

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET PROMETNIH ZNANOSTI

Martin Gregurić

INTELIGETNO UPRAVLJANJE PRILJEVNIM TOKOVIMA
AUTO-CESTE SA OSVRTOM NA MOGUĆNOST PRIMJENE NA
ZAGREBAČKOJ OBILAZNICI

Zagreb, 2011.

Ovaj rad izrađen je na Zavodu za inteligentne transportne sustave Fakulteta prometnih znanosti pod vodstvom prof. dr. sc. Sadka Mandžuke, dipl.ing.ele. i predan je na natječaj za dodjelu Rektorove nagrade za akademsku godinu 2010./11.

Popis i objašnjenje kratica

ITS – Intelligent Transportation System

RIR - Raskrižja izvan razine

LOS – Level of Service

CENTRICO - Central European Region Transport Telematics Implementation Co-ordination

VMS - Variable message signs

WDOT- Washington Department of Transportation

SWARM - System-Wide Adaptive Ramp Metering

ATMS - *Advanced Transportation Management System*

FIS - Fuzzy inference system

ANFIS – Adaptive neuro-fuzzy inference system

ACTM - Asymmetric Cell Transmission Model

VHT - Vehicle hours traveled

RMSE - Root Mean Squared Error

RMSD - *Root mean square deviation*

MSE - Mean Squared Error

FCM - *Fuzzy c-means*

Vh - *Vehicles per Hour*

VMT - *Vehicle Miles Traveled*

ASECAP - European Association with tolled motorways, bridges and tunnels

PGDP - Prosječni godišnji dnevni promet

SADRŽAJ

Popis i objašnjenje kratica

SADRŽAJ

POPIS SLIKA

POPIS TABLICA

1. Uvod.....	2
2. Općenito o principu <i>upravljanja priljevnim tokovima</i>	5
2.1. <i>Tehnička oprema prometno ovisnog sustava upravljanja priljevnim tokovima</i>	6
2.2. <i>Strategije upravljanja priljevnim tokovima</i>	8
2.2.1. <i>Jednotračna strategija sa jednim prolaskom vozila za vrijeme trajanja zelenog svijetla</i> 8	
2.2.2. <i>Jednotračna strategija sa prolaskom više vozila za vrijeme trajanja zelenog svijetla</i>	9
2.2.3. <i>Strategija dvotračnog mjerenja</i>	9
3. Opći i specifični ciljevi rada.....	10
4. Algoritmi u upravljanju priljevnim tokovima autoceste.....	11
4.1. <i>Kratki pregled algoritama koji se koriste za podršku ili kao alternativa obitelji algoritama za isključivo upravljanje priljevnim tokovima</i>	11
4.1.1. <i>Algoritmi za filtraciju podataka</i>	12
4.1.2. <i>Algoritam za isključivanje i uključivanje sustava</i>	12
4.1.3. <i>Algoritam za kontrolu redova na prilazima</i>	13
4.1.4. <i>Algoritmi za sprječavanje prerastanja redova čekanja na prilazu</i>	13
4.1.5. <i>Arbitracijski algoritam</i>	13
4.1.6. <i>Algoritmi za određivanje forme signalnog plana</i>	14
4.2. <i>Algoritmi za isključivo upravljanje priljevnim tokovima</i>	14
4.2.1. <i>ALINEA algoritam</i>	16
4.2.2. <i>ZONE algoritam</i>	18
4.2.3. <i>BOTTLENECK algoritam</i>	19
4.2.4. <i>SWARM algoritam</i>	20
5. Adaptivni neuro-fuzzy algoritam u upravljanju prilaznim tokovima autoceste	22
5.1. <i>Struktura adaptivnog neuro-fuzzy algoritma</i>	24
5.2. <i>Metode prikupljanja podataka</i>	27
5.2.1. <i>Prikupljanje podataka makrosimulacijskim alatom CTMSIM</i>	27
5.3. <i>Iscrpan (Brute-force) odabir ANFIS ulaza</i>	30
5.4. <i>Validacija modela</i>	33

5.5. Hibridni algoritam učenja.....	37
5.6. Kalibracija funkcija pripadnosti i baze znanja	39
6. Rezultati.....	43
7. Mogućnosti primjene sustava upravljanja priljevnim tokovima na zagrebačkoj obilaznici.....	46
8. Zaključak.....	51
9. Zahvale	53
O AUTORU	57
SAŽETAK.....	58
ABSTRACT	59
PRILOZI.....	60

POPIS SLIKA

<i>Slika 1. Prilaz autocesti obilježen jedino statičkom vertikalnom signalizacijom</i>	5
<i>Slika 2. Prilijevanje tokova u glavni kontrolirano sustavom upravljanja priljevnim tokovima</i>	5
<i>Slika 3. Tehnička oprema prometno ovisnog sustava upravljanja priljevnim tokovima[14].</i>	7
<i>Slika 4 Jednotračna strategija sa jednim prolaskom automobila za vrijeme trajanja zelenog svijetla ..</i>	8
<i>Slika 5. Interakcija CTMSIM alata i Fuzzy Logic Toolbox-a unutar MATLAB okruženja</i>	10
<i>Slika 6. Prikaz svih algoritama u sustavu upravljanja prilaznim tokovima autocesti [15].</i>	11
<i>Slika 7. Shema položaja i funkcije arbitracijskog algoritma u cijelom sustavu upravljanja priljevnim tokovima[15].</i>	14
<i>Slika 8. Klasifikacijsko stablo najpoznatijih algoritma za isključivo upravljanje priljevnim tokovima [16]</i>	16
<i>Slika 9. Lokacija detektora algoritma ALINEA u odnosu na konvencionalne[15]</i>	17
<i>Slika 10. Parametri ZONE Algoritma</i>	18
<i>Slika 11. Osnovni dijagram toka Bottleneck algoritma[18].</i>	19
<i>Slika 12 Operativni koncept SWARM1 algoritma[18].</i>	20
<i>Slika 13. Koncept rada ANFIS algoritma za isključivo upravljanje priljevnim tokovima</i>	23
<i>Slika 14. Struktura ANFIS-a</i>	24
<i>Slika 15 Prikaz strukture ANFIS algoritma u MATLAB okruženju</i>	26
<i>Slika 16. Sučelje CTMSIM makrosimulacijskog alata</i>	27
<i>Slika 17. ACTM demonstracijski model autoceste</i>	28
<i>Slika 18. Iscrpna pretraga jednog ANFIS ulaza od 5 kandidata</i>	30
<i>Slika 19. Iscrpna pretraga dva ANFIS ulaza od 10 kandidata</i>	31
<i>Slika 20. Iscrpna pretraga tri ANFIS ulaza od 10 kandidata</i>	32
<i>Slika 21. Dijagram odnosa ponašanja greške podataka za učenje i podatka za provjeru</i>	35
<i>Slika 22. Dijagram odnos ponašanja greške podataka za učenje podatka za provjeru do iteracije 5036</i>	
<i>Slika 23. Grafovi s prikazom odnosa podatka za učenje/provjeru i ANFIS predviđanja.</i>	36
<i>Slika 24. Shematski prikaz inicijalnog FIS-a</i>	39
<i>Slika 25. Inicijalizacija početnih vrijednosti funkcija pripadnosti FIS-a</i>	40
<i>Slika 26. Izgled funkcija pripadnosti nakon kalibracije ANFIS algoritmom</i>	40
<i>Slika 27. 3D prikazi odnosa izlaza i parova ulaza</i>	41
<i>Slika 28. Odnosi brzine i gustoće naspram propuštanja priljevnih tokova vozila u glavni tok</i>	42
<i>Slika 29. Ppropusnost glavnog toka naspram propuštanja priljevnih tokova vozila u glavni tok</i>	42
<i>Slika 30. Graf odnosa VHT-a i trajanja simulacije po pojedinim algoritmima</i>	43
<i>Slika 31. Graf odnosa kašnjenja i trajanja simulacije po pojedinim algoritmima</i>	44
<i>Slika 32. Graf odnosa VMT-a i trajanja simulacije po pojedinim algoritmima</i>	45
<i>Slika 33. Prikaz stanja na zagrebačkoj obilaznici tijekom zagušenja izazvanog prometnom nesrećom</i>	46
<i>Slika 34. Prikaz zagrebačke i milanske obilaznice sa obilježenim čvorovima</i>	47
<i>Slika 35. Prikaz PGDP-a u 2010. godini na hrvatskim autocestama[27].</i>	48
<i>Slika 36. Prikaz broja stradalih sudionika u nesrećama po autocestama u razdoblju 2006/10. [27].</i> ..	49
<i>Slika 37. Prikaz projektnog rješenja nove zagrebačke obilaznice</i>	50

POPIS TABLICA

<i>Tablica 1. Parametri demonstracijskog modela autoceste na ulazima autoceste</i>	<i>29</i>
<i>Tablica 2. Tablični prikaz ulaznih i izlaznih dijelova para za učenje</i>	<i>33</i>
<i>Tablica 3. Testirani tipovi ANFIS modela s obzirom na parametre učenja</i>	<i>34</i>

1. Uvod

Jedan od temeljnih problema suvremenog svijeta je promet, koji se ne uspijeva više rješavati samo fizičkom gradnjom odnosno rekonstrukcijama prometnica (build only - pristup). U tom smislu, u posljednjih dvadesetak godina napravljeni su značajni znanstveno-istraživački napori u SAD-u, Japanu, zemljama Europske Unije i drugim visoko-razvijenim zemljama, na sagledavanju rješavanja problema prometa korištenjem resursa novih informacijsko-komunikacijskih tehnologija i novousvojenih znanja o vođenju ovakvih kompleksnih sustava i procesa. To novo područje nadgradnje klasičnog prometnog inženjerstva, nazvano inteligentni transportni sustavi (ITS), iskazuje novi pristup i primjenu naprednih upravljačkih i tehničko-tehnoloških rješenja, kojima se postiže veća sigurnost, učinkovitost i pouzdanost prijevoza, a uz smanjenje utjecaja na okoliš i društvo (smanjenje emisije onečišćenja, buka i slično), [1]. Očigledna ograničenja klasičnog pristupa razvoju prometnog sustava, sukladno načelima znanstveno utemeljenog kreiranja politike gospodarenja i održivog razvitka, doveli su do zahtjeva za novim usklađenim rješenjima u cestovnom i drugim granama prometa. Suštinu ITS-a čine sustavna upravljačka i informatičko-komunikacijska rješenja ugrađena u prometnu infrastrukturu, vozila, upravljačke centre i različite komunikacijsko-računalske terminale.

Jedan od takvih kritičnih elemenata su i problemi vezani sa miješanjem prometnih tokova auto cesta na čvorovima i drugim raskrižjima izvan razine (RIR), [2, 3]. Naime, u prostor trase autoceste, osim same autoceste, ubrajamo prilazne i izlazne ceste (eng. *entrance/exit ramps*), te prometnice koje prolaze ispod ili iznad autoceste kao i za nju direktno ili indirektno vezane arterijske lokalne ceste. Autoceste su projektirane kako bi pružile visoki stupanj prometne uslužnosti (LOS – *Level of Service*) korisnicima i društvu regije kroz koju prolazi. Unatoč projektiranom visokom stupnju uslužnosti pojavljuju se zagušenja, poglavito na dijelovima autoceste koja prolaze blizu velikih urbanih sredina (vrijeme ranih jutarnjih ili popodnevnih sati). Pojava takvih zagušenja pripisuje se dnevnim migracijama stanovništva prema i od mjesta zaposlenja. Za Hrvatsku je osim toga specifičan slučaj stvaranja zagušenja na autocestama u periodu turističke sezone. Uzroke zagušenja koje smo do sada napomenuli spadaju u periodična zagušenja, koja je lako predvidjeti i samim time lakše se postaviti prema njima. Uz periodična zagušenja imamo i ne periodična zagušenja koja uzrokuju nagli pad u propusnosti pojedinog djela autoceste. Glavni uzroci ne periodičnih zagušenja su prometne nesreće ili događaji od velikog interesa (utakmice, koncert, itd.).

Na navedene uzroke periodičnih zagušenja koji potječu od strane ljudskog faktora teško možemo djelovati u smislu prevencije. Sa stajališta prometnog inženjerstva potrebno je najprije analizirati tehničke parametre autoceste, te ih usporediti sa prometnom potražnjom u određenim situacijama i vremenskim intervalima. Upravljanje širim prostorom prometnog sustava autoceste u užem urbanom području sastoji se od dvije velike komponente. Prva komponenta je upravljanje tokom same autoceste, a druga je upravljanje tokovima arterijskih lokalnih cesta direktno ili indirektno vezanih za autocestu. Za te potrebe razvijena je posebna tehnika poznata pod nazivom *Ramp metring* koja se odnosi na upravljanje interakcijom priljevnih tokova arterijskih cesta sa glavnim tokom autoceste. Za hrvatski naziv ove tehnike u ovom radu koristi se naziv: upravljanje priljevnim tokovima (u nekim dijelovima koristi se

i naziv *ramp metering*, posebno kad je navođenje vezano za neka svjetska rješenja i algoritme). Proces upravljanja širim prometnim sustavom autoceste od iznimne je važnosti u sprječavanju nastajanja periodičnih, pa čak u određenoj mjeri i ne periodičnih zagušenja. Poglavitno iz razloga što se tijekom provođenja *upravljanja priljevnim tokovima* regulira stupanj protočnosti na prilazima autoceste. Taj postupak direktno utječe na promjenu opterećenja glavnog i priljevnih tokova. Ukoliko se implementira pravilan algoritam koji utječe na stupanj protočnosti može se postići optimalni stupanj opterećenja glavnog toka, ali i priljevnih tokova. Upravljanje priljevnim tokovima autocesta samo je jedna od sastavnica suvremenog koncepta poznatog pod nazivom – inteligentne prometnice [4]. Općenito se može zaključiti kako *Upravljanje priljevnim tokovima* predstavlja korištenje odgovarajućih algoritama u određivanju signalnog plana upravljačkog sustava (mjerenja značajki prometnih tokova, obrada signala i upravljanje, posebni prometni semafori) koji upravljaju stupnjem propuštanja priljevnih tokova u glavni prometni tok. Osnovni cilj *upravljanja priljevnim tokovima* je zadržavanje optimalne operativne protočnosti autoceste, kontroliranjem prometne potražnje koja se generira na prilazima autoceste. Održavanje optimalne operacijske propusnosti trase autoceste sprječava nastajanje zagušenja i time stvara uštede u vremenu putovanja trasom. Također, od posebnog je značaja što ovaj sustav značajno poboljšava sigurnosni element na ovim kritičnim dijelovima autoceste, [5, 6]. Ovisno o parametrima glavnog prometnog toka osigurava se sigurnije spajanje odvojenih tokova vozila u jedinstveni tok. Taj efekt se postiže specifičnim upravljanjem propusnosti priljevnih tokova.

U radu se najprije prikazuju pozitivni učinci *upravljanja priljevnim tokovima* na sigurnost i protočnost prometnog sustava autoceste. U nastavku rada se daje pregled algoritama koji se koriste za *upravljanje priljevnim tokovima* te je napravljena klasifikacija najpoznatijih algoritama za tu svrhu. Kroz prikazanu klasifikaciju dani su temeljni elementi osnovnih principa rada. Na temelju tih elemenata i dodatne analize identificirani su najbolji algoritmi, koji se danas koriste na svjetskim autocestama. Između njih su izabrani najpopularniji (prema stupnju njihovog korištenja u stvarnim prometnim sustavima) i najkvalitetniji (prema stupnju zadržavanja optimalne propusnosti glavnog toka). Izabrani postojeći algoritmi za *upravljanje priljevnim tokovima* će se dalje u radu detaljnije analizirati, te na kraju poslužiti za usporedbu kvalitete upravljanja postojećih algoritama i algoritma razvijenog kroz ovo istraživanje.

Glavni dio rada je konceptualna i simulacijska konstrukcija novog algoritma za upravljanje priljevnim tokovima baziranog na algoritmima umjetne inteligencije (adaptivni neuro-fuzzy algoritam) kao i njegovo testiranje u simulacijskom paketu CTMSIM izrađenog u MATLAB okruženju. Kako bi kvalitetu njegovog potencijalnog upravljanja stavili u kontekst postojećih algoritama za upravljanje priljevnim tokovima usporedili smo ga sa odabranim postojećim algoritmima na testnom prometnom sustavu autoceste u simulacijskom paketu CTMSIM. Na temelju dobivenih rezultata donijet će se zaključci o njegovom potencijalu za daljnji razvoj i istraživanje.

Zaključno je analizirana mogućnosti primjene *upravljanja priljevnim tokovima* na primjeru zagrebačke obilaznice. Za potrebe usporedbe mogućnosti primjene izabrani su reprezentativni primjeri milanske i zagrebačke obilaznice. Za potrebe ocjene primjenjivosti *upravljanja priljevnim tokovima* napravljena je usporedba njihovih specifičnosti i parametara trase. Na

temelju spomenute analize dano je mišljenje o mogućnosti i vrsti primjene *ramp metering* algoritma i na drugim dionicama hrvatskih autocesta.

2. Općenito o principu *upravljanja priljevnim tokovima*

Većina urbanih autocesta su višetrake ceste koje su dizajnirane za podnošenje velikih prometnih opterećenja. No pri njihovom kapacitativnom dimenzioniranju teško se mogu predvidjeti prometna potražnja na priljevnim tokovima koja će utjecati na propusnost glavnog toka. Za ove potrebe u svijetu se već duže vrijeme razmatraju metode kontrole priljevnih tokova vozila glavnom toku autoceste. Primjerice u SAD-u je takav koncept razvijan već 60-ih godina, dok su u Europi prvi takvi sustavi implementirani 80-ih godina u Njemačkoj, Nizozemskoj, Francuskoj i Belgiji. Godine 2001. projekt europske unije CENTRICO izdao je procjenu tih sustava kako bi se mogao izraditi standard na području cijele europske unije[6]. Takvi sustavi upravljanja priljevnim tokovima često se objedinjuju pod nazivom – *ramp metering*. *Ramp metering* (u stranoj literaturi se spominje i pod nazivom *Flow Signals*) u hrvatskom jeziku nema direktan prijevod, već ga možemo definirati kao skupinu prometnih signala koji kontroliraju prometne priljevne tokove na ulazima autoceste [7, 8, 9]. Na slici 1. možemo vidjeti prilaz autocesti obilježen jedino statičkom vertikalnom signalizacijom.



Slika 1. Prilaz autocesti obilježen jedino statičkom vertikalnom signalizacijom

Na idućoj slici 2 vidimo primjenu *ramp metring*-a sa statičkom signalizacijom. Statička signalizacija uključuje oznaku za postojanje semafora i zabranjenog skretanja u desno. A dinamička signalizacija postoji u vidu svjetlosnog signala za upozoravanje o postojanju sustava *upravljanja priljevnim tokovima* i samog semafora za propuštanje priljevnih tokova.



Slika 2. Prilijevanje tokova u glavni kontrolirano sustavom upravljanja priljevnim tokovima

Glavni operativni razlozi uvođenja upravljanja priljevnim tokovima autoceste su:

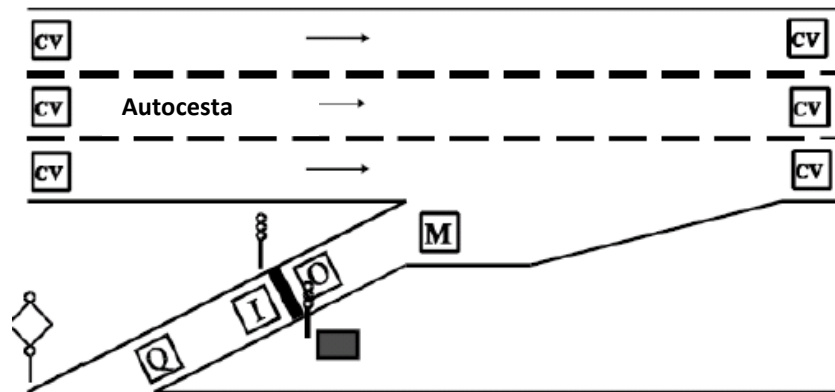
- Manja zagušenja i poboljšanje protočnosti glavnih prometnih tokova na autocesti
- Smanjenje vremena putovanja autocestom kao i povećana pouzdanost u planiranju potrebnog vremena za putovanje autocestom
- Smanjenje potražnje za korištenjem autoceste pri kratkim putovanjima
- Smanjenje rizika od nastajanja nesreća
- Unaprjeđenje zaštite okoliša kao rezultat smanjenja buke i potrošnje goriva

Svrha prvog i drugog operativnog razloga je osigurati stanje u kojem ukupni broj vozila koji ulazi na autocestu zajedno s vozilima u glavnom toku autoceste bude ispod kapaciteta koji sugerira na postojanje zagušenja na tom segmentu autoceste. Cilj trećeg operativnog razloga je stvaranje kontroliranog zastoja na prilazima autoceste kako bi se spriječila kratka putovanja autocestom prilikom vršnih opterećenja. Četvrti operacijski razlog ima ulogu uskladiti brzinu i gustoću priljevnog toka sa glavnim. Time se sugerira vozačima koji se uključuju u glavni tok autoceste na trenutak u kojem se smiju uključiti u glavni tok, a da je pritom rizik od nesreće najmanji. Peti operacijski razlog produkt je prva tri operacijska razloga [10].

2.1. Tehnička oprema prometno ovisnog sustava upravljanja priljevnim tokovima

Sustav upravljanja priljevnim tokovima autoceste (*Ramp Metering System*) može se implementirati na postojeće prilaze autocesti, ali i na novo izgrađene prilaze autocesti. Svaki od elemenata tehničke opreme koji je spomenut u ovom dijelu trebao bi biti razmatran pri implementaciji na postojeći prilaz autocesti. Također savjetuje se isto razmatranje i pri projektiranju novog prilaza sa kojeg će se slijevati priljevni tokovi u glavni ovisno o prometnom stanju glavnog toka. Na slici 3. vidimo temeljne elemente tehničke opreme *upravljanja priljevnim tokovima* sustava, te raspored tih elemenata u odnosu na zaustavnu liniju i konstrukciju samog prilaza autocesti.

Detektori koji se koriste pri *upravljanju priljevnim tokovima* su uglavnom induktivne petlje, no mogu se upotrijebiti i bilo koji drugi tipovi detektora koji se koriste za detekciju prometnih parametara[14].



Slika 3. Tehnička oprema prometno ovisnog sustava upravljanja priljevnim tokovima[14].

Popis osnovne potrebne tehničke oprema prometno ovisnog sustava *upravljanja priljevnim tokovima* prema simbolima iz slike 3.:

↘ - linija zaustavljanja



- semafori signalni uređaj za potrebe *upravljanja priljevnim tokovima*



- Napredni znak za signalizaciju postojanja upravljanja prilaznim tokovima autocesti sa svjetlosnim treptajućim upozorenjem trajanja procesa upravljanja prilaznim tokovima



- detektor prisutnosti vozila na liniji zaustavljanja



- detektor prolaza vozila linije zaustavljanja



- detektor veličine reda čekanja



- detektor prisutnosti vozila u pomoćnoj traci za spajanje sa glavnim tokom



- detektor parametara glavnog toka



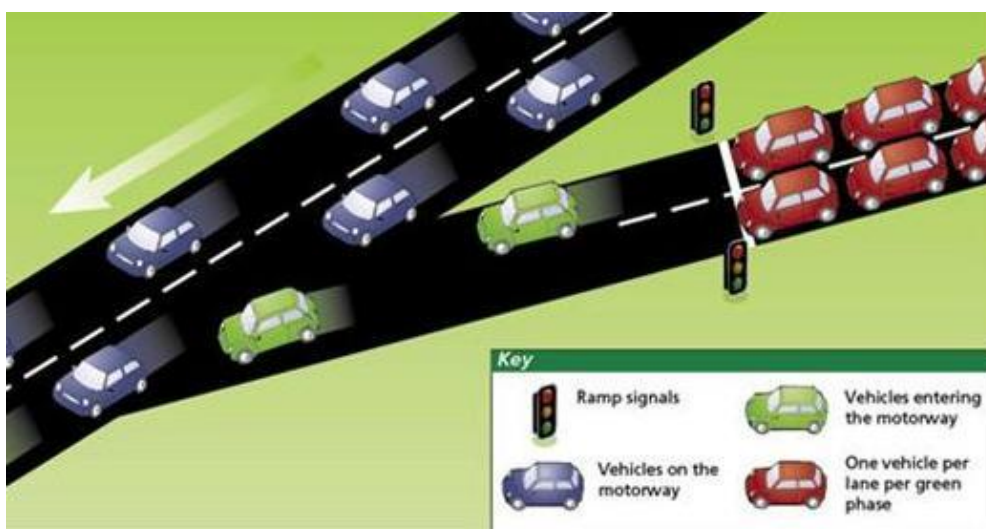
- kontrolor

2.2. Strategije upravljanja priljevnim tokovima

Maksimalna teoretska vrijednost propusnosti prilaza autocesti ovisi o tipu strategije koja se koristi pri *upravljanju priljevnim tokovima*. Postoje tri vrste strategija pri kontroli pristupa priljevnih tokova glavnom[10]. Svaka se razlikuje prema vrsti i rasporedu prometne signalizacije, kao i dizajniranju mehanizma rada algoritma za. Svaka će strategija biti opisana u nastavku.

2.2.1. Jednotračna strategija sa jednim prolaskom vozila za vrijeme trajanja zelenog svijetla

Ova strategija omogućava jednom vozilu ulazak u glavni tok autoceste za vrijeme trajanja svakog signalnog ciklusa. Savi signalni ciklus ima zeleni, žuti i crveni svjetlosni indikator. Duljina zelenog plus žutog svjetlosnog signala bi trebala biti postavljena na vrijednosti koje osiguravaju dovoljno vrijeme za prolazak jednog automobila preko linije za zaustavljanje. Dok bi duljina crvenog intervala trebala biti dovoljno dugačka za zaustavljanje vozila koje se nalazilo iza vozila koje se uključilo u glavni tok autoceste. S teoretske točke gledišta najmanji mogući ciklus traje 4 sekunde sa jednom sekundom zelenog i žutog svijetla, te dvije sekunde crvenog svijetla. Ipak terenska istraživanja su pokazala da je minimalni ciklus u trajanju od 4 sekunde premali, jer se nije mogao postignut cilj da se svako vozilo mora zaustaviti prije nego što se krene uključivat u glavni tok. Također, bilo koja tromost vozača pri pokretanju vozila na zeleni indikator semafora uzrokuje pojavu potrošnje dva ili čak više ciklusa po vozilu. Pa je razumnije minimalno trajanje ciklusa od 4.5 sekundi sa trajanjem crvenog svijetla od 2.5 sekunde [11, 16]. Algoritmi za prometno ovisno *upravljanje priljevnim tokovima* uglavnom djeluju na trajanje crvenog svijetla kako bi korigirali protok vozila sa priljevnih u glavni tok. Slika 4. prikazuje mehanizam spomenute strategije. Plavi automobili predstavljaju automobila u glavnom toku. Crveni – vozila koja čekaju idući ciklus odnosno, zeleni indikator na semaforu. Zelena vozila predstavljaju dva automobila propuštena svaki po svojoj traci.



Izvor: <http://www.nzta.govt.nz/projects/rampsignalling/gallery/photos/ramp-diagram.html>

Slika 4 Jednotračna strategija sa jednim prolaskom automobila za vrijeme trajanja zelenog svijetla

2.2.2. Jednotračna strategija sa prolaskom više vozila za vrijeme trajanja zelenog svijetla

Ova strategija je još poznata pod nazivom kao *platoon* ili *bulk metering*. Kao što joj i samo ime govori ona omogućava prolazak dvaju ili više vozila u glavni tok za vrijeme trajanja zelenog svijetla. Najuobičajena forma ove strategije je propuštanje dva automobila za vrijeme trajanja zelenog svijetla. Također, mogu se propuštati tri ili više automobila, ali takva bi forma ove strategije uzrokovala ne razbijanje nizova vozila koji dolazi sa prilaza i povećala rizik od nesreća.

Postoje mnogi znanstveni radovi koji se bave izradom analitičkih modela za proučavanje pražnjenja redova[8, 12, 13]. Radovi se bave vremenom potrebnim za održavanje prolaska specificiranog broja vozila preko linije za zaustavljanje. Nasuprot očekivanju, *Platoon metering* ne pruža drastična povećanja u kapacitetu nasuprot jednotračne strategije sa jednim prolaskom vozila za vrijeme trajanja zelenog svijetla. Razlog ovom zaključku leži u činjenici da strategija *platoon metering*-a zahtjeva veća trajanja zelenog, žutog i crvenog svijetla kako bi se osigurala operacije kao što su povećanje brzine priljevnih tokova. To rezultira dužem trajanju ciklusa što implicira na postojanje manjeg broja ciklusa u jednom satu[8, 16].

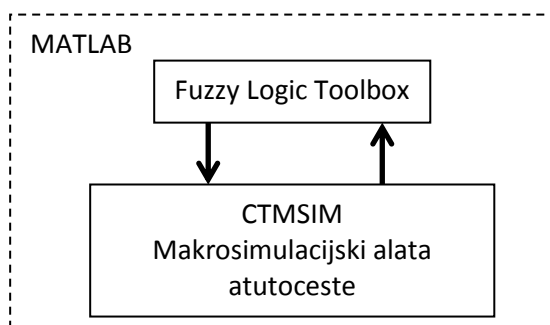
2.2.3. Strategija dvotračnog mjerenja

Strategija dvotračnog mjerenja ili *dual-line metering* zahtjeva za implementaciju dvije trake na prilazu autocesti. U ovoj strategiji, kontrolor izvodi operacije mijenjanjem trajanja zeleno-žutih-crvenih ciklusa za svaku promatranu traku zasebno. Ovisno o kontroloru koji se koristi ciklusi mogu, ali i ne trebaju biti sinkronizirani. U većini slučajeva sinkronizacija se postavlja na način kako se nikad ne bi upalilo zeleno svijetlo u obje trake u isto vrijeme. Intervali između dva zelena indikatora su sinkronizirani kako bi osigurali stalni razmak između dva vozila u različitim trakama[8].

3. Opći i specifični ciljevi rada

Opći cilj rada je napraviti klasifikaciju svih algoritama koji se koriste u cjelokupnom sustavu upravljanja stupnjem propuštanja priljevnih tokova u glavni tok autoceste. Taj postupak bi nam trebao dati cjelovitu sliku sustava. Također je potrebno utvrditi i njihove međudnose, te važnost njihove uloge u ukupnom sustavu. Zatim je potrebno identificirati u kojoj se klasifikacijskoj skupini nalaze algoritmi za upravljanje priljevnim tokovima u užem smislu. Na temelju proučavanja literature potrebno je identificirati algoritme prema sljedećim parametrima: popularnosti, usklađenosti logike rada sa problemom koji se rješava i širine upotrebe. Algoritmi će se klasificirati prema logici rada. Na temelju svih podataka koji će biti prikupljeni o algoritmima za *upravljanje priljevnim tokovima* izabrat će se i objasniti principi rada najboljih.

U specifične ciljeve rada ubrajamo stvaranje novog algoritma na principima *neuro-fuzzy (hibridih)* sustava u MATLAB okruženju. U stvaranju novog algoritma od iznimne je važnosti izabrati najbolji algoritam kojeg ćemo identificirati u prethodnom istraživanju. Također, izabrali smo makrosimulacijski alata CTMSIM koji će nam poslužiti u stvaranju, analizi i usporedbi novog algoritma za *upravljanje priljevnim tokovima* sa postojećim.



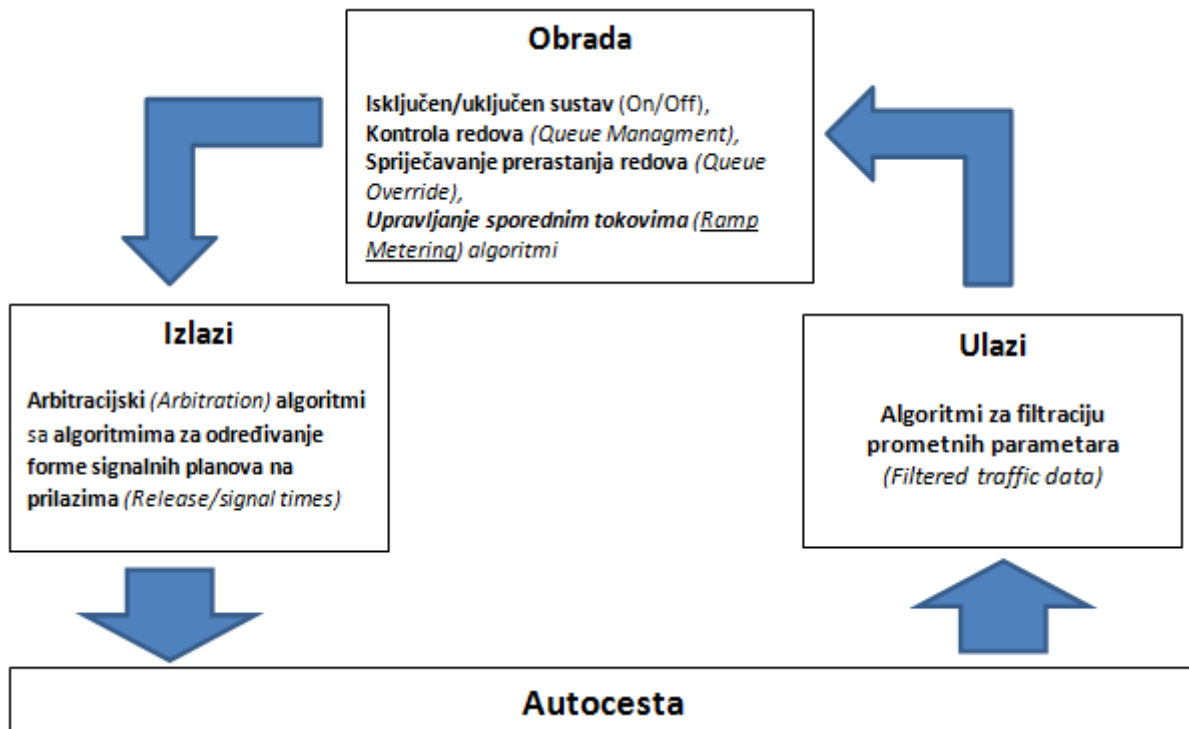
Slika 5. Interakcija CTMSIM alata i Fuzzy Logic Toolbox-a unutar MATLAB okruženja

Iz tog razloga potrebno je ostvariti interakciju CTMSIM alata i Fuzzy Logic Toolbox-a unutar MATLAB okruženja. Osnovna shema vidljiva je na slici 5. Rezultate usporedbe ćemo grafički predstaviti i komentirati.

Zaključno će se istražiti mogućnost primjene sustava *upravljanja priljevnim tokovima* na hrvatskim autocestama. To će se provesti na način u kojem će se usporediti kritični parametri europskih i hrvatskih autocesta. Kao ogledni primjer usporedba će biti izvedena na zagrebačkoj i milanskoj obilaznici.

4. Algoritmi u upravljanju priljevnim tokovima autoceste

Proces upravljanja priljevnim tokovima (*ramp metering*) koristi zatvorenu kontrolnu petlju kao što je prikazano na slici 6. Vidimo kako se u tom procesu koristi skupina različitih algoritama koji imaju zajednički cilj ostvarivanja maksimalne protočnosti glavnog toka autoceste bez značajnog ometanja lokalnih prometnica koje se spajaju na autocestu[15].



Slika 6. Prikaz svih algoritama u sustavu upravljanja prilaznim tokovima autocesti [15].

4.1. Kratki pregled algoritama koji se koriste za podršku ili kao alternativa obitelji algoritama za isključivo upravljanje priljevnim tokovima

Kao što smo vidjeli na slici 5. postoje dodatni algoritmi koji pružaju podršku ili alternativu u određenim karakterističnim situacijama *algoritmima za isključivo upravljanje priljevnim tokovima*. Ukratko ćemo im spomenuti funkciju kako bi dobili općenitu sliku o značenju i funkciji algoritama *za upravljanje priljevnim tokovima* u užem smislu unutar cijelog *softwear-skog* sustava za upravljanje priljevnim tokovima autoceste. Općenita slika će nas dovest do zaključka kako korištenje algoritama isključivo namjenjenih *za upravljanje priljevnim tokovima u užem smislu* (dalje u tekstu bit će naznačeni kao *algoritmi za isključivo upravljanje priljevnim tokovima*) nije dostatno za upravljanje cijelim sustavom za upravljanje priljevnim tokovima.

4.1.1. 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

4.1.2. 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 algoritmi za obradu manji od trenutnog stupnja protočnosti što znači kako je uspostavljen zadovoljavajući stupanj protočnosti, te se sustav može isključiti.

Kao što smo do sada zaključili on uključuje ili isključuje sustav konstantno prateći stanje prometa na autocesti, te se pokreće u slučaju nezadovoljavanja minimalne kritične razine zauzeća ili toka i zauzeća. 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:

- a) Ručno uključivanje – prema mišljenu operativnog osoblja
- b) Ručno isključivanje - prema mišljenu operativnog osoblja
- c) Vremenski – operacionalan u slučaju postizanja maksimalne predefiniране brzine ili ovisno o datumu ili vremenskom periodu dijela dana u kojem radi (npr. uključivanje u vrijeme predodređenog vršnog sata opterećenja)
- d) 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
- e) 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.

4.1.3. 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 priljevnih 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[15].

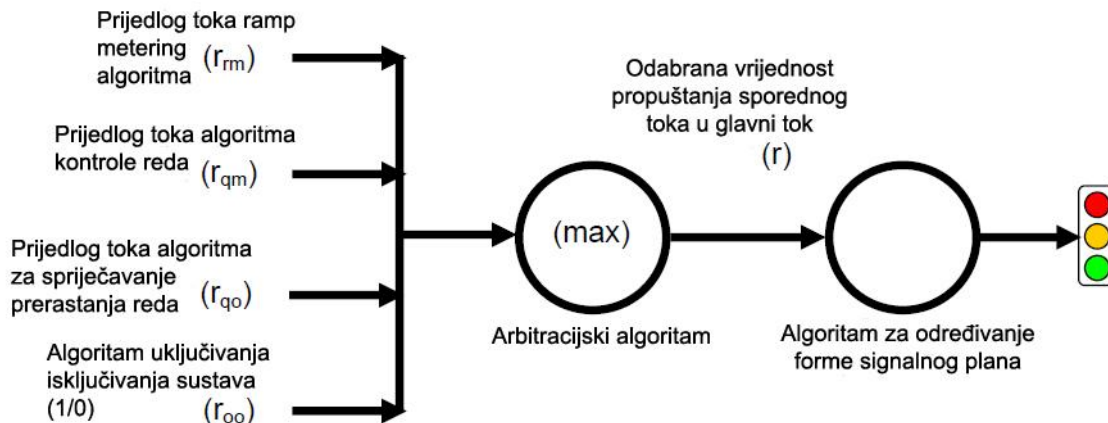
4.1.4. Algoritmi za sprječavanje prerastanja redova čekanja na prilazu

Algoritmi za sprječavanje prerastanja redova spadaju u algoritme za obradu. Oni imaju temelju zadaću koja 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 ometat promet na lokalnim cestama. Obično se detekcija takvog događaja obavlja postavljanjem detektora u neposrednoj blizini lokalne prometnice na koju može djelovat teoretski ekstremni red prilaza autocesti. Ukoliko je taj detektor stalno pod podražajem 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[15].

4.1.5. 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 algoritama 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. Pri odabiru te vrijednosti može koristiti veoma komplicirane mehanizme, ali u većini slučajeva jednostavno odabire najveću vrijednost izlaza algoritama za obradu. To je ponajprije izvedeno na spomenut 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[15].

Shemu položaja i funkcije arbitracijskog algoritma u cijelom sustavu vidimo na slici 6.



Slika 7. Shema položaja i funkcije arbitracijskog algoritma u cijelom sustavu upravljanja priljevnim tokovima[15].

4.1.6. Algoritmi za određivanje forme signalnog plana

Algoritmi za određivanje forme signalnog plana dio su algoritama koji se klasificiraju kao izlazni. Svrha im je usklađivanje signalnog plana, odnosno duljina trajanja pojedinih svjetlosnih indikatora na semaforu sa stupnjem propuštanja priljevnih tokova u glavni tok. Algoritam stupanj propuštanja priljevnih tokova u glavni tok dobiva kao ulazna vrijednost od arbitracijskog algoritma. Sekundarna mu je funkcija praćenje stupnja protočnosti na prilazu[10].

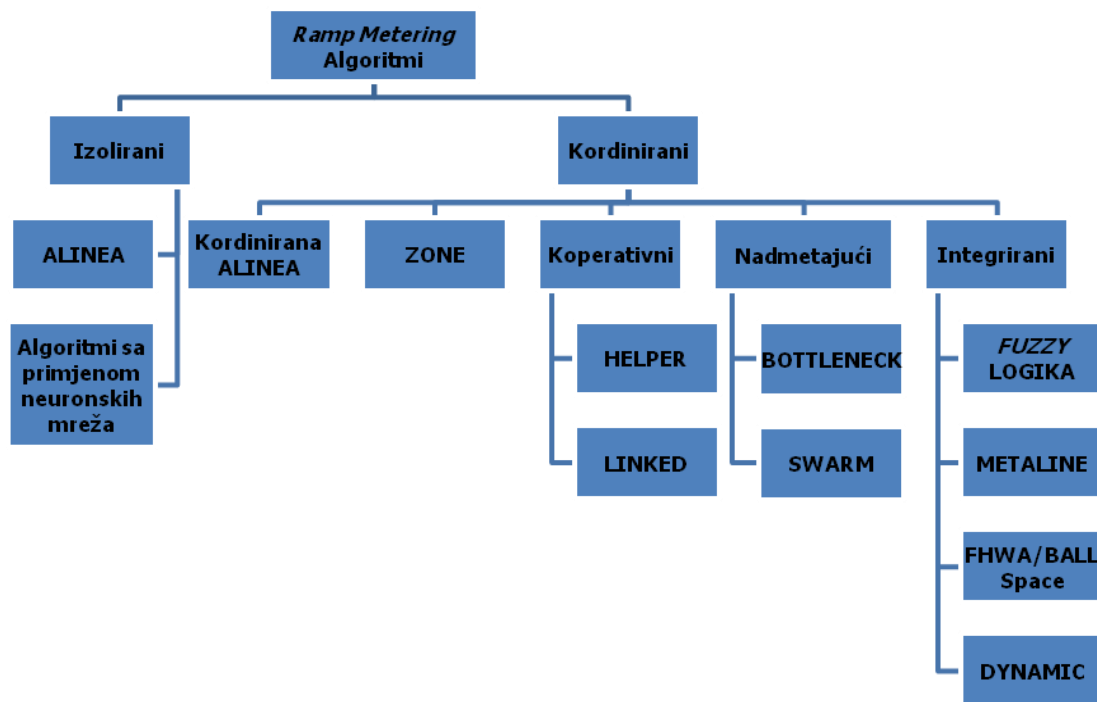
4.2. Algoritmi za isključivo upravljanje priljevnim tokovima

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 [6, 15, 16]. 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.
2. **Koordinirane**, kod kojih je algoritam primijenjen u međusobno ovisnom upravljanju priljevnim tokovima u određenoj skupini prilaza autoceste 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[16].

- *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 sa pojedinih prilaza. Najveća mana ovih algoritama je što su osjetljivi na iznenadne kritične situacije zagušenja. Poglavitno iz razloga što se promjene proračunavaju po *ad hoc* prirodi. Danas ih gotovo nema u operacionalnoj upotrebi, pa ih nećemo u ovom radu obuhvatiti[6].
- *Nadmetajući* algoritmi imaju pretežito dvije upravljačke logike po kojima proračunavaju stupanj propuštanja priljevnog prometnog toka sa 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[6].
- *Integrirana skupina* je od ove tri podskupine najzanimljivija i najsoficiranija skupina algoritama. Ona se definira kao upravljački sustav koji ima cilj optimizirati proces *ramp metering*-a integracijom različitih tipova upravljačkih algoritma koji kao ulaze koriste širok spektar prometnih parametara. Oni mogu biti integrirani svi u jedinstven algoritam ili mogu djelovati jedinstveno 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 prosječnu brzinu. 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. Uglavnom ova podskupina algoritama ima kompleksnu logiku rada i zahtjevni proračun. Od iznimne im je važnosti kvaliteta ulaznih podataka. Uz same *ramp metering* algoritme, kao upravljačke mjere mogu se koristiti i primjerice algoritmi za putno vođenje putem VMS-a (*Variable message signs*). Danas je ova podskupina algoritama još u eksperimentalnoj fazi, pa se stoga u praksi gotovo i ne koriste. Slika 6. prikazuje najpoznatije *algoritme za isključivo upravljanje priljevnim tokovima*.



Slika 8. Klasifikacijsko stablo najpoznatijih algoritma za isključivo upravljanje priljevnim tokovima [16]

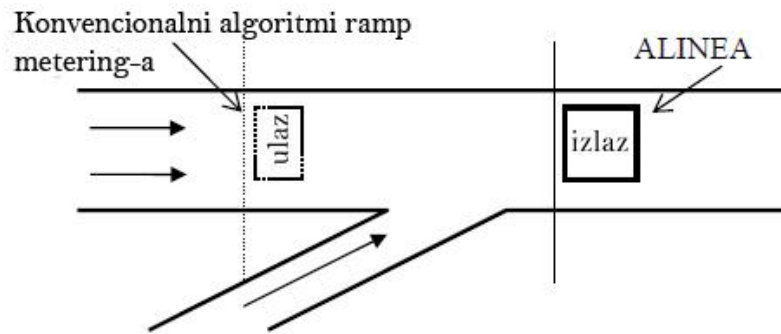
U nastavku ćemo obraditi samo neke od algoritama koji su spomenuti u klasifikacijskom stablu. Ponajprije iz razloga što je većina od njih danas još uvijek u eksperimentalnoj fazi ili se koriste na ograničenim segmentima autoceste. Također, bit će naglašeni oni algoritmi koji će kasnije u radu biti analizirani ili će nad njima biti izvršeno inicijalno prikupljanje podataka potrebno za izgradnju novog algoritma.

4.2.1. ALINEA algoritam

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 *ramp metering*-a. 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 autocesta[15, 17].

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.

Grafički prikaz lokacije detektora se može vidjeti na slici 9. Na slici je također prikazana i lokacija detektora kod ostalih prometno ovisnih *ramp metering* algoritama [15, 17].



Slika 9. Lokacija detektora algoritma ALINEA u odnosu na konvencionalne[15]

Dodatno, ALINEA algoritma se razlikuje od tradicionalnih *algoritama za isključivo upravljanje priljevnim tokovima* po tome što koristi sustav zatvorene petlje u upravljanju, dok tradicionalni koriste sustav otvorene petlje. Ta činjenica se odražava u činjenici kako ALINEA algoritam konstantno proračunava stupanj propuštanja sporednog toka u glavni kao bi se ostvarilo željeno zauzeće kapaciteta dotičnog segmenta autoceste. Tradicionalni algoritmi koriste prethodno programirane vrijednosti pragove zauzeća kako bi izabrali potrebni stupanj propuštanja priljevnih tokova u glavni prema tablicama propuštanja. ALINEA algoritam koristi sljedeću jednadžbu pri određivanju stupnja propuštanja tokova koji se prilijevaju u glavni tok autoceste:

$$r(t) = r(t - 1) + K_r [O - O_{izlaz}(t)] \text{ (vph)} \quad (1)$$

Gdje je:

O – željeni prag zauzeća kapaciteta glavnog toka (%)

O_{izlaz} – izmjereno zauzeće u vremenskom periodu t (%)

$r(t - 1)$ – dobiveni stupanj propuštanja u prethodnom vremenskom periodu (vph)

K_r – regulatorni parametar (vph). Tvorcima algoritma preporučuju postavljanje vrijednosti ovog parametra na 70 vph[16].

Jedan od nedostataka ALINEA algoritama je pretpostavka kako vozilo udaljenost od zaustavne linije na prilazu do detektora prolazi prema prethodno pretpostavljenim vremenskim intervalom. Ukoliko je detektor previše udaljen od prilaza autoceste ili je pretpostavljen vremenski interval premali kako bi pretpostavka bila točna, primjenjuju se sljedeće jednadžbe:

$$r(t) = r(t - 1) + K_r [O - O_{izlaz}(t)] + K_p [O - O_{izlaz}(t)] + \gamma [q_{ulaz}(t) - q_{ulaz}(t - 1)] \quad (2)$$

$$K_p = \delta / (T\alpha) - K_r > 0 \quad (3)$$

$$\alpha = \mu/100\lambda \quad (4)$$

Gdje je:

T – interval uzorkovanja (s)

μ - broj kolničkih traka

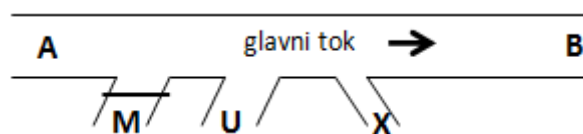
λ - duljina vozila (km)

q_{ulaz} - trenutno zauzeće kapaciteta autoceste u vremenskom periodu t (%)

γ – koeficijent kalibracije ulaza

4.2.2. ZONE algoritam

ZONE algoritam pripada koordiniranoj skupini *algoritama za isključivo upravljanje priljevnim tokovima*. On je baziran na upravljačkoj logici podjele autoceste i njenih prilaza i izlaza na više zona. Prvi put je primijenjen u SAD-u na užem području garda Minneapolis-a. Dio autoceste nakon prilaza, pa sve do prethodno određenog početka zone je područje zagušenja, dok je dio iza prilaza, pa sve do kraja zone područje slobodnog toka. U literaturi se područje zagušenja naziva i područje uskog grla, jer u tom području dolazi do stapanja glavnog i priljevnog toka u jedinstveni tok. ZONE algoritam proračunava stupanj propuštanja na prilazima, prema prometnom volumenu u pojedinoj zoni. Kako bi se postigao navedeni mehanizam mora se ostvariti pravilna podjela autoceste na zone. Bitna je precizna procjena kapaciteta uskog grla i svih ulaza i izlaza na autocestu u dotičnoj zoni. Upravo zbog potrebe za vrlo preciznim određivanjem tih parametara algoritam nije doživio širu primjenu[18]. Algoritam proračunava stupanj propuštanja priljevnih tokova za svaku zonu koristeći sljedeću jednadžbu prema slici 8:



Slika 10. Parametri ZONE Algoritma

$$M + F = X + B + S - (A+U)$$

Gdje je:

M – ukupan izmjeren prometni volumen na prilazima autocesti

F – ukupan izmjeren prometni volumen između susjednih zone

X - ukupan izmjeren prometni volumen na izlazima autoceste

B – kapacitet područja zagušenja

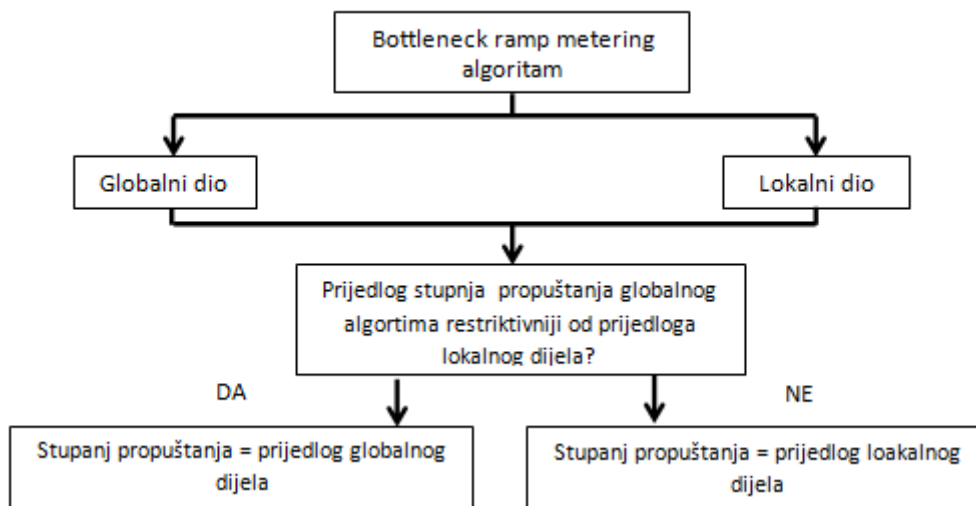
S – slobodan prostor u zoni (računa se mjerenjem zauzeća zone)

A – ukupni izmjereni prometni volumen na području slobodnog toka

U – ukupni izmjereni prometni volumen na prilazima na kojima nema *sustava za upravljanje priljevnim tokovima*

4.2.3. BOTTLENECK algoritam

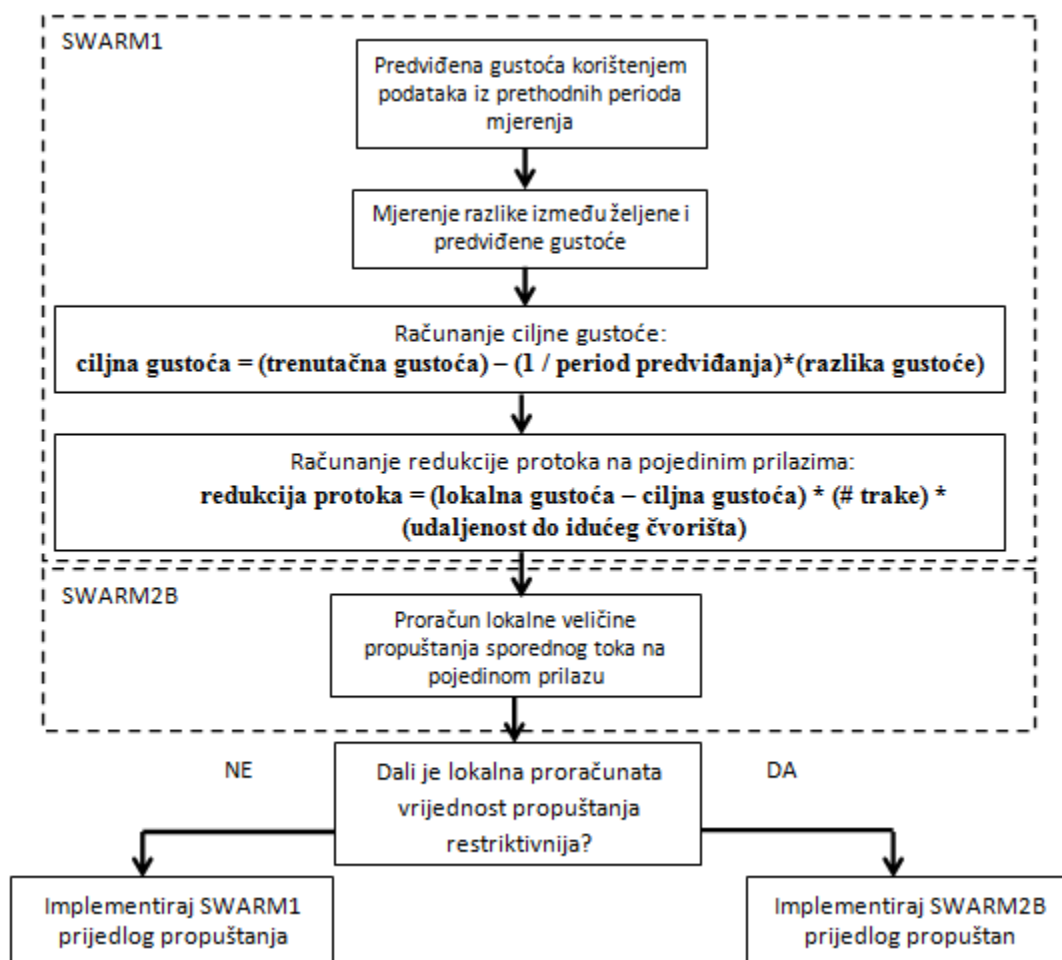
BOTTLENECK algoritam je konceptualno jedan od najboljih heurističkih koordiniranih algoritama za isključivo upravljanje priljevnim tokovima koji se koristi u praksi. Još se naziva i Seattle BOTTLENECK algoritam, jer je prvi put implementiran na području grada Seattle-a od strane WDOT-a (*Washington Department 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) [15, 18]. BOTTLENECK algoritam autocestu dijeli u segmente s obzirom na lokacije pojavljivanja uskih grla, odnosno zagušenja. Logika rada algoritma je podijeljena na dva stupnja djelovanja: **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 predefimirani protok glavnog toka. Algoritam zatim distribuira vrijednost redukcije priljevnog toka pojedinim prilazima prema predefiniranim 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. Također, danas postoje i mogućnosti poboljšanja uvođenja robusnijeg ALINEA algoritma u lokalni stupanj djelovanja ovog algoritma, kao i dinamičko obnavljanje težinskih vrijednosti utjecaja pojedinih prilaza ovisno o trenutačnoj situaciji [18]. Osnovni dijagram toka algoritma je prikazan na slici 9.



Slika 11. Osnovni dijagram toka Bottleneck algoritma [18].

4.2.4. SWARM algoritam

SWARM (*System-Wide Adaptive Ramp Metering*) algoritam je u početku bio razvijan kao dio napredne tehnologije općenitog upravljanja prometnim tokovima pod nazivom ATMS (*Advanced Transportation Management System*). Prvi put je implementiran i testiran u Kaliforniji (okrug Oregon). Spada u koordinirane nadmetajuće algoritme, te mu je osnovni cilj zadržati gustoću glavnog toka ispod definirane razine u realnom vremenu. Kao i BOTTLENECK algoritam, SWARM algoritam koristi dvije vrste upravljačke logike. Možemo ih s pravom zbog svoje kompleksnosti nazvati i zasebnim algoritmima funkcionalno objedinjenim u jedan. Prva vrsta upravljačke logike obuhvaćena je SWARM 1 algoritmom, te se obavlja na globalnoj razini, odnosno na čitavom sustavu autoceste. Na lokalnoj razini funkcionira SWARM2B algoritam. Osnovni dijagram toka SWARM1 algoritma integriranog sa algoritmom SWARM2B vidimo na slici 10.



Slika 12 Operativni koncept SWARM1 algoritma[18].

Ovaj dio SWARM algoritma bazira redukciju faktora propuštanja priljevnih tokova u glavni tok na temelju predviđanja nastajanja uskih grla, odnosno zagušenja. Za razliku od BOTTLENECK algoritma koji koristi unaprijed određene lokacije uskih grla. Pozitivna strana SWARM1 algoritma leži u mogućnosti predviđanja lokacije uskog grla na autocesti uz pomoć

povijesnih podataka o parametrima glavnog toka. Ukupni SWARM algoritam je više preventivan, a manje odzivan na već gotov slučaj zagušenja. Uviđamo da kvaliteta ukupnog algoritma ovisi o stupnju točnosti predviđanja nastajanja uskih grla. Kako bi poboljšao performanse predviđanja, SWARM 1 algoritam zapravo predviđa stanje prometnih tokova prema unaprijed određenim lokacijama na kojima su evidentirana veća zagušenja. Prema tim podacima prilagođava koeficijente mjerenja koje koristi pri predviđanju stanja prometnih tokova. U inicijalnom stadiju rada algoritma najprije dijeli autocestu na ćelije. Svaka ćelija sadrži dio autoceste sa prilazom ili izlazom iz nje. Zatim se ćelije grupiraju u sektore čije granice određuju ćelije sa evidentiranim velikim zastojevima. Ćelija sa zastojem čini zadnju ćeliju u pojedinom sektoru. Pri takvoj organizacijskoj podjeli autoceste i povijesnim podacima o lokaciji uskih grla može se dobiti dobar stupanj točnosti predviđanja[18].

Drugi dio upravljačke logike SWARM algoritma usmjeren je na lokalno upravljanje priljevnim tokovima na pojedinim prilazima autoceste. Danas taj dio logike obavlja SWARM 2B algoritam. On koristi tradicionalne empiričke metodologije za lokalno upravljanje priljevnim tokovima na prilazima autoceste. Koeficijent mjerenja u ovom algoritmu je prilagođena na način prema kojem se gustoća prometnog toka zadržava ispod kritične. Napomenuti algoritmi se paralelno odvijaju, te daju različite vrijednosti, pri čemu SWARM kontrolor odabire minimalnu vrijednost.

SWARM algoritam je jedan od najboljih algoritama ramp metering-a današnjice koji se primjenjuje u praksi.

5. Adaptivni neuro-fuzzy algoritam u upravljanju prilaznim tokovima autoceste

U prethodnim poglavljima prikazali smo principe rada najraširenijih *algoritama za isključivo upravljanje priljevnim tokovima* u operativnoj primjeni. Jedan od elementa ovog rada je i pokušaj stvaranja novog kontrolora koji će se bazirati na neuronskim mrežama i *fuzzy* logici. U umjetnoj inteligenciji takvi sustavi se nazivaju hibridnim. Metoda je izabrana poglavito iz razloga što se danas rijetko koriste metaheurističke metodologije u rješavanju *razmatranog* problema[20, 21].

Modeliranje sustava bazirano na konvencionalnim matematičkim alatima nije prikladno za modeliranje sustava sa visokom nesigurnošću kao što je interakcija glavnih prometnih tokova na autocesti sa priljevnim tokovima. FIS (*Fuzzy inference system*) je sa korištenjem IF-THAN pravila u mogućnosti modelirati, odnosno oponašati kvalitativne aspekte ljudskog znanja i procesa rasuđivanja bez provođenja detaljnih kvantitativnih analiza. Prilikom reguliranja stupnja propuštanja priljevnih prometnih tokova u glavni tok ovaj algoritam u određenoj mjeri oponaša biološke procese u mozgu prometnog operatera. Ti su biološki procesi odgovorni za rasuđivanje i predviđanja stupnja propuštanja priljevnih tokova ovisno o trenutačnom stanju glavnog prometnog toka na autocesti. Proces se provodi kako bi se optimirali temeljni parametri protočnosti na autocesti[20] .

Svojevrсна sinteza *fuzzy* logike i neuronskih mreža označava se u MATLAB okruženju akronimom ANFIS. Akronim označava *adaptive neuro-fuzzy inference system*, tj. algoritam koji na principima umjetnih neuronskih mreža modelira parametre FIS-a (IF-THAN pravila, parametre funkcija pripadnosti, broj ulaza, itd.). To ga čini svojevrsnom bliskom kopijom ljudskog rasuđivanja o upravljanju prometnim tokovima na autocesti kao što smo ranije već to napomenuli. Primarni razlog zašto smo koristili ovaj algoritam je nemogućnost određivanja preciznih granica funkcije pripadnosti pri pojedinim ulazima FIS-a. Osnovna ideja ANFIS algoritma je da se na temelju poznatih ulaznih/izlaznih skupina (setova) podataka konstruira FIS pri kojem se funkcije pripadnosti prilagođavaju samostalnim korištenjem algoritma povratnog rasprostiranja greške ili u kombinaciji sa metodom najmanjih kvadrata – hibridni algoritam učenja. Prilagodbe omogućuju *fuzzy* sustavu da uči na temelju ulazno/izlaznih setova podataka[21].

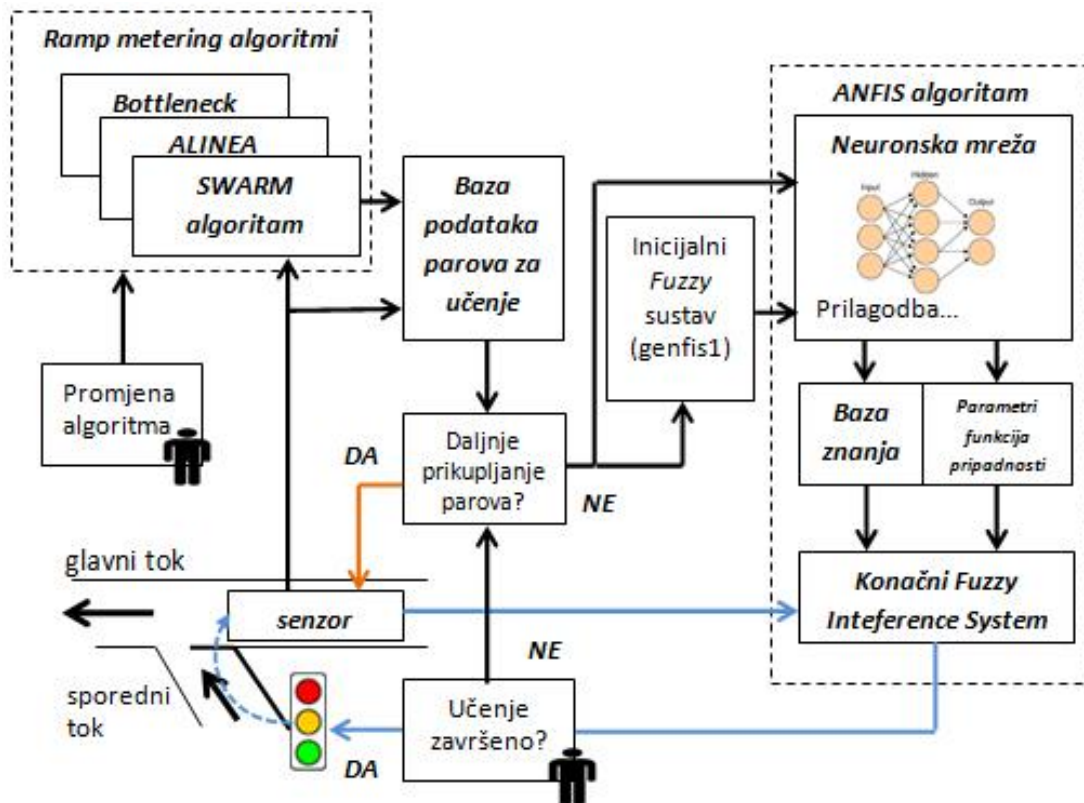
Prilikom korištenja ANFIS algoritma u MATLAB okruženju valja poštivati njegova ograničenja:

- FIS mora biti Sugeno-v tip sustava prvog ili nultog reda
- Mora imati jedan izlaz, kao produkt korištenja težinski prosječne defuzzifikacije, te sve izlazne funkcije pripadnosti moraju biti istog tipa linearne ili konstante.
- Ne smije biti dijeljenja pravila. Različita pravila ne mogu dijeliti istu izlaznu funkciju pripadnosti, tj. broj izlaznih funkcija pripadnosti mora biti jednak broju pravila.

- Imati jedinstvenu težinu za svako pravilo

Općenit koncept rada ANFIS algoritma za isključivo upravljanje priljevnim tokovima je prikazan na slici 11. Sustav upravljanja ANFIS ramp metering-a najprije koristi jedan od postojećih algoritama na segmentu autoceste nad kojim se primjenjuje sustav upravljanja priljevnim tokovima. U našem slučaju koristili smo SWARM algoritam. SWARM ili bilo koji drugi algoritam funkcionira normalno, ali se ulazni podatci i izlazi producirani od strane algoritma bilježe u posebnu bazu podataka po principu jedan par (ulaz-izlaz) - jedan element (unos) u tablici. Zatim se na temelju tih podataka inicijalizira početni fuzzy sustav, MATLAB naredbom *genfis1*[20].

Nakon toga adaptivna neuronska mreža prilagođava parametre funkcija pripadnosti fuzzy sustava i gradi bazu znanja na temelju baze podataka parova za učenje. Neuronska mreža stvara novi fuzzy sustav koji je učen o potrebnom načinu reagiranja na specifične i nespecifične situacije u prometnom sustavu autoceste. Opće „znanje“ o upravljanju je naučeno od SWARM algoritma, no zahvaljujući adaptivnoj neuronskoj mreži ANFIS algoritam bi u teoriji trebao prepoznavati i situacije koje su slične situacijama kojima je učen. Te na njih odgovarati u skladu s naučenim općim „znanjem“. Cilj je odrediti dali su ti odgovori zaista bolji od SWARM algoritma i kako utječu na parametre prometnog sustava autoceste. Fuzzy logika bi cijelom sustavu trebali dati dodatni stupanj kvalitete u odlučivanju[22]. Trenutak kad je učenje završeno kao i pitanje odabira algoritma učitelja, odabire operater ovisno o željenoj kakvoći djelovanja cijelog sustava i želi li algoritam postaviti u funkciju lokalno ili globalno.



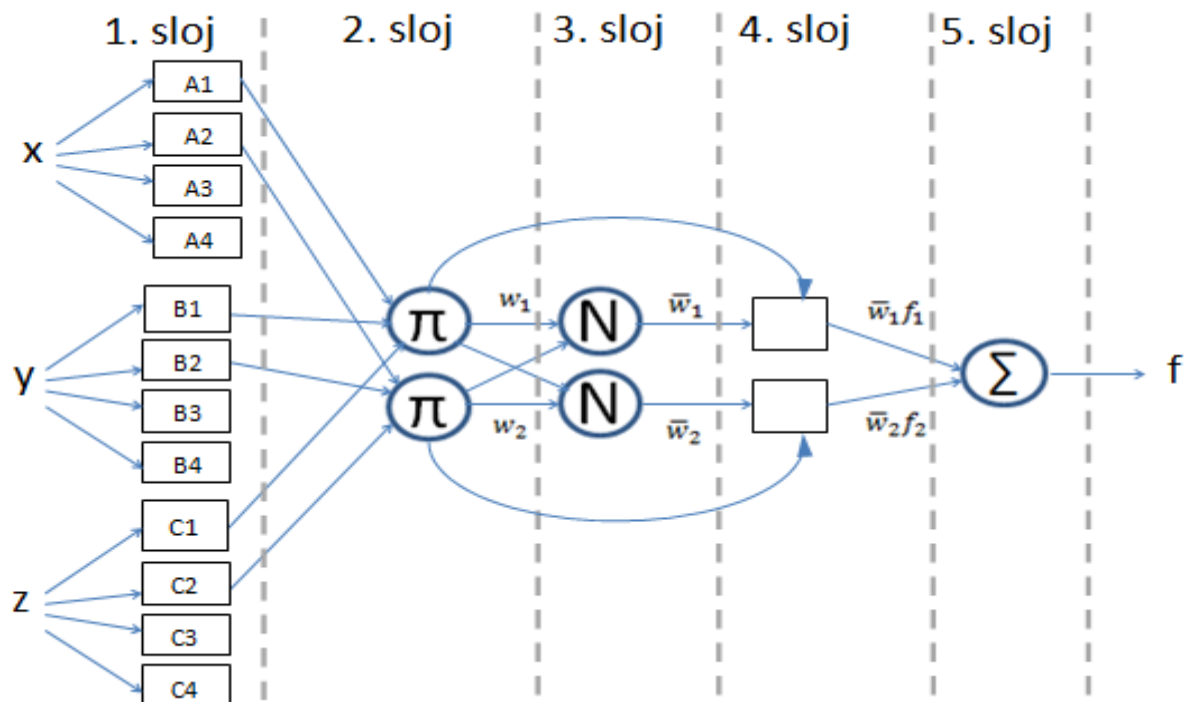
Slika 13. Koncept rada ANFIS algoritma za isključivo upravljanje priljevnim tokovima

5.1. Struktura adaptivnog neuro-fuzzy algoritma

Sa upoznavanjem strukture ANFIS algoritma početak ćemo od procesa izgradnje adaptivne mreže koje su ustvari velike skupine različitih *feedforward* neuronski mreža sa mogućnošću nadziranog učenja. Adaptivna mreža je mrežna struktura koja se sastoji od čvorova i usmjerenih veze putem kojih su čvorovi povezani. Čvorovi su organizirani u mreži unutar koje su neki ili čak svi čvorovi adaptivni što znači da njihovi izlazi ovise o parametrima koji se mijenjaju kroz mrežu prolazeći kroz razne veze i čvorove koje dovode parametre do promatranog čvorova. Sukladno spomenutom, promjenu vrijednosti parametara uzrokuju adaptivni i neadaptivni (fiksni) čvorovi mreža, ali u sprezi s pravilima učenja koji specificiraju na koji će se način ti parametri mijenjati kako bi se minimalizirala propisana mjera greške[16, 18]. U ovom poglavlju objasnit ćemo pojednostavljenu strukturu ANFIS algoritma na parametrima korištenim za odlučivanje o propuštanju prometnog toka na prilazu autoceste. U našem slučaju imamo tri ulaza: brzinu vozila u glavnom toku, gustoću glavnog prometnog toka, te protok vozila u glavnom prometnom toku. Označit ćemo ih sa x , y , z i izlaza f . Koristeći Sugenov tip *fuzzy* sustava koristimo sljedeći oblik pravila (baze znanja) na uzorku od dva pravila kako bi pojednostavnili strukturu modela u tumačenju ANFIS strukture[23]:

1. If x is $A1$ and y is $B1$ and z is $C1$, then $f1=p1x+q1y+h1z+r1$
2. If x is $A2$ and y is $B2$ and z is $C2$, then $f2=p2x+q2y+h2z+r2$

Pri čemu su funkcije pripadnosti *fuzzy* setova A_i , B_i , C_i $i=1,2,3$, označene se μ_{A_i} , μ_{B_i} , μ_{C_i} . Tipično razaznajemo 5 različitih slojeva u ANFIS arhitekturi prema slici 19.



Slika 14. Struktura ANFIS-a

Sloj 1: Svaki čvor i u ovom sloju je adaptivni čvor i zadan sljedećom jednažbom:

$$0_i^1 = \mu_{Ai}(x) \quad (5)$$

Oznaka 0_i^1 označava funkciju pripadnosti od A_i (A_i je lingvistička varijabla koja označava stupanj pripadnosti određenog ulaza neizrazitom skupu, npr. kod ulaza za brzinu glavnog toka te su varijable jako spor, spor, umjeren, brz... za brzinu od 90km/h), te određuje stupanj pri kojem x (ulaz u čvorište) zadovoljava kvantificiran A_i . Za upravljanje prometnim tokovima na prilazima autocesti odabrali smo za *trapeznu funkciju*, kao što je sugerirano tablicom 3. Dok smo za i . Koristili trokutastu funkciju pripadnosti. Maksimum ovih funkcija je 1, a minimum je 0.

Sloj 2: Svaki čvor u ovom sloju je čvor označen s krugom i oznakom π i neadaptivan je. Ti čvorovi jednostavno množe ulazne signale i produkt šalju kao izlazni signal.

$$w_i = \mu_{Ai}(x) \mu_{Bi}(y) \mu_{Ci}(z) \quad i=1,2. \quad (6)$$

Matematički gledano, u postupku procjene prostora vrijednosti pravila budućeg FIS-a, prema gornjoj jednažbi koristimo produkt za *T-normu*. Koja je ekvivalent logičkom AND. Svaki produkt, odnosno izlaz iz čvora predstavlja aktivacijsku vrijednost pojedinog pravila.

Također možemo reći da se u njemu obavlja fuzifikacija. Pa ako shvatimo da su ovi čvorovi neuroni, tada je njihova aktivacijska funkcija odgovara neizrazitom skupu pridruženom pravilu.

Sloj 3: Svaki čvor u ovom sloju je označen sa slovom N u kružnici. Ovaj sloj ima ulogu procjene implikacija i posljedica pojedinih pravila. Matematički izraženo:

$$f(x, y, z) = \frac{w_1(x,y,z)f_1(x,y,z) + w_2(x,y,z)f_2(x,y,z)}{w_1(x,y,z) + w_2(x,y,z)} \quad (7)$$

Ili ako izostavimo argumente

$$f = \frac{w_1 f_1 + w_2 f_2}{w_1 + w_2} \quad (8)$$

Što nadalje može biti razdvojeno po fazama, odnosno i -tim pravilima

$$\bar{w}_i = \frac{w_i}{w_1 + w_2} \quad i=1,2. \quad (9)$$

Svaki i -ti čvor računa udjel aktivacijske vrijednosti i -tog pravila u sumi svih aktivacijskih vrijednosti pravila kojima raspolaže ANFIS algoritam. U literaturi se taj sloj naziva *normalizirana aktivacijska vrijednost*.

Ako ove čvorove shvatimo kao neurone, svaki neuron odgovara neizrazitom pravilu. Pa težine između 3. i 4. sloja odgovaraju normaliziranim faktorima uvjerenosti u istinitost neizrazitih pravila. One se uspostavljaju u fazi učenja sustava.

Sloj 4: U ovom sloju svaki adaptivni čvor i se može opisati s čvornom jednačbom:

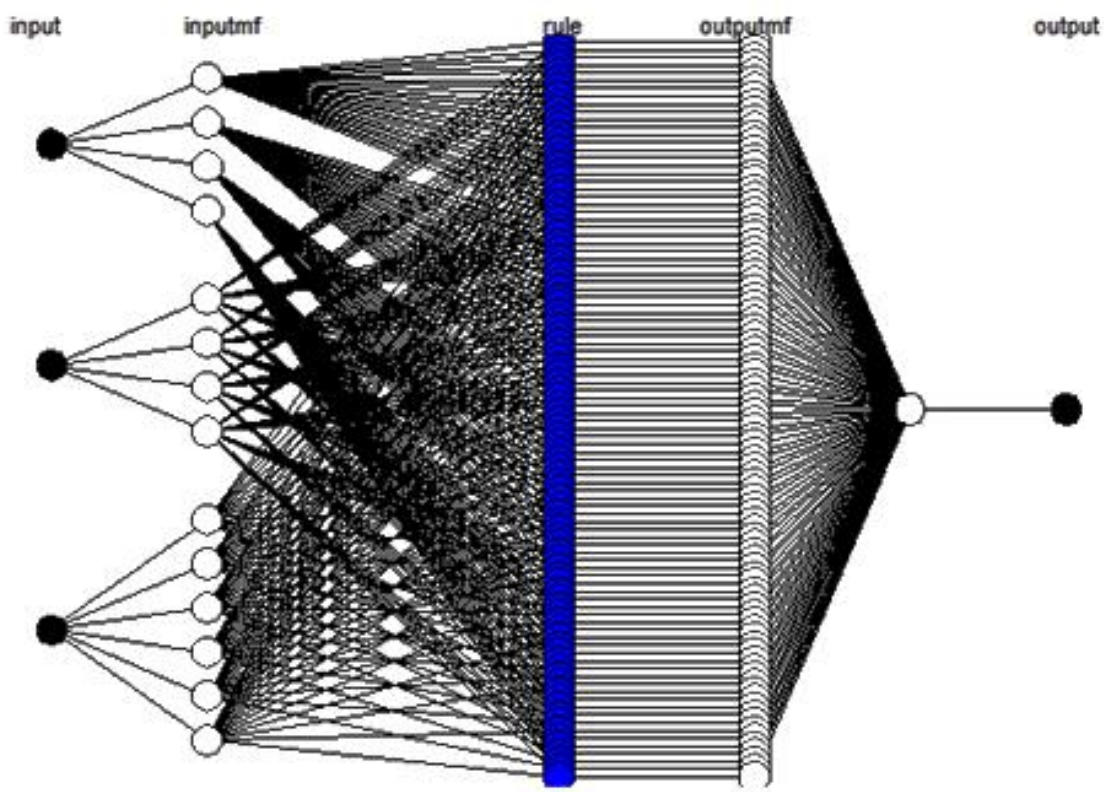
$$o_i^4 = \bar{w}_i f_i = \bar{w}_i (p_i x + q_i y + h_i z + r_i) \quad (10)$$

Gdje je \bar{w}_i izlaz iz sloja 3, dok su $p_i + q_i + h_i + r_i$ skup parametara koji utječu na izlaznu linearnu funkciju u Sugenovom *fuzzy* sustavu, tj. ovdje se ostvaruje disjunkcija izlaza pravila. U literaturi se navedeni parametri nazivaju i *posljedični parametri*.

Sloj 5: Sloj sadrži samo jedan neadaptivni čvor označen sa krugom u kojem se nalazi oznaka za sumu, koji kao što mu i sam izgled sugerira računa ukupnu izlaznu vrijednost kao zbroj svih dolaznih signala. Predstavlja svojevrsni proces defuzifikacije[21]. Računa se po sljedećoj jednačbi:

$$o_i^5 = \text{ukupni izlaz} = \sum_i \bar{w}_i f_i = \frac{\sum_i w_i f_i}{\sum_i w_i} \quad (11)$$

Dosada smo objašnjavali opće principe strukture ANFIS algoritma, koristeći samo dva pravila dok smo zadržali parametre kao što su tri ulaza sa po tri funkcije pripadnosti. Na slici 20 vidimo konačni izgled adaptivne neuronske mreže sa 96 pravila koja je konstruirana od strane ANFIS algoritma u MATLAB okruženju.



Slika 15 Prikaz strukture ANFIS algoritma u MATLAB okruženju

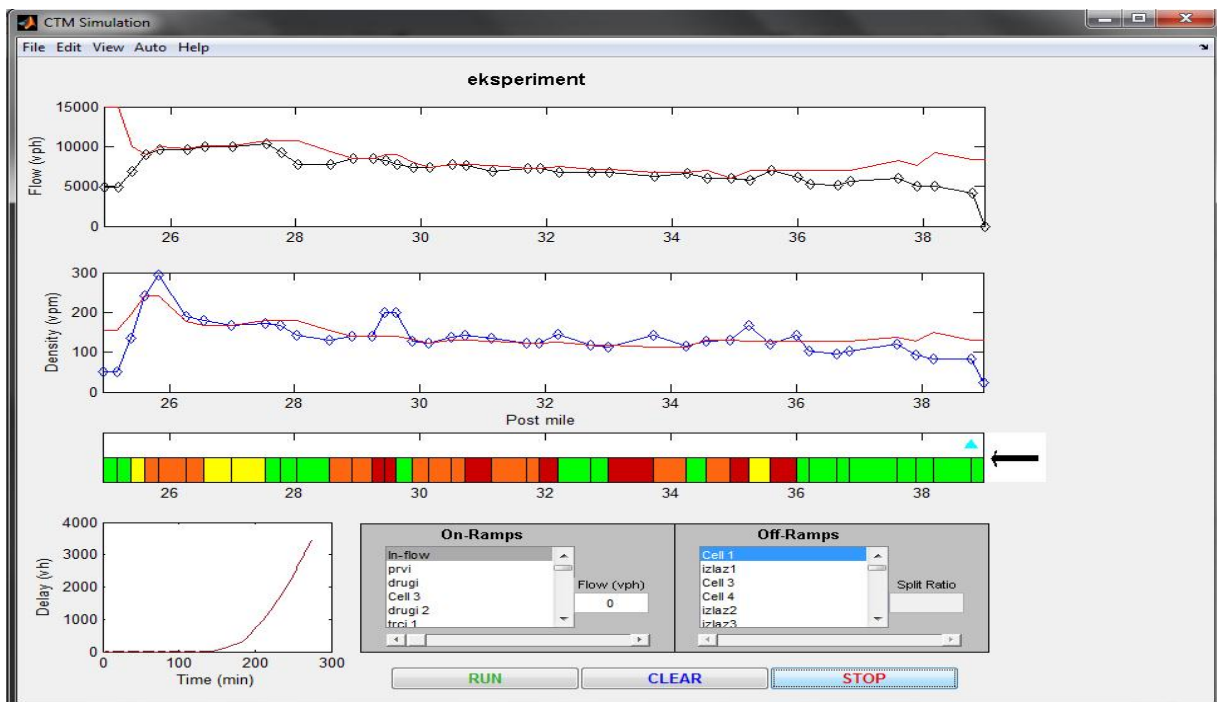
5.2. Metode prikupljanja podataka

Prilikom prikupljanja skupa podataka za učenje u prometnom modelu upravljanja priljevnim tokovima na autocesti koristili smo program CTMSIM izrađen u MATLAB okruženju. Prije procesa samog prikupljanja podataka postavljamo hipotetski model buduće ANFIS strukture, odnosno konačnog dobivenog *fuzzy* sustava. Najprije smo morali donijeti odluku što će biti izlaz FIS-a koji će generirati ANFIS algoritam i koji će to ulazi biti u smislu najboljeg opisivanja sustava i produkcije najmanje greške prilikom učenja. Izlaz ćemo definirati kao veličinu toka koju može propustiti algoritam na prilazima autoceste. Izlaze i potencijalne ulaze generirat ćemo uz pomoć CTMSIM alata kojeg ćemo u idućem poglavlju detaljnije obraditi.

5.2.1. Prikupljanje podataka makrosimulacijskim alatom CTMSIM

CTMSIM je makrosimulacijski alat interakcije glavnih i priljevnih tokova na autocesti. Uz kalibriranje parametara navedenih prometnih tokova nudi i mogućnost komparacije, dizajna i ugradnje različitih algoritma stupnja propuštanja priljevnih tokova[19].

Što ga čini izrazito pogodnim za implementaciju i testiranje ANFIS algoritma. Okruženje CTMSIM alata vidimo na slici 12:



Slika 16. Sučelje CTMSIM makrosimulacijskog alata

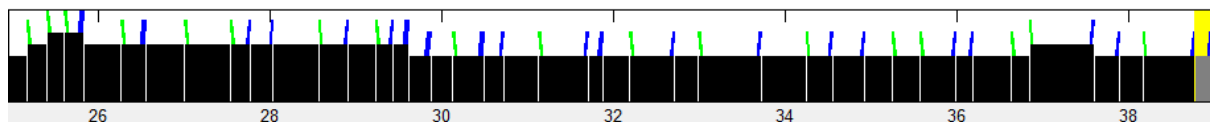
Podaci su prikupljeni praćenjem rada kontrolora SWARM (*System-Wide Adaptive Ramp Metering*). Iz opisa principa rada SWARM kontrolora ranije u radu uvidamo neke njegove karakteristike koje možemo postići i adaptivnim neuronskim mrežama. Zadaća ANFIS algoritma, odnosno njegove adaptivne neuronske mreže je predviđanje i traženje uzoraka u velikom skupu prikupljenih podataka za učenje od strane ulaznih podataka CTMSIM paketa i

izlaznih podataka koje producira SWARM algoritam. Specifični cilj mu je generiranje baze znanja i kalibrirati parametre funkcija pripadnosti pojedinih ulaznih prometnih veličina[16, 19]. ANFIS algoritam ima zadatak ostvariti isti ili bolji učinak optimiziranja prometnih tokova na autocesti. Učeći i izvodeći nova znanja na temelju rezultata upravljanja SWARM kontrolora. SWARM algoritam kao jedan od ponajboljih *ramp metering* algoritama služi kao svojevrsan učitelj, koji ANFIS algoritam treba naučiti osnovama upravljanja stupnjem protočnosti prilivnih tokova ovisno o stanju glavnog toka.

Također, prilikom skupljanja podataka pomoću SWARM algoritma, moramo imati na umu kako će kvaliteta ANFIS kontrolora ovisiti o stupnju reprezentativnosti podataka kojim ga učimo. Iz iskustva znamo kako parametri prometnih tokova na autocesti variraju od onih koji sugeriraju na veća ili manja opterećenja, pa prema tome svaki stupanj opterećenja opisuje se s drugačijim skupom podataka za učenje.

U ovom slučaju odabrali smo stupanj manjeg opterećenja, jer bi za sve stupnjeve opterećenja trebalo skupiti veliku količinu podataka.

Kako bi prikupili željene podatke za treniranje i učenje potrebno je prvo prilagoditi makrosimulaciju unutar programskog okruženja CTMSIM. CTMSIM je dizajniran prema ACTM (*Asymmetric Cell Transmission Model*) modelu koji najprije raščlani kompleksni sustav na segmente/ćelije, te zatim provodi proračune za svaku ćeliju zasebno[19]. Na slici 13 vidimo demonstracijski model autoceste. Crni kvadrati predstavljaju autocestu, tj. svaki zasebno jednu ćeliju segmentu autoputa na kojem se prikupljaju i računaju parametri. Zelene crte predstavljaju izlaze na autocestu, a plave ulaze. Prometni tok se kreće od desne strane prema lijevoj. Cijela autocesta je podijeljena na 40 segmenata/ćelija na kojima se mjere prometni parametri.



Slika 17. ACTM demonstracijski model autoceste

Tablica 1. prikazuje parametre koji su postavljeni za pojedine segmente na autocesti na kojim dolazi do pritoka vanjskih tokova.

Tablica 1. Parametri demonstracijskog modela autoceste na ulazima autoceste

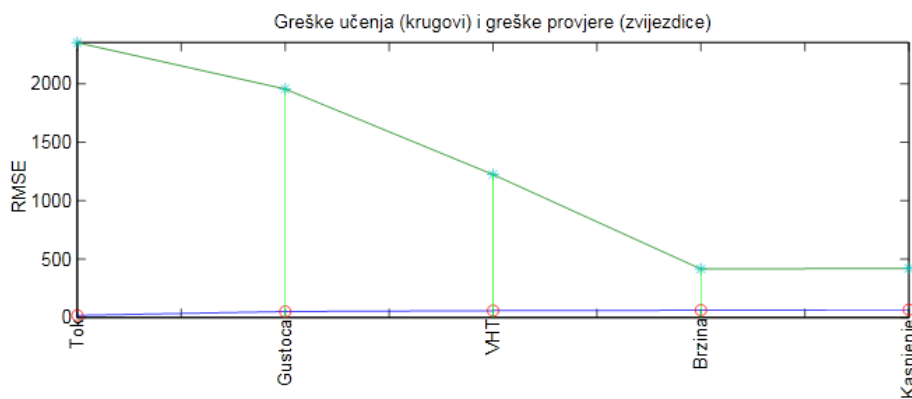
Broj i-te ćelije/segmenta sa prilazom	Karakteristike autoceste u i-toj ćeliji/segmentu						Karakteristike prilaza u i-toj ćeliji/segmentu			
	Maksimalni tok (vozila po satu po traci)	Brzina pri zagušenju (km/h)	Kritična brzina (km/h)	Broj pomoćnih traka	Broj traka	Duljina (km)	Maksimalni tok (vozila po satu po traci)	Broj traka	Duljina reda (vozila)	Potražnja
1.	2097,5	79,34	102,76	0	4	0,33	5000	1	50	0,45
2.	2097,5	22,53	102,76	0	4	0,98	5000	1	50	
4.	1921,0	4,83	96,56	0	4	0,48	5000	1	50	
5.	1920,3	4,83	96,56	0	4	1,23	5000	1	50	
8.	1750	17,73	86,96	0	4	0,32	5000	1	50	
9.	1750	17,73	86,96	0	4	0,64	5000	1	50	
12.	1500	14,65	72,42	0	4	0,59	5000	1	50	
13.	1750	28,98	85,34	0	4	0,52	5000	1	50	
15.	1684,75	24,14	96,56	0	4	1,17	5000	1	50	
17.	1781,25	28,98	96,56	0	4	0,83	5000	1	50	
19.	1824,25	28,98	96,56	0	4	0,29	2500	2	25	
20.	1824,25	28,98	96,56	0	4	0,92	5000	1	50	
22.	1950	32,19	96,56	0	4	0,35	5000	1	50	
23.	1950	24,14	96,56	0	4	0,59	2500	2	25	
25.	1995	24,14	96,56	0	4	0,38	2500	2	25	
26.	1792	19,31	103	0	5	0,31	2500	2	25	
27.	1792	19,31	103	0	5	0,32	5000	1	50	
29.	1687,8	24,14	96,56	0	5	0,56	5000	1	50	
31.	2144,8	24,14	96,56	0	5	0,41	5000	1	50	
32.	2144,8	24,14	96,56	0	5	0,39	5000	1	50	
33.	2144,8	24,14	96,56	0	5	0,85	5000	1	50	

Prema gornjoj tablici vidimo kako smo na prilazu u ćeliji 19. stvorili prvo manje zagušenje smanjivši maksimalni protok i povećali kritičnu brzinu. To manje zagušenje možemo karakterizirati kao prvu karakterističnu situaciju, dok smo veće zagušenje stvorili stvarajući zagušenje u susjednim privozima u ćelijama 23., 25., 26. Ta veća zagušenje možemo smatrati drugom karakterističnom situacijom.

Prikupljeni podaci moraju biti odabrani sa minimalnom međusobnom kovarijancom, tj. moraju biti statistički nezavisni. Pa prema tome skup podataka za učenje ne može biti potpuno reprezentativan za sve moguće situacije na autocesti pri različitim opterećenjima u analiziranom trenutku. U takvim situacijama je potrebna validacija modela koju ćemo obraditi u idućem poglavlju. Ostaje nam još zadaća koja uključuje određivanje broja i vrste ulaza. Kako bi kompletirali konačni izgled ANFIS modela i kako bi ga mogli validirati.

5.3. Iscrpan (Brute-force) odabir ANFIS ulaza

U MATLAB okruženju koristili smo funkciju `exhsrch` za iscrpnu (brute-force) pretragu unutar svih mogućih ulaza kako bi izabrali ulaze koji imaju najveći utjecaj na izlaz. Iscrpno pretraživanje najlakše možemo shvatiti po principu rješavanja problema pokušaja i promašaja, tj. ono zapravo generira sve moguće ANFIS modele. Svaki ANFIS model uči jednom iteracijom, te FIS svakog modela ima samo dvije funkcije pripadnosti[16]. Zaključujemo iscrpan odabir ANFIS modele generira na što jednostavniji način, kako bi se skratilo vrijeme pretrage. `Exhsrch` – proračunava grešku pri treniranju i provjeri za svaki generirani ANFIS model s različitim ulazima. Od ukupno 5 ulaza prikupljenih CTMSIM alatom: Gustoća, tok, brzina, kašnjenje, VHT (*Vehicle hours traveled*), pokušat ćemo pronaći prvo jedan koji najviše utječe na veličinu toka koju može propustiti algoritam na prilazima autoceste:



Slika 18. Iscrpna pretraga jednog ANFIS ulaza od 5 kandidata

Iz grafa na slici 14 uviđamo kako je brzina ulaz koji najviše utječu na veličinu toka koji može propustiti kontrolor na prilazima autoceste, to potvrđuje i sljedeći izvod:

Train 5 ANFIS models, each with 1 inputs selected from 5 candidates...

ANFIS model 1: Gustoća --> trn=50.9003, chk=1955.5832

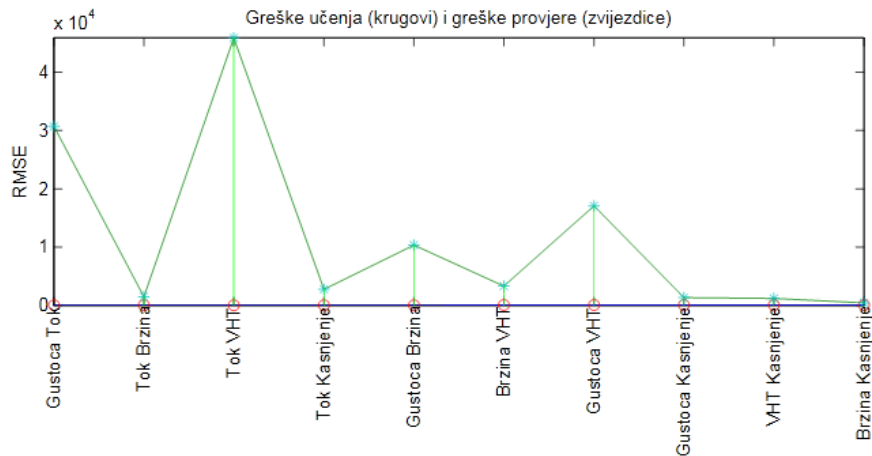
ANFIS model 2: Tok --> trn=18.4257, chk=2353.8958

ANFIS model 3: Brzina --> trn=61.9087, chk=414.4683

ANFIS model 4: VHT --> trn=57.5478, chk=1224.2000

ANFIS model 5: Kasnjenje --> trn=65.4152, chk=420.1218

Velike greške pri učenju i provjeri pripisujemo malim brojem funkcija pripadnosti i samo jednom iteracijom prilikom učenja koju koristi *exhsrch* funkcija. Uviđamo postojanje prostora za poboljšanje modela, pa uvodimo i drugi ulaz:



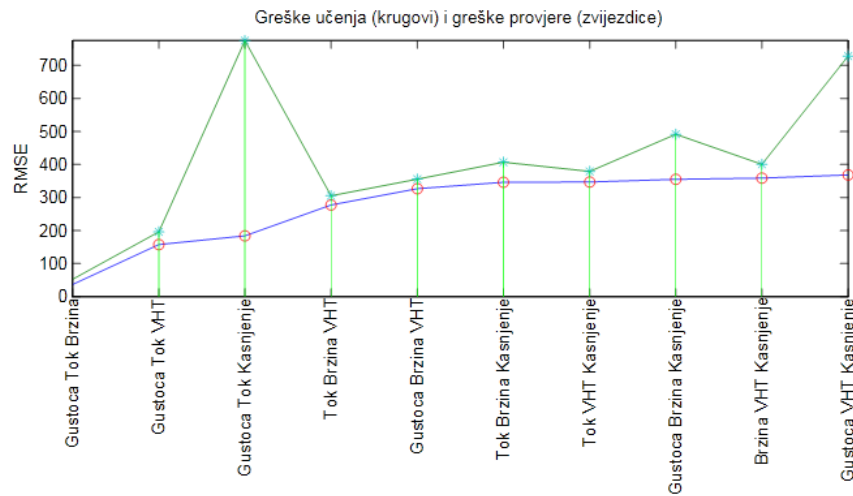
Slika 19. Iscrpna pretraga dva ANFIS ulaza od 10 kandidata

Graf na slici 14 pokazuje velika odstupanja od greške učenja i greške provjere, pri nekim parovima ulaza. Ipak zaključujemo kako par ulaza Brzina – Kasnjenje najviše utječe na izlaz. No ipak je neznatno bolji rezultat od jednog ulaza i nezadovoljavajući za krajnju odluku o ulazima.

Train 10 ANFIS models, each with 2 inputs selected from 5 candidates...

- ANFIS model 1: Gustoca Tok --> trn=12.9494, chk=30712.8672
- ANFIS model 2: Gustoca Brzina --> trn=18.2948, chk=10350.3270
- ANFIS model 3: Gustoca VHT --> trn=52.3021, chk=17064.4931
- ANFIS model 4: Gustoca Kasnjenje --> trn=53.9898, chk=1325.7487
- ANFIS model 5: Tok Brzina --> trn=15.4856, chk=1475.8923
- ANFIS model 6: Tok VHT --> trn=15.7799, chk=45923.7616
- ANFIS model 7: Tok Kasnjenje --> trn=16.6964, chk=2740.7331
- ANFIS model 8: Brzina VHT --> trn=40.2415, chk=3324.3503
- ANFIS model 9: Brzina Kasnjenje --> trn=59.8987, chk=430.2477**
- ANFIS model 10: VHT Kasnjenje --> trn=57.6580, chk=1184.2259

Uvodimo i treći ulaz kako bi poboljšali rezultate, na grafu slike 15 – možemo vidjeti rezultate sa tri ulaza.



Slika 20. Iscrpna pretraga tri ANFIS ulaza od 10 kandidata

Već po grafu možemo uvidjeti kako tri ulaza Gustoća – Tok – Brzina najbolje utječu na veličinu toka koji može propustiti kontrolor na prilazima autoceste. Što potvrđujemo i izvodom:

Train 10 ANFIS models, each with 3 inputs selected from 5 candidates...

ANFIS model 1: Gustoca Tok Brzina --> trn=37.1553, chk=52.9882
 ANFIS model 2: Gustoca Tok VHT --> trn=157.5240, chk=196.1232
 ANFIS model 3: Gustoca Tok Kasnjenje --> trn=184.0970, chk=775.4800
 ANFIS model 4: Gustoca Brzina VHT --> trn=326.8191, chk=355.5690
 ANFIS model 5: Gustoca Brzina Kasnjenje --> trn=355.2695, chk=491.4980
 ANFIS model 6: Gustoca VHT Kasnjenje --> trn=368.6199, chk=728.7008
 ANFIS model 7: Tok Brzina VHT --> trn=277.5334, chk=305.4985
 ANFIS model 8: Tok Brzina Kasnjenje --> trn=346.1700, chk=407.1305
 ANFIS model 9: Tok VHT Kasnjenje --> trn=347.2662, chk=378.9556
 ANFIS model 10: Brzina VHT Kasnjenje --> trn=359.0290, chk=400.9632

Iako rezultati greške za učenje i provjeru još nisu zadovoljavajući za predviđanje. Oni su bitan podatak, jer će se te greške prilikom učenja sa više iteracija i prilagodbom broja funkcija pripadnosti smanjiti na zadovoljavajuću razinu. Dakle, odlučili smo se na temelju iscrpnog pretraživanja za tri ulaza: brzinu automobila u glavnom toku, gustoću glavnog prometnog toka, te protok automobila u glavnom prometnom toku. Te da će prvi (brzina) i drugi (gustoća) ulaz biti kvalificirani u 4 četiri funkcije pripadnosti, a treći (tok) ulaz biti raspoređen u 6 funkcija pripadnosti - zbog širokog raspona mogućih vrijednosti. Izlaz je vrijednost priljevnog toka koji se sa prilaza može propustiti u glavni tok. Uz uvjet što manjeg utjecaja na karakteristike glavnog toka. Odabirom i četvrtog ulaza bi ukupan model učinili kompleksnijim i sporijim, bez značajnijeg utjecaja na kvalitetu predviđanih izlaza.

Zbog ograničenja MATLAB-a koristit ćemo Sugenov tip *fuzzy* sustava, jer Mamandi-jev tip *fuzzy* sustav izlaz ima također prikazan u obliku funkcija pripadnosti, za razliku od Sugeno-

vog tipa čiji je izlaz linearan ili prikazan u obliku konstante, te shodno tome nije primjeren za izvođenje na računalu[20].

Nakon toga prikupljamo podatke u obliku koji je prepoznatljiv ANFIS algoritmu. Podaci se prikupljaju u obliku ulaza i izlaza[21]. Ulazni podaci se spremaju u obliku stupaca. U našem slučaju ima ih tri sa izlazom kao zadnji stupac, pa ukupno imao četiri stupca, kao što je prikazano na tablici 2. Na slici 2 ulazi su označeni plavim okvirom, a izlazi crvenim.

Tablica 2. Tablični prikaz ulaznih i izlaznih dijelova para za učenje

15,87692	3354	0	3354
16,00771	72	3148,786	72
14,51954	0	946,1496	0
14,64165	180	886,1729	180
14,30063	78	947,0951	78
11,47915	0	652,2502	0
10,19286	0	580,6835	0
10,09574	162	557,4223	162
10,3699	707,6155	635,2	707,6155
9,712354	0	666,9393	0
8,487107	0	469,2872	0
8,748917	144	463,8971	144
9,213573	180	433,5404	180
8,79499	0	506,8706	0
9,908368	36	527,6994	36
9,81443	0	573,0731	0
10,66219	180	588,8658	180
10,53869	0	643,1296	0
10,6226	180	632,3216	180
11,73552	36	749,2801	36
11,20269	0	675,6877	0

Jedan redak predstavlja tri ulaza i jedan izlaz. Što je ujedno i jedan unos podataka. Općenito možemo reći kako takav pristup modeliranju daje dobre rezultate ukoliko je prezentirani skup podataka, kojim se procjenjuju parametri funkcija pripadnosti u potpunosti opisuje parametre model kojeg imamo namjeru opisati. Takav skup podataka nazivamo skup podataka za učenje – *training data set*. Zbog složenosti i nepredvidivosti nastajanja tokova na autocesti, teško je konstruirati skup podataka koji će bit potpuno reprezentativan takvog kompleksnog modela[12, 19].

5.4. Validacija modela

Izgrađenom novom FIS-u posredstvom ANFIS algoritma, prezentiraju se parovi ulazno/izlaznih podataka koji nisu obuhvaćeni skupom podataka za učenje kojim je stvoren FIS. Validacija se izvodi kako bi se vidjelo kako novo stvoreni FIS predviđa izlaze novog skupa podatka na temelju ulazno/izlaznih podataka za učenje kojim je konstruiran ispitivani FIS. Ili jednostavnije, predstavlja usklađenost realnog sustava i novo stvorenog FIS sustava[21].

Validaciju provodimo pomoću skupa podataka za provjeru - *checking data set*. Kod validacije svih modela koji su konstruirani adaptivnim tehnikama problem je u odabiru skupa podataka za provjeru. Skup podataka za provjeru mora biti reprezentativan za što širi spektar stanja na prilazima autocesti, ali pri tom ne smije biti previše sličan skupu podataka za učenje. Ta su ograničenja postavljena kako se validacija ne bi učinila trivijalnom. Prilikom prikupljanja podatka iz prometnog modela autoceste pokušali smo prikupiti što veći skup parova podatka koji bi obuhvaćao što više specifičnih i nespecifičnih situacija na prilazima pri manjim opterećenjima. No kao što smo ranije napomenuli prikupljeni podaci imaju dosta šumova. Tako postoje mogućnosti u kojima parovi podataka za učenje ne obuhvaćaju sva stanja u kojima se mogu naći svi prometni tokovi koji utječu na sustav autoceste.

Glavni smisao uvođenja validacije, odnosno skupa parova podataka za provjeru leži u činjenici kako prilikom učenja modela dolazi do „prerastanja“ (*overfitting*) skupa parova podataka za učenja. *Overfitting* se računa testiranjem naučenog FIS-a. U procesu učenja se stavi u odnos skup podataka za učenje naspram skupu podataka za provjeru, te se biraju parametri funkcija pripadnosti na temelju minimalnih grešaka skupa parova podataka za provjeru[25].

Tablica 3 prikazuje tipove modela koje smo testirali kako bi izabrali optimalni model podjele ukupnog skupa podataka pri 500 iteracija/epoha učenja.

Tablica 3. Testirani tipovi ANFIS modela s obzirom na parametre učenja

Model	Omjer podjele ukupnog skupa parova podataka (%)		Tip krivulje funkcije pripadnosti*			Prosječna greška izlaza FIS-a s obzirom na skup parova podataka za (RMSE)	
	Učenje	Provjeru	Ulaz 1	Ulaz 2	Ulaz 3	Učenje	Provjeru
1	30	70	gaussmf	trimf	trimf	0.297	206.008
2	50	50	gaussmf	trimf	trimf	0.127	17.593
3	70	30	gaussmf	trimf	trimf	0.162	0.320
4	70	30	gbellmf	gbellmf	trimf	0.016	0.424
5	30	70	gaussmf	trapmf	trapmf	0.141	207.394
6	50	50	gauss2mf	gauss2mf	gauss2mf	0.112	9.078
7	50	50	gauss2mf	gaussmf	trimf	0.119	2.254
8	40	60	gbellmf	gauss2mf	trimf	0.182	29.592
9	60	40	trapmf	trimf	trimf	0.065	0.080
10	60	40	gbellmf	trimf	trimf	0.056	0.627

***trimf** = trokutna funkcija pripadnosti, **gbellmf** = generalizirana funkcija pripadnosti bell-ovog oblika, **gaussmf** = gauss-ova funkcija pripadnosti, **gauss2mf** = gauss-ova krivulja koja ovisi o dva parametra, **trapmf** = trapezna funkcija pripadnosti

Prvo što možemo uočiti iz priložene tablice je da korijen srednjeg kvadrata pogreške - RMSE (*Root Mean Squared Error*) modela varira s obzirom na tip funkcija pripadnosti i omjeru podjele ukupnog skupa parova podataka na učenje i provjeru. RMSE ili RMSD (*Root mean square deviation*) je često korištena mjera za razliku između vrijednosti predviđenih nekim modelom i stvarne vrijednosti koja se modelira ili procjenjuje. Razlike između te dvije vrijednosti obično se nazivaju reziduali. RMSE služi kako bi ih agregirao u jedinstvenu mjeru preciznosti predviđanja[22,25]. U našem slučaju uzmimo- x_n {podatci za učenje/provjeru}, te. \hat{x}_n {predviđeni podaci prema ANFIS algoritmu}.

RMSE računamo prema sljedećoj jednadžbi:

$$RMSE(\hat{x}, x) = \sqrt{MSE(\hat{x}, x)} \quad (12)$$

Pri čemu se elementi jednadžbe izvode na sljedeći način:

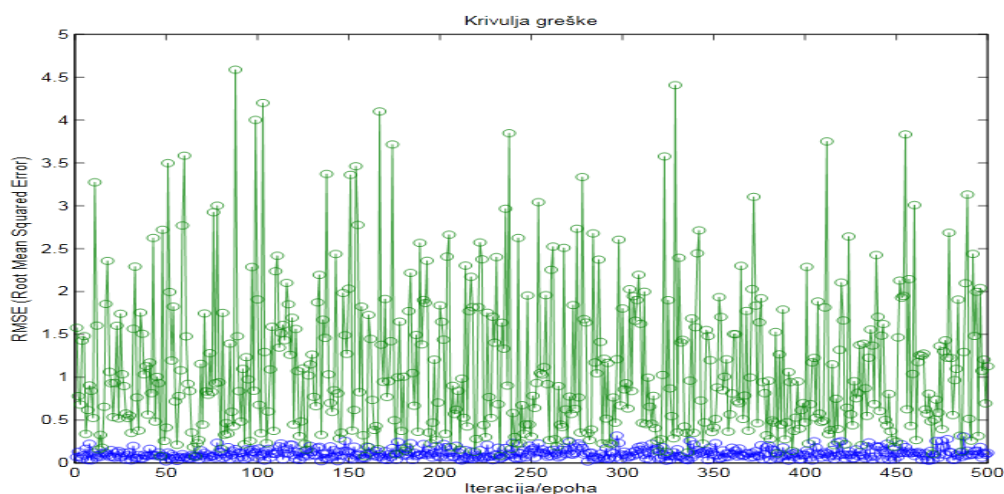
$$1 \leq n \leq N \quad (13)$$

$$MSE(\hat{x}, x) = SE(\hat{x}, x) / N \quad (14)$$

$$SE(\hat{x}, x) = \sum_{n=1}^N SE(\hat{x}_n, x_n) \quad (15)$$

$$SE(\hat{x}_n, x_n) = (\hat{x}_n - x_n)^2 \quad (16)$$

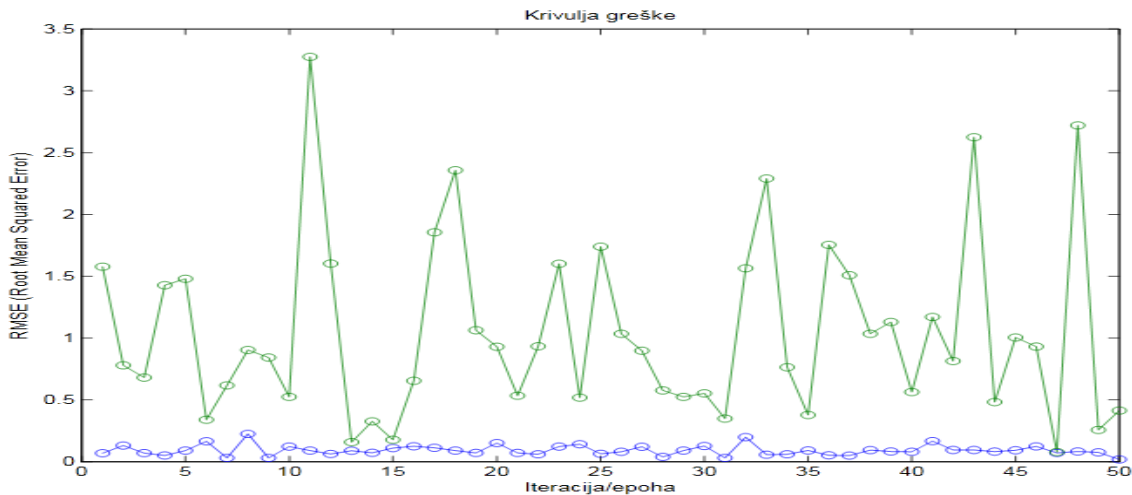
Iako je nastajanje prometnih tokova na autocesti izrazito, statistički gledano kaotične prirode. S obzirom na kompleksnost ispreplitanja priljevni tokova i glavnog toka, te njihovim pražnjenjima na izlazima autoceste, dobili smo iznenađujuće zadovoljavajuća rješenja. No ti kvalitetni rezultati greške učenja i provjera, odnose se samo na karakteristične situacije za koju je adaptivna neuronska mreža naučena, pa bi trebalo prikupiti više podataka za učenje. Budući kako imamo i jako puno karakterističnih situacija za koje modeli nisu naučeni dati zadovoljavajuće rješenje, već se na njih odgovara aproksimacijom[22, 25]. Iz spomenutog zaključujemo kako bi se na drugačije situacije, pri većim opterećenjima vjerojatno smanjila kvaliteta rezultata ANFIS algoritma za isključivo upravljanje priljevnim tokovima. Dalje u tekstu vidjet ćemo i grafičke prikaze koji potvrđuju zadovoljavajuće rezultate ANFIS modela, pri generiranju rješenja na temelju predviđanja i pronalaženja uzoraka u ponašanju tokova. Pri odabiru što optimalnijeg modela izabrali smo optimalni omjer parova podataka za učenje i testiranje 60:40, te smo u tome smjeru mijenjali tip funkcije pripadnosti za svaki pojedini ulaz. Kako bi osigurali što manju pogrešku pri učenju i provjeri izabrali smo model 9. Iz razloga što ima najmanje greške izlaza s obzirom na podatke za učenje i što je još bitnije na podatke za provjeru.



Slika 21. Dijagram odnosa ponašanja greške podataka za učenje i podatka za provjeru

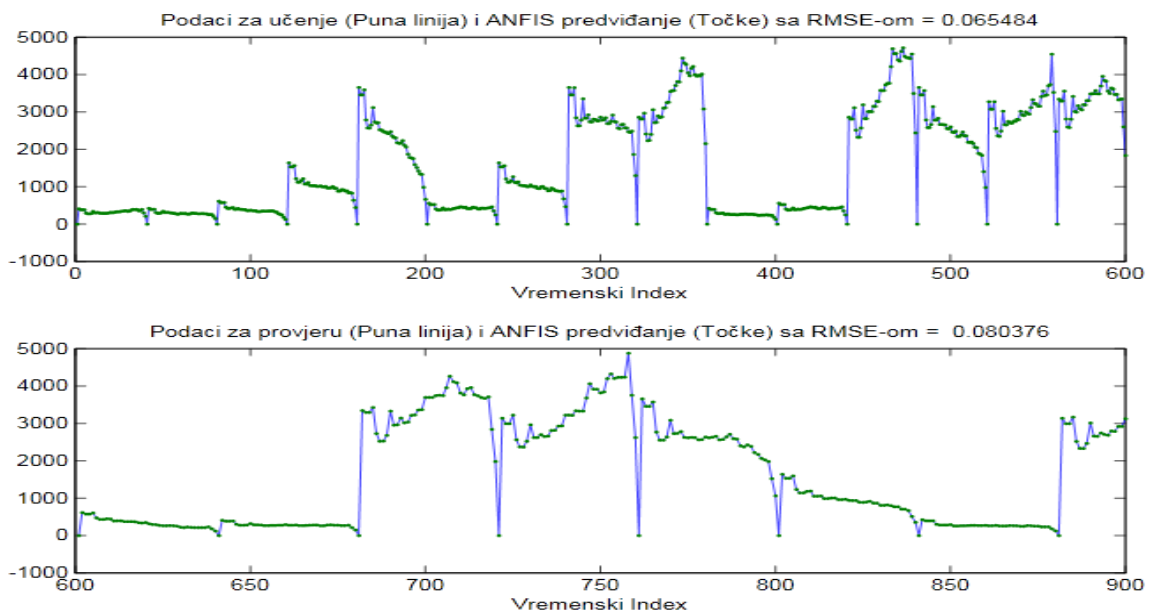
Na slici 16 vidimo dijagram odnosa ponašanja greške podataka za učenje (plava linija) i podatka za provjeru (zelena linija), prema broju iteracija (epoha). Iz prikaza grafom vidimo

kako greška s obzirom na podatke za učenje ima vrlo male fluktuacije, dok greška prema podacima za provjeru ima velike fluktuacije. U tom slučaju odabrali smo model oko iteracije 47 u kojem je najmanji stupanj *overfitting-a*, tj. možemo reći kako nakon iteracije 47 učenje nije potrebno. Jer ne možemo dobiti bolje rješenje, već ga možemo samo pogoršati što je i vidljivo i na slici 17 koja prikazuje odnos ponašanja greške podataka za učenje (plava linija) i podatka za provjeru (zeleno linija), do iteracije 50.



Slika 22. Dijagram odnos ponašanja greške podataka za učenje podatka za provjeru do iteracije 50

Slika 18. u ovom nizu rezultata učenja modela 9. je prikaz stupnja podudaranja podataka za učenje, odnosno podataka za provjeru prema predviđenim izlazima ANFIS algoritma izraženim u RMSE. Taj prikaz nam prikazuje i stupanj šuma koji imamo u prikupljenom skupu podataka, te u kojoj mjeri smo buduću FIS naučili zadovoljavajućem reagiranju na ulaze.



Slika 23. Grafovi s prikazom odnosa podatka za učenje/provjeru i ANFIS predviđanja.

5.5. Hibridni algoritam učenja

Parametri adaptivne mreže se određuju postupkom učenja. Postupkom učenja mreža se adaptira prema uzorku s velikim brojem poznatih vrijednosti ulaznih i izlaznih veličina. Samim procesom učenja potrebno je odrediti ANFIS strukturu, broj čvorova i veze među njima, te težinske koeficijente[21].

U MATLAB okruženju postoje dva načina učenja – učenje s povratnom greškom i hibridno učenje. Hibridno učenje je ustvari kombinacija učenja s povratnom greškom i metodom najmanjih kvadrata. Ono je i korišteno u našem slučaju[20].

Adaptivnoj mreži se prezentira jedan element skupa podataka za učenje (samo ulazi), a ona na temelju te vrijednosti izračuna vlastiti izlaz (prema inicijalnim matricama težina). Te ga se uspoređi s izlazom izabranog elementa skupa podataka za učenje. Na temelju razlike ta dva broja se računa stupanj podudaranja te dvije veličine koju nazivamo greškom slaganja. Prema ponašanju greška slaganja mreži se prezentiraju jedan po jedan element skupa podataka za učenje. Prilagođavaju se matrice težina koje će utjecati na izbor parametra funkcije pripadnosti. Proces prezentacije svih elementa skupa podataka za učenje naziva se *epoch*. Što je sinonim za iteraciju. Proces učenja je gotov kada su greške neslaganja između vladanja vrijednosti izlaza skupa podataka za učenje i izlaza adaptivne mreže statistički prihvatljive, odnosno kada su pogreške neslaganja slučajnog karaktera[21,23, 25].

Tokom svake iteracije, postoji veća vjerojatnost kako će mreža u idućoj iteraciji smanjiti grešku slaganja, tj. bolje odgovoriti na prezentirani element skupa podataka za učenje.

Kod hibridnog tipa učenja, promjene na samoj mreži se događaju nakon što je cijeli skup podataka za treniranje prezentiran adaptivnoj mreži. Za hibridni algoritam učenja, svaka iteracija sadrži prolaz signala prema naprijed od ulaza prema izlazu (*forward pass*) i prolaz signala prema nazad od izlaza prema ulazu (*backward pass*). Podatke za učenje S možemo podijeliti u dva skupa. Ulazni skup S_1 i pripadajući izlazni skup S_2 . Oni čine jedan par ovisnih podataka[25]. U prolazu prema naprijed, kada su vektori ulaznog para podataka prezentirani mreži, izlazi čvorova računaju vrijednosti s obzirom na ulazne vektore sloj po sloj. Sve dok nije dobiven odgovarajući redak u matrici A i y prema jednadžbi:

$$A\theta = y \quad (17)$$

Gdje je A , matrica $m \times n$, u kojoj su f_1, \dots, f_n poznate funkcije, a u_1, \dots, u_m su poznati ulazni vektori iz skupa za učenje.

$$A = \begin{bmatrix} f_1(u_1) & \cdots & f_n(u_1) \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ f_1(u_m) & \cdots & f_n(u_m) \end{bmatrix} \quad (18)$$

Oznakama θ su označeni nepoznati parametri koje treba optimizirati. A prikazan je matricom $n \times 1$:

$$\theta = \begin{bmatrix} \theta_1 \\ \vdots \\ \theta_n \end{bmatrix} \quad (19)$$

Oznakom y su označeni izlazni vektori, također u obliku matrice $m \times 1$:

$$y = \begin{bmatrix} y_1 \\ \vdots \\ y_m \end{bmatrix} \quad (20)$$

Proces se ponavlja za sve parove podataka za učenje kako bi se u potpunosti formirale matrice A i y . Zatim uzimamo par skupa pripadajućih izlaza podataka za učenje, tj. skup S_2 . Kojim smo formirali matrice A i y , te računamo njihove nepoznate parametre prema jednadžbi:

$$\hat{\theta} = \frac{1}{(A^T A)} A^T y \quad (21)$$

Nakon toga, moramo izračunati mjeru greške sa svaki element skupa podataka za učenje. Derivat tih mjerenja greška na izlazu svakog čvora je računat prema sljedećoj jednadžbi:

$$\epsilon_{L,i} = \frac{\partial E_p}{\partial x_{L,i}} \quad (22)$$

Gdje je $\epsilon_{L,i}$ signal greške u L - sloju adaptivne mreže, na izlazu čvora i . E_p mjera greške na p -tom paru cijelog skupa podataka za učenje – P , prikazana je sljedećom jednadžbom:

$$E_p = \sum_{k=1}^{N(L)} (d_k - x_{L,k})^2 \quad (23)$$

Prema navedenoj pogrešci vidimo da je E_p ustvari suma kvadrata pogreške. U kojoj je d_k k -ta komponenta p -tog željenog izlaznog vektora, a $x_{L,k}$ je k -ta komponenta stvarnog izlaznog vektora izračunatog prezentacijom p -tog elementa ulaznih podataka mreži.

Nadalje u jednadžbi (21) nam preostaje objasniti element $x_{L,i}$ koji predstavlja izlaznu funkciju čvora i u sloju L , a računamo ju prema sljedećoj jednadžbi:

$$x_{L,i} = f_{L,i}(x_{L-1,L}, \dots, x_{L-1,N(L-1)}, \dots, \alpha, \beta, \gamma, \dots) \quad (24)$$

Funkcija čvora i u sloju L je prikazana s $f_{L,i}$, α, β, γ Oni su parametri i -tog čvora.

Konačni produkt prolaza prema naprijed je prikupljeni signal greške iz jednadžbe (21). U prolazu prema nazad dobiveni signal greške rasprostire se od izlaznog kraja prema ulaznom kraju. Za svaki element skupa podataka za učenje pronalazi se gradijent vektor[21].

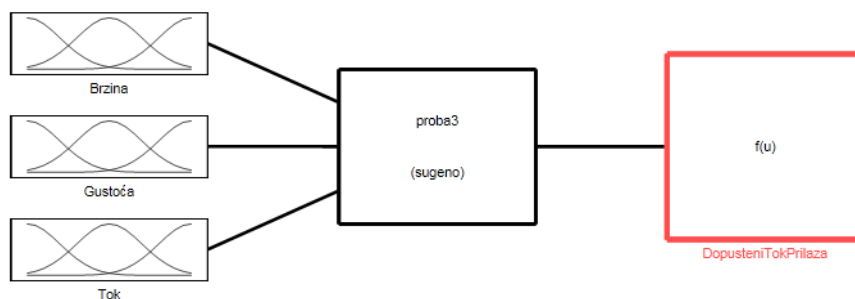
Na kraju prolaza prema natrag za sve parove učenja, ulazni parametri se promjene prema sljedećoj jednadžbi:

$$\alpha_{novi} = \alpha_{stari} - \eta \frac{\partial E}{\partial \alpha} \quad (25)$$

Gdje je α_{novi} novi parametar čvora koji će zamijeniti stari parametar α_{stari} , α – generički parametar, dok je η - koeficijent učenja.

5.6. Kalibracija funkcija pripadnosti i baze znanja

Prilikom korištenja ANFIS algoritma najprije je potrebno postaviti inicijalni FIS model, čije će parametre kasnije modificirati ANFIS algoritam. U MATLAB okruženju za generiranje inicijalne FIS strukture iz skupa podataka za učenje koristi se *genfis* funkcija. Postoje tri vrste funkcije *genfis*, *genfis1* koji u izradi inicijalne FIS strukture na temelju podataka koristi fiksnu rešetkastu podjelu (*Grid Partition*), *genfis2* koristi uskupljavanje podataka, a *genfis3* FCM (*Fuzzy c-means*) uskupljivanje[20]. Mi ćemo u našem slučaju koristiti funkciju *genfis1*. Shematski prikaz inicijalnog FIS-a je prikazan na slici 21:

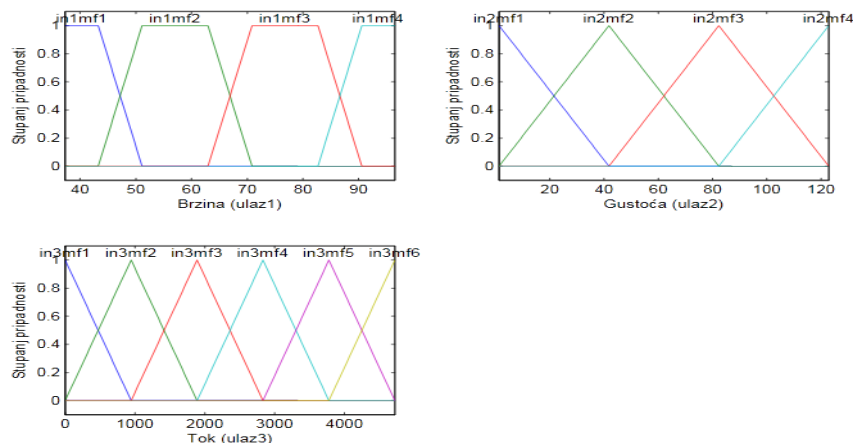


Slika 24. Shematski prikaz inicijalnog FIS-a

Sa tim pristupom smo podatke za učenje *priori* podijelili u specificiran broj i tip funkcija pripadnosti što su nam ujedno i zadani uvjeti za inicijalnu FIS strukturu. Zatim smo uspostavili bazu znanja kako bi se prekrio prostor uvjeta kojim smo zadali inicijalni FIS. Koristeći logičke kombinacije broja ulaza i broja funkcija pripadnosti sa mogućim izlazima. Prema podacima za učenje, proračunavaju se stupnjevi ispunjavanja zadanih uvjeta za svaki par podataka učenja. Parametri posljedica, odnosno izlaza procjenjuju se metodom najmanjih kvadrata.

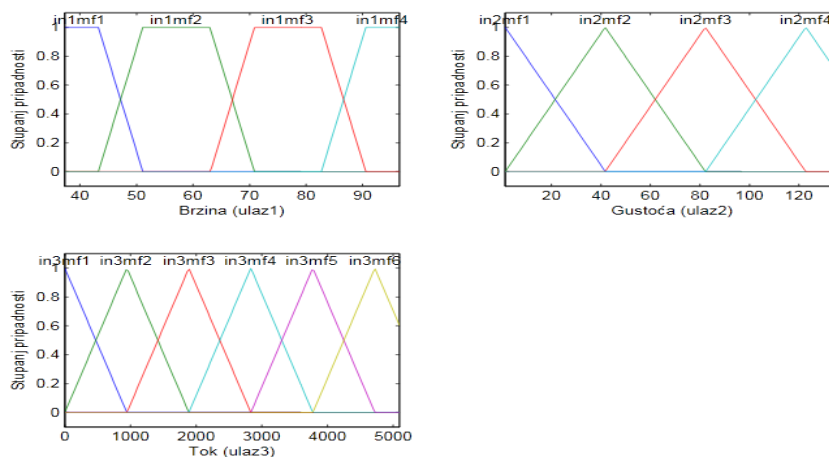
Loša strana ovog pristupa je da se broj pravila vrlo brzo povećava, te se koristi samo u manjim *fuzzy* sustavima do tri ulaza zbog čega je ovaj pristup inicijalizacije početnih vrijednosti FIS-a interesantan u našem slučaju[20, 21, 22].

Rezultat inicijalizacije početnog FIS-a vidimo na slici 22.



Slika 25. Inicijalizacija početnih vrijednosti funkcija pripadnosti FIS-a

Nakon pokretanja ANFIS algoritma i samim time procesa učenja došlo je do promjena u parametrima funkcija pripadnosti koje možemo vidjeti na slici 23:



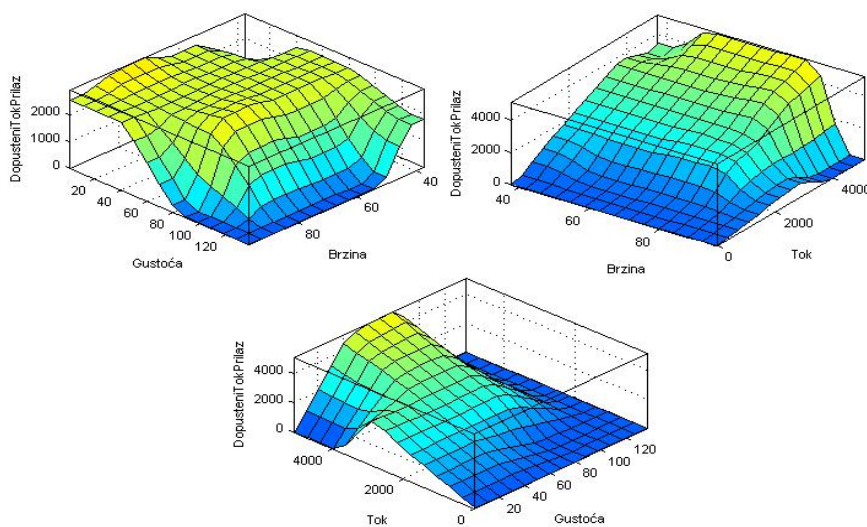
Slika 26. Izgled funkcija pripadnosti nakon kalibracije ANFIS algoritmom

Zaključujemo kako je do bitnih promjena došlo u funkcijama pripadnosti u ulazima gustoće i toka. Dodatno primjećujemo kako te veličine imaju najduže raspone mogućih vrijednosti ulaza. Na slici 24 su prikazane površine, odnosno 3D prikazi odnosa izlaza i parova ulaza.

Prije nego pokušamo protumačiti površine, moramo objasniti osnovni princip kako su se preuzimali podaci za učenje, te devijacije u njima zbog prirode preuzimanja. Podatci su preuzimani segmentno po pojedinim ćelijama na koje je podijeljena autocesta. U pojedinim 5 minutnim intervalima u kojima se prikupljaju podatci. Dakle, prikupimo podatke iz svih ćelija u određenom 5 minutnom vremenskom intervalu. Onda dodajemo tom skupu podatka drugi skup iz svih ćelija u nekom drugom proizvoljnom 5 minutnom intervalu. Problem je što se u prvoj ćeliji u kojoj se generira glavni prometni tok ne mjeri tok, jer se ne zadovoljava konzistentnost prethodne ćelije. Prethodna ćelija zapravo i ne postoji, pa iz uvjeta – $Tok = ((1-b)/b) * Frfmax$, gdje je b stupanj odvajanja vozila sa autoceste, a $Frfmax$ maksimalni dopušteni tok odvajanja vozila, proizlazi kako se ona u tom slučaju stavlja na vrijednost 0 [19]. Jer je

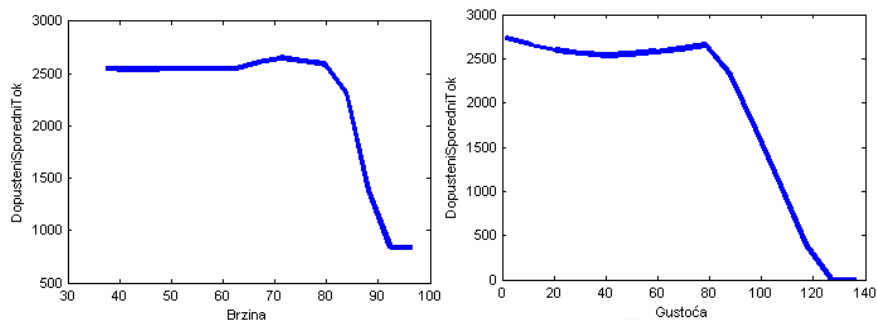
Fr_{max} jednak 0. Nagli pad vrijednosti glavnog toka utječe i na pad vrijednosti gustoće i brzine. Pa će se ta anomalija primjećivati i u rezultatima površina, pogotovo na rubnim dijelovima. Jer ukoliko je vrijednost glavnog toka 0, onda je i dopušteni priljev automobila sa sporednih prilaza također 0. To naravno vrijedi samo za prvu ćeliju segmenta autoceste. Odnos brzine i gustoće na prvoj slici ukazuje u većini slučajeva kako pri većim vrijednostima brzine i gustoće dolazi do pada mogućnosti propuštanja priljevnih tokova u glavni tok. Kao i sa manjom gustoćom i brzinom. Anomalija se ogleda jedino u slučaju pri većim gustoćama i manjom brzinom. U tom slučaju bi se skroz trebalo zaustaviti prilaz priljevnih tokova vozila, no ipak se nastavlja s umjerenim propuštanjem priljevnih tokova. Što može svjedočiti i o važnosti parametra brzine za određivanje moći propuštanja sporednih tokova[12].

Površina odnosa brzine i toka ukazuje nam na veliku važnost parametra glavnog toka naspram brzine. Ukoliko glavni tok ima male vrijednosti, bez obzira na vrijednost brzine doći će do malog ili neznatnog propuštanja priljevnih tokova, što je i logično. Pri velikim vrijednostima gustoće, brzina jedino značajno utječe na mogućnost propuštanja priljevnih tokova, ako i ona ima velike vrijednosti. U tom se slučaju drastično smanjuje mogućnost propuštanja priljevnih tokova što je od iznimne važnosti za sigurnost prilaza autocesti. Uplitanje u tok sa velikim brojem vozila koji se kreće velikim brzinama često završava tragično zbog teške procjene vozača kada se treba uključiti u glavni tok[25]. Dakle, vozač pri uključivanju teško može uskladiti sposobnosti vozila i brzinu svojih reakcija sa razmakom između brzih vozila u glavnom toku. Zabrana uključivanja u glavni tok u ovakvim situacijama izvodi se crvenim indikatorom na semaforu. Dok se ne smanji ili brzina glavnog toka ili vrijednosti toka ili oboje. Sličnu situaciju imamo i kod površine odnosa gustoća – tok. Pri malom toku, bez obzira na njegovu brzinu nema propusnosti priljevnih tokova što je posljedica spomenute anomalije. Također ukoliko je gustoća jako velika bez obzira na vrijednost toka doći će do smanjenja stupnja propuštanja priljevnih tokova. Velike vrijednosti propuštanja moguće su samo pri manjim gustoćama toka i velikim vrijednostima toka. Što logički sugerira na mogućnost povećavanja stupnja propusnosti priljevnih tokova, jer nije došlo do zagušenja.



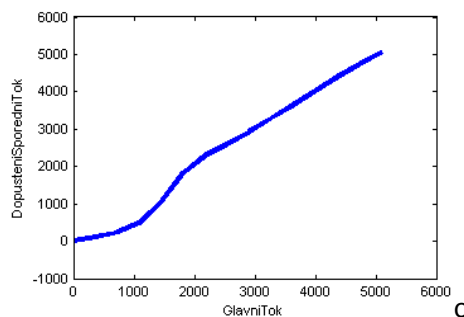
Slika 27. 3D prikazi odnosa izlaza i parova ulaza

Na slici 25 prikazan je odnos parametra brzine i gustoće naspram stupnja propuštanja priljevnih tokova vozila. Grafovi u kojima su prikazani parametri brzine i gustoće imaju zajedničku karakteristiku kako pri jako velikim veličinama tih parametara dolazi do naglog smanjenja stupnja propuštanja priljevnih tokova. Možemo opaziti neposredno prije naglog smanjenja propuštanja priljevnih tokova u glavni dolazi kako dolazi do malog povećanja stupnja propusnosti. To malo povećanje možemo objasniti da su vrijednosti tih parametara u tom područje zapravo vrijednosti koje su standardne, jer se ipak radi o autocesti gdje se veće brzine i gustoće razumijevaju se kao standardnim. Ukoliko su te vrijednosti uobičajene - neuronska mreža izvodi svojevrstan zaključak kako nema većih zagušenja, te se može dozvoliti povećanje stupnja propusnosti priljevnih tokova. Također, uviđamo kako se pri nižim vrijednostima gustoće ili brzine zadržava veća razina stupnja propusnosti priljevnih tokova. Osim kod grafa gustoće gdje se bilježi i povećanje propusnosti priljevnih tokova pri manjim vrijednostima gustoće glavnog toka. To sugerira kako je autocesta relativno prazna, te se mogu dozvoliti maksimalne ili vrlo velike veličine stupnja propusnosti priljevnih tokova. Kod grafa s gustoćom zapažamo kako se pri ekstremnim gustoćama uopće ne propuštaju priljevni tokovi. Ponajprije iz razloga kako bi se izbjegla veća zagušenja. Dok kod grafa s brzinom i pri velikim vrijednostima brzine glavnog toka ne dolazi do potpune blokade priljevnih tokova. Što je bitno iz sigurnosnih razloga[26].



Slika 28. Odnosi parametra brzine i gustoće naspram propuštanja priljevnih tokova vozila u glavni tok

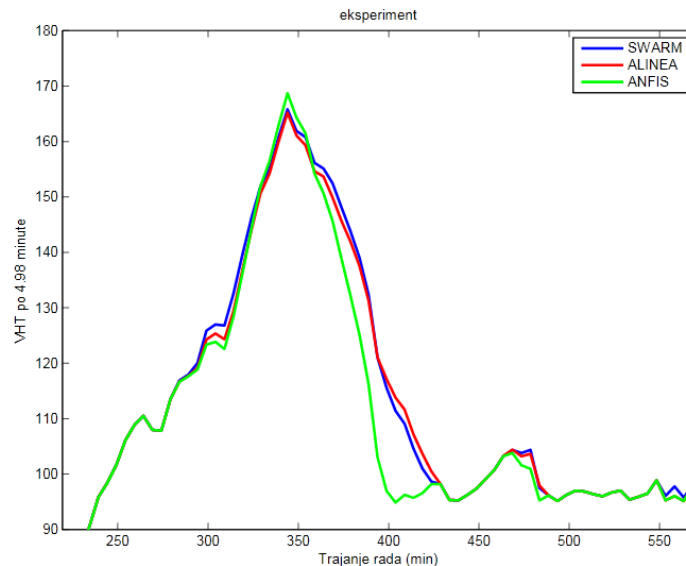
Graf glavnog toka i mogućnosti propuštanja priljevnih tokova u glavni tok je prikazan na slici 26. Primjećujemo kako se gotovo može opisat linearnom funkcijom. S povećanjem protoka glavnog toka dolazi i do mogućnosti povećanja propusnosti priljevnih tokova. Budući da povećanje protoka glavnog toka ukazuje na ne postojanje zagušenja.



Slika 29. Odnosi parametra propusnosti glavnog toka naspram propuštanja priljevnih tokova vozila u glavni tok

6. Rezultati

Pri proučavanju kvalitete upravljanja *priljevnim tokovima* sustava baziranog na ANFIS algoritmu usporedili smo ga s djelovanjem SWARM algoritma. SWARM algoritam smo postavili u ulogu svojevrsnog algoritma učitelja. Također, uz SWARM algoritam za komparaciju koristili smo i lokalni algoritam ALINEA kao algoritmom koji se najviše koristi na europskim autocestama u sustavu *ramp metering*-a. Prvi nam graf na slici 27 prikazuje ponašanje parametra VHT (*Vehicle Hours Traveled*) pri glavnom toku u odnosu na vrijeme trajanja simulacije, pri upravljanju pojedinih algoritama.



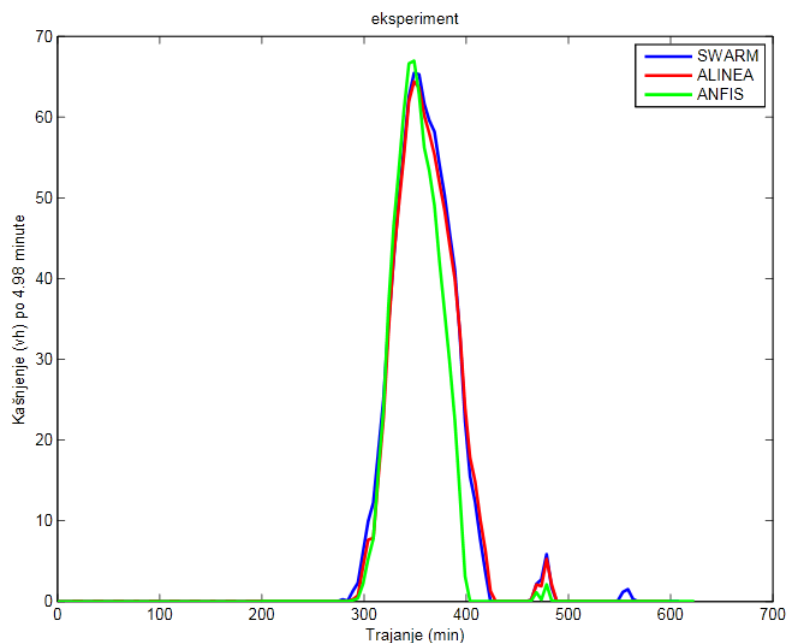
Slika 30. Graf odnosa VHT-a i trajanja simulacije po pojedinim algoritmima

Parametar VHT ukazuje na podatak o broju vozila koji prođu od početka segmenta autoceste na kojem se primjenjuje *ramp metering*, pa sve do zaključnog dijela segmenta u vremenskom periodu od jednog sata. VHT se mjeri u intervalima po 4.98 minuta. ANFIS algoritam tijekom cijele simulacije gotovo identično prati izlazne vrijednosti VHT-a koje producira SWARM algoritam. Graf prikazuje dio simulacije kada dolazi do odstupanja, kako bi se bolje uočila odstupanja. Svojevrsni „veliki šiljak“ kojeg vidimo na grafu predstavlja reakciju algoritama u vidu povećanja propuštanja stupnja protočnosti priljevnih tokova. Strmi uspon „velikog šiljka“ predstavlja povećanje VHT čemu je uzrok to što algoritmi ne dozvoljavaju veće vrijednosti propuštanja priljevnih tokova u glavni. Kako se ne bi stvorila veća zagušenja u glavnom toku. Oko 350 minute simulacije povoljne vrijednosti glavnog toka ukazuju na mogućnosti velikih propuštanja priljevnih tokova sa prilaza. Nakon 350 minute simulacije dolazi do drastičnog pada VHT-a glavnog toka zbog velikog priljeva vozila iz priljevnih tokova u glavni, tj. dolazi do stvaranja uskih grla i zagušenja, nakon prilaza. Nakon toga dolazi do još jednog uvećanog propuštanja priljevnih tokova u glavni, a zatim se propuštanje priljevnih tokova u glavni odvija ustaljenim vrijednostima do kraja simulacije.

Kod ANFIS algoritam primjećujemo karakteristično svojstvo prepoznavanja, odnosno predviđanja naglog pada VHT nakon 350 minute. U tom trenutku ANFIS algoritam ima najveću vrijednost VHT-a od svih algoritama, odnosno postavlja najmanji stupanj propusnosti

na svim prilazima. Spomenutu reakciju čini kako bi što više pospješio protok glavnog toka prije drastičnog pada protočnosti, odnosno propuštanja priljevnih tokova. No zbog svojstva prepoznavanja uzoraka ANFIS algoritam prepoznaje ustaljenu vrijednost malog VHT do kraja simulacije kao poželjnu vrijednost koju što prije treba postići. Stoga bilježimo nagli pad VHT nakon 350 minute, te se već u 400-oj minuti bilježi relativna stabilizacija VHT-a. Tu situaciju smatramo nepoželjnom, jer dolazi do prevelikog povećanja propusnosti priljevnih tokova što stvara veća zagušenja u glavnom toku u intervalu od 400-te do 425-e minute.

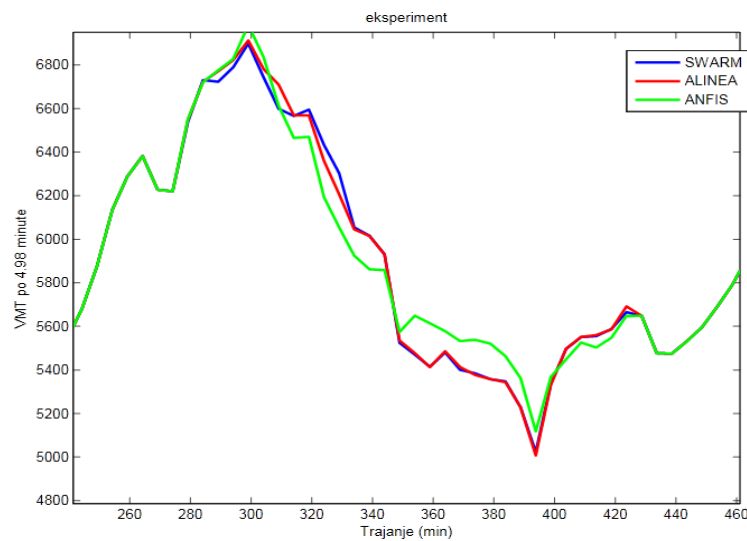
Iduća slika 28 prikazuje graf odnosa stvaranja kašnjenja pojedinih algoritama prema vremenu trajanja simulacije. Interval mjerenja je 4.98 minute. Kašnjenje definiramo kao razliku između stvarnog VHT-a i VHT-a kojeg bi vozila ostvarila u slučaju potpuno neometanog glavnog toka pri maksimalnoj dozvoljenoj brzini. Jedinica mjerenja je *vh* (*Vehicle per Hour*) - vozila po satu.



Slika 31. Graf odnosa kašnjenja i trajanja simulacije po pojedinim algoritmima

Parametar kašnjenja nam daje drugačije tumačenje kvalitete reakcija algoritama s obzirom na parametar VHT. Kašnjenje je puno opsežniji parametar od VHT parametra. VHT parametar prati „izmiješana“ vozila glavnog i priljevnog toka, na početku i kraju promatranog segmenta autoceste. Broj vozila na ulazu i izlazu promatranog segmenta autoceste će biti različit zbog priljeva vozila sa sporednih prilaza. Za parametar VHT je što bolja veća i duža propusnost priljevnih tokova, jer će na kraju simulacije više vozila proći promatrani segment autoceste. Dok je kod parametra kašnjenja veća propusnost negativnija, jer što više automobila imamo u glavnom toku to će dovest do pada vrijednosti brzine glavnog toka i uzrokovati kašnjenja. Tako da je pri promatranju ovog parametra ANFIS algoritam bolji od drugih upravo iz razloga što ima manji stupanj propusnost priljevnih tokova u glavni. Na sljedećem grafu na slici 29 vidimo odnos ponašanja parametra VMT (*Vehicle Miles Traveled*) ovisno o trajanju simulacije.

VMT parametar se mjeri u 4.98 minutnim intervalima. Definira se kao vrijednost zbroja pređenih milja (1 milja = 1.609344 kilometra) svakog vozila u promatranom segmentu autoceste u jednom satu.



Slika 32. Graf odnosa VMT-a i trajanja simulacije po pojedinim algoritmima

Graf je također izvadak iz cjelokupnog trajanja simulacije. Prikazan je slučaj gdje imamo veća neslaganja između algoritama. Kod ANFIS algoritma, pri mjerenju parametra VMT dolazi do pojavljivanja dostizanja minimalnih i maksimalnih vrijednosti VMT u rangu ova tri algoritma. Pa ga s aspekta utjecaja na VMT možemo smatrati nešto lošijim.

Općenito možemo reći kako ANFIS algoritam u sustavu *ramp metering*-a pri manjim prometnim opterećenjima daje zadovoljavajuće rezultate. Dobre rezultate daje ukoliko analiziramo utjecaj na parametar kao što je kašnjenje. No ipak možemo reći kako ovaj algoritam ipak nešto negativnije djeluje na ukupnu performanse glavnog toka. Glavni razlog tome vjerojatno leži u činjenici da je ANFIS algoritam učen sa relativno malim skupom parova podataka za učenje (1000 parova) s obzirom na kompleksnost prometnog sustava autoceste. Također, trebali bi se prikupiti i podaci o specifičnim zagušenjima na pojedinim prilazima kao bi se razvila šira i kvalitetnija baza znanja.

7. Mogućnosti primjene sustava upravljanja priljevnim tokovima na zagrebačkoj obilaznici

Grad Zagreb izvorište je i cilj mnogim prometnim putovanjima koja se danas ostvaruju preko pet autocestovnih pravaca. Svi oni završavaju ili započinju na obodnoj južnoj prometnici; postojećoj zagrebačkoj obilaznici. Autocesta A1 ujedno i autocesta A6, preko čvorišta Lučko povezuje Zagreb sa Splitom, a isto tako i drugim smjerom za Rijeku. Autocesta A3, preko čvora Jankomir povezuje Zagreb s Breganom i dalje Ljubljanom. Od Jankomira do čvorišta Ivanja Reka proteže se dio A3 kao zagrebačka obilaznica, a od Ivanje Reke nastavlja se autocesta A3 prema Slavoniji, i dalje graničnom prijelazu Bajakovo. Autocesta A2 u čvorištu Jankomir povezuje Zagreb s Krapinom i dalje graničnim prijelazom Macelj sa Slovenijom u smjeru Maribora. Autocesta A4, preko čvorišta Ivanja Reka povezuje Zagreb s Varaždinom i dalje preko graničnog prijelaza Goričan s Mađarskom. Ove su sve autoceste već izgrađene i nalaze se u sustavu postojeće prometne mreže šireg područja grada Zagreba. Autocesta A11 trenutno je u izgradnji, i povezivat će grad Zagreb, preko čvorišta Jakuševac sa Velkom Goricom i u nastavku s gradom Siskom. Sve ove autoceste završavaju na zagrebačkoj obilaznici [28].

Zbog svog karaktera zagrebačka obilaznica u značajnoj mjeri služi i kao dio mreže gradskog prometa. Kao posljedica ovog, javljaju se u pojedinim dijelovima dana značajna prometna zagušenja. Poseban problem predstavljaju prometne nesreće i njihove posljedice na zagušenje glavnih prometnih tokova. Sve ovo utječe na značajni pad stupnja prometne uslužnosti (LOS – *Level of Service*) za korisnike koji su u tranzitu.



Slika 33. Prikaz stanja na zagrebačkoj obilaznici tijekom zagušenja izazvanog prometnom nesrećom

Slično zagrebačkoj situaciji postoje obilaznice i u nekim europskim gradovima. Za potrebe ove analize uzeti je primjer Milana. Na slici 34 vidimo usporedbu dviju obilaznica (gornja se odnosi na grad Zagreb, a donja na Milano). Prva najočiglednija razlika se očituje u broju čvorova, te udaljenosti između njih. Zagrebačku obilaznicu na slici čini 5 čvorova,

raspoređenih na duljini trase od 26,79 km (prosječna udaljenost dvaju čvorova je 5,36 km). S druge strane kod dijela obilaznice Milana vidimo 6 kompleksnih čvorova raspoređenih na dužini trase od 10,73 km (prosječna udaljenost dvaju čvorova je 1,73km). Razlika u udaljenosti najbližeg čvora od središta grada približno za milansku obilaznicu je 3,35 km, dok je ta vrijednost kod zagrebačke obilaznice oko 6 km za promatrani segment. Čitava zagrebačka obilaznicama sa prikazanim čvorovima i stacionažama je prikazana u prlogu 3.



Slika 34. Prikaz zagrebačke i milanske obilaznice sa obilježenim čvorovima

Službeni podatci ASECAP-a (Europske asocijacije autocesta pod naplatom) govore da hrvatske autoceste imaju najveći stupanj smrtnosti. Hrvatska ima gotovo tri puta manji promet nego Italija ili Austrija. U godini 2010. Hrvatske autoceste su imale PGDP (*Prosječni godišnji dnevni promet*) u iznosu od 13.272 vozila što je daleko ispod europskih vrijednosti.

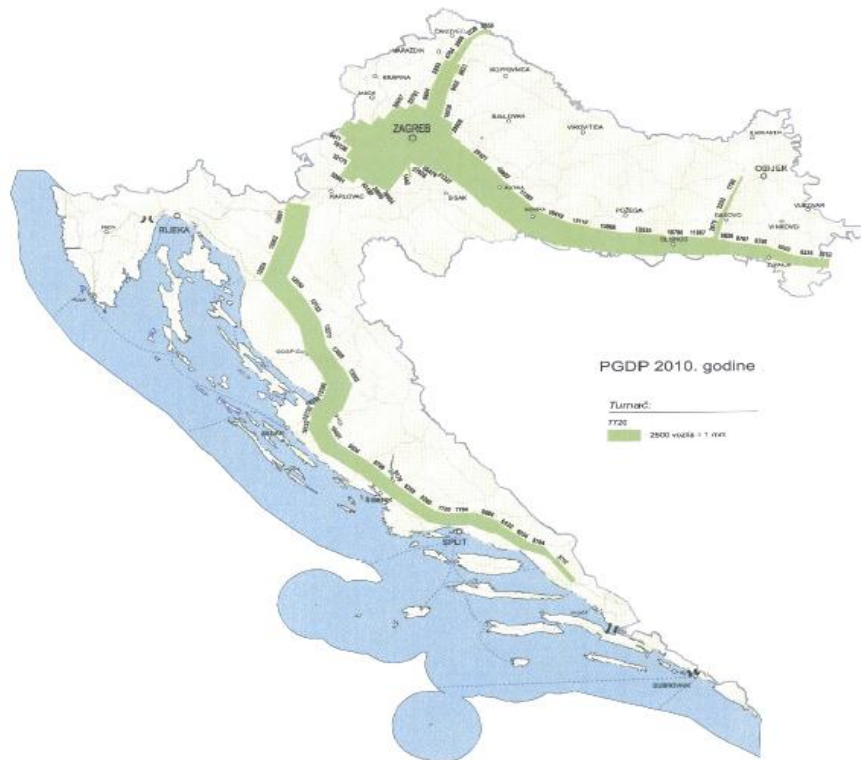
U tom smislu, a na osnovu navedenih svjetskih iskustava, predlaže se mogućnost ugradnje sustava upravljanja priljevnim tokovima (ramp metering).

Kako hrvatske autoceste imaju jako malu prosječnu prometnu gustoću, ali visok stupanj smrtnosti, ugradnja sustava za upravljanje priljevnim tokovima u početku bi imala pretežito sigurnosnu zadaću. Međutim u slučaju zagrebačke obilaznice treba promatrati sustav sa stvarno-vremenskim podacima, koji su karakterizirani značajnim prometnim opterećenjima u pojedinim dobima dana i pojedinim čvorištima. U tom slučaju, primjena navedenih algoritama značajno bi povećala operativni prometni kapacitet pojedinih čvorova.

Pri naglim porastima prometne gustoće u turističkoj sezoni ovaj sustav bi mogao ostvarivati svoju punu ulogu. Također, ovakav sustav bi se mogao ugrađivati i na prilazima brzih gradskih cesta. No zbog velikih udaljenosti između čvorišta na hrvatskim autocestama, te

male gustoće prometa savjetuje se primjena lokalnih algoritma *ramp metering*-a. Naime susjedni prilazi i stanje prometa između njih imaju mali međusobni utjecaj.

Kao rezultat ovog istraživanja predlaže se testiranje sustava *ramp metering*-a na zagrebačkoj obilaznici. Ponajprije iz razloga postojanja dnevnih vršnih opterećenja zbog ustaljenih dnevnih migracija stanovništva, a što je vidljivo na slici 35.

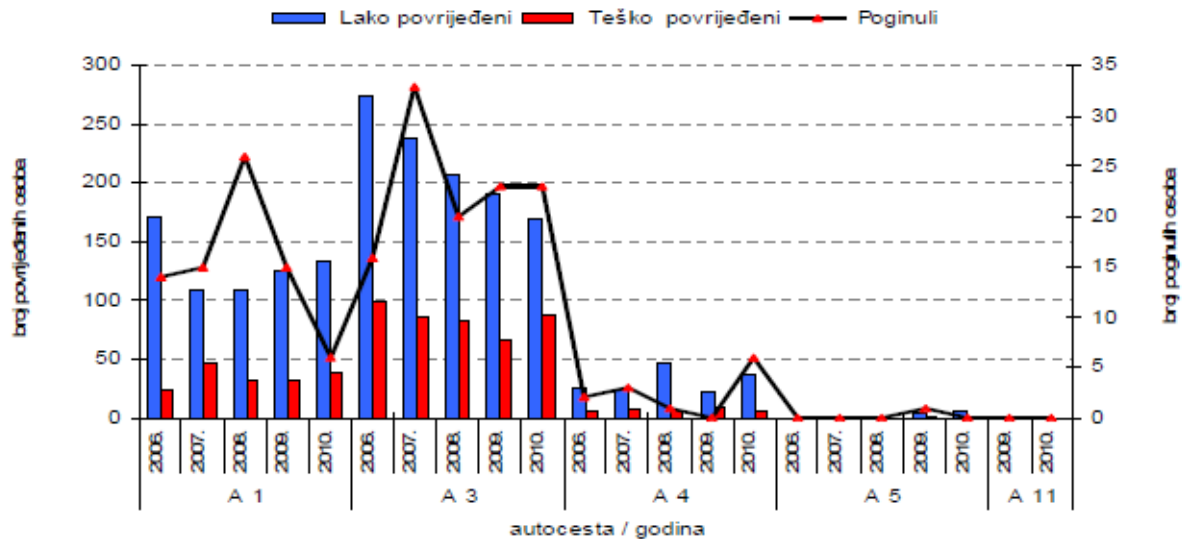


Slika 35. Prikaz PGDP-a u 2010. godini na hrvatskim autocestama[27].

Zbog povećane gustoće prometa na zagrebačkoj obilaznici mogla bi se obaviti i testiranja s algoritmima koji u svojoj logici rada imaju mogućnost predviđanja nastajanja uskih grla. Kada govorimo o algoritmima s takvom mogućnosti ponajprije mislimo na algoritme SWARM ili čak na algoritam ANFIS. Ovi algoritmi bi u teoriji mogli ostvariti dobre rezultate u upravljanju priljevima tokovima na prilazima autoceste u glavni tok. Poglavitno iz razloga što temelje svoj rada na prepoznavanju uzoraka nastajanja uskih grla koja se periodično pojavljuju na ovoj obilaznici.

Osim toga, korištenjem postojeće mjerne opreme (brojači prometa) te opreme koja bi se dogradila, mogla bi se koristiti i za automatsku detekciju prometnih incidenata [29, 30]. Ovo je od posebnog interesa za potrebe šireg koncepta upravljanja incidentnim prometnim događajima, a u smislu učinkovitijeg djelovanja na promet.

Implementacija sustava za upravljanje priljevnim tokovima imala bi značajnu ulogu za poboljšanje prometne sigurnosti na ovim vrlo osjetljivim dijelovima prometnica. Na grafu na slici 36 vidimo prikaz broja stradalih sudionika u nesrećama po autocestama u razdoblju 2006. – 2010.



Slika 36. Prikaz broja stradalih sudionika u nesrećama po autocestama u razdoblju 2006. – 10. [27].

U ovoj raspravi postavili smo naglasak na zagrebačku obilaznicu koja je segment A3 autoceste. Promatrajući podatke za cjelovitu A3 autocestu navedenog grafa najprije se uočava kako je ona među najnesigurnijim autocestama u Republici Hrvatskoj. Uočavamo smanjenje broja smrtno stradalih za 10,3 % dok se broj teže povrijeđenih osoba povećao za 21,1 %, a lakše povrijeđenih osoba za 0,6 % u odnosu na 2009. godinu[27]. Ti podatci sugeriraju na potrebu daljnjeg ulaganja u podizanju stupnja sigurnosti na dotičnoj autocesti.

Budući rad uključuje i stvaranje simulacijskog modela zagrebačke obilaznice sa realnim podacima, te testiranje predloženih algoritama.

Zbog nekih od navedenih problema sa postojećom zagrebačkom obilaznicom pokrenut je projekat nove zagrebačke obilaznice. Primarni cilj južne obilaznice je odvajanje tranzitnog od gradskog prometa i njegovo preusmjeravanje oko Zagreba. Početak odvajanja, a ujedno i početak južnog koridora zagrebačke obilaznice, predviđen je u čvorištu Luka, gdje bi se tranzitni promet odvajao od autoceste A2, a onaj sa ciljem u Zagrebu bi išao postojećom autocestom A2, na naplatu. Nakon toga, koridor prolazi zapadno od Zaprešića, te preko predviđenih čvorišta Pušća i Šibice, prelazeći Savu dolazi do interregionalnog čvorišta Gradna gdje se križa sa autocestom A3. Dalje trasa, nastavlja na jug, te prolazeći tunelom Molvice ispod Svete Nedelje, stiže do Rakovog Potoka, gdje skreće na jugoistok i presijeca se sa autocestama A1 i A6 u interregionalnom čvorištu Horvati. Preko predviđenih novih čvorišta Dragonožec i Markuševec Turopoljski, nastavlja prema interregionalnom čvorištu Mraclin u kojem se križa s autocestom A11. Iza čvorišta Mraclin, trasa skreće na sjeveroistok prema Rakitovcu i trima mostovima prelazi kanal Sava-Odra, rijeku Odru i rijeku Savu, da bi došla do interregionalnog čvorišta u Ivanić Gradu kojim se ponovno povezuje sa autocestom A3.

8. Zaključak

Od početka razvoja *ramp metering*-a 60-ih godina, pa sve do današnjih dana razvijen je i upotrebljen niz algoritama. U ovom radu obrađen je njihov utjecaj na optimizaciju prometnih parametara i povećanje sigurnosti autoceste na kritičnim mjestima - čvorovima. Na temelju proučavanja literature potrebno je bilo izabrati algoritme koji su se u praksi pokazali specifičnim po kriterijima: rasprostranjenosti u realnim sustavima autocesta, kvaliteti upravljanja ili prema jednostavnosti konceptualne logike rada. Prema tim kriterijima izabrani su sljedeći algoritmi: ALINEA – kao lokalni algoritam koji je najjednostavniji i najkorišteniji, naročito u zemljama Europe, ZONE – algoritam koji je zanimljiv zbog konceptualne logike i zadovoljavajućih rezultata, BOTTLENECK – kao prvi algoritam razvijen u klasi koordiniranih nadmetajućih algoritama koji pokazuju danas najbolje rezultate, SWARM – algoritam koji uvodi element predviđanja nastajanja uskih grla, te time u sustav upravljanja priljevnim tokovima uvodi preventivni način upravljanja prema budućim zagušenjima. Odredili smo SWARM algoritam kao najkvalitetnijim u donošenju odluka o stupnju propuštanja priljevnih tokova u glavni. Te je s obzirom na tu značajku izabran kao algoritam učitelj u konstrukciji novog ANFIS *algoritma za isključivo upravljanje priljevnim tokovima*.

Algoritam ANFIS kao matehauristička metoda unutar hibridnih sustava umjetne inteligencije izabrana je iz razloga što objedinjuje principe rada umjetnih neuronskih mreža i *fuzzy* (neizrazite) logike u jedinstven sustav. Iz priložene klasifikacije *ramp metering* algoritma vidi se da su obje metodologije rješavanja problema u domeni umjetne inteligencije uspješno primijenjene samostalno. Ipak lokalni *algoritam za isključivo upravljanje priljevnim tokovima* razvijen na temelju neuronskih mreža imao je nešto slabiji uspjeh zbog isključive ovisnosti o količini i reprezentativnosti parova za učenje. S druge strane upravljački sustavi razvijeni na bazi *fuzzy* logike široko su rasprostranjeni u gotovo svim prometnim sustavima, pa tako i pri *ramp metering*-u. Primjena u *ramp metering*-u je također polučila dobre rezultate. ANFIS algoritam je ustvari metoda kalibracije parametra *fuzzy* sustava ostvarena neuronskom mrežom. Na kvalitetu kalibracije *fuzzy* sustava i općenito upravljačku moć ANFIS algoritma direktno će ovisiti stupanj reprezentativnosti i količini prikupljenih parova podataka za učenje od strane SWARM algoritma. Ideja je da ANFIS algoritam od SWARM algoritma nauči osnovne principe upravljanja *ramp metering*-om pri malim opterećenjima prometnog kapaciteta autoceste sa sporednih prilaza, tj. sa malim stupnjem prometne potražnje priljevnih tokova. Uzeta je situacija manjeg prometnog opterećenja iz razloga što ta situacija ima manje specifičnih slučajeva naglih promjena opterećenja pa je potrebno bilo skupiti manji broj parova podataka za učenje, a da se bitno ne ugrozi stupanj reprezentativnosti parova podataka.

Za potrebe učenja neuronske mreže najprije je razvijen testni model sustava autoceste u makrosimulacijskom alatu CTMSIM. Prilikom pokretanja makrosimulacijskog alata CTMSIM korišten je SWARM algoritam u opcijama upravljačkog *algoritma za isključivo upravljanje priljevnim tokovima*. Nakon završetka simulacije dobivene su velike količine ulaznih parametara čije su vrijednosti prilagođavane i na temelju izlaznih rezultata SWARM algoritma. Također valjalo je i konstruirati bazu parova podataka za učenje budućeg ANFIS algoritma. CTMSIM makrosimulacijski alat generirao je više vrsta parametara koji su

mijenjani tijekom simulacije. U konstrukciji baze podataka za učenje neuronskih mreža najprije je određen izlazni dio para kojeg čini parametar koji ukazuje na propusnost priljevnih tokova u glavni. Metodom iscrpnog pretraživanja između zbira dobivenih vrsta parametara izabrana su tri parametara za ulazni dio para za učenje koji najviše utječu na izlazni dio para za učenje.

Nakon završenog procesa učenja valjalo je usporediti rad dobivenog ANFIS algoritam sa nekim od postojećih *algoritama za isključivo upravljanje priljevnim tokovima*. Za usporedbu su odabrani ALINEA i SWARM algoritam. ALINEA algoritam je izabran iz razloga što je najbolji predstavnik lokalnih algoritama i što ima široku upotrebu na europskim autocestama, dok je SWARM algoritam primarno odabran zbog usporedbe rezultata algoritma učitelja i novog ANFIS algoritma, tj. kako bi se uvidio stupanj odstupanja djelovanja ta dva algoritma. Uz navedeni razlog SWARM algoritam je ponajbolji kooperativni algoritam u podskupini nadmetajućih algoritama. Rezultati usporedbe ova tri algoritma su pokazali postojanje potencijala upotrebe ANFIS algoritama u sustavu *ramp metering-a*. ANFIS algoritam u većini slučajeva daje identične rezultate kao i SWARM algoritam. Što ukazuje na činjenicu da je ANFIS algoritam uspješno naučio osnovna znanja u upravljanju stupnjem propuštanja priljevnih tokova u slučajevima manjeg opterećenja autoceste. Ipak određene fluktuacije se javljaju, pri naglim propuštanjem sporednih tokova u glavni gdje kod ANFIS algoritma dolazi do pada VHT-a (Vehicle hours traveled), te samim time i drastičnog porasta stupnja gubitka produktivnosti autoceste. Te se anomalije mogu pripisati malim brojem prikupljenih parova podataka za učenje u odnosu na dužinu testne trase autoceste i broja prilaza/izlaza. S druge strane pozitivna mu je strana što pokazuje manji stupanj kašnjenja u odnosu na ostale algoritme s kojima je bio uspoređivan.

Na kraju je, u smislu aktualizacije tematike, obavljena analiza karakteristika zagrebačke obilaznice prema broju i međusobnoj udaljenosti čvorova. Ukazano je i na općenite udaljenosti najbližeg čvora autoceste od središta grada. Ti su podaci bitni pri razmatranju pitanja o mogućnosti i vrsti primjene *algoritama za isključivo upravljanje priljevnim tokovima* na hrvatskim autocestama. Kako bi se dobila što bolja percepcija o spomenutim karakteristikama autoceste provedena je usporedba slučajeva zagrebačke i milanske obilaznice. Uz tu usporedbu dati su i neki statistički podaci o sigurnosti i iskorištenosti kapaciteta hrvatskih u odnosu na europske autoceste. Na temelju tih usporedba i podataka općenit je zaključak kako su hrvatske autoceste projektirane sa izrazito velikom prosječnom udaljenosti između čvorova u odnosu na europske prometnice. U takvim uvjetima se savjetuje uporaba algoritama za isključivo upravljanje priljevnim tokovima koje možemo klasificirati kao lokalne algoritme ili algoritama koji predviđaju nastajanje uskih grla (npr. SWARM, ALINEA ili ANFIS algoritam). Razlog tomu je manji utjecaj susjednih čvorova zbog njihove prevelike udaljenosti, ali uz postojanje periodičnih zagušenja.

Također posebno treba istaknuti kako *sustav upravljanja priljevnim tokovima* ima i ulogu u značajnom povećanju sigurnosti odvijanja prometa. To je možda i važnija značajka njegove primjene u slučaju hrvatskih autocesta, jer svaka negativna reklama uslijed prometnih nesreća u značajnoj mjeri narušava ugled Republike Hrvatske kao turističke destinacije.

9. Zahvale

Zahvaljujemo se mentoru, prof. dr. sc. Sadku Mandžuki na vodstvu, koordinaciji i savjetima tijekom izrade ovog rada.

Posebna zahvala prof. dr. sc. Ivanu Legcu na pruženim informacijama i literaturi.

Literatura

- [1] Bošnjak, I.: Inteligentni transportni sustavi 1, Fakultet prometnih znanosti Sveučilišta u Zagrebu, Zagreb, 2006.
- [2] Legac, I.: Cestovne prometnice I, Fakultet prometnih znanosti Sveučilišta u Zagrebu, Zagreb, 2006.
- [3]] Legac, I.: Raskrižja javnih cesta, Cestovne prometnice II, Fakultet prometnih znanosti Sveučilišta u Zagrebu, Zagreb, 2008.
- [4] Mandžuka, S.: Inteligentni transportni sustavi – Razvoj inteligentnih prometnica, Pozvano predavanje, Tribina Hrvatskog društva za ceste VIA VITA, Zagreb, 2008.
- [6] 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.
- [5] Bošnjak, I., Mandžuka, S.: Inteligentni transportni sustav - ITS - temelj učinkovitosti i sigurnosti prometa, Zbornik radova Sigurnost u prometu, Hrvatski autoklub, 2007.
- [6] Zhang, M., Kim, T., Nie, X., Jin, W.: Evaluation of On-ramp Control Algorithms, California PATH Research Report UCB-ITS-PRR-2001-36, 2001.
- [7] Chaudhary, N.A., Messer, C.J.: Freeway On-Ramp Design Criteria for Ramp Meters with Excessive Queue Detectors, Transportation Research Record 1796, 2003.
- [8] Chaudhary, N.A., Messer, C.J.: Ramp-Metering Design and Operations Guidelines for Texas, Research Report FHWA/TX-01/2121-2, TTI, College Station, Texas, 2000.
- [9] Freeway Management and Operations Handbook, Federal Highway Administration, Washington, D.C., U.S. Department of Transportation (Chapter 7 - Ramp Management and Control), 2003.
- [10] Chaudhary, N.A., Zongzhong, T., Messer, C.J., Chu, C.L.: Ramp metering algorithms and approaches for Texas, Texas Transportation Institute The Texas A&M University System College Station, Texas 77843-3135, 2004.
- [11] Zongzhong, T.: Development and Evaluation of Operational Strategies for Providing an Integrated Diamond Interchange Ramp-Metering Control System. Ph.D. Dissertation, Department of Civil Engineering, Texas A&M University, College Station, Texas, 2004.
- [12] Al-Kaisy, A. F., Hall, F.L., Reisman, E.S.: Developing passenger car equivalents for heavy vehicles on freeways during queue discharge flow, Department of Civil Engineering and Construction, Bradley University, 2001.
- [13] Carlos, F. D., Jorge, L., Muñoz, J.C.: Ten strategies for freeway congestion mitigation with advanced technologies, Institute of Transportation Studies, University of California, Berkeley, Revised, 2002.

- [14] Papageorgiou, M., Smaragdis, E.: Series of new local ramp metering strategies, Transportation Research Record, No.1856, pp.74-86, 2004.
- [15] Ramp metering - Summary report, Highway agencies publications, U.S. Department of Transportation, 2007.
- [16] Mohammadian, K., Chakrabarti, S.: Optimizing ramp metering strategies, ITS Midwest Annual Meeting, Chicago, 2006.
- [17] 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.
- [18] Bogenberger, K.: Advanced Coordinated Traffic Responsive, Ramp Metering Strategies, Berkeley, 2000.
- [19] Kurzhanskiy, A.: CTMSIM Traffic Macro-Simulator for MATLAB, UC Berkeley, 2008.
- [20] Sivanandam, S. N., Sumathi, S., Deepa, S. N.: Introduction to Fuzzy Logic using MATLAB, Springer, 2007.
- [21] Chong, Y., Quek, C., Loh, P.: A novel neuro-cognitive approach to modeling traffic control and flow based on fuzzy neural techniques, Expert Systems with Applications. 36 (2009), pp.4788–4803, 2009.
- [22] Gregurić, M.: Inteligentni sustavi upravljanja brodom, završni rad, Fakultet prometnih znanosti, Zagreb 2009.
- [23] Gregurić, M.: Pregled algoritama za automatsku detekciju incidenata u prometu, seminarski rad, Fakultet prometnih znanosti, Zagreb 2010.
- [24] Kulkarni, G.H., Waingankar, P.G.: Fuzzy logic based traffic light controller, Second International Conference on Industrial and Information Systems, ICIIS 2007, Sri Lanka, 2007.
- [25] Gorzalczany, M. B.: Computational Intelligence Systems and Applications, Springer Verlag, 2002.
- [26] Lord, D., Persaud, B.N.: Estimating the safety performance of urban road transportation road networks, Accident Analysis & Prevention 36: 609-620, 2004.
- [27] Hrvatske autoceste d.o.o., Analiza prometnih nesreća u 2010. godini; Odjel za tipizaciju prometnog sustava, sigurnost i brojenje prometa, Broj : 45212 – 750 – 1 – TD – 4 /11. II, Zagreb 2011.
- [28] Prostorno - prometna studija cestovno - željezničkog sustava šireg područja grada zagreba, Sažetak, Institut građevinarstva Hrvatske, Zagreb, 2009.
- [29] Škorput, P., Mandžuka, S., Jelušić, N.: Real-time detection of road traffic incidents, Promet - Traffic – Traffico, vol 22, No 2, 2010.

[30] Bošnjak, I., Mandžuka, S., Golenić, V.: Inteligentni transportni sustavi, mogućnosti integracije postojećih informacijsko-prometnih sustava, Zbornik radova IV hrvatski kongres o cestama, Hrvatsko društvo za ceste VIA VITA, Cavtat, 2007.

[31] Mandžuka, S.: Inteligentni transportni sustavi 2, Zavod za inteligentne transportne sustave, Fakultet prometnih znanosti, 2010.

[32] Legac, I., Kamber, I., Meštrić- Matković, T.: Twenty Years of Zagreb Bypass Motorway – Expectations and Effects, *Promet - Traffic – Traffico*, vol 14, 2002, Supplement 1/2002.

O AUTORU

Martin Gregurić je rođen 24. siječnja 1988. u Sisku. U Petrinji je završio program Opće gimnazije u Srednjoj školi Petrinja. 2006. godine upisuje Fakultet prometnih znanosti u Zagrebu, gdje je upisao preddiplomski studij Inteligentni transportni sustavi i logistika; smjer Inteligentni transportni sustavi. 2009. postaje sveučilišni prvostupnik inženjer prometa, te iste godine upisuje i diplomski studij, također smjer: Inteligentni transportni sustavi. Danas je absolvent diplomskog studija.

SAŽETAK

Martin Gregurić

INTELIGETNO UPRAVLJANJE PRILJEVNIM TOKOVIMA AUTO-CESTE SA OSVRTOM NA MOGUĆNOST PRIMJENE NA ZAGREBAČKOJ OBILAZNICI

U ovoj studiji dan je pristup projektiranja priljevnim tokovima auto-ceste (ramp metering) zasnovan na inteligentnom upravljanju, gdje su korištene umjetne neuronske mreže i algoritmi neizrazitog upravljanja (ANFIS). Pregled dosadašnjih metoda upravljanja priljevnim tokovima je prikazan u studiji, u rasponu od ranih jednostavnih pristupa do suvremenih sofisticiranih struktura upravljanja. Napravljena je usporedna analiza postojećih algoritama. U prvoj fazi projekta definirana je struktura adaptivnog neuro-fuzzy algoritma. Odabrana je metoda prikupljanja podataka te za ovaj slučaj ista obavljena korištenjem makrosimulacijskog alata CTMSIM. Provedena je validacija modela te je projektiran hibridni algoritam učenja. U završnom dijelu su prikazani rezultati istraživanja, koji su pokazali u većini slučajeva usporedive rezultate (a u nekim i značajno bolje) sa mogućnostima dosadašnjih algoritama upravljanja priljevnim tokovima autoceste. Također su razmotrene mogućnosti primjene sustava upravljanja priljevnim tokovima na zagrebačkoj obilaznici.

Ključne riječi: optimizacija tokova, upravljanje priljevnim tokovima, upravljanje prometom autoceste, umjetne neuronske mreže, neizrazito upravljanje

ABSTRACT

Martin Gregurić

INTELLIGENT HIGHWAY RAMP METERING WITH EMPHASIS ON POSSIBLE USE TO ZAGREB BYPASS

This study gives intelligent control approach for designing ramp metering controls using artificial hybrid neural networks and fuzzy algorithm (ANFIS). An overview of ramp metering algorithms is provided in study, ranging from early simple approaches to modern sophisticated control structures. A comparative analysis of existing algorithms is made. The structure of adaptive neuro-fuzzy algorithm is defined in first phase of design. Data collection was carried out using macro-simulation tool CTMSIM. Validation of models is made and the hybrid learning algorithm is designed. The final part presents the research results, which showed comparable results in most cases (in some and significantly better) than the current ramp metering algorithm. Possibilities of applying this technique to the Zagreb bypass are also discussed.

Keywords: flow optimization, ramp metering, highway traffic control, artificial neural networks, fuzzy control

PRILOZI

Prilog 1. MATLAB ANFIS program sa exhsrch funkcijom i iscrtavanjem odgovarajućih grafova

```
trn_data_n = 600;
total_data_n = 1000;
trnData=mydata(1:trn_data_n, :);
chkData=mydata(trn_data_n+1:end, :);
input_name = str2mat('Gustoca','Tok','Brzina','VHT','Kasnjenje');
input_index = exhsrch(3, trnData, chkData, input_name);
new_trn_data = trnData(:, [input_index, size(trnData,2)]);
new_chk_data = chkData(:, [input_index, size(chkData,2)]);
numMFs = [4 4 6];
mfType = str2mat('trapmf', 'trimf', 'trimf');
fismat = genfis1(trnData,numMFs,mfType);
for input_index=1:3,
    subplot(2,2,input_index)
    [x,y]=plotmf(fismat,'input',input_index);
    plot(x,y)
    axis([-inf inf 0 1.2]);
    xlabel(['Input ' int2str(input_index)]);
end
[fismat1,error1,ss,fismat2,error2] = anfis(trnData, fismat, 500, 0, chkData);
figure(3)
subplot(2,2,1)
plotmf(fismat2, 'input', 1)
subplot(2,2,2)
plotmf(fismat2, 'input', 2)
```

```

subplot(2,2,3)
plotmf(fismat2, 'input', 3)
figure(4)
plot([error1 error2]);
hold on; plot([error1 error2], 'o');
xlabel('Iteracije');
ylabel('RMSE (Root Mean Squared Error)');
title('Error Curves');
anfis_output = evalfis([trnData(:,1:3); chkData(:,1:3)], fismat2);
figure(5)
subplot(2,1,1);
index = 1:120;
plot(index, mydata(index, size(mydata,2)), '-', ...
     index, anfis_output(index), '.');
rmse = norm(anfis_output(index)-mydata(index,size(mydata,2)))/sqrt(length(index));
title(['Podaci za učenje (Puna linija) i ANFIS Predviđanje (Dots) sa RMSE-om = '
num2str(rmse)]);
xlabel('Vremenski Index'); ylabel("");
subplot(2,1,2);
index = 120+1:300;
plot(index, mydata(index, size(mydata,2)), '-', index, anfis_output(index), '.');
rmse = norm(anfis_output(index)-mydata(index,size(mydata,2)))/sqrt(length(index));
title(['Podaci za učenje (Puna linija) i ANFIS Predviđanje (Dots) sa RMSE-om = '
num2str(rmse)]);
xlabel('Vremenski Index'); ylabel("");
writefis(fismat2,'proba4')

```

Prilog 2: Učitavanje ANFIS ramp metering kontrolora u prilagođenom kodu funkcije makrosimulacijskog alata CTMSIM

```
function new_flows = controller_anfis(densities, flows, celldata, speeds, idx)

% Parameters:
%     densities - vector of densities;
%     flows    - vector of on-ramp flows, same size as 'densities';
%     celldata - array of freeway cell structures, whose length
%               must be the same as size of 'densities';
%     ts       - sampling period;
%     idx      - index of the cell with our on-ramp.
%
% Returns: new_flows - updated vector of on-ramp flows.
% Alex Kurzhanskiy <akurzhan@eecs.berkeley.edu>
%

L = size(densities, 1);
M = size(flows, 1);
N = size(celldata, 2);

if L ~= N
    error('CONTROLLER_ANFIS: number of densities does not match number of cells.');
```

```
end

if M ~= N
    error('CONTROLLER_ANFIS: number of flows does not match number of cells.');
```

```
end

if (idx < 1) | (idx > N)
    error('CONTROLLER_ANFIS: invalid cell index.');
```

```
end

new_flows = flows;

rat    = celldata(idx).ORmlcontroller.ratio;

n      = densities(idx, 1);
s      = speeds;
fl     = flows(idx, 1);
a      = readfis('proba4');
f1     = evalfis([s n fl], a);
f      = abs(f1)*rat/0.002777777777;
f      = min([f celldata(idx).ORmlcontroller.Cmax]);
f      = max([f celldata(idx).ORmlcontroller.Cmin 0]);

new_flows(idx, 1) = f;

return;
```

Prilog 3: Temeljni podaci o programu CTMSIM

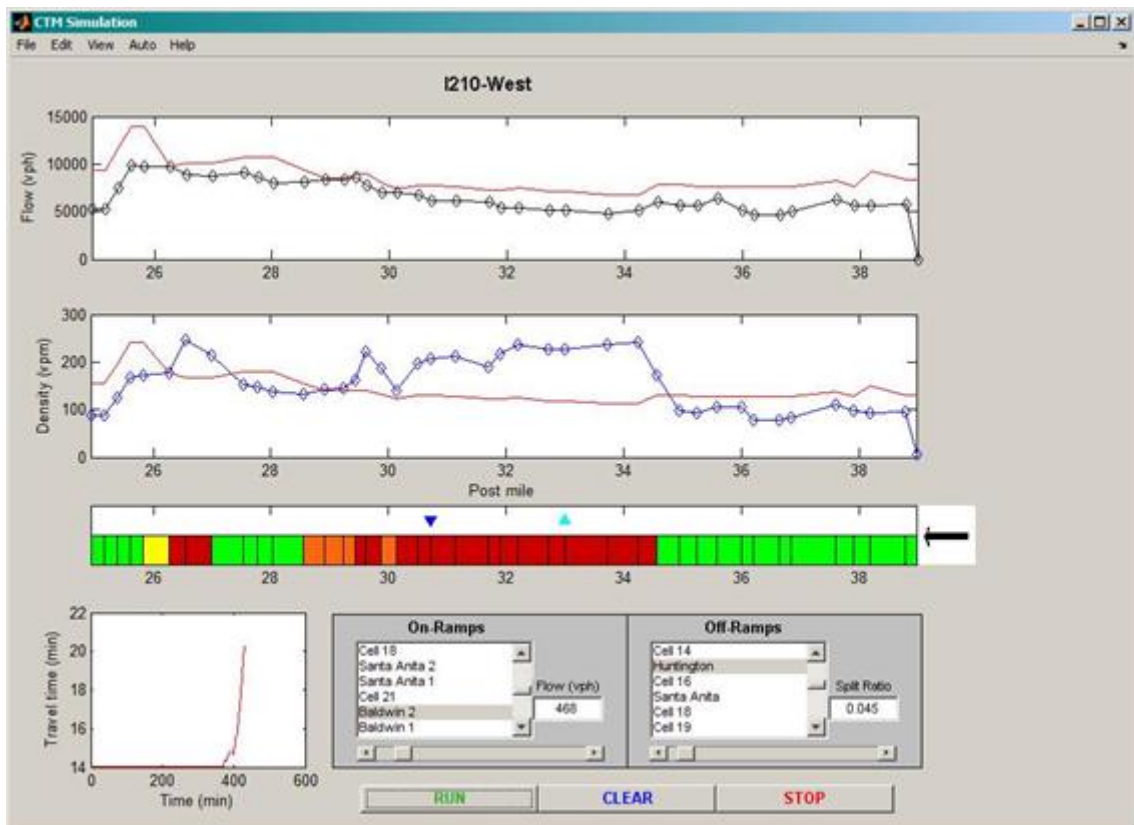
File Information

Description CTMSIM is an interactive freeway traffic macrosimulator for MATLAB. It is based on the Asymmetric Cell Transmission Model (ACTM) and allows user-pluggable ramp flow and ramp queue controllers. Its output can be directly compared with PeMS data (<http://pems.eecs.berkeley.edu>). CTMSIM operates both in graphical (interactive) mode and command line (batch) mode.

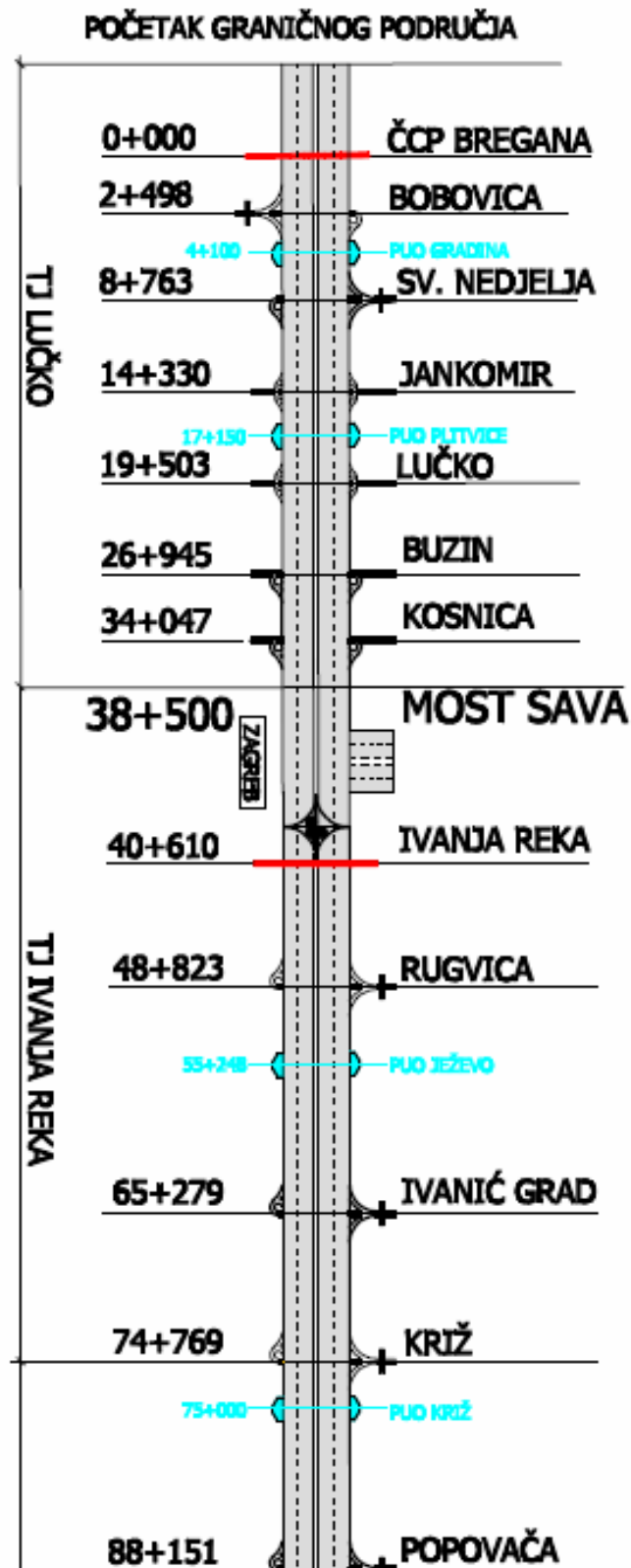
Homepage: <http://path.berkeley.edu/topl/software.html>

MATLAB MATLAB 6.5 (R13)

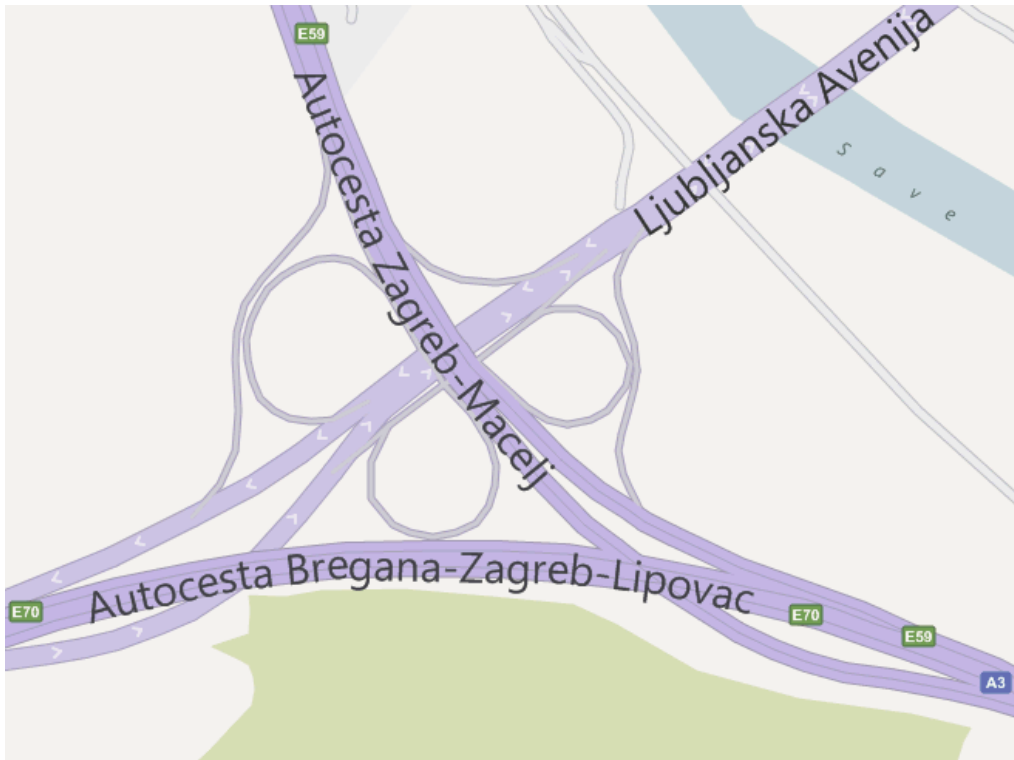
release



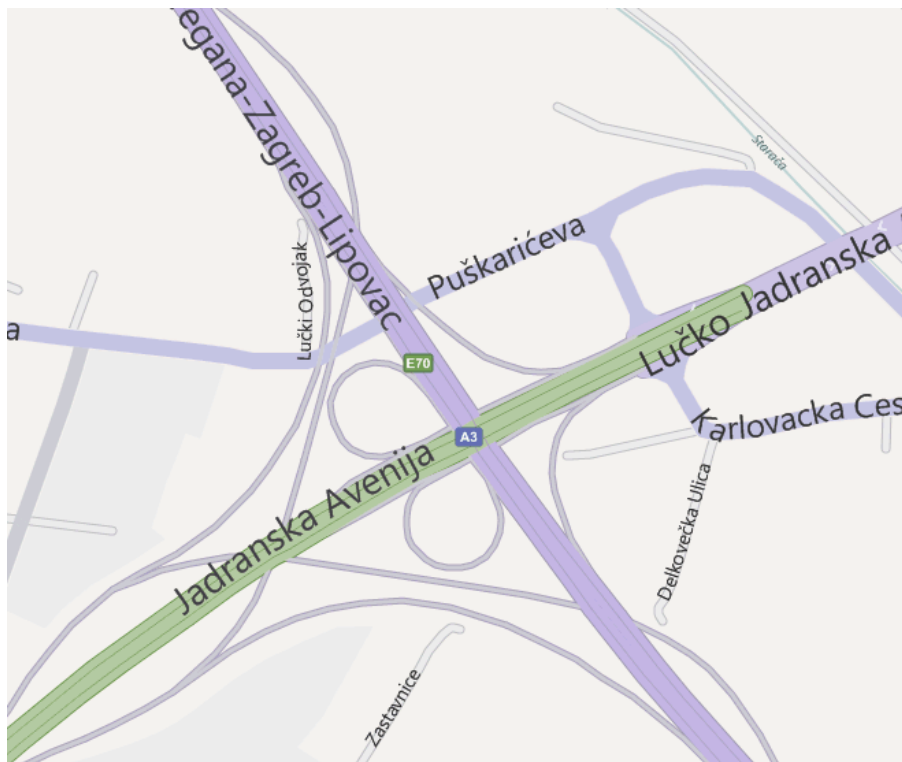
Prilog 4: Zagrebačka obilaznicama sa prikazanim čvorovima i stacionažama



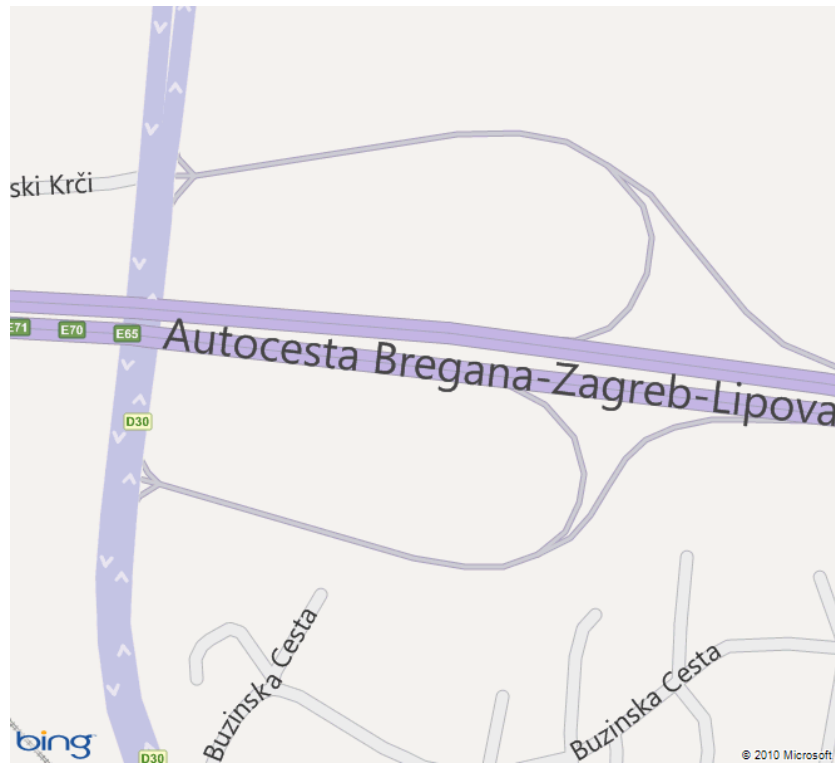
Prilog 6: Nacrti izvedbe glavnih čvorova na zagrebačkoj obilaznici



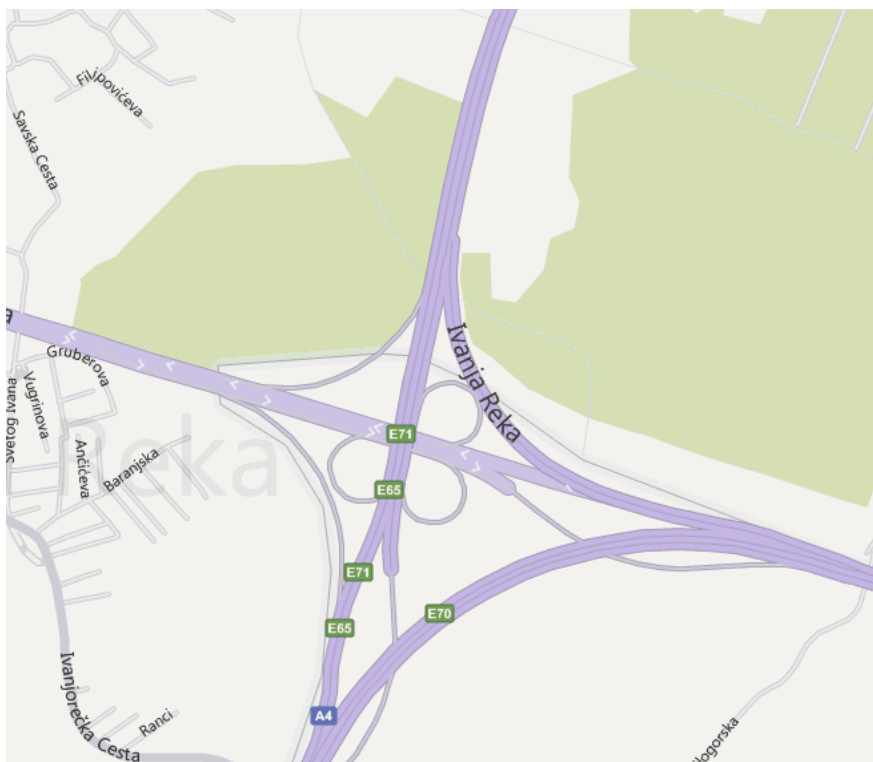
Čvor Jankomir



Čvor Lučko



Čvor Buzin



Čvor Ivanja Reka