice incidentnih događaja kao što su zagušenje, kašnjenje, zagađenje i posebno opasni sekundarni incidenti. Razvoj sustava upravljanja incidentima približava se na novi i tehnološki inovativan način počevši od adekvatne osnove teorije tijeka prometa, teorije dinamičkog sustava procjene, opće teorije klasifikacije, kao i odgovarajućih ITS arhitektura, dostupnih tehnologija itd. [4].

Tehnološki razvoj ITS usluga (uključujući multimodalne planere rute) usklađen je između nekoliko europskih tijela: ETSI - Europski institut za telekomunikacijske norme, CEN - Europski odbor za normizaciju i ISO - Međunarodna organizacija za normizaciju. U tehnološkom smislu glavni je cilj osigurati razmjenu informacija u svim područjima razvoja ITS usluga. Sustavi koji se koriste za razmjenu podataka su sustavi kratkog dometa i "ad-hoc" sustavi, stanični sustavi i digitalni sustavi emitiranja. Fiksni (žičani) sustavi uglavnom se koriste za internu komunikaciju. Europski ITS 5,9 GHz komunikacijski sustav temelji se na WLAN-u (Wireless Local Area Network) i usmjeren je na "ad-hoc" komunikaciju između vozila. Ovaj sustav je izvrsno rješenje za brzu razmjenu informacija o prometu i putovanjima (prometni uvjeti, procijenjena vremena putovanja, moguće odgode, alternativne rute itd.). Također, za potpuno korištenje mogućnosti multimodalnih planera rute uvelike se koriste mobilne komunikacijske usluge [5].

## **2.2. Arhitektura ITS-a**

Arhitektura je temeljna organizacija sustava koja sadrži ključne komponente, njihove odnose i veze prema okolini te načela njihova dizajniranja i razvoja promatrajući cijeli životni ciklus sustava. [3] "Architecton" (grčki) znači "glavni zidar" ili "glavni graditelj", odnosno označava stil gradnje pri čemu konkretne izvedbe mogu biti različite.

Prvi korak u razvoju ITS arhitekture je jasno i jednoznačno definiranje zahtjeva korisnika odnosno interesnih skupina. U drugom koraku slijedi proučavanje i istraživanje funkcionalnih aspekata kojim se definiraju funkcije potrebne za zadovoljenje zahtjeva i ostvarenje veze s vanjskim svijetom preko sudionika. Sagledavajući sve aspekte od funkcionalnog, informacijskog preko fizičkog do komunikacijskog dolazi se do ostvarivog ITS rješenja. Na slici 1. su prikazani aspekti arhitekture ITS-a [1].



**Slika 1.** Aspekti arhitekture ITS-a [3]

Svrha arhitekture sustava ITS-a je da pruži stabilan i otvoren okvir za razvoj sustava (podsustava) niže razine koji će biti konzistentni, kompatibilni i interoperabilni.

### 2.2.1. Fizička ITS arhitektura

Fizička ITS arhitektura definira i opisuje načine kojima dijelovi funkcionalne arhitekture mogu biti povezani tako da formiraju fizičke entitete. Temeljna je značajka fizičkih entiteta da mogu pružati jednu ili više fizičkih usluga zahtijevanih od korisnika te da mogu biti fizički realizirani.

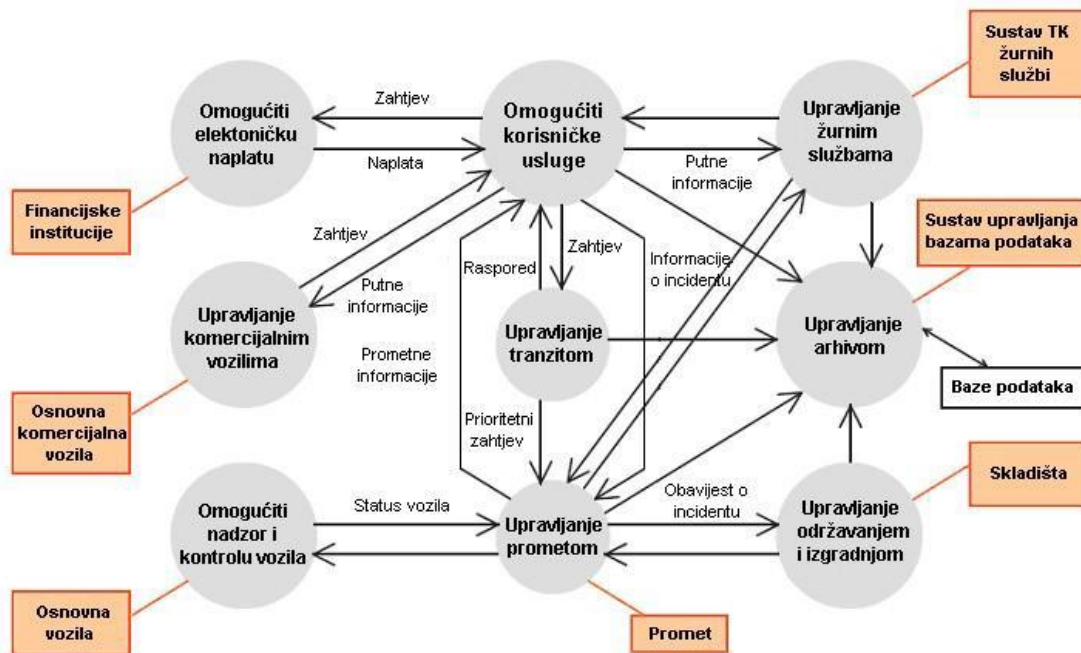
Fizička arhitektura pokazuje gdje će se funkcijski procesi smjestiti te prikazuje važna ITS sučelja (veze) između glavnih komponenata sustava (centri, vozač/putnik, vozilo, prometnica). Komunikacija između pojedinih komponenti sustava ostvaruje se pomoću žičanih i bežičnih komunikacijskih mreža. Komunikacijska arhitektura predstavlja dio fizičke arhitekture ITS-a i služi kao alat za realiziranje postavljenih ciljeva razvoja, kompatibilnosti i interoperabilnosti te omogućava širenje i modernizaciju sustava uz prihvatljive troškove [1].

Osnovni dijelovi fizičke arhitekture sustava za upravljanje priljevima su:

- Glavni upravljački centar
- Lokalne upravljačke jedinice sustava
- Detektori na glavnoj prometnici i rampama
- Izvršni elementi sustava

## 2.2.2. Logička ITS arhitektura

Logička (funkcionalna) arhitektura izvodi se iz specificiranih korisničkih zahtjeva i služi za izradbu fizičke arhitekture odnosno primjera ITS sustava (engl. *examplesystems*). Ova vrsta arhitekture prikazuje potrebne funkcijske procese i tokove podataka koji su potrebni da bi se zadovoljili zahtjevi korisnika i neovisna je o tehničko-tehnološkoj implementaciji (opremi).



Slika 2. Prikaz logičke ITS arhitekture [3]

Funkcionalni tokovi podataka mogu se promatrati kao zasebna arhitektura ili kao dio logičke ili funkcionalne arhitekture što je prikazano na slici 2. [3].

## 2.2.3. Komunikacijska ITS arhitektura

Komunikacijska arhitektura definira i opisuje načine na koje se razmjenjuju informacije između različitih dijelova sustava i to korištenjem fizičke razmjene podataka koja je opisana fizičkom arhitekturom. Samo značenje razmjene podataka između različitih dijelova sustava definirano je komunikacijskom arhitekturom. Generički pristup koji daje okvir za rješavanje važnih pitanja, predstavlja temelj komunikacijske arhitekture, a vodi nas ka uspješnom dizajniranju ITS rješenja u cilju pronalaska što efikasnijih rješenja.

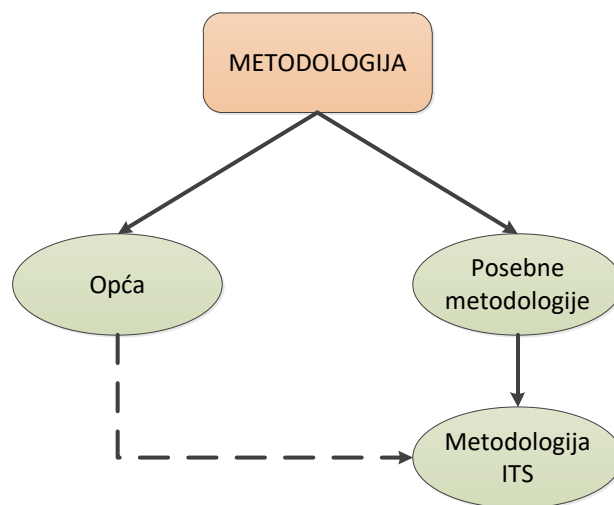
Sustav za podršku fizičke razmjene podataka objedinjuje dva veoma bitna problema. Prvi problem je kako osigurati sredstva koja omogućuju da podaci budu preneseni s jednog mjesta na drugo. Način na koji se podaci prenose treba biti pogodan za naš sustav u smislu troškova, korištenja i promjena. Drugi problem na koji nailazimo je odstupanje od strane primatelja te izražava potrebe za standardnim protokolima. Europska komunikacijska ITS arhitektura upućuje na rješenje ovih dvaju bitnih pitanja. Uzimajući u obzir ostale komponente Europske ITS arhitekture, komunikacijska arhitektura mora ostati što tehnološki neovisnija. Telekomunikacijske tehnologije se mijenjaju tolikom brzinom da nije moguće osigurati arhitekturu potaknutu tehnologijom koja će imati dugoročnu vrijednost, pa se za krajnji izlaz i rješenje u obzir treba uzeti svrha i cilj, a ne alati, te se svakom problemu treba pristupiti metodologijom evolutivnog razvoja [11].

Kod sustava upravljanja priljevnim tokovima u Europi uvriježeno je korištenje TLS (engl. Transport Layer Security) protokola za sigurnu komunikaciju i prijenos podataka, dok se kod američkih sustava češće koristi NTCIP (engl. The National Transportation Communications for Intelligent Transportation System Protocol) protokol.

### 3. METODOLOGIJA RAZVOJA ITS SUSTAVA UPRAVLJANJA PRILJEVNIM TOKOVIMA

ITS kao samostalna disciplina razvija samostalnu metodologiju utemeljenu na sustavskom pristupu, kibernetici i metodama sustavskog inženjerstva. ITS ima značenje kritičnog pojma kojim se radikalno mijenja tijekom razvoja prometne znanosti i tehnologije transporta ljudi i roba. Metodologija (methodology) je znanost o metodama i načinu istraživanja odnosno izvođenja određenih aktivnosti (znanstvenih, stručnih, nastavnih, itd.).

Na slici 3. prikazan je opći pristup razvoju metodologije.



Slika 3. Razvoj metodologije ITS-a [6]

ITS metodologija je skup metodoloških pristupa, metoda, modela i postupaka kojima se mogu uspješno rješavati problemi definiranja, razvoja, gradnje, evaluacije, eksploatacije i razgradnje inteligentnih transportnih sustava [1].

#### 3.1. Sustavski pristup u inteligentnim transportnim sustavima

Teorija sustava je interdisciplinarno područje koje proučava relacije/međudnose sustava kao cjeline. Razvoj teorije sustava počeli su Ludwig von Bertalanffy, William Ross Ashby i drugi tijekom 1950-tih godina na principima ontologije, filozofije, fizike, biologije i inženjeringa. Teorija sustava (systems theory) postoji već više od pola stoljeća kao akademsko područje koje proučava sustav, strukturu, funkcije, procese vođenja itd. i neovisna je o specifičnom području implementacije [1].

Ključna razlika između sustavske znanosti i kibernetike je u tome da sustavska znanost ima jače težište na strukturu sustava dok je kibernetika više usmjerena na funkcioniranje

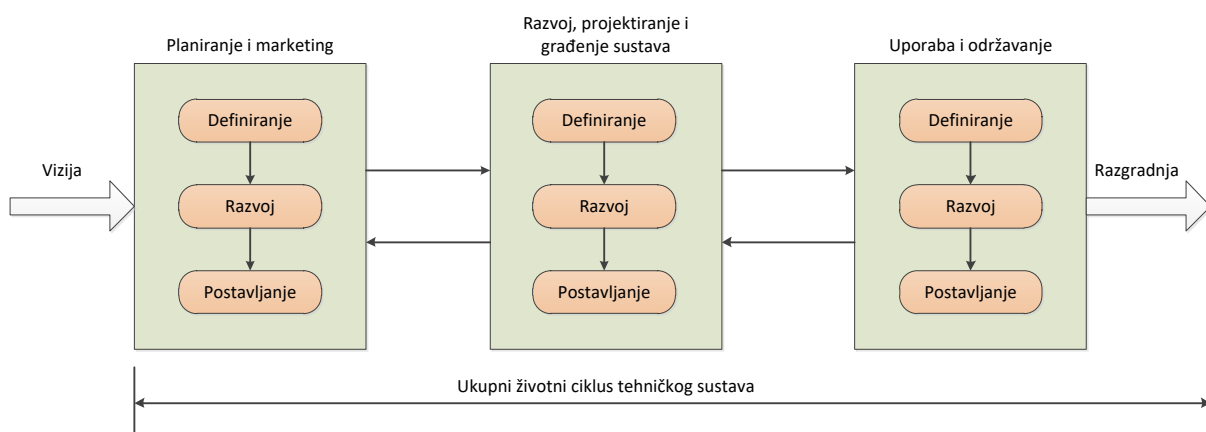
reguliranih sustava. Iz okrilja sustavske znanosti i kibernetike razvile su se brojne teorije, discipline i struke. Posebno su značajne teorija automata, teorija informacija, teorija vođenja, teorija autopoetskih sustava, umjetna inteligencija, inteligentno izračunavanje, inteligentni transportni sustavi itd. [11].

### 3.2. Sustavski pristup u razvoju sustava upravljanja priljevnim tokovima

Pristup, metode i modeli kojima se istražuju ITS problemi moraju biti usklađeni s temeljnim značajkama tih problema. Ako nije zadovoljen taj uvjet, postoji realna opasnost neefektivnosti, tj. rješavaju se pogrešni problemi i radi se „dobro pogrešna stvar“ unatoč dobroj volji sudionika istraživanja. Sustavska znanost i metodologija omogućuju znanstveno objašnjenje i rješavanje problema sustava neovisno o vrsti (modu) ili fizičkoj izvedbi sustava (građevinski objekti, elektronički sklopovi i dr.). Narav prometnih, transportnih i logističkih problema je takva da se ne može postići razumijevanje i uspješno rješavanje tih problema bez primjene sustavskog pristupa, metoda i pomagala.

Prema općenitom modelu prometa, transporta i aktivnosti sustav aktivnosti generira potrebe za transportiranjem ljudi, roba i informacija između dviju ili više točaka u prostoru. Transportni problem rješava se uporabom odgovarajućih vozila i kapaciteta mrežne infrastrukture. Alternativno rješenje fizičkom premještanju je primjena „kvazitransportnih rješenja“ telekomunikacijskog (žičnog i bežičnog) prijenosa informacija [1].

Integralno upravljanje prometom i transportom uključuje objedinjeno rješavanje problema u rasponu od upravljanja potražnjom, preraspodjelom modova, upravljanja prometnim tokom do otklanjanja incidentnih situacija [2].



Slika 4. Dekompozicija životnog ciklusa sustava [6]



Sustavski pristup u razvoju sustava upravljanja priljevnim tokovima sastoji se od:

- Prikupljanja funkcionalnih zahtjeva korisnika
- Prikupljanja geometrijskih i prostornih parametara
- Dizajniranja sustava
- Rješavanja funkcionalnih zahtjeva
- Implementacije sustava
- Verifikacije sustava od strane izvođača
- Validacije sustava od strane klijenta

### **3.3. Specifikacija zahtjeva sustava upravljanja priljevnim tokovima**

Definiranje i specifikacija zahtjeva je jedna od središnjih tema sustavskog inženjerstva. Zbog toga postoji različita terminologija i procedure koje se koriste u otkrivanju i specifikaciji zahtjeva korisnika i drugih interesnih skupina. Sustavsko inženjerstvo je usmjereno na koncept i funkcionalnu razinu neovisnu o specifičnom tehničkom rješenju. Time je omogućeno uključivanje svih tehničkih mogućnosti u evaluaciju i izbor rješenja, bez opterećivanja postojećim tehničkim rješenjima [1].

Ne postoje dva sustava koja su istovjetna u svojim zahtjevima, ali postoji uniformni i prepoznatljiv proces za logističko i konzistentno otkrivanje sustavskih zahtjeva neovisno o:

- Tipu sustava,
- Veličini sustava,
- Broju varijabli itd.

Postoji više načina karakterizacije zahtjeva te njihova izražavanja. Ključan je odgovor na pitanje što će sustav raditi, a ne kako.

Specifikacija je konzistentan uređen skup zahtjeva koji cjelovito definira ograničenja i zahtjevne performanse sustava. Definiranje korisničkih zahtjeva i sustavskih specifikacija za ITS prvi je i ključni korak u životnom ciklusu ITS-a. Budući da sustavsko inženjerstvo promatra cjelokupan životni ciklus sustava, potrebno je pažljivo pristupiti definiranju zahtjeva i formuliranju početnih sustavskih specifikacija. Definiranje i specifikacija zahtjeva podrazumijevaju [1]:

- Definiranje granica sustava
- Eksplicitno formuliranje svrhe i ciljeva sustava

- Razumijevanje mogućega konceptualnog rješenja

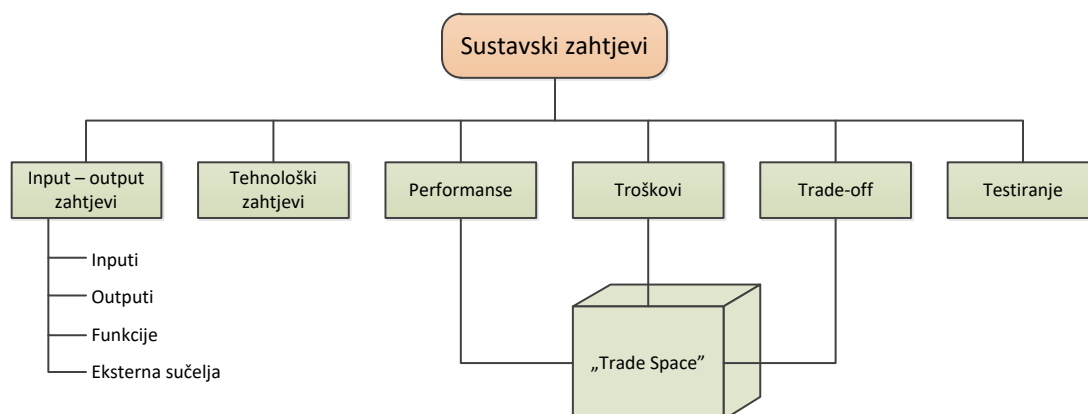
Zahtjevi predstavljaju izjave koje usmjeruju ili ograničavaju razvoj sustava. Zahtjeve generiraju korisnici ili druge interesne skupine. U procesu dizajniranja sustava definiraju se svi sustavski zahtjevi koji se potom segmentiraju i dotjeruju u specifikacije za određene segmente sustava. Postoje neka pitanja koja treba postaviti pri identifikaciji korisničkih zahtjeva a to su:

- Čemu će služiti sustav?
- Koje ciljeve treba ostvariti?
- Što su mu inputi koje će procesuirati, a što outputi?
- Što čini jezgru sustava?
- Koje su restrikcije i posebni zahtjevi?
- Koji su kriteriji za performanse sustava?
- Koja su troškovna ograničenja?
- Koji su mogući kompromisi troškova i performansi?

Korisna sistematizacija odnosno kategorizacija zahtjeva koji se odnose na dizajniranje složenih i kompleksnih sustava je postavio W. Wymore [7]. Razlikujemo šest kategorija sustavskih zahtjeva, a to su [2]:

- Input – output zahtjevi
- Tehnološki zahtjevi
- Zahtjevi u pogledu performansi
- Troškovni zahtjevi (ograničenja)
- Zahtjevi „razmjene“ troškova i performansi
- Zahtjevi testiranja sustava

Slika 5. prikazuje pregled sustavskih zahtjeva s naznakom odnosa između njih.



### **Slika 5.** Pregled sustavskih zahtjeva s naznakom odnosa između njih [8]

Input – output zahtjevi odnose se na prihvatljive inpute i outpute, trajektorije inputa i outputa, sučelja prema vanjskim sustavima i prihvatljivu funkciju koja pokazuje sustavske inpute i outpute. Tehnološki i širi sustavski zahtjevi odnose se na mogućnosti i ograničenja tehnološke i fizičke izvodljivosti sustava. To uključuje dostupnost tehnologije, uporabljivost, vrijeme razvoja itd. Zahtjevi u pogledu performansi specificiraju koliko dobro input – output zahtjevi mogu biti zadovoljeni što se iskazuje [1]:

- Očekivanim vremenom odziva sustava,
- Očekivanom kvalitetom itd.

Posebno se specificira kako parametri performansi mogu biti međusobno komparirani. Zahtjevi troškova odnose se na ukupne troškove tijekom čitavog životnog ciklusa sustava. Definira se algoritam koji omogućuje usporedbu troškova alternativnih dizajna ili tehnoloških rješenja sustava. Zahtjevi testiranja se odnose na [1]:

- Testiranje ispunjenja svih zahtjeva,
- Verifikaciju,
- Validaciju,
- Prihvaćanje sustava.

U procesu definiranja sustavskih zahtjeva sustavski inženjer treba težiti da se na odgovarajući način specificiraju svi zahtjevi, uz eliminiranje onih koji su nemogući ili neuskladivi [1].

Osnovni zahtjevi korisnika kod sustava upravljanja priljevnim tokovima su najčešće:

- Smanjenje prometne gužve na glavnoj cesti
- Smanjenje ukupnog vremena putovanja
- Smanjenje onečišćenja
- Smanjenje prometnih nesreća i nezgoda

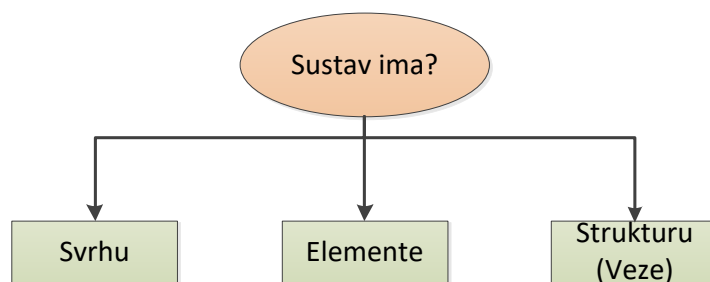
Korisnički zahtjevi također mogu uključivati davanje prioriteta javnom gradskom prijevozu, smanjenje broja lakših prometnih nezgoda koje bitno utječu na prometni tok, fluidnost prometnog toka na glavnim cestama ali i sposobnost samoučenja te adaptivno upravljanje sustava i sinkronizaciju više ulaznih rampi.

## **3.4. Elementi ITS metodologije**

Kako bi razumjeli ITS potrebno je krenuti od općih definicija sustava uz korištenje odgovarajućih poopćenih modela i interpretacija prilagođenih specifičnosti ITS-a. Iako je riječ sustav odnosno struktura, funkcija i proces u širokoj uporabi, često izostaje preciznije određenje tih termina. Riječ sustav potječe od Aristotela koji je uočio da sustav transcendentira elemente, tj. da je „sustav više od skupa dijelova“. Više autora dalo je definicije sustava koje se dijelom razlikuju ovisno o metodološkom pristupu, tj. interesu i pravcu proučavanja. Za početno razumijevanje termina sustav trebalo bi krenuti od općih definicija pojma sustav vodećih stručnjaka teorije sustava i kibernetike [1].

- L. W. Bertalanfy: Sustavi su skupine elemenata u međusobnom i uzajamnom djelovanju na koje se sustavski zakoni mogu primijeniti.
- D. Hall i R. E. Fagen: Sustav je skup objekata zajedno s odnosima između objekata i atributa tih objekata.
- G. J. Klir: Sustav je općenito predstavljen izrazom  $S=(T, R)$  gdje je T skup „stvari“, a R skup relacija definiranih na T
- M. D. Mesarević: Opći matematički sustav je relacija na apstraktnim skupovima.
- G. J. Klir – Orchardove definicije općeg sustava induktivno su izvedene prema fundamentalnim (primarnim) značajkama sustava:
  - Sustav S je skup veličina promatranih u odgovarajućoj rezolucijskoj razini
  - Sustav S je skup varijacija promatranih veličina u vremenu
  - Sustav S je određen vremenski – invarijantnom relacijom između trenutanih i/ili prošlih i/ili budućih vrijednosti eksternih veličina
  - Sustav S je određen skup elemenata, njihovih permanentnih ponašanja i veza između elemenata te između elemenata i okoline
  - Sustav S je skup stanja i skup promjena između stanja
  - Različite K- sustavske trajektorije dobivaju se aplikacijom sustavske procedure koja opisuje način kako fundamentalne značajke sustava variraju u vremenu.

Da li se nešto može definirati kao sustav može se procijeniti iz pozitivnih odgovora na tri temeljna pitanja vezana uz osnovne značajke sustava što je prikazano na slici 6.



**Slika 6.** Temeljna pitanja osnovnih značajki sustava [6]

Neovisno o fizičkoj javnosti, nešto će se definirati kao sustav ako to predstavlja svrhovitu i relativno izoliranu cjelinu koja ima određene elemente i strukture. Iz toga se može zaključiti da su osnovne značajke sustava [1]:

- Sustav ima realne ili apstraktne elemente
- Sustav ima strukturu odnosno veze i odnose između elemenata
- Sustav ima funkciju odnosno svrhu postojanja u određenoj okolini.

Pojam sustav vezan je uz organizaciju odnosno nešto što je suprotno kaosu. Realni problem je što iza korištenja riječi sustav obično ne stoji dublje razumijevanje niti povezivanje na neke od razrađenih modela sustavskog proučavanja i rješavanja problema.

U nastavku su dani primjeri definiranja sustava koristeći naredne opće sustavske značajke [1]:

- Realni tehnički sustav – tehnička olovka je primjer za ovaj sustav. Sastoji se od elemenata: kućište olovke, mina, mehanizam za pomicanje mine. Struktura tog sustava predstavlja povezivanje tih elemenata. Funkcija sustava je omogućiti pisanje na papiru. Gledište je tehnološki, a svrha promatranja je poboljšanje kvalitete crtanja ili pisanja.
- Apstraktni sustav – zakon o sigurnosti prometa na cestama je primjer apstraktnog sustava. Njegovi elementi su: naslov, poglavlja/članci 1 do n, zaglavlje. Strukturu, odnosno veze čine brojevi poglavlja/članaka i stavaka. Funkcija sustava je pružiti informacije o pravima i obvezama sudionika u cestovnom prometu. Svrha sustava je podići razinu sigurnosti prometa i smanjiti broj te posljedice nesreća.
- Prirodni odnosno živi sustav – primjer ovog sustava je pas. Elementi sustava su: glava, trup, četiri noge i rep. Strukturu čine veze mišića, zglobova i dr. Funkcija sustava je biti čovjekov prijatelj. Svrha je izabrati psa koji odgovara zahtjevima čovjeka.
- Kompleksni integrirani sustav – javni gradski prijevoz putnika je primjer za ovaj sustav, koji čine brojni elementi kao što su: putnici, vozila, stajališta itd., u

složenim interakcijama. Strukturu sustava čini način povezivanja elemenata koji može biti određen voznim redom, „na zahtjev“, itd. Funkcija sustava je omogućiti kvalitetan i racionalan prijevoz putnika na gradskom području. Gledište je prometno – tehnološko.

- Samoorganizirajući sustav – postiže željena stanja ili ponašanja interakcijom komponenata i povratnim vezama koje reguliraju kompleksno ponašanje.

Temeljno određenje ITS-a je svrhovito povezivanje različitih tehničkih komponenata i organizacijskih rješenja kojima se postiže učinkovitije, brže, sigurnije, zaštićenije i ekološki povoljnije obavljanje prijevoza ljudi i roba između izvorišta i odredišta. U pitanju je vrlo kompleksan dinamički otvoren sustav koji ima svojstva samoregulacije i samoorganizacije. Neophodno je da se polazi od produbljenih definicija sustava koji uključuju izvorne i podatkovne sustave, formalne opise ponašanja i strukture te opise vođenih sustava [1].

### **3.5. Metode sustavske analize**

Sustavska analiza je općenito definirana kao skup metoda i postupaka koje primjenjujemo kod sustavskog dizajniranja, kontrole i evaluacije sustava. U literaturi i praksi sintagma sustav analize pojavljuje se u različitim kontekstima i s različitim značenjima, kao npr. [1]:

- Sustavska analiza vrlo složenih sustava
- Sustavska analiza vezana za projektiranje, implementaciju i korištenje informacijskih sustava
- Sustavska analiza kao metoda ili postupak analize koji se temelji na sustavskom pristupu i izveden je prema načelima teorije sustava.

Karakteristika sustavske analize:

- Sistematičnost
- Sustavnost
- Heuristički način rješavanja problema

Sistematičnost znači da se sustavska analiza odvija po nekom definiranom planu korak po korak tako da svaka sljedeća aktivnost čini logičan nastavak prethodne. Sustavnost nije isto što i sistematičnost. Sustavnost znači istraživati i dekomponirati sustav do one sustavske razine gdje su funkcija, struktura i sustavski elementi dovoljno jasni da se može riješiti postavljeni problem. Heuristika predstavlja shemu razmišljanja odnosno način rješavanja problema koji se temelji na zdravom razumu i dobro postavljenom cilju.

Od početka primjene sustavske analize početkom Drugog svjetskog rata do danas razvijeno je više metoda koje se tako nazivaju ili se mogu obuhvatiti pod nazivom sustavske analize. Uz analize vezane za kompleksne vojne i svemirske programe razvijene su opće primjenjive analize, kao što su [1]:

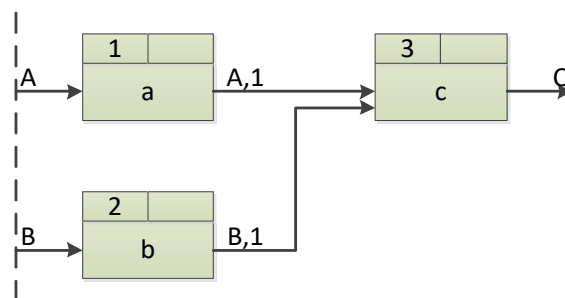
- Metoda crne kutije - sustav može imati više ulaza te jedan ili više izlaza. Obilježje koje opisuje i definira oblik sustava naziva se granica sustava, pri čemu je sustav mahom unutar granica, dok je okolina izvan tih granica [9].
- Metoda bijele kutije i metoda sive kutije
- Strukturna sustavska analiza - SSA promatra sustav kao funkciju (odnosno proces), koja na osnovu ulaznih podataka i skladišta podataka generira izlazne podatke, tretira se kao metodološki postupak dekompozicije nekog sistema na podsisteme [10].
- Sustavska funkcionalna analiza
- Metoda  $N^2$  karte, itd.

### 3.5.1. Objektogram

Objektogram je vrsta sustavskog dijagrama kojim prikazujemo strukturu promatranog sustava odnosno elemente (objekte) i veze. Da bi se nacrtao objektogram neophodno je znati ili barem pretpostaviti što se gdje događa i kojim vremenskim redoslijedom se to događa. Ako se dobro nacrtat objektogram će poslužiti [1] :

- Kao polazište za izradbu drugih sustavskih dijagrama (funkciograma, dijagrama ponašanja sustava itd.)
- Za izravno iznalaženje rješenja problema.

Na slici 7. je prikazan objektogram zadanog sustava s tri elementa.



Slika 7. Objektogram zadanog sustava s tri elementa [6]

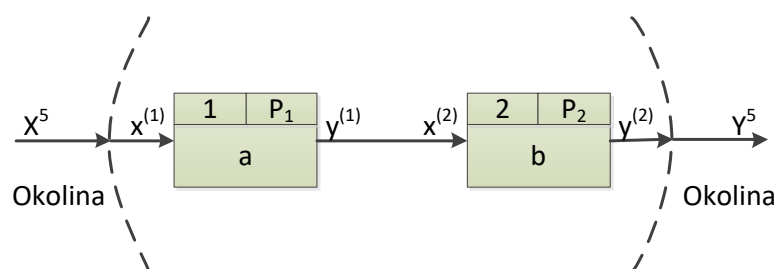
Iz objektograma je vidljivo od čega se sustav sastoji i kakva je njegova struktura tako da on može poslužiti za daljnji razvoj sustava. Važne značajke objektograma su:

- Objektogram je osnovni sustavski dijagram kojim se prikazuje struktura promatranog sustava temeljem verbalnog ili drugog opisa sustava;
- Objektogram mora sadržavati sve elemente i sve vanjske i unutarnje veze sustava;
- Vremenski redoslijed veza ključan je pri crtanju objektograma dinamičkog sustava;
- Počinje se vektorom ulaza budući da po logici sustava svaki ulaz mora biti prihvaćen od nekog elementa u sustavu;
- U elementima se događaju procesi koji transformiraju ulaznu veličinu u izlaznu i predaju je sljedećem elementu;
- Svaki element crta se samo jednom;
- Između elemenata mogu postojati povratne veze [1].

### 3.5.2. Funkciogram

Funkciogram je tip sustavskog dijagrama koji prikazuje način funkcioniranja sustava odnosno slijed procesa po elementima u promatranom sustavu. Funkciogram je, osim kod najjednostavnijih sustava (gdje između objektograma i funkciograma nema razlike) potrebno koristiti u kombinaciji s objektogramom. Nakon izradbe funkciograma, pristupa se matematičkom opisu sustava odgovarajućim jednadžbama pri čemu treba voditi računa o determiniranosti ponašanja elemenata i sustava u cjelini [1].

Na slici 8. je prikazan funkciogram jednostavnog dinamičkog sustava.



**Slika 8.** Funkciogram jednostavnog dinamičkog sustava [6]

Svrha funkciograma je formalno prikazati način funkcioniranja sustava do razine procesa pridruženog svakom elementu; funkciogram se crta počevši od ulaznih veličina i ulaznih elemenata te se postupno razvija prema izlaznim elementima tako da se u pravokutnicima označe elementi kojima se proces odvija. U funkciogramu ne smiju biti povratne veze a svaki



element se crta onoliko puta koliko raznih procesa se u njemu obavlja, tj. koliko se transformacija ili drugih obrada koje izazivaju vremenski pomak u njemu događa.

Monofunkcionalni element ima jedan nedjeljiv proces s jednim ili više ulaza i izlaza, a multifunkcionalni elementi obavljaju više procesa koji mogu biti usporedivi ili slijedni te usporedna multifunkcionalnost znači da se u promatranom elementu procesi odvijaju usporedno.

Slijedna multifunkcionalnost znači da se u multifunkcionalnom elementu može odvijati više procesa slijedno jedan iza drugog, ali ne i usporedno. Razlikuje se čvrsta i slobodna slijedna multifunkcionalnost dok čvrsta slijedna multifunkcionalnost znači da redoslijed nije odrađen unaprijed nego prema potrebi. Multifunkcionalni elementi s više usporednih procesa u funkciogramu se mogu crtati jednom ili više puta, ovisno o prikladnosti, a u funkciogramu je nužno osigurati procesno ili izravno označavanje počevši od ulaznog elementa prema izlaznom elementu [1].

## 4. IZRAŽAVANJE I MJERENJE KOMPLEKSNOSTI SUSTAVA

Teorija kompleksnih sustava je skup temeljnih objašnjenja kompleksnosti i pripadajućih metoda koje omogućuju spoznavanje i objašnjenja ponašanja takvih sustava. Budući da postoji sličnost između različitih klasa kompleksnosti sustava, moguće je poopćavanjem i apstrahiranjem utvrditi njihova zajednička sustavska svojstva.

Sustavski pristup omogućuje integraciju analitičkih i sintetičkih metoda u proučavanju otvorenih sustava koji su u integraciji s okruženjem. Zbog toga ima ključnu prednost u odnosu na analitički pristup fokusiran na zatvorene sustave.

U novije vrijeme je posebna pozornost usmjerena na proučavanje kompleksnih i samoorganizirajućih sustava te prevladavanje ograničenja redukcionističkog pristupa [12].

Slika 9. prikazuje razvoj kompleksnih sustava te njegove komponente:



**Slika 9.** Razvoj kompleksnih sustava [6]

Samoorganizirani sustav je sustav u kojemu su komponente u interakciji tako da se dinamički ostvaruje funkcija ili željeno ponašanje sustava. To nije ostvareno s jednom ili nekoliko upravljačkih komponenata, nego se postiže autonomno kroz interakciju komponenata i povratnim spregama koje reguliraju sustav. Hoće li neki dinamički sustav biti definiran kao samoorganizirajući to bitno ovisi o promatraču. Npr., ako se preferirana stanja sustava definiraju kao organizirajući sustav, tada će dinamika ponašanja biti vođena prema postizanju samoorganizacije sustava. Za razumijevanje samoorganizirajućih sustava nužno je koristiti višerazinsku analizu i apstrahiranje [12].

#### **4.1. Kompleksni sustavi**

Kompleksni sustav je sustav koji se sastoji od više elemenata koji međusobno mogu komunicirati. Budući da postoji sličnost između različitih klasa kompleksnih sustava, moguće je poopćavanjem i apstrahiranjem utvrditi njihova zajednička sustavska svojstva.

Sustavski pristup omogućuje integraciju analitičkih i sintetičkih modela u proučavanju otvorenih sustava koji su u integraciji s okruženjem. Zbog toga ima ključnu prednost u odnosu na analitički pristup fokusiran na zatvorene sustave. U novije vrijeme posebna je pozornost usmjerena na proučavanje kompleksnih i samoorganizirajućih sustava te prevladavanje ograničenja redukcionističkog pristupa [1].

U standardnim rječnicima kompleksnost je opisana kao obilježje vezano uz velik broj povezanih dijelova odnosno oblika i kao stanje koje je teško detaljno razložiti i opisati.

Za razliku od složenih sustava koji se mogu dekomponirati na jednostavne i na taj način ih dalje rješavati, kod kompleksnih sustava uvijek postoji značajan „ostatak“ koji nije obuhvaćen dekompozicijom. Pojavna svojstva odnosno veličine kompleksnog sustava ne mogu se identificirati i pratiti u pojedinom dijelu. Stupanj kompleksnosti je određen:

- Brojem komponenata sustava
- Brojem i vrstom interakcija
- Odnosima ciljeva
- Kompleksnošću vođenja
- Kompleksnošću znanja i vještina
- Subjektivnim konotacijama itd.

#### **4.2. Kompleksni adaptivni sustavi**

Kompleksni adaptivni sustavi predstavljaju posebnu vrstu adaptivnih sustava. Kompleksni su na način da su sastavljeni od više međusobno povezanih elemenata, a adaptivni su na način da imaju sposobnost stvarnovremenske promjene te učenja iz iskustva.

Deskriptivna kompleksnost je definirana veličinom najkraćeg opisa sustava određenim standardnim jezikom, a simulacijska kompleksnost predstavlja veličinu najkraćeg programa kojim se može simulirati ponašanje sustava na računalu. Većina studija koje proučavaju računalnu kompleksnost orijentirane su najprije na najteži slučaj problema. To znači da su „prepesimistične“.

U literaturi postoje različiti prikazi i podjela faza modeliranja kompleksnih sustava. Proces modeliranja može početi definiranjem [1]:

- Cilja, tj. koje specifične informacije i znanja trebamo,
- Funkcije modela.

ITS kao funkcionalni sustav ima određena invarijantna svojstva vezana za njegovu funkciju, no struktura i ponašanje promjenjivi su u prostoru i vremenu. Matematizirani modeli determinističkih linearnih sustava ne uključuju u razmatranje kompleksne interakcije većeg broja komponenata.

Za modeliranje ponašanja ITS sustava je moguće koristiti metode:

- „sustavske dinamike“
- Simulacije diskretnih događaja
- Fuzzy zaključavanja
- Neuronske mreže
- Genetskih algoritama itd.

Ovladavanje kompleksnošću ključno je za drugu fazu životnog ciklusa modeliranja, odnosno konceptualizaciju. Model treba obuhvatiti samo ono što je esencijalno za cilj i funkciju modela. Reduciranje kompleksnosti modela se postiže:

- Selekcijom aspekata
- Agregiranjem različitih komponenata u jedan entitet
- Aproksimiranjem strukture i ponašanja [1].

## 5. SUSTAVI UPRAVLJANJA PRILJEVNIM TOKOVIMA

Ulazna rampa (Ramp meter) je uređaj, obično semafor s crvenim i zelenim svjetlosnim signalom, koji regulira pritek prometa koji se uključuje na autocestu. Ulazne rampe postavljene na više prilaznih traka na različitim čvorovima autoceste mogu međusobno komunicirati u cilju bolje optimizacije prilaznog toka. Pri upravljanju gradskim prometnim sustavom moguće je postojeći sustav nadograditi kooperativnim konceptom radi poboljšanja sustava javnog gradskog prijevoza (dodjelom prioriteta vozilima javnog gradskog prijevoza). Suradnja (engl. cooperation) između vozila javnog gradskog prijevoza i upravljačkog sustava (pr. glavni prometni centar) ključna je u razvoju novih sustava upravljanja prometom budući da ti podsustavi više ne djeluju samostalno, nego "suraduju" u cilju poboljšanja kvalitete gradskog prometnog sustava u cjelini [1].

Sustav upravljanja priljevnim tokovima je raspoređivanje prometnih signala na rampi za kontrolu količine ili frekvencije ulaska vozila koja ulaze na autocestu. Kontroliranjem količine ili frekvencije vozila kojima je dopušten ulazak na autocestu, promet postaje dosljedniji, povećava se brzina prometa na glavnoj cesti te se omogućuje učinkovitije korištenje kapaciteta autoceste. Sustav upravljanja priljevnim tokovima se može koordinirati s drugim sustavima kontrole priljevnih tokova kako bi se omogućio nesmetani promet u određenoj točki ili na dionici autoceste.

Sustavi kontrole priljevnih tokova imaju pozitivne učinke na protok prometa na autocesti, smanjenje i posljedice zagušenja prometa (sudari, kašnjenja, emisije plinova i potrošnja goriva) te sekundarne incidente. Međutim, valja napomenuti da vozači mogu odabrati zaobilazak sustava upravljanja priljevnim tokovima priključivanjem na autocestu na čvorištima gdje ne postoji prilazna rampa. Mogućnost preusmjerenja prometa je problem koji se treba uzeti u obzir prije postavljanja sustava upravljanja priljevnim tokovima te ga uvrstiti u početne specifikacije sustava prilikom izračuna. Sustav upravljanja priljevnim tokovima u praksi se koristi od kasnih 1950 – tih i početkom 1960 – tih godina kada su sustavi kontrole priljevnih tokova postavljeni u Chicagu, Detroitu i Los Angelesu. Od tada je više od 2100 sustava upravljanja priljevnim tokovima primijenjeno u 29 gradova unutar Sjedinjenih Država (SAD) [1].

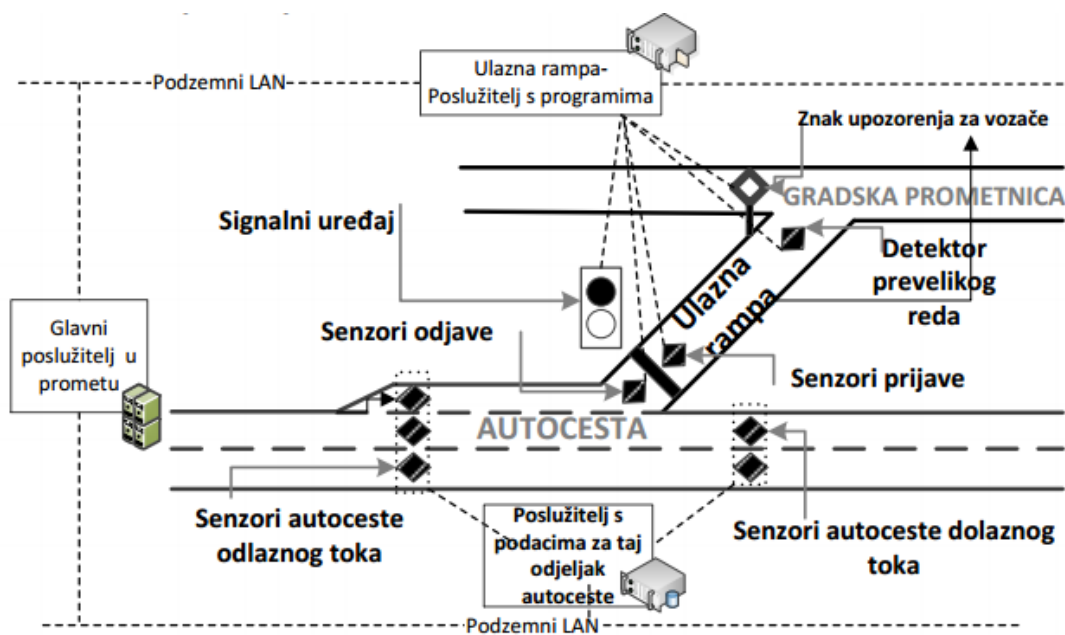
Tipično, sustavi kontrole priljevnih tokova su raspoređeni na rampe koje povezuju autoceste s lokalnim priljevnim ulicama, međutim u SAD – u je bilo nekoliko slučajeva gdje su raspoređeni na rampe koje povezuju jednu autocestu s drugom u sljedećim gradovima:

- Minneapolis – St. Paul, Minnesota,

- San Francisco – Oakland – San Jose, Kalifornija, San Diego, Kalifornija,
- Milwaukee – Racine, Wisconsin,
- Portland, Oregon – Vancouver, Washington,
- Seattle, Washington [1].

Iskustvo sa sustavima kontrole priljevni tokova je pokazalo učinke povećane sigurnosti, smanjeno ukupno vrijeme putovanja, povećanu brzinu i propusnost prometnog toka i pozitivne učinke na okoliš. Kada su sustavi kontrole priljevni tokova bili isključeni šest tjedana u Minneapolisu, procjene prije i nakon su pokazale da su sustavi kontrole priljevni tokova bili odgovorni za 21 % smanjenje nesreća. Istraživanja u Minnesoti i Glasgou u Škotskoj su pokazala da većina vozača promatra sustave kontrole priljevni tokova kao korisnu strategiju upravljanja prometom.

### 5.1. Komponente sustava upravljanja priljevnim tokovima



Slika 10. Komponente sustava upravljanja priljevnim tokovima [13]

Za ostvarivanje sustava upravljanja priljevnim tokovima prometa potrebno je više elemenata, a to su [1]:

1. Semafori na rampama – rad semaforских uređaja za sustav upravljanja priljevnim tokovima prometa ovise o strategijama ovakvog sustava. Važno je naglasiti da

semaforske uređaje većinom prate prometni znakovi i table koje sudionike u prometu upućuju na način propuštanja vozila na glavni tok.

Na slici 11. je prikazan semaforski uređaj za sustav upravljanja priljevnim tokovima prometa

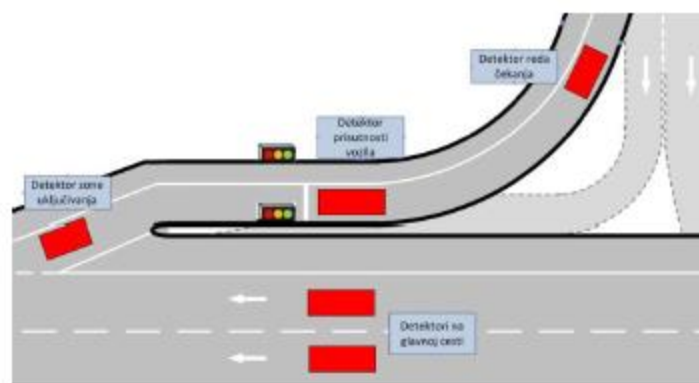


**Slika 11.** Semaforski uređaji za sustav upravljanja priljevnim tokovima prometa [14]

2. Detektori na glavnoj prometnici i rampama – uzmemo li u obzir činjenicu da se sustav upravljanja priljevnim tokovima prometa temelji na visokoj tehnologiji i činjenicu da je uključivanje u tok s višom prednosti jedna od najrizičnijih radnji u prometu možemo zaključiti da ovaj sustav mora raditi bez greške. Da bi se osiguralo funkcioniranje sustava bez prometnih nesreća važno je uzeti u obzir mnoštvo podataka koje skupljaju sljedeći detektori:

- Detektori na rampi – detektori koji prate dolazak vozila koja se žele uključiti u glavni tok prometa.
- Detektor prisutnosti vozila – detektor koji obavještava sustav da je jedno ili više vozila spremno za uključivanje u glavni tok prometa.
- Detektor zone uključivanja – detektor koji se postavlja na područje gdje se prepliću glavni i sporedni tok prometa.
- Detektor reda čekanja – detektor koji prvi obavještava na dolazak vozila na priključnu rampu, ali primarni cilj mu je praćenje reda čekanja kako bi se sustav mogao prilagoditi novonastaloj situaciji.
- Detektori na glavnoj prometnici – ovi detektori prikupljaju informacije o vozilima u glavnom toku poput njihove brzine i gustoće prometa.

Na slici 12. je prikazan raspored pojedinih detektora na prometnici. Kao što se vidi na slici, detektorima su pokrivena najvažnija područja priključne rampe i glavne ceste. Dobar raspored detektora ključan je za funkcioniranje sustava [15].



**Slika 12.** Prikaz rasporeda pojedinih detektora [16]

3. Lokalni uređaji, odnosno cestovne prometne stanice, imaju ulogu lokalnog kontrolera opreme spojene na sam uređaj. Bilo na urbanim raskrižjima ili točki spajanja priljevnih tokova na autocesti, lokalni uređaji primaju, obrađuju i upravljaju sa mjernim uređajima poput detektora ili izvršnim elementima poput semaforne lantern. Također, u centraliziranim sustavima lokalni uređaj služi kao koncentrator podataka koji se šalju u glavni sustav.
4. Centralni računalni sustav kontrolira cijeli sustav i u njega se prikupljaju sve dostupne informacije koje se na kraju obrađuju, a kao rezultat dobivamo funkcionalan prometni sustav.[16]

## **5.2. Najčešće korišteni algoritmi u sustavu upravljanja priljevnim tokovima**

Algoritmi za isključivo upravljanje priljevnim tokovima spadaju u algoritme za obradu, te ćemo se njima detaljnije baviti u ovom radu. Razlikuju se od ostalih (općih) algoritama za upravljanje priljevnim tokovima, jer im je temeljna svrha optimizirati parametre procesa priljeva priljevnih tokova u glavni tok autoceste kako bi stvarali što manje smetnje u protočnosti glavnog toka [18]. Algoritme možemo podijeliti na dvije velike skupine:

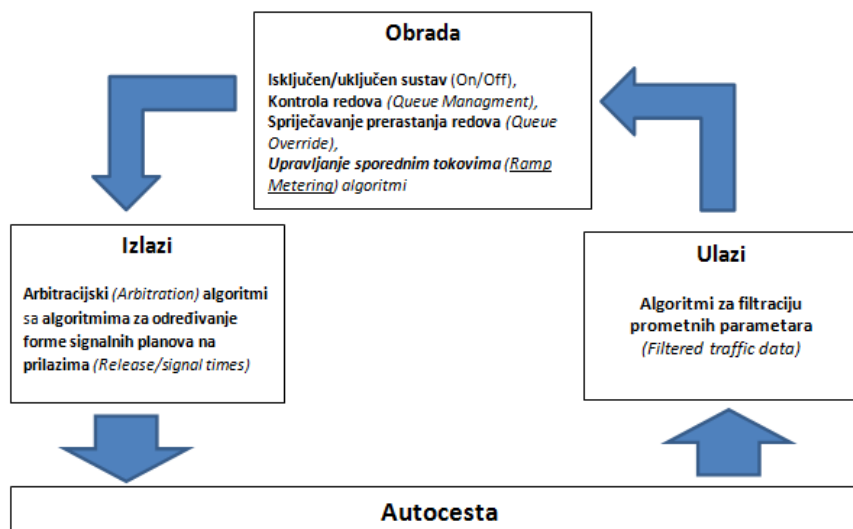
1. Izolirane ili lokalne, kod kojih je algoritam primijenjen na pojedinom prilazu autocesti neovisno o stanju prometa na drugim prilazima [18].
2. Koordinirane, kod kojih je algoritam primijenjen u međusobno ovisnom upravljanju priljevnim tokovima u određenoj skupini prilaza autocesti koje pokriva dotični algoritam. Ova skupina algoritama uzima u obzir prometno stanje cijelog prometnog sustava autoceste za razliku od lokalne skupine algoritama koji donose odluku o vrijednosti toka koji se propušta na prilazima neovisno o ukupnoj situaciji. U



literaturi se ovi algoritmi dijele dodatno još i na kooperativne, nadmetajuće i integrirane [18].

- *Kooperativni* se razlikuju od klasičnih koordiniranih algoritama po tome što se nakon proračuna stupnja propuštanja toka na svakom prilazu dodatno proračunavaju promjene na tim vrijednostima. Promjene se proračunavaju prema informacijama o cijelom sustavu autoceste kako bi se izbjegla zagušenja na uskim grlima ili propuštanje prevelike količine priljevnog prometnog toka s pojedinih prilaza. Najveća mana ovih algoritama je što su osjetljivi na iznenadne kritične situacije zagušenja. Danas ih gotovo nema u operacionalnoj upotrebi [19].
- *Nadmetajući* algoritmi imaju pretežito dvije upravljačke logike po kojima proračunavaju stupanj propuštanja priljevnog prometnog toka s prilaza. Obično se radi o globalnoj i lokalnoj upravljačkoj logici. Svaka vrsta upravljačke logike ponudi vlastitu vrijednost za stupanj propuštanja priljevnog toka pojedinog prilaza. Odabire se ona vrijednost koja je restriktivnija, odnosno manja. Danas su najraširenija podskupina *algoritma za isključivo upravljanje priljevnim tokovima* u operacionalnoj upotrebi [19].
- *Integrirana skupina* je od ove tri podskupine najzanimljivija i najsofisticiranija skupina algoritama. Ona se definira kao upravljački sustav koji ima cilj optimizirati proces sustava upravljanja priljevnim tokovima integracijom različitih tipova upravljačkih algoritama koji kao ulaze koriste širok spektar prometnih parametara. Mogu biti integrirani u jedinstven algoritam ili mogu djelovati pojedinačno pomoću posebnih integracijskih modula. Također, često imaju precizan cilj u upravljanju koji može biti eksplicitno ili implicitno vezan za upravljačku akciju. Primjerice, precizan cilj može biti prosječno vrijeme prolaska automobila autocestom ili prosječna brzina. Oni odlučuju o stupnju propuštanja priljevnih tokova na temelju optimizacije preciznog cilja uz poštivanje ograničenja kao što je maksimalna dozvoljena propusnost prilaza, kapacitet uskih grla, itd. Ova podskupina algoritama uglavnom ima kompleksnu logiku rada i zahtjevan proračun. Od iznimne im je važnosti kvaliteta ulaznih podataka.

Slika 13. prikazuje algoritme za isključivo upravljanje priljevnim tokovima



**Slika 13.** Prikaz algoritama u sustavu upravljanja prilaznim tokovima autocesti [20]

U idućim poglavljima pojedinačno su opisani najvažniji te najčešće korišteni algoritmi u sustavima upravljanja priljevnim tokovima.

### 5.2.1. Algoritmi za filtraciju podataka

Algoritmi za filtraciju podatka spadaju u ulazne algoritme, te računaju korigirane vrijednosti za tok, brzinu i zauzeće iz sirovih podataka o vozilima prikupljenih od strane detektora. Također, spomenuti algoritam prilagođava i format zapisa podatka formatu koji koriste algoritmi za obradu. Postoje dvije vrste algoritama za filtraciju ulaznih podatka:

- a) Algoritam za filtraciju podatka dobivenih iz glavnog toka autoceste
- b) Algoritam za filtraciju podatka dobivenih iz priljevnih tokova autoceste.

### 5.2.2. Algoritam za isključivanje i uključivanje sustava

Algoritam za isključivanje i uključivanje sustava spada u algoritme za obradu, te kao što mu ime samo sugerira glavna mu je funkcija isključiti ili uključiti cijeli sustav upravljanja priljevnim tokovima. U postavkama algoritma se prethodno treba definirati najveći i kritični stupanj protočnosti za promatrani segment autoceste. Ukoliko se na temelju podataka dobivenih od algoritama za filtraciju podataka dođe do zaključaka kako je došlo do pada stupnja protočnosti sustava ispod vrijednosti kritične protočnosti - algoritam se pokreće. U trenutku pokretanja algoritma za isključivanje i uključivanje sustava pokreću se i svi ostali algoritmi za obradu, među kojima i algoritmi za isključivo upravljanje priljevnim tokovima. Sustav je u stanju rada do trenutka kada su izlazi ostalih algoritama za obradu manji od trenutnog stupnja protočnosti što znači da ako je uspostavljen zadovoljavajući stupanj protočnosti, sustav se može isključiti [18].

Također ovaj algoritam može inicirati postupak uključivanja ukoliko je brzina iznad ili na granici predodređene sigurnosne operacionalne brzine. Obično ovaj algoritam ima pet operativnih modova [21]:

- Ručno uključivanje – prema mišljenu operativnog osoblja
- Ručno isključivanje - prema mišljenu operativnog osoblja
- Vremenski – operacionalan u slučaju postizanja maksimalne predefinirane brzine ili ovisno datumu ili vremenskom periodu dijela dana u kojem radi (npr. uključivanje u vrijeme predodređenog vršnog sata opterećenja)
- Vremenski u sprezi s zauzećem – operacionalan ovisno o vremenskom periodu dijela dana u kojem radi i datumu, ukoliko su zadovoljeni uvjeti minimalnog zauzeća i maksimalne brzine
- Vremenski u sprezi s tokom i zauzećem - operacionalan ovisno o vremenskom periodu dijela dana u kojem radi i datumu, ukoliko su zadovoljeni uvjeti minimalnog toka i minimalnog zauzeća.

### **5.2.3. Algoritam za kontrolu redova na prilazima**

Algoritam za kontrolu redova spada u algoritme za obradu. Zadržava duljinu reda u zadovoljavajućim granicama kako bi se maksimizirao period efektivnog operacijskog postupka ulijevanja priljevnihi tokova u glavni. Danas se najviše koristi algoritam kontrole redova temeljen na proporcionalnosti zauzeća prostora za čekanje u redu. On prati zauzeće svakog detektora prilaza kako bi proračunao prosječno zauzeće prostora za čekanje u redu na promatranom prilazu autocesti. Ta se vrijednost koristi za procjenu duljine reda. Prema procijenjenoj vrijednosti duljine reda, algoritam postavlja željenu vrijednost oslobađanja prometnog toka sa prilaza na kojem se promatra red. Ta vrijednost ima cilj održati duljinu reda prilaza u preddefiniranoj vrijednosti [18].

### **5.2.4. Algoritmi za sprječavanje prerastanja redova čekanja na prilazu**

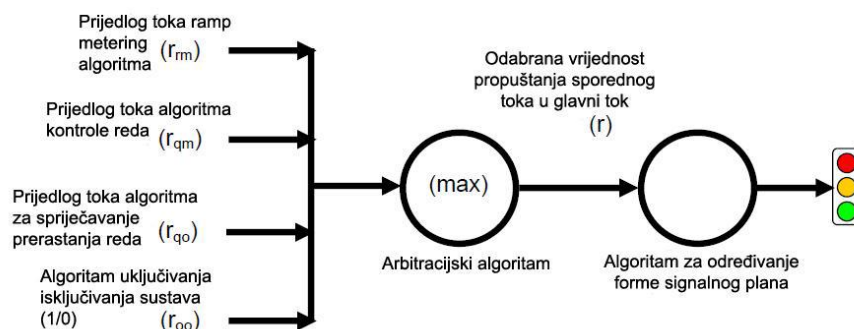
Algoritmi za sprječavanje prerastanja redova spadaju u algoritme za obradu. Temeljna zadaća im se očituje u sprječavanju utjecaja veličine reda prilaza autocesti na promet lokalnih cesta. To postižu na jednostavan način – detekcijom prisustva ekstremno velikog reda na prilazu koji teoretski može ometati promet na lokalnim cestama. Obično se detekcija takvog događaja obavlja postavljanjem detektora u neposrednoj blizini lokalne prometnice na koju

može djelovati teoretski ekstremni red prilaza autocesti. Ukoliko je taj detektor stalno pod podržtanjem vjerojatno je u tijeku ekstremna situaciju prerastanja reda čekanja na prilazu. U tom slučaju algoritam odmah propušta maksimalni mogući protok na tom prilazu, kako bi onemogućio daljnji utjecaj ekstremnog reda na lokalne ceste [18].

### 5.2.5. Arbitracijski algoritam

Arbitracijski algoritam spada u skup izlaznih algoritama. Ovaj algoritam ima neobično važnu funkciju u cjelokupnom sustavu upravljanja priljevnim tokovima. On odlučuje koja će se vrijednost stupnja propuštanja priljevnih prilaza izabrati između skupa predloženih vrijednosti od strane svih algoritma za obradu (algoritama za sprječavanje prerastanja redova, kontrole redova, uključivanje-isključivanje sustava, te samog algoritma za upravljanje priljevnim tokovima). Nakon što je izabrao vrijednost kojom se definira stupanj propuštanja priljevnih tokova ona se prosljeđuje algoritmu za određivanje forme svjetlosnih signala na prilazima.

Shemu položaja i funkcije arbitracijskog algoritma u cijelom sustavu vidimo na slici 14.



**Slika 14.** Shema položaja i funkcije arbitracijskog algoritma u cijelom sustavu upravljanja priljevnim tokovima [20]

Pri odabiru prioritete vrijednosti arbitracijski algoritam može koristiti veoma komplicirane mehanizme, ali u većini slučajeva jednostavno odabire najveću vrijednost izlaza algoritama za obradu. To je ponajprije izvedeno na spomenuti način zbog algoritma za sprječavanje prerastanja redova čekanja koji ukazuje na najgoru moguću situaciju na prilazu. Ukoliko se ona dogodi algoritam za sprječavanje prerastanja redova čekanja prosljeđuje arbitracijskom algoritmu vrijednost maksimalnog dopuštenog toka (stupnja propuštanja) na prilazu na kojem se dogodilo prerastanje reda. Pošto je to najveća predložena vrijednost zanemaruju se prijedlozi ostalih algoritama za obradu [18].

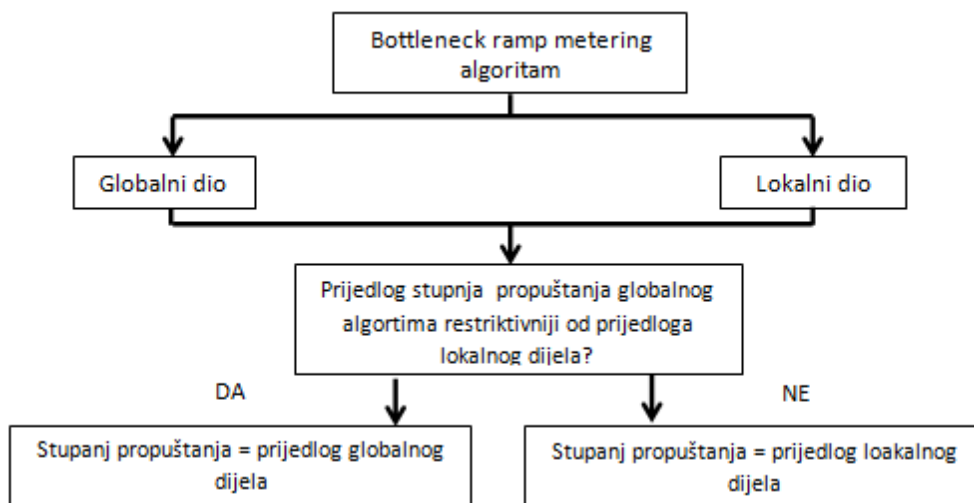
### 5.2.6. Algoritam BOTTLENECK

BOTTLENECK algoritam je konceptualno jedan od najboljih heurističkih koordiniranih algoritama za isključivo upravljanje priljevnim tokovima koji se koristi u praksi. Još se naziva i Seattle BOTTLENECK algoritam, jer je prvi put implementiran na području grada Seattle-a od strane WDOT-a (*Washington Department of Transportation*). Algoritam se odvija u realnom vremenu, logika rada mu je jednostavna (bazirana na podacima prometne ponude i potražnje, te promatranjem prometnih tokova), te se odlikuje visokim stupnjem fleksibilnosti (potrebno je prilagoditi veoma malo parametara) [1].

BOTTLENECK algoritam autocestu dijeli u segmente s obzirom na lokacije pojavljivanja uskih grla, odnosno zagušenja. Logika rada algoritma je podijeljena na dva stupnja djelovanja [18]:

- Lokalnom – stvarno-vremenska prometna potražnja toka koji se kreće prema prilazu autocesti uspoređuje sa kapacitetom toka koji se kreće od prilaza, te je razlika između te dvije vrijednosti stupanj propuštanja priljevnog toka na prilazima autocesti.
- Globalnom – koordinirana kontrolna strategija identificira zagušenja i računa potrebnu redukciju prometnog toka na prilazima kako bi se sačuvao predefrirani protok glavnog toka. Algoritam zatim distribuira vrijednost redukcije priljevnog toka pojedinim prilazima prema predefriranim težinskim vrijednostima. Težinske vrijednosti se baziraju na stupnju kritičnog utjecaja pojedinog prilaza autocesti na glavni tok. U trenutku kada se proračunaju ta dva stupnja propuštanja priljevnih tokova u glavni tok uzima se onaj koji ima manju vrijednost, odnosno koji je restriktivniji za propuštanje priljevnih tokova.

Osnovni dijagram toka algoritma je prikazan na slici 15.



**Slika 15.** Osnovni dijagram toka Bottleneck algoritma [23]

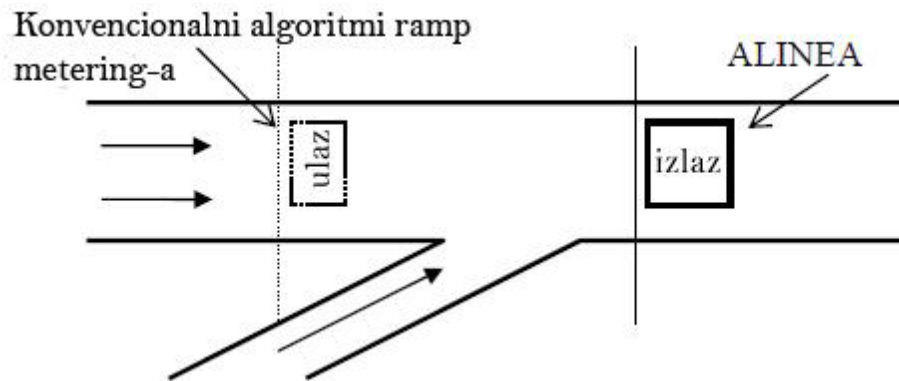
Danas postoje i mogućnosti poboljšanja rada uvođenjem robusnijeg ALINEA algoritma u lokalni stupanj djelovanja ovog algoritma, kao i dinamičko obnavljanje težinskih vrijednosti utjecaja pojedinih prilaza ovisno o trenutačnoj situaciji.

### 5.2.7. Algoritam ALINEA

Spada u lokalnu skupinu algoritama, iako danas postoji i koordinirana verzija algoritma. Ima prilično jednostavan princip funkcioniranja, te daje zadovoljavajuće rezultate upravljanja s obzirom na jednostavnost njegove prirode i implementacije. Stoga je od iznimne važnosti pri bilo kojoj komparaciji i analizi algoritama sustava upravljanja priljevnim tokovima. Dodatni razlog njegovom pojavljivanju u gotovo svakoj analizi i komparaciji algoritama za isključivo upravljanje priljevnim tokovima je to što je najkorišteniji algoritam na europskom sustavu autoceste.[22]

ALINEA algoritam se bazira na logičkoj strukturi povratne veze od strane detektora glavnog toka autoceste. Temeljni mu je cilj dinamički održati razinu zauzeća kapaciteta segmenta autoceste na kojem se priljeva sporedni tok ispod predefiniране granice zauzeća dotičnog segmenta. Kako bi ostvario spomenuti cilj izdaje prometno ovisne naredbe za regulaciju mogućnosti priljeva priljevnog toka u glavni tok dotičnog segmenta autoceste. ALINEA algoritam zahtjeva samo jedan detektor po traci autoceste. On se treba postaviti niže od prilaza autocesti na kojem je implementiran algoritam [21].

Grafički prikaz lokacije detektora se može vidjeti na slici. Na slici 16. je također prikazana i lokacija detektora kod ostalih prometno ovisnih algoritama sustava upravljanja priljevnim tokovima.



**Slika 16.** Lokacija detektora algoritma ALINEA u odnosu na konvencionalne algoritme [23]

Brzina propuštanja vozila u intervalu  $(t, t + \Delta t)$  računa se po sljedećoj formuli:

$$r(t) = r'(t - \Delta t) + K_R * (O' - O(t)) \quad (1)$$

gdje je:

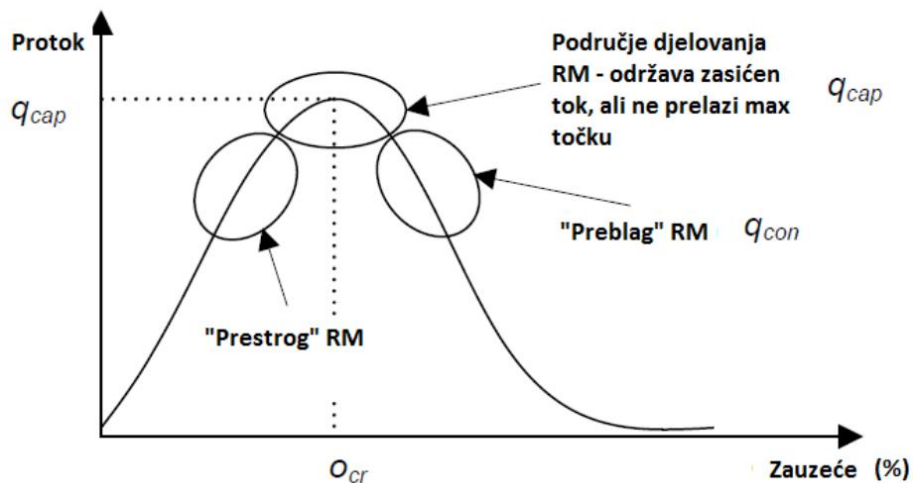
- $\Delta t$  – ciklus osvježanja sustava
- $O'$  – željeni stupanj zasićenja na senzoru
- $O(t)$  – izmjereni stupanj zasićenja na senzoru u vremenskom intervalu  $(t, t + \Delta t)$
- $r'(t - \Delta t)$  – izmjerena brzina propuštanja vozila u vremenskom intervalu  $(t, t + \Delta t)$
- $K_R$  – kontrolni parametar

### 5.3. Izračun signalnih planova sustava upravljanja priljevnim tokovima

Balansiranjem između prometne potražnje i kapaciteta razdvajanjem kolone vozila na pojedinačna vozila te njihovom kontrolom nastoje se postići glavni ciljevi i strategije sustava upravljanja priljevnim tokovima:

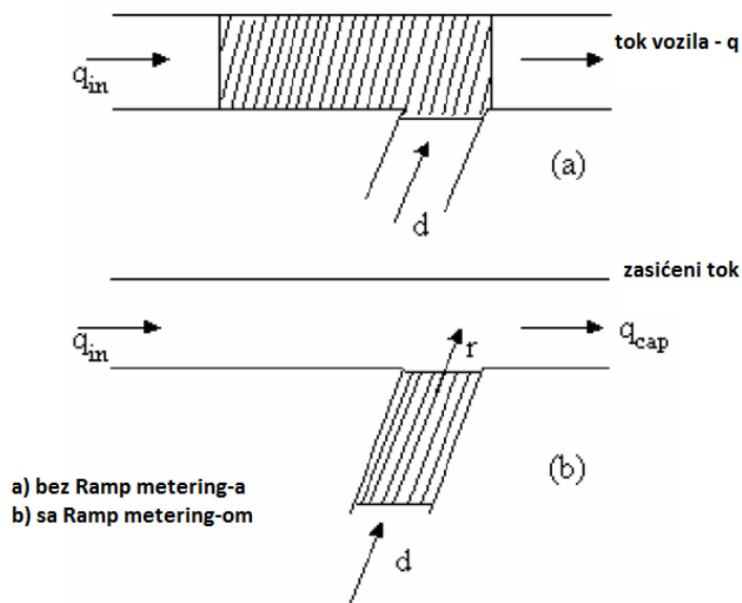
- Održati optimalan prometni tok minimiziranjem incidenata (zastoj, prometne nezgode)
- Smanjiti broj nezgoda (prvenstveno prilikom uključivanja na autocestu)
- Dati prioritet određenoj klasi vozila (autobusi, teretna vozila...)
- Smanjiti onečišćenje okoliša [21].

Kao što je prikazano na slici 17., praktični cilj sustava upravljanja priljevnim tokovima je izbjeći pad kapaciteta prometnice uslijed povećanja protoka vozila.



Slika 17. Područje djelovanja sustava upravljanja priljevnim tokovima [14]

Učinkovitost prometne mreže ovisi o nekoliko parametara (Slika 18.):



Slika 18. Učinkovitost prometne mreže [14]

gdje je:

- $q_{in}$  – ulazni tok vozila autoceste
- $d$  – ulazni tok rampe
- $q$  – protok prilikom zastoja (5-20% manji od kapaciteta)
- $q_{cap}$  – maksimalan protok (kapacitet)

Sustav upravljanja priljevnim tokom će stvoriti dodatnu gužvu na rampi, ali će održavati tok na glavnoj prometnici oko kapaciteta. [14]



Signalni planovi semaforških kontrolera na ulaznim rampama se računaju isto kao i za standardno semaforizirano raskrižje, korištenjem geometrijskih parametara prometnice te prometnih podataka (slika 19.).

PARAMETAR	VRIJEDNOST
GEOMETRUSKI PODACI	
Duljina sekcije (m)	253,7
Broj traka na glavnoj prometnici	2
Prosječna širina trake na glavnoj prometnici (m)	3,5
Udaljenost bočnih prepreka od prometnice (cm)	60
Broj traka na rampi	1
Duljina trake za ubrzavanje (m)	107
PROMETNI PODACI	
Satni protok na glavnoj prometnici (vozila po satu po traci)	960
Kapacitet prometnice (vozila po satu)	2300
Kapacitet rampe	1100
Zahtijevani protok vozila na rampi (vozila po satu)	2100
Prosječno zauzeće glavne prometnice	22%
Prosječna brzina na glavnoj prometnici (free-flow speed)	58.8 Km/h
Prosječna brzina na rampi (free-flow speed)	34.1 Km/h
Postotak teretnih vozila na glavnoj prometnici	0
Postotak teretnih vozila na rampi	0

**Slika 19.** Primjer geometrijskih i prometnih parametara prometnice [14]

Kako bi se izbjeglo „zbunjivanje“ vozača, potrebno je definirati minimalno trajanje ciklusa signalnih planova izvršnih elemenata sustava upravljanja priljevnim tokovima. Kod najčešće strategije rada prilaznih rampi, „jedno vozilo po ciklusu“ (engl. „one car per green“), minimalno trajanje ciklusa računa se po formuli:

$$C_{\min} = 2 + R_{\min} \quad (2)$$

gdje je:

- $C_{\min}$  – minimalno trajanje ciklusa [s]
- $R_{\min}$  – minimalni protok vozila na rampi [vozila/h]

Nadalje, maksimalni protok na rampi računa se prema sljedećoj formuli:

$$Q_{\max\_ramp} = 3600 \times \frac{\text{broj traka}}{C_{\min}} \quad (3)$$

Najveći nedostatak strategije propuštanja jednog vozila po ciklusu je ograničavanje maksimalnog protoka s obzirom na minimalni ciklus, npr:

$$Q_{\max\_ramp} = 3600 \times \frac{1 \text{ traka}}{6} = 600 \text{ [vozila/h]} \quad (4)$$

Druga strategija rada prilaznih rampi „N vozila po ciklusu“ (engl. „N cars per green“), koristi se kada je potrebno brže isprazniti rep čekanja na rampi. Za razliku od prve strategije koriste se standardni signalni planovi sa žutim svjetlosnim pojmom za propuštanje više vozila po ciklusu (engl. vehicle platoon).

Kod strategije „N vozila po ciklusu“ minimalni ciklus računa se po formuli:

$$C_{\min} = 2n + R_{\min} \quad (5)$$

Prilikom razvoja strategija sustava za upravljanje priljevnim tokovima koriste se različiti simulacijski alati, kao što su:

- PTV VISSIM
- Paramics
- Aimsun
- Corsim

no zbog specifičnosti lokacija na kojima se implementira sustav upravljanja priljevnim tokovima nije moguće izraditi u potpunosti realan simulacijski model.

#### **5.4. Scenariji rada sustava upravljanja priljevnim tokovima**

Ukoliko svi uređaji i pripadajući programi rade kako je zamišljeno tada sustav za upravljanje priljevnim tokovima radi automatski, bez ikakve potrebe za uključivanje operativnog osoblja u odluke sustava. No, u realnim situacijama postoji mogućnost kvara mjernih uređaja te prekida u komunikaciji između uređaja te se, u takvim slučajevima, u donošenje odluka o radu sustava uključuje operativno osoblje.

U nastavku teksta navedeno je nekoliko mogućih scenarija koji bi, ukoliko bi se implementirali u sustav upravljanja priljevnim tokovima, pridonijeli vrijednosti cjelokupnog sustava:

1. Scenarij - Prevelika potražnja za oba smjera.

Ukoliko glavni cestovni detektori daju podatke o velikoj gustoći prometa ili zagušenju na glavnoj cesti ali i veliki red čekanja na prilaznoj cesti, sustav automatski informira operativno osoblje te nudi jednostavno i brzo sučelje za donošenje odluka (*da* ili *ne*) i nudi nekoliko potencijalnih rješenja:

- staviti manja ograničenja brzine na glavnoj cesti (autocesta) kako bi se smirio protok prometa, smanjila mogućnost sudara i olakšalo usmjeravanje vozila na rampu
- na zaslonu prije rampe staviti informacije o zagušenju i predložiti alternativni put.

Dobra je praksa da se svaka reakcija, odluka i izdana naredba svakog operatora bilježi i pohranjuje u bazi podataka, pa se informacije mogu koristiti za analizu i istragu nakon incidenta.

## 2. Scenarij - prekid komunikacije

Ako postoji komunikacijski prekid između mjerenja rampe, kontrolera na cesti i kontrolnog centra lokalni kontroler automatski postavlja žuto trepćuće svjetlo na semaforu te obavještava operativno osoblje o nastaloj situaciji.

## 3. Scenarij – zagušenje na mjestu spajanja prilazne ceste na autocestu

Ako je otkrivena prisutnost u području spajanja, crveni signal se može držati za unaprijed zadano maksimalno vrijeme (kako bi se smanjila mogućnost sudara i kako se ne bi došlo do zagušenja na području spajanja). Ako se nakon unaprijed definiranog vremena crvenog svjetlosnog signala vozila nisu priključila na glavni tok prometnice, obavještava se operativno osoblje. Operator, koristeći video prikaz, treba prepoznati nastalu situaciju te odabrati odgovarajuće rješenje.

### **5.5. Primjeri implementacije sustava upravljanja priljevnim tokovima**

Kao primjere naprednog sustava za upravljanje priljevnim tokovima navedeni su sustavi implementirani u dva grada, Melbourne, Australija te Teheran, Iran.

Jedan od najvećih sustava upravljanja priljevnim tokovima nalazi se na području grada Melbournea i njime su obuhvaćene 64 rampe na autocesti M1. Društvene, ali i prometne koristi implementacije sustava za upravljanje priljevnim tokovima su izrazito velike: 2 milijuna dolara uštede dnevno, 30% manje prometnih nesreća, 48% manje prosječno vrijeme putovanja i tako dalje.

U Teheranu, prema izvještaju iranskog ureda za statistiku iz 2015. godine u širem području glavnog i najvećeg grada Irana živi oko 15 milijuna stanovnika, a na gradskom području nalazi se oko 4 milijuna registriranih vozila i još mnoštvo neregistriranih. Prometnu situaciju iranske prijestolnice karakteriziraju nevjerojatne gužve i prometna kultura koja je za europske pojmove nezamisliva. Neovisno o broju iscrtanih traka sudionici u prometu formiraju zasebne kolone pa se tako na tri iscrtane trake nerijetko može vidjeti pet kolona vozila.

Jedan od izvođača sustava upravljanja priljevnim tokovima u Teheranu je i hrvatska tvrtka Telegra, koja vlastitim računalnim sustavom sudjeluje u ovom projektu. Ogroman problem za implementaciju ovakvog sustava stvara već spomenuta prometna situacija jer zbog izuzetno malih intervala slijeđenja te ne poštivanja prometnih propisa sustavi detekcije ponekad ne mogu prepoznati svako vozilo. Sustav upravljanja priljevnim tokovima postavljen

je na Sadr Bridge vijaduktu koji služi kao priključak za Niayesh tunel. Spomenuti tunel dug je 6658 metara i jedan je od ključnih infrastrukturnih objekata u prometnom povezivanju istoka i zapada grada. Sustav upravljanja priljevnim tokovima prometa postavljen je na pet ulaznih rampi na Sadr Bridge. Implementacijom sustava za upravljanje priljevnim tokovima normaliziran je promet na samom vijaduktu, no, osim prednosti za Sadr Bridge, ovaj sustav uvelike utječe i na promet u Niayesh tunelu. [21]. No, sustav upravljanja priljevnim tokovima samo je jedno od rješenja iz ITS domene potrebno da bi se u potpunosti normalizirao kaotičan promet u vršnim satima.

## 6. ZAKLJUČAK

Zbog stalnog povećanja broja vozila, odnosno povećanja prometnog opterećenja dolazi do sve češćih i intenzivnijih prometnih zagušenja, porasta broja incidentnih situacija te općenito smanjenja kvalitete prometnog sustava. Negativni učinci naglog porasta broja vozila posebno su izraženi u gradskim sredinama te pripadajućim obilaznicama i autocestama, gdje su mogućnosti povećanja kapaciteta prometnica fizičkom nadogradnjom, odnosno proširenjem prometnica vrlo ograničene. Rješenje tog problema nalazimo u informacijsko – komunikacijskoj nadogradnji klasičnog sustava prometa, što predstavlja opću definiciju ITS-a.

Rješenje prikazano u ovom radu predstavlja učinkovitu metodu za smanjenje prometnog zagušenja, prometnih incidenata, negativnih posljedica na okoliš te ukupnog vremena putovanja na urbanim autocestama.

Sustav upravljanja priljevnim tokovima na autocestama najčešće se implementira na dionici prilazne ceste na autoceste, a sastoji se od semafora na prilaznim rampama, detektora na glavnoj prometnici i prilaznim rampama, lokalnog uređaja (cestovne prometne stanice) te centralnog računalnog sustava. Koristeći detektore na prometnicama sustav stvarnovremenski prikuplja podatke o prometu te uz pomoć ostalih elemenata sustava ima mogućnost adaptivnog upravljanja priljevom vozila na autoceste. Također treba napomenuti da je za rad sustava za upravljanje priljevnim tokovima vrlo bitan izbor algoritama koje će sustav koristiti, od kojih su najčešće korišteni opisani u ovom radu.

Sustav za upravljanje priljevnim tokovima na autocestama moguće je implementirati samo na jednom čvorištu autoceste, no međusobno uparivanje više ovakvih sustava na više čvorišta pokazalo se kao mnogo učinkovitije rješenje. Takvo rješenje zahtijeva centralnu stanicu za upravljanje prometom iz koje se može upravljati svim sustavima za upravljanje priljevnim tokovima.

Daljnijim razvojem tehnologije, kako hardverske tako i softverske, prometni inženjeri imati će sve više mogućnosti primijeniti svoje alate u cilju povećanja kvalitete te održivosti prometnog sustava.

## LITERATURA

1. Klir, G. J.: Facets of Systems Science, Plenum, New York, 1995.
2. Klir, G.J.: Architecture of Systems Problem Solving, Plenum Press, New York, 1985.
3. Bošnjak, I.: Inteligentni transportni sustavi 1, Zagreb, 2006
4. Škorput, P.; Mandžuka, S.; Jelušić, N.: Real-time Detection of Road Traffic Incidents, PROMET-Traffic&Transportation, Scientific Journal on Traffic and Transportation Research, University of Zagreb, Faculty of Transport and Traffic Sciences, Vol. 22, No.4, pp. 273-283, 2010. (ISSN: 1848-4069)
5. Mandzuka, B.; Brcic, D.; Skorput, P.: *ITS in the Function of Sustainable Urban Mobility*, 22nd International Symposium on Electronic in Transport, Ljubljana, Slovenia, 24. - 25. 03. 2014. R-1-R-4 (ISBN: 978-961-6187-54-1)
6. Škorput, P.: Metodologija i metodika ITS-a, materijali za predavanja iz kolegija Inteligentni transportni sustavi 1, Fakultet prometnih znanosti, Zagreb, ak. godina 2016/17.
7. Bošnjak, I., Mandžuka, S., Šimunović, Lj.: Mogućnosti inteligentnih transportnih sustava u poboljšanju stanja sigurnosti u prometu, Zbornik radova: Nezgode i nesreće u prometu i mjere za njihovo, Hrvatska akademija znanosti i umjetnosti, Zagreb, 2007.
8. Wymore, W.: Model-Based Systems Engineering, CRC Press, Boca Raton, 1993.
9. URL:<http://lumens.fthm.hr/enotice/2011/bc1ad1d3-268a-4df2-91a0-7118a1397f6.pdf>)  
zadnji put pregledano 23.06.2017
10. URL:[https://sr.wikipedia.org/wiki/Strukturna\\_sistemska\\_analiza](https://sr.wikipedia.org/wiki/Strukturna_sistemska_analiza), zadnji put pregledano 23.06.2017.
11. Vujić, M.: Komunikacijska ITS arhitektura, materijali za predavanja iz kolegija Arhitektura inteligentnih transportnih sustava, Fakultet prometnih znanosti, Zagreb, ak. godina 2012/13
12. Cybernetics, Systemics and Informatics Journal
13. Ivanjko, E.: Primjeri jednostavnih upravljačkih sustava, materijali za predavanja iz kolegija Automatsko upravljanje u prometu i transportu, Fakultet prometnih znanosti, Zagreb, ak. godina 2015/16
14. Šehagić, N.: Predavanja iz kolegija cestovna telematika, Fakultet prometnih znanosti, Zagreb, 2015.
15. URL:<http://autopoiesis.foi.hr/wiki.php?name=KM%20-%20Tim%2023&parent=30603&page=6.%20Inteligentni+sustavi#Znac%20Dajke%20i%20svojstva%20inteligentnih%20sustava>, zadnji put pregledano 15.6.2017.

16. U.S. Department of Transportation, Federal Highway Administration: Ramp Management and Control, Handbook, January 2006
17. Piotrowicz, G., and Robinson, J.R., „Ramp Metering Status in North America“, Report DOT-T-95-17. FHWA, U.S. Department of Transportation, Washington, DC, 1995.
18. Miškulin, S.: Razvoj prometa u funkciji očuvanja energetske resursa. Rijeka. 2013.
19. URL:<http://www.mppi.hr/UserDocsImages/Nacrt%20Prijedloga%20Nacionalnog%20programa%20za%20uvodenje%20i%20razvoj%20ITS.PDF>, zadnji put pregledano 19.6.2016.
20. Ramp metering - Summary report, Highway agencies publications, U.S. Department of Transportation, 2007.
21. Radošević, D.: Osnove teorije sustava, Nakladni zavod Matice hrvatske, Zagreb. 2001.
22. Chu, L., Liu, H.X., Recker, W., Zhang, H.M.: Development of a Simulation Laboratory for Evaluating Ramp Metering Algorithms. Paper 02-3427 presented at the TRB Annual Meeting, Washington, D.C., 2002.
23. Bogenberger, K.: Advanced Coordinated Traffic Responsive, Ramp Metering Strategies, Berkeley, 2000.

## POPIS SLIKA I TABLICA

Slika 1. Aspekti arhitekture ITS-a.....	5
Slika 2. Prikaz logičke ITS arhitekture .....	6
Slika 3. Razvoj metodologije ITS-a .....	8
Slika 4. Dekompozicija životnog ciklusa sustava .....	9
Slika 5. Pregled sustavskih zahtijeva s naznakom odnosa između njih .....	12
Slika 6. Temeljna pitanja osnovnih značajki sustava .....	14
Slika 7. Objektogram zadanog sustava s tri elementa .....	16
Slika 8. Funkciogram jednostavnog dinamičkog sustava .....	17
Slika 9. Razvoj kompleksnih sustava .....	19
Slika 10. Komponente sustava upravljanja priljevnim tokovima.....	23
Slika 11. Semaforski uređaji za sustav upravljanja priljevnim tokovima prometa.....	24
Slika 12. Shematski prikazan raspored pojedinih detektora.....	25
Slika 13. Prikaz svih algoritama u sustavu upravljanja prilaznim tokovima autocesti .....	27
Slika 14. Shema položaja i funkcije arbitracijskog algoritma u cijelom sustavu upravljanja priljevnim tokovima .....	29
Slika 15. Osnovni dijagram toka Bottleneck algoritma .....	31
Slika 16. Lokacija detektora algoritma ALINEA u odnosu na konvencionalne .....	32
Slika 17. Područje djelovanja sustava upravljanja priljevnim tokovima .....	33
Slika 18. Učinkovitost prometne mreže .....	33
Slika 19. Primjer geometrijskih i prometnih parametara prometnice .....	34



## POPIS KRATICA

VSLC	Variable speed limit control	Upravljanje promjenjivim ograničenjem brzine
ITS	Intelligent transport system	Inteligentni transportni sustavi
SAD	United States of America	Sjedinjene Američke Države
WDOT	Washington Department of Transportation	Washington odjel za transport



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 **Sustav upravljanja priljevnim tokovima na urbanim autocestama**

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

Student/ica:

U Zagrebu, 6.9.2017

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