

# Usporedba algoritama za upravljanje promjenjivim ograničenjem brzine na urbanim autocestama

---

**Korent, Nino**

**Master's thesis / Diplomski rad**

**2017**

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

*Permanent link / Trajna poveznica:* <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:119:835595>

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

*Download date / Datum preuzimanja:* **2025-01-12**



*Repository / Repozitorij:*

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



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

**Korent, Nino**

**USPOREDBA ALGORITAMA ZA UPRAVLJANJE PROMJENJIVIM  
OGRANIČENJEM BRZINE NA URBANIM AUTOCESTAMA**

**DIPLOMSKI RAD**

**ZAGREB, 2017.**

**SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET PROMETNIH ZNANOSTI  
POVJERENSTVO ZA DIPLOMSKI ISPIT**

Zagreb, 24. travnja 2017.

Zavod: **Zavod za inteligentne transportne sustave**  
Predmet: **Umjetna inteligencija**

**DIPLOMSKI ZADATAK br. 4218**

Pristupnik: **Nino Korent (0035183253)**  
Studij: **Inteligentni transportni sustavi i logistika**  
Smjer: **Inteligentni transportni sustavi**

Zadatak: **Usporedba algoritama za upravljanje promjenjivim ograničenjem brzine na urbanim autocestama**

**Opis zadatka:**

Urbane autoceste su dizajnirane kako bi mogle prihvatiti veliku prometnu potražnju uz veću razinu uslužnosti naspram ostalih vrsta cesta. Unatoč tome u nekim slučajevima mogu biti preopterećene. Najveća opterećenja urbanih autocesta dešava se kod ulaznih i izlaznih rampi. Jedna od strategija upravljanja zagušenjem je sustav upravljanja promjenjivim ograničenjem brzine. Time se smanjuje brzina i homogenizira se protok prometa. Rezultati su smanjene gustoće, veća sigurnost, smanjenje ispuštanja štetnih plinova i bolja propusnost. Danas postoji više različitih algoritama za upravljanje promjenjivim ograničenjem brzina, te se postavlja pitanje koji od njih je najbolji. U radu je potrebno prikazati probleme upravljanja prometom na urbanim autocestama i pristup upravljanja ograničenjem brzine, detaljnije opisati odabrane algoritme za sustave upravljanja promjenjivim ograničenjem brzine, izraditi model dionice urbane autoceste u simulatoru VISSIM te napraviti simulaciju odabranih algoritama korištenjem programskog paketa Matlab i simulatora EnViVeR.

Zadatak uručen pristupniku: 28. travnja 2017.

Mentor:



doc. dr. sc. Edouard Ivanjko

Predsjednik povjerenstva za  
diplomski ispit:

---

Sveučilište u Zagrebu  
Fakultet prometnih znanosti

**DIPLOMSKI RAD**

**USPOREDBA ALGORITAMA ZA UPRAVLJANJE  
PROMJENJIVIM OGRANIČENJEM BRZINE NA URBANIM  
AUTOCESTAMA**

**COMPARISON OF ALGORITHMS FOR VARIABLE SPEED LIMIT  
CONTROL ON URBAN MOTORWAYS**

Mentor: doc.dr.sc. Edouard Ivanjko

Student: Nino Korent

JMBAG: 0035183253

Zagreb, rujan 2017.

## Sažetak

Autoceste su dimenzionirane kako bi omogućile veći maksimalni prometni kapaciteta, što posljedično omogućuje višu razinu uslužnosti (engl. *Level of Service - LoS*), u usporedbi s drugim vrstama prometnica. Unatoč tome u nekim slučajevima može doći do preopterećenja prometnog toka autoceste. Autoceste koje su konstruirane blizu većih urbanih središta posebice su pod velikim prometnim opterećenjem budući da se koriste za potrebe dnevnih migracija gradskog stanovništva i tranzitnog prometa. Najistaknutiji efekti zagušenja su duže vrijeme putovanja i veće onečišćenje zraka na prometnicama koje su pod utjecajem zagušenja. Kako bi se izbjegli ili ublažili efekti zagušenja na autocestama koristi se niz rješenja iz područja inteligentnih transportnih sustava. Najkorištenije upravljačke strategije na urbanim autocestama su upravljanje priljevnim tokovima i promjenjivo ograničenje brzine. Fokus rada je usporedba različitih algoritama za upravljanje promjenjivim ograničenjem na urbanim autocestama. U svrhu usporedbe je napravljen model dionice autoceste u mikroskopskom simulatoru VISSIM, implementirana su tri različita algoritma za upravljanje promjenjivim ograničenjem brzine u programskom paketu MATLAB te odsimulirane emsije ispušnih polinova cestovnih vozila u simulatoru EnViVeR.

**KLJUČNE RIJEČI:** upravljanje promjenjivim ograničenjem brzine; simulacijsko okruženje; urbane autoceste; mikroskopska simulacija prometa; neizrazita logika

## **Summary**

### **Comparison of Algorithms for Variable Speed Limit Control on Urban Motorways**

Motorways are designed in order to enable higher maximal traffic throughput, which consequently enables higher LoS, compared with other road types. Nevertheless, in some cases traffic congestion can occur on motorways. Motorways constructed near major urban regions are under heavy traffic load because they are intensively used during peak hours and transit traffic. The most notable effects of congestion are longer travel time and increased air pollution on roads affected by congestions. Several solutions in the field of intelligent transport systems are used in order to avoid or mitigate effects of congestion on motorways. Variable speed limit control and ramp metering are the most widely used control strategies on the motorways. The focus of this thesis is placed on comparison of different algorithms for variable speed limit control on motorways. For the purpose of comparing the implemented VSLC algorithms a motorway model was made in microscopic simulator VISSIM, three different algorithms for variable speed limit control were implemented using MATLAB and simulation of vehicle emission pollution was done in EnViVer.

**KEY WORDS:** variable speed limit control; urban motorway; microscopic traffic simulation; simulation framework; fuzzy logic

## Sadržaj

1.	Uvod .....	1
2.	Problemi zagušenja urbanih autocesta .....	4
3.	Princip upravljanja promjenjivim ograničenjem brzine .....	7
4.	Opis odabranih algoritama za upravljanje promjenjivim ograničenjem brzine....	9
4.1.	Regulator promjenjivog ograničenja brzine zasnovan na upravljanju tokom.	10
4.2.	Jednostavni proporcionalni regulator ograničenja brzine .....	13
4.3.	Upravljački algoritam zasnovan na neizrastoj logici .....	14
5.	Simulacijsko okruženje MATLAB – VISSIM – EnViVeR .....	18
5.1.	Simulator prometa VISSIM .....	18
5.2.	Simulator emisije štetnih plinova .....	19
5.3.	Povezivanje VISSIM-a i MATLAB-a .....	20
5.4.	Prometni model i postavke.....	23
6.	Simulacijski rezultati.....	30
6.1.	Brzina.....	30
6.2.	Gustoća.....	33
6.3.	Protok.....	34
6.4.	Ograničenja brzine.....	36
6.5.	Vrijeme putovanja, ukupno utrošeno vrijeme i duljina red čekanja.....	39
6.6.	Red čekanja na drugoj ulaznoj rampi ( $r_2$ ) .....	42
6.7.	Rezultati simulacije ispušnih plinova i čestica.....	44
6.8.	Tablice vrijednosti svih simulacija .....	46
7.	Zaključak .....	48
	Popis slika.....	52
	Popis tablica.....	53
	Popis grafova .....	54

# 1. Uvod

Urbane autoceste opslužuju prometnu potražnju obližnjih, gusto naseljenih, urbanih područja te tranzitni promet. Kombinacija tih vrsta prometa generiraju ciklička prometna zagušenja tijekom vršnih sati. Osim vršnih sati, urbana područja podložna su zagušenju i u vremenima velikih događaja, incidenata i sl. Uz činjenicu da su gradovi danas sve veći i prometno povezaniji, a uz primjenu suvremene tehnologije u prometu omogućuje se lakše putovanje u udaljenije dijelove grada s obzirom na mjesto stanovanja, mobilnost u urbanim sredinama na dnevnoj razini uzrokuje dodatnu prometnu potražnju. S obzirom na mentalitet ljudi na prostoru Republike Hrvatske najčešće prijevozno sredstvo je osobni automobil. Unatoč činjenici da su današnje autoceste dizajnirane za pružanje većeg maksimalnog prometnog kapaciteta, što kao posljedicu ima višu razinu uslužnosti (engl. *Level of Service – LoS*) u usporedbi s drugim vrstama cesta, sve se češće javlja problem premalog kapaciteta istih.

Pojava manjka kapaciteta prometnica najizraženija je tijekom vršnih sati, a nemogućnost širenja (ili ekonomska isplativost istog) prometne infrastrukture unutar gradova postavlja ograničenje na ionako složeni sustav. Pojava preopterećenja prometnog toka autoceste naziva se zagušenje, a dešava se kada prometna potražnja premaši kritičnu vrijednost. Pojave preopterećenja najčešće se javljaju kod urbanih autocesta s velikim brojem bliskih ulaznih i izlaznih rampi. Kako su te rampe povezane s obližnjim urbanim područjem, mogu biti generatori velike prometne potražnje prema kapacitetu glavnog toka autoceste. Pošto se urbane autoceste najčešće ne mogu širiti dalje, potrebno je rješenja tražiti na drugi način kako bi se nosili s dodatnim prometnim opterećenjima. Jedno od rješenja je korištenje raznih servisa dostupnih iz domene inteligentnih transportnih sustava (ITS), poput upravljačkih i nadzornih sustava. Cilj je takvih sustava podizanje razine uslužnosti na urbanoj autocesti, povećanje sigurnosti prometa, smanjenje emisija štetnih plinova i slično.

Prometna potražnja koja dolazi iz urbanih područja u kombinaciji s tranzitnim prometom predstavlja dobre preduvjete za nastanak zagušenja. Mjesta gdje započinju zagušenja najčešće se nazivaju prometnim čepom. U prometnoj teoriji mjesto nastanka prometnog zagušenja naziva se glavom udarnog (šok) vala. Statična zagušenja su obično prisutna pri mjestima ulaznih te izlaznih rampi ili blizu područja prometnih incidenata.

Jedna od upravljačkih strategija, koja se koristi za izbjegavanje zagušenja na autocestama, je upravljanje je pomoću promjenjivog ograničenja brzine (engl. *Variable speed limit control – VSLC*). VSLC sustavi prikazuju informaciju o ograničenju brzine na



promjenjivim znakovima (*engl. variable messaging signs – VMS*). Zbog ovog pristupa VSLC sustav je u mogućnosti postaviti ograničenja brzine na promjenjive znakove u ovisnosti od trenutne prometne situacije za razliku od fiksnih prometnih znakova ograničenja brzine. VSLC sustavi prvi puta su bili predstavljeni u Njemačkoj prije 3 desetljeća. Postoje dva glavna pristupa za implementaciju VSLC sustava. Prvi pristup zasniva se na homogenizacijskom efektu dok je drugi pristup više fokusiran na sprječavanje prometnog kolapsa ili rješavanja postojećih zagušenja smanjenjem protoka ili postavljanjem ograničenja brzine [1]. Homogenizacija brzine vozila smanjuje razliku brzina između vozila i posljedično uzrokuje stabilniji te sigurniji prometni tok. Srednja brzina vozila smanjuje se ispod vrijednosti koje bi mogle izazvati kritičnu gustoću i posljedično uzrokovati prometno zagušenje [2]. Metode smanjenja protoka više djeluju na sprječavanje ili rješavanje prevelikih gustoća, uključujući i zagušenja, tako da smanjuju dopušteni priljev vozila na područja uskog grla [1]. Takvim se sustavima izravno utječe na dinamiku prometnog toka zbog primjene promjenjivog ograničenja brzine na pojedinim dijelovima upravljane dionice autoceste.

Kako bi se VSLC sustavi mogli uopće implementirati, potrebno je prvo odabrati zadovoljavajući upravljački zakon i postaviti pripadajuće parametre takvog sustava. Da bi se to moglo napraviti, potrebno je izvršiti testiranja u smislu simulacije takvog upravljačkog sustava. Za postizanje relevantnih rezultata potrebno je postaviti odgovarajući simulacijski okvir i proceduru evaluacije. U ovom diplomskom radu kao spomenuti simulacijski okvir korištena je kombinacija triju programskih paketa. Simulacijski model bio je izrađen u VISSIM programskom paketu, a u istom je također bila pokretana simulacija. Upravljački algoritmi bili su izrađeni u MATLAB programskom paketu, a preuzeti su iz prijašnjih radova autora [3] i [4]. Algoritam zasnovan na neizrazitoj logici preuzet je iz [5]. Za izračun zagađenja, odnosno emisije štetnih plinova, korišten je programski paket EnViVer.

Cilj je ovog diplomskog rada dati pregled triju odabranih upravljačkih algoritama i međusobno usporediti njihova djelovanja na prometni tok s ciljem poboljšanja prometnih parametara. U radu će detaljno biti objašnjen model prometnog okruženja koji će služiti za testiranje i evaluaciju simulacija, proces implementacije i način izračuna prometnih parametara.

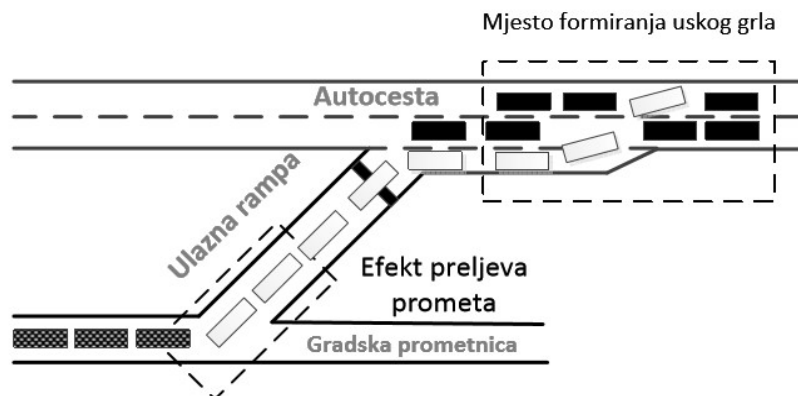
Rad je podijeljen u sedam poglavlja. U drugom poglavlju opisani su problemi zagušenja urbanih autocesta. Treće poglavlje opisuje principe upravljanja promjenjivim ograničenjem brzine. U četvrtom poglavlju bit će objašnjeni odabrani algoritmi za upravljanje promjenjivim ograničenjem brzine uz detaljan pregled svakog od algoritama i objašnjenje izraza ili pravila upravljačkog zakona te načina funkcioniranja. Peto poglavlje daje pregled simulacijskog

okruženja korištenog za testiranje i evaluaciju upravljačkih algoritama uz opisan proces povezivanja programskih paketa. U šestom poglavlju biti će analizirani i prikazani rezultati dobiveni simulacijom. Posljednje poglavlje zaključit će diplomski rad iznošenjem spoznaja, zaključaka i prijedloga za daljnji rad.

## 2. Problemi zagušenja urbanih autocesta

Autoceste se dizajniraju za pružanje većeg maksimalnog prometnog kapaciteta što omogućuje višu razinu uslužnosti u usporedbi s drugim vrstama prometnica. Pri tome, razina uslužnosti definira se kao grupa kvalitativnih mjera koje karakteriziraju operativne uvjete prometnog toka i njegove percepcije od strane vozača [6]. Pošto neizravno, zbog bolje prometne povezanosti, izgradnja takve prometnice uvijek privlači i gospodarske subjekte (tvornice, skladišta itd.) u svoju blizinu, u konačnici se na autocestu dovede više vozila. Tijekom samog dimenzioniranja kapaciteta autoceste takve je promjene teško točno predvidjeti.

Unatoč većim razinama uslužnosti i konstrukcijskim značajkama autoceste, u nekim slučajevima svejedno može doći do preopterećenja prometnog toka. Takve pojave nazivamo prometnim zagušenjima. Njihova karakteristika su male brzine i visoke gustoće prometnog toka, odnosno manja razina uslužnosti. Zagušenja se dešavaju kada prometna potražnja premaši kritičnu vrijednost te se prometna mreža ne može nositi s tolikim brojem vozila. Do tih pojava najčešće dolazi na tipovima autocesta koje sadrže veliki broj ulaznih i izlaznih rampi [2], a nazivamo ih urbanim autocestama. Urbane autoceste vrlo su bitne u prometnoj mreži velikih gradova jer omogućuju brzo i sigurno odvijanje prometa te time rasterećuju gradske prometnice. Ukoliko su spomenute rampe izravno vezane s obližnjom urbanom prometnom mrežom, mogu biti generatori visoke prometne potražnje koja može biti blizu vrijednosti kapaciteta glavnog toka autoceste. Područje gdje prometni tok s ulazne rampe i glavni prometni tok dolaze u međusobnu interakciju poznato je pod nazivom nizvodno usko grlo [1]. Na Slika 1 prikazana je jedna takva situacija nizvodnog uskog grla (*engl. Downstream bottleneck*) blizu ulaza na autocestu i učinak preljeva prometa na lokalnu cestu.



Slika 1 - Mjesto formiranja uskog grla i efekti preljeva prometa [7]

Pri nastanku zagušenja na dionici autoceste pod utjecajem nizvodnog uskog grla stvara se zagušenje koje se zatim širi u obliku šok vala, unatrag, uz glavni tok autoceste suprotno smjeru prometnog toka. Kako u tim slučajevima dolazi do potrebe za smanjenjem brzine i narušavanja stupnja harmonizacije brzine na glavnom prometnom toku autoceste, dolazi do smanjenja faktora sigurnosti. Zagušenja se najčešće dešavaju zbog prevelike prometne potražnje tijekom vršnih sati, odnosno tijekom ranog jutra i kasnog poslijepodneva kada ljudi putuju na relaciji posao/škola/vrtić - dom. Međutim, pošto je promet stohastičke prirode te njegovo ponašanje ovisi o ponašanju sudionika, vrlo je teško predvidjeti kada će točno doći do zagušenja iako je moguće donekle predvidjeti gdje će doći do smanjenja propusnosti autoceste. Na urbanim područjima postoji problem širenja autoceste, odnosno najčešće ih više nije moguće širiti, a takvo je rješenje skupo za realizaciju te kasnije neekonomično s eksploatacijskog gledišta. Iz tog su se razloga problemi zagušenja prometnih tokova počeli intenzivnije razmatrati unutar domene ITS-a. ITS se može definirati kao holistička, upravljačka i informacijsko-komunikacijska nadgradnja klasičnog sustava prometa i prijevoza kojim se postiže znatno poboljšanje performansa, odvijanja prometa, učinkovitijeg prijevoza putnika i roba, sigurnosti prometa, udobnosti i zaštiti putnika te manjih onečišćenja okoliša. Osim toga cilja i na bitna poboljšanja za davatelje usluga, mrežne operatore, korisnike i društvo u cjelini [8].

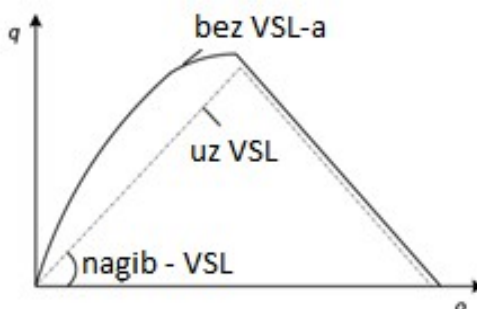
Upravljanje prometom na urbanim autocestama moguće je na osnovu nekoliko kriterija. Jedan od njih je sigurnost i upravljanje sigurnošću prometa na autocestama koje postaje sve značajnije. Dodatni kriterij je upravljanje protočnošću prometa kako bi se smanjilo zagušenje. U smanjenju zagušenja pomoću upravljanja protočnošću susrećemo se s dva glavna problema koja uzrokuju zagušenje, a to su priljevni tokovi te nehomogene brzine vozila u glavnom toku. Za rješavanje prometnih problema na autocestama posebno efikasnim pokazala su se napredna tehnološka rješenja kao što su primjerice:

- Strategije za smanjenje zagušenja poput upravljanja priljevnim tokovima urbanih autocesta (engl. *Ramp-metering*) gdje se upravlja količinom vozila na ulaznim rampama koja se priključuju na glavni tok urbane autoceste;
- VSLC kod kojeg se izravno regulira prometni tok vozila na urbanim autocestama izmjenom ograničenja brzine na VMS-u, a s ciljem smanjenja pojave šok valova [9].

Osnova rada ovakvih sustava trenutna je razmjena podataka prikupljenih od osjetila na prometnoj infrastrukturi. Da bi to bilo ostvarivo, potrebna je odgovarajuća informacijsko-

komunikacijska infrastruktura putem koje se podaci šalju, analiziraju te razmjenjuju između korisnika i pružatelja usluga unutar samog sustava.

Fokus ovog rada bit će na VSLC sustavima, odnosno na mijenjanju vrijednosti ograničenja brzina u odnosu na trenutnu prometnu situaciju korištenjem odgovarajućeg algoritma upravljanja. Sustavi promjenjivog ograničenja brzine (*engl. Variable Speed Limit – VSL*) koriste promjenjiva ograničenja brzine koje prikazuju na varijabilnim znakovima (*engl. Variable Messaging Sign*), te na taj način vrše upravljanje prometnim tokom. Pri pojavi zagušenja veliki problem predstavljaju nejednolike brzine kretanja vozila. U slučaju kada zbog dolaska vozila s priljevne rampe dolazi do preopterećenja dionice, postoji mogućnost stvaranja prometnog čepa. U tom se slučaju prometni zastoj širi unatrag uzduž urbane autoceste. To također dovodi do povećanja mogućnosti sudara jer na mjestima gdje vozila s velikim prilazećim brzinama dolaze do kraja prometnog reda ona moraju naglo smanjivati brzinu. Takva vožnja izaziva nepravilnosti u odvijanju prometnog toka te izaziva stres i frustraciju vozača jer im onemogućuje putovanje ujednačenom brzinom. VSLC sustav nakon instalacije vrši promjenu nad fundamentalnim dijagramom odgovarajuće sekcije na autocesti. Promjene na krivulji u osnovnom dijagramu protok ( $q$ ) – zauzeće ( $o$ ) s VSLC-om i bez njega prikazane su na slici 2.



Slika 2 - Nagib fundamentalnog dijagrama prometnog toka bez VSL-a i s VSL-om [10]

### 3. Princip upravljanja promjenjivim ograničenjem brzine

VSLC sustav prvi put bio je predstavljen u Njemačkoj. S obzirom na poboljšanje protočnosti prometnice, postoje dva glavna principa implementacije VSLC sustava. Prvi pristup naglašava homogenizacijski efekt, odnosno, pomoću smanjenja razlike u brzinama između vozila posljedično proizvodi stabilniji te sigurniji prometni tok. Drugi pristup fokusira se na sprečavanje pojave ili rješavanje postojećih prometnih zastoja smanjujući brzinu nadolazećih vozila pomoću promjenjivog ograničenja brzine. Srednja brzina vozila smanjuje se ispod vrijednosti koje bi mogle prouzročiti kritičnu prometnu gustoću i prometno zagušenje [10]. Općenito se VSLC sustavi najčešće dijele u dvije grupe:

- VSLC sustavi zasnovani na vremenskim uvjetima koji se koristi na urbanim autocestama gdje su pojave magle, leda kiše ili drugih vremenski nepovoljnih uvjeta često utjecajan faktor na sigurnost prometnice i to na način da se prilikom pogoršanja vremenskih uvjeta do kritične točke smanjuje ograničenje brzine na prikladnu brzinu kako bi se smanjile mogućnosti nastanka incidentnih situacija (npr. pomoću algoritma ALINEA [2]), odnosno djeluju preventivno,
- VSLC sustavi zasnovani na zagušenjima koji kada volumeni i/ili brzine prođu određenu granicu aktiviraju upravljačku strategiju kojom se smanjuje ograničenje brzine.

Smanjenje brzine može se desiti automatski prema već određenom algoritmu upravljanja ili ručno preko centra za upravljanje autocestom. U ovom radu se analizira prvi pristup automatske promjene ograničenja brzine. Kao glavne operativne razloge uvođenja VSLC sustava na autocesti mogu se navesti:

- smanjenje vremena putovanja,
- pouzdanija vremena putovanja,
- smanjenje broja pada prosječne brzine glavnog toka,
- smanjenje emisije štetnih plinova,

- veća iskorištenost prometnih traka,
- ujednačeniji vremenski interval slijedenja,
- smanjenje broja incidentnih situacija.

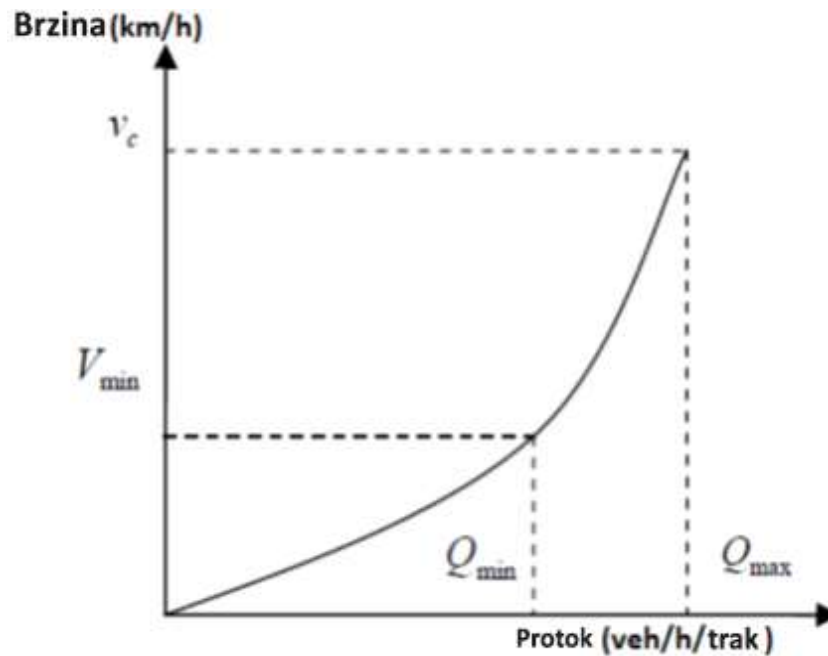
Kako bi VSLC sustavi zasnovani na zagušenjima (ili zauzeću) bili efikasni, potrebno je dobro predvidjeti kritičnu lokaciju. Ova strategija, makar bila stabilnija, ima također i nedostatak da je potrebno uložiti mnogo resursa i znanja kako bi se mogle dobro odrediti kritične vrijednosti za odabranu sekciju autoceste. Osim toga, mora postojati svijest o mogućem pomaku stvarne kritične točke samog prometnog toka zbog promjene vremenskih uvjeta na cesti ili povećanjem relativnog udjela teretnih vozila na dionici ceste [11]. Da bi se doskočilo ovim problemima, može se koristiti pristup evaluacije kritičnih uvjeta na cesti prometnim mjerenjima dobivenih putem raznih osjetila u stvarnom vremenu. Ovaj pristup se fokusira na kritičnim vrijednostima autoceste, vrlo slično načinu funkcioniranja metode upravljanja priljevnim tokovima. Ova metoda se pokazala veoma preciznom pri procjeni kritične vrijednosti zauzeća autoceste na lokacijama sa značajnim razlikama u kritičnom zauzeću. Ovakav pristup, potpomognut algoritmima odlučivanja i prilagođenim modulom procjene kritičnih točaka, koristi se u većini VSLC sustava kako bi se aktivirali u pravom trenutku [11]. Ovim načinom se izbjegava potreba za zamornim umjeravanjima sustava u različitim uvjetima. Razlog tome praćenje je uvjeta stvarnog prometnog toka.

Iako se u praksi koristi veći broj različitih algoritama za upravljanje, u sklopu ovog rada napravljena je usporedba učinka korištenja 3 različita algoritma o kojima će više govora biti u idućem poglavlju. Također, njihovi će učinci biti prikazani u poglavlju rezultata.

## **4. Opis odabranih algoritama za upravljanje promjenjivim ograničenjem brzine**

Već je spomenuto kako se VSLC može podijeliti u dvije implementacijske grupe. U prvu grupu ulazi promjena ograničenja brzine na osnovu odluka operativnog osoblja autocesta. Taj se način upravljanja većinom koristi u slučaju sigurnosnih opasnosti kao što su prometne nesreće, gusta magla, mokre ceste i slično te on nije u okviru ovog rada. Druga skupina uključuje reaktivne VSLC regulatore koji mijenjaju ograničenje brzine s obzirom na stvarno stanje na autocesti utvrđeno pomoću senzora. Na osnovu podataka prikupljenih na osjetilima, VSLC algoritmi izračunavaju odgovarajuća ograničenja brzine. Ovaj se način upravljanja većinom koristi kako bi se unaprijedile karakteristike toga prometa. Jednostavni reaktivni regulatori zasnivaju se na klasičnoj negativnoj povratnoj vezi. U nastavku su opisani reaktivni regulatori za VSLC. Prva dva temelje se na temeljnom odnosu protok-gustoća mapiranom prema vrijednostima brzine kao što je prikazano na slici 3, a treći koristi pravila neizrazite logike za izračunavanje granične vrijednosti brzine.





Slika 3 - Strogo rastuća funkcija  $f(Q)$  od  $(Q_{min}, Q_{max})$  do  $(V_{min}, V_c)$  [2]

#### 4.1. Regulator promjenjivog ograničenja brzine zasnovan na upravljanju tokom

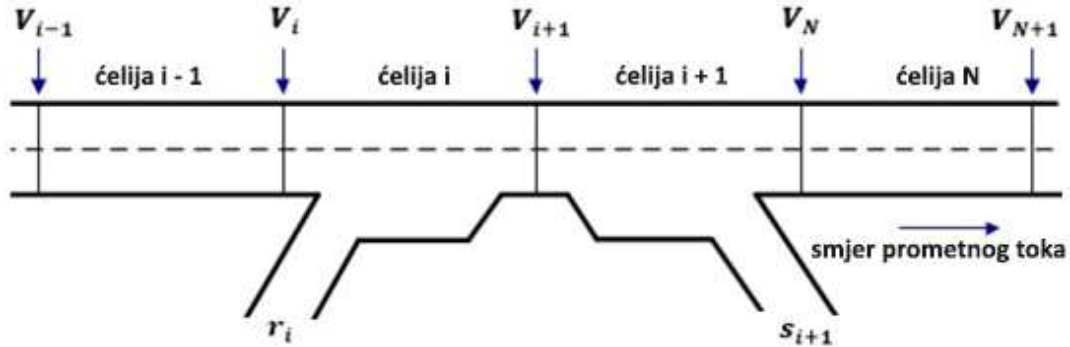
Regulator promjenjivog ograničenja brzine zasnovan na upravljanju tokom (engl. *Mainline virtual metering – MVM*) zasniva se na konceptu upravljanja priljevnim tokovima. Upravljanje priljevnim tokovima smanjuje zagušenja na autocesti ograničavanjem priljeva vozila. Često korišten algoritam za upravljanje priljevnim tokovima je ALINEA. To je lokalni pristup koji je jednostavan za primjenu i zasnovan na čistom integralnom djelovanju nadzora predstavljenom u formuli:

$$R(kT1) = R((k - 1)T1) + Kr [Od - O(kT1)], \quad (1)$$

gdje je

- $k$  vremenski korak,
- $R(kT1)$  je naredba upravljanja priljevnim tokovima,
- $R((k - 1)T1)$  je naredba upravljanja priljevnim tokovima prethodnog ciklusa,
- $Kr$  parametar je kontrole,
- $O(kT1)$  izmjerena je nizvodna zauzetost u tekućem ciklusu, a
- $Od$  željena je vrijednost nizvodne zauzetosti koja se obično bira blizu kritične zauzetosti  $O_c$ .

Ovaj pristup upravljanju priljevnim tokovima može se generalizirati pomoću jednostavnog algoritma regulatora ograničenja brzine na osnovu temeljnog odnosa protoka i gustoće. Za ovu generalizaciju odjeljak  $i$  kontrolirane autoceste smatra se virtualnom ulaznom rampom odjeljka  $i+1$  kao što je to prikazano na slici 4.



Slika 4 - Ilustracija odsjeka jednosmjerne autoceste podijeljene u N dijelova [3]

Jednaka integralna strategija kao u slučaju upravljanja priljevnim tokovima koristi se za regulaciju protoka  $Q_i$  od odsjeka  $i$  do odsjeka  $i+1$ . Protok  $Q_i$  određen je nejednadžbama u nastavku:

$$Q_i(kT_1) = \begin{cases} Q_{\max}, & \text{ako je } \bar{Q}_i(kT_1) \geq Q_{\max} \\ Q_{\min}, & \text{ako je } \bar{Q}_i(kT_1) \leq Q_{\min}. \\ \bar{Q}_i(kT_1), & \text{u suprotnom} \end{cases} \quad (2)$$

Jednadžba (3) predstavlja regulaciju protoka na određenom dijelu autoceste gdje je  $k_v$  parametar regulatora,  $\rho_i$  gustoća određenog dijela autoceste, a  $\rho_d$  je željena gustoća.

$$\bar{Q}_i(kT_1) = Q_i((k-1)T_1) + k_v \sum_{m=1}^{N_c} [\rho_d - \rho_{i+1}((k-1)N_c T_0 + mT_0)] \quad (3)$$

Upravljanje protokom opisano jednadžbama (2) i (3) ne može se provesti kao u slučaju upravljanja priljevnim tokovima jer je u ovom slučaju upravljačka varijabla ograničenje brzine. Stoga, kako bi se regulirala brzina prometa umjesto gustoće prometa, komanda protoka mora biti pretvorena u komandu ograničenja brzine pomoću odnosa protok-brzina prikazanog na slici 3. Brzina protoka prometa u svakom odjeljku  $i$  mora biti ograničena kako slijedi:

$$V_{min} \leq V_i(kT_i) \leq V_{max}, \quad (4)$$

gdje je  $V_{max}$  maksimalna dopuštena brzina (često postavljena kao zadana granica brzine), a  $V_{min}$  najniža dopuštena brzina koju želimo primijeniti. Dakle,  $Q_{min}$  je postavljen kao protok koji odgovara  $V_{min}$ , a  $Q_{max}$  je protok koji odgovara kritičnoj gustoći (kapacitet protoka). Kapacitet protoka se obično ne postiže pri maksimalnoj dopuštenoj brzini [12] [13] [14]. Pretvorba  $f(Q)$  se zasniva na procijenjenoj vezi protok – gustoća za koju se smatra da je jednaka:

$$q = \rho V_f \exp\left[-\frac{1}{\alpha} \left(\frac{\rho}{\rho_c}\right)^\alpha\right], \quad (5)$$

gdje je  $V_f$  brzina protoka,  $\rho_c$  kritična gustoća, a eksponent  $\alpha$  se procjenjuje direktno na mreži ili odvojeno od mreže koristeći stvarne podatke prometa. Kada je  $C_i$  (varijabla reguliranja svakog kontroliranog dijela autoceste) neaktivna, željeno ograničenje brzine je postavljeno ograničenje brzine i-tog dijela autoceste. Ako je  $C_i$  aktivna, odjeljak  $i$  zahtjeva proračun novog ograničenja brzine. Nova vrijednost ograničenja brzine može biti određena funkcijom:

$$\bar{V}_i(kT_i) = f(Q_i(kT_i)). \quad (6)$$

Međutim,  $\bar{V}_i$  dobiven funkcijom (6) može dovesti do nesigurnih promjena brzine. Za praktične svrhe koristi se slijedeće ograničenje brzine  $V_i$ :

$$V_i(kT_1) = \begin{cases} V_i((k-1)T_1) - C_v, & \text{ako je } \bar{V}_i(kT_1) \leq V_i((k-1)T_1) - C_v \\ V_{i+1}(kT_1) + C_v, & \text{ako je } \bar{V}_i(kT_1) \geq V_{i+1}(kT_1) + C_v \\ \bar{V}_i(kT_1), & \text{u suprotnom} \end{cases}, \quad (7)$$

gdje je  $C_v$  pozitivna konstanta koja predstavlja maksimalnu dozvoljenu promjenu ograničenja brzine (obično 10 km/h), a  $\bar{V}_i(kT_1)$  je trenutna prosječna brzina protoka prometa u odjeljku  $i$  [12].

## 4.2. Jednostavni proporcionalni regulator ograničenja brzine

Jednostavni proporcionalni regulator ograničenja brzine razvijen je kako bi se MVM, koji je prethodno opisan, učinio još jednostavnijim. Upravljanje priljevnim tokovima obično je aktivno kada je volumen glavnog toka prometa vrlo visok. Sukladno tome, fiksno odabrano željeno zauzeće ima smisla. Povrh toga, dinamična varijabla ograničenja brzine potrebna je samo kada se dogodi poremećaj kao što je nesreća ili val s povećanom gustoćom prometa. U takvoj je situaciji teško predvidjeti željenu gustoću zbog problema poput volumena prometa (pad kapaciteta) i geometrije autoceste [13]. Iz tog je razloga preporučljivo imati regulator brzine ograničenja koji prikladno reagira na promjene u nizvodnoj gustoći umjesto u fiksnoj željenoj gustoći.

Pretpostavimo da je segment autoceste podijeljen u  $N$  kao što je prikazano na slici 4 te da se poremećaj dogodio u najnižvodnijem odjeljku  $N$ . Reguliranje brzina dijelova koji su uzvodno od odjeljka  $N$  bili bi aktivni i reagirali bi na nizvodnu promjenu gustoće. Stoga, regulator brzine donosi odluke temeljene na aktivnostima varijable regulatora  $C_i$  i izračunava novu graničnu vrijednost [15]. Agregirane varijable stanja prometa prikupljene su iz sustava nadzora prometa. Procijeniti se mogu i varijable stanja prometa. Svaki regulator generira naredbene signale svakih  $T_1$  sekunda gdje je  $T_1 = N_c T_0$ ,  $T_0$  vrijeme diskretizacije, a  $N_c$  je pozitivan cijeli broj (engl. *positive design integer*). Neka  $I_v$  označava skup indeksa cestovnih sekcija u kojima se regulira ograničenje brzine. Neka  $C_i$  označava varijablu regulatora svakog dijela ( $i \in I_v$ ). Regulator generira željeno ograničenje brzine  $\bar{V}_i$  za odjeljak  $i$  kao što je to prikazano na slici 3. Da bi se utvrdilo kada je  $C_i$  aktivna ili ne, gustoća u sljedećem odjeljku  $\rho_{i+1}$  treba se mjeriti za konkretan trenutak  $nT_1$ . Sljedeće odluke prate tri slučaja:

- prvi slučaj, ako je  $\rho_{i+1}(kT_1) \geq (1 + \Delta^+)\rho_c$ , gdje je  $\Delta^+$  parametar pozitivne povratne veze, a  $\rho_c$  je kritična gustoća, tada je  $C_i$  aktivna,
- drugi slučaj, ako je  $\rho_{i+1}(nk) \leq (1 + \Delta^-)\rho_c$ , gdje je  $\Delta^-$  pozitivna (negativna?) povratna veza, tada je  $C_i$  neaktivna,
- treći slučaj, ako niti jedna od prethodne dvije nejednakosti nije zadovoljena  $C_i$  zadržava svoj status kao prethodni vremenski interval regulatora.

Brzina protoka prometa u svakom odjeljku  $i$  autoceste ograničena je sa (4). Kao što je već spomenuto, ako  $C_i$  nije aktivna, ograničenje brzine o svakom odjeljku ostaje identično zadanom ograničenju brzine. Aktivno stanje  $C_i$  zahtjeva izračun nove vrijednosti ograničenja

brzine. U tom slučaju jednačba (7) se koristi za određivanje nove vrijednosti ograničenja brzine. Ako je  $C_i$  neaktivna u trenutku  $(k - 1)T_1$ , a postane aktivna u trenutku  $T_1$ , ograničenje brzine dano je kao:

$$V_i(kT_1) = \begin{cases} V_{i+1}(kT_1) + C_v, & \text{ako je } \bar{V}_i(kT_1) \geq V_{i+1}(kT_1) + C_v \\ \bar{V}_i(kT_1) = f(\rho_{i+1}(kT_1)v_{i+1}(knT_1)), & \text{u suprotnom} \end{cases} \quad (8)$$

Koristeći osnovnu jednačbu protoka prometa  $Q = \rho v$ ,  $f(\rho_{i+1}(kT_1)v_{i+1}(kT_1))$  funkcija (8) može se izraziti kao funkcija  $f(Q)$ . Tada se  $\bar{V}_i(kT_1)$  može odrediti odnosom  $V = f(Q)$  prikazanim na slici 3.

### 4.3. Upravljački algoritam zasnovan na neizrazitoj logici

Algoritmi koji se zasnivaju na pravilima naširoko se koriste u VSLC aplikacijama zbog svojih razumljivosti i jednostavnosti primjene. U algoritmima zasnovanim na pravilima ograničenja brzine određena su na osnovu unaprijed postavljenih teza i formulacija koje onda određuju ponašanje algoritama. Glavni problem algoritama ove kategorije je što su većina predloženih u literaturi relativno gruba za reguliranje brzine. Gruba priroda tih algoritama inducirana je korištenjem strogih pravila na kojima se temelje pravila regulatora. Gruba pravila ne mogu adekvatno predstavljati prometne situacije zbog nelinearne i stohastičke prirode tokova prometa. VSLC koje se zasniva na neizrazitoj logici koristi neizrazite skupove koji provode odvajanje domena atributa u nekoliko preklapajućih intervala. Takav pristup zasniva se na korištenju neizrazite logike, a povoljniji je za VSL regulator zbog slijedećih razloga:

- ne zahtjeva matematički model, zbog toga nije ograničen točnošću modela,
- može koristiti nepotpune i neprecizne informacije, time se smanjuje osjetljivost sustava prema nekonzistentnom dotoku ulaznih podataka,
- na izlazu regulatora se dobiva blaža oscilacija vrijednosti,
- pogodnija je za kombinaciju objektivnog i subjektivnog znanja,
- jednostavna je za podešavanje mijenjanjem težinskog faktora i parametara pripadajućih funkcija.

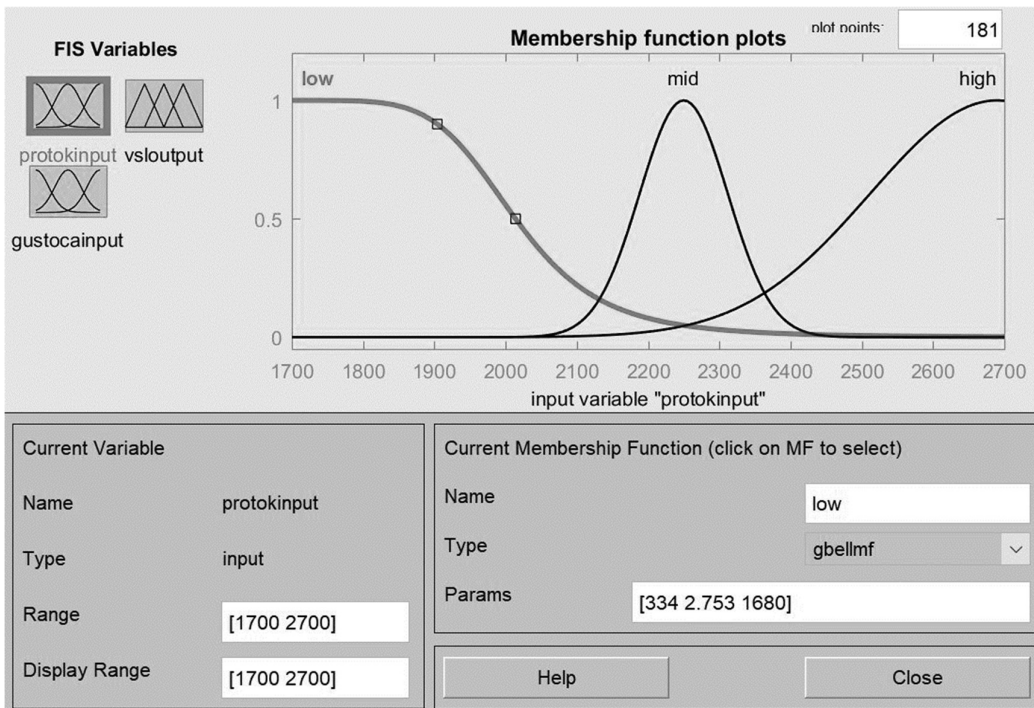
U ovom diplomskom radu upravo je algoritam zasnovan na neizrazitoj logici odabran kao treći algoritam pomoću kojeg je napravljen upravljački algoritam VSLC sustava. Opisani način upravljanja predložen je u radu [5], odakle je i preuzet uz prilagodbu područja djelovanja i vrstu ulaznih varijabli kako bi odgovaralo modelu korištenom u ovom diplomskom radu. Ova vrsta regulacijskog sustava zasniva se na tri glavna koraka. U prvom koraku pretvaraju se izrazite vrijednosti, koje se nalaze na ulazu kontrolera, te se pretvaraju u skup neizrazitih varijabli definiranih funkcijama pripadnosti. Kao ulazne varijable uzimaju se dvije vrijednosti prometnih parametara, protok i gustoća. Drugi korak zove se proces zaključivanja. U tom koraku procjenjuju se sva pravila paralelno na osnovu neizrazite teorije skupova koja opisuje tumačenje logičkih operacija. Izlaz ovog koraka kombinacija je rezultata zaključivanja ovih pravila kroz proces agregacije. Konačni korak provodi pretvaranje produkata agregacije iz neizrazitih u izrazite te konačno u egzaktnu vrijednost koju dobivamo na izlazu upravljačkog algoritma. Na slici 5 prikazana je shema neizrazitog sustava zaključivanja za VSLC predložena u [5]. Pravila koja određuju kontroler zasnovan na neizrazitoj logici su slijedeća. Bellova krivulja koristi se za opis pravila protoka, a tri trokuta koriste se za nisko, srednje i visoko područje gustoće, što je prikazano na slikama Slika 5, Slika 6 i Slika 7. Glavni dio upravljačkog sustava nalaze se pravila, koja se nazivaju bazom znanja, a osmišljena su kao operatori iskustva, ekspertnog mišljenja i sustavskog znanja. Pravila koja pripadaju lingvističkom dijelu upravljača mogu se izraziti u formatu koji slijedi:

AKO <premisa> ONDA <posljedica>.

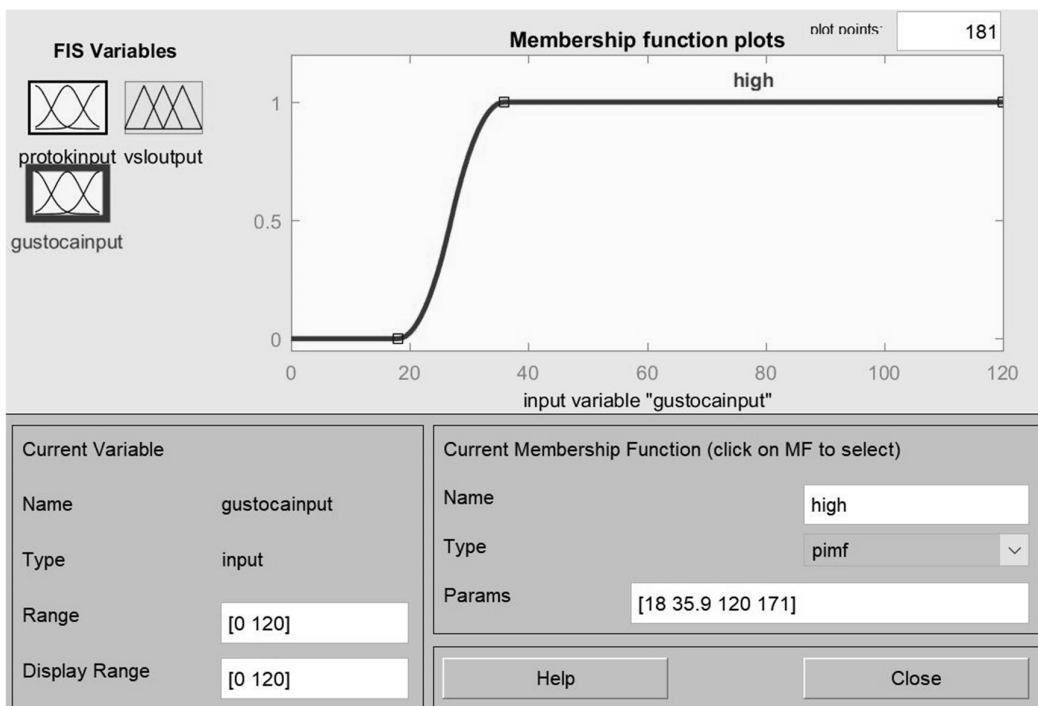
Također postoji mogućnost kombinacije nekoliko premisa i operatora, a oblik funkcije je u tom slučaju:

AKO <premisa 1> I/ILI <premisa 2> I/ILI <premisa 3> .... ONDA <posljedica>.

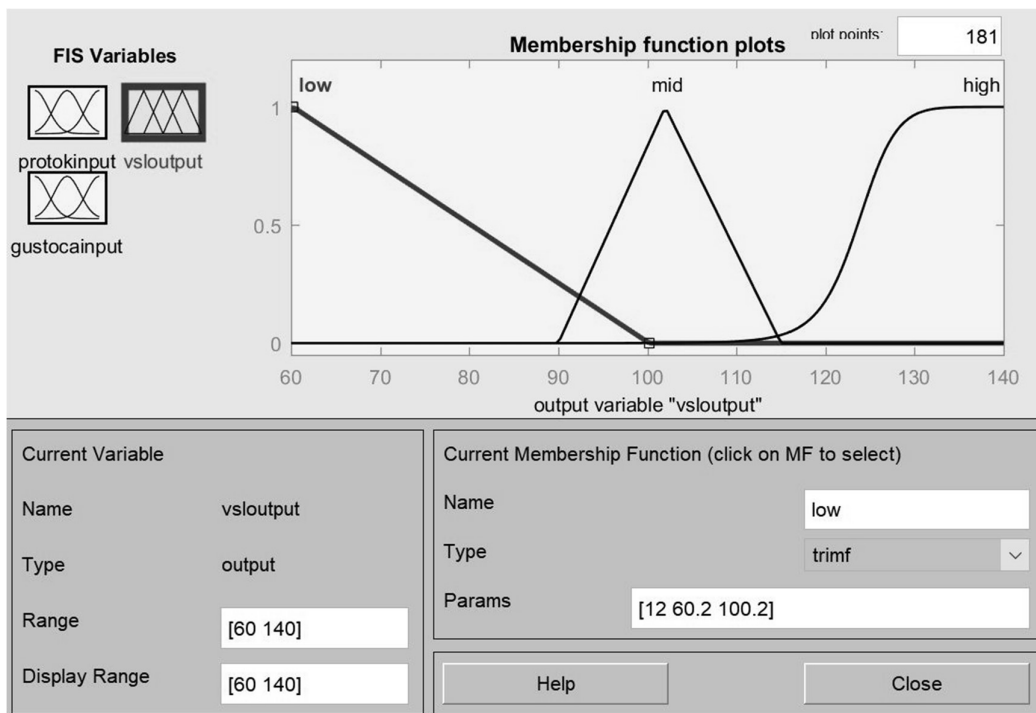
Sva pravila se ocjenjuju u neizrazitom setu teorija koje opisuju interpretaciju logičkih operacija poput komplementa, presjeka i unije skupova. Pravila korištena u ovom algoritmu dana su u tablici Tablica 1. Iz pravila četiri vidljivo je kako iznos protoka utječe na izlaznu vrijednost upravljačkog algoritma sa duplim faktorom, time se pretpostavlja kako visoke razine protoka pridonose stvaranju uskog grla. Odnosno, svaki težinski faktor dodijeljen određenom setu pravila predstavlja prioritet dodijeljen svakom od pravila. Veći faktor koji je dodijeljen na pravila tri i četiri postavlja veći prioritet pri postizanju željenog efekta VSLC regulatora.



Slika 5 – Funkcija pripadnosti varijable protoka



Slika 6 – Funkcija pripadnosti varijable gustoće



Slika 7 - Funkcija pripadnosti izlazne varijable

Tablica 1 - Baza pravila neizrazitog VSL algoritma

BR. PRAVILA	FAKTOR TEŽINE	PREMISA	POSLJEDICA
1	1.0	AKO protok = nizak	ONDA ograničenje brzine = malo
2	1.0	AKO protok = srednji	ONDA ograničenje brzine = srednje
3	2.0	AKO protok = visok	ONDA ograničenje brzine = visoko
4	2.0	AKO gustoća = visoka	ONDA ograničenje brzine = visoko





reakcija i slično. Jednako vrijedi i za interakciju između entiteta. Entiteti u međusobnoj reakciji prate, osim postavljenih atributa, fizikalna pravila kretanja objekta. Makroskopske simulacije pak promatraju prometni tok, a zbog dovoljno poopćene razine promatranja mogu se smatrati fluidom koji se ponaša po pravilima mehanike fluida. VISSIM je alat koji se zasniva na mikroskopskom modelu simulacije, odnosno, kako je već spomenuto, na ponašanju jednog para vozila u toku uz pretpostavku da se takvo ponašanje može primijeniti na sva ostala vozila. Zbog toga se koriste parametri koji opisuju kretanje na razini svakog tipa vozila, a neki od njih su brzina, interval slijeđenja i razmak vozila [16]. VISSIM preko svog API sučelja omogućuje komunikaciju sa vanjskim programima što omogućuje upravljanje simulacijama tijekom njihovog izvođenja, pristup informacijama sa detektora i postavljanje ograničenja brzine za svaku od ćelija autoceste. Posljedično se time omogućuje implementacija algoritama i vršenje simulacijskih testiranja pomoću istog na osnovu rezultata dobivenih iz simulatora VISSIM.

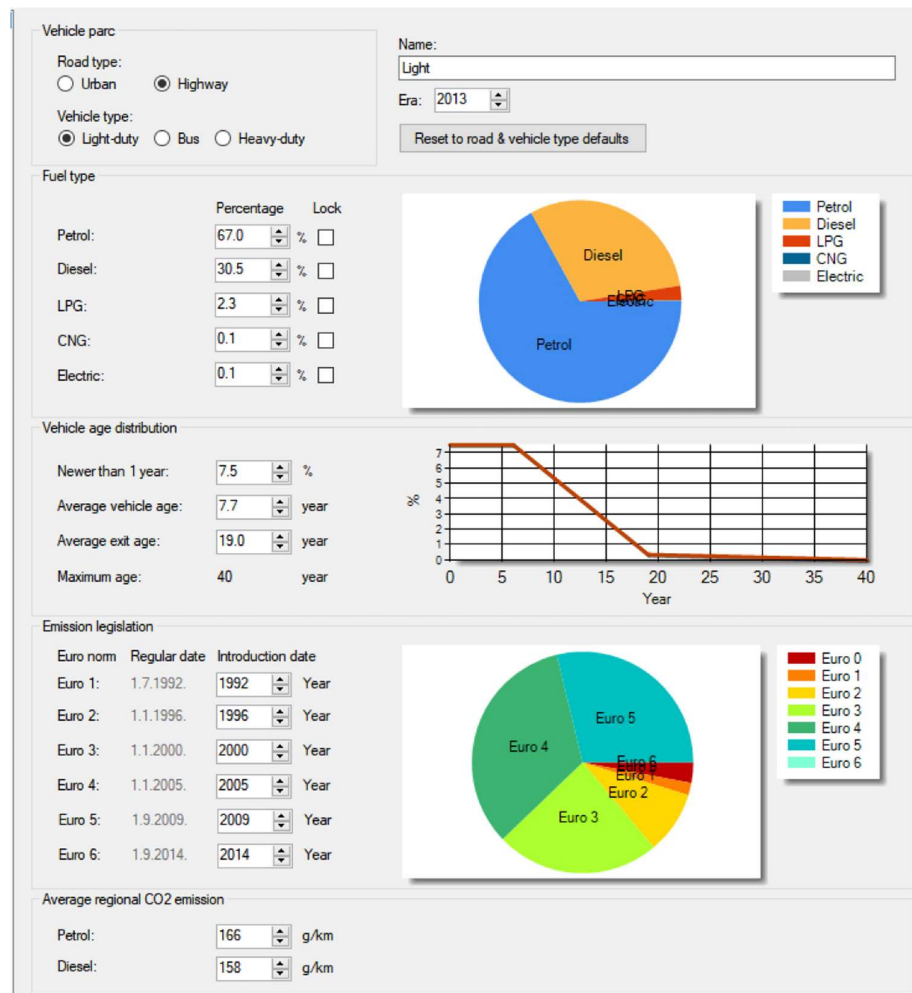
## **5.2. Simulator emisije štetnih plinova**

Emisije štetnih plinova postaju sve bitnije u prometnim studijama zahvaljujući postojanju potencijalnih načina smanjenja emisija primjenom prometnih metoda. Koristeći programski dodatak EnViVer, koji je zasnovan na VERSIT+ modelu emisije štetnih plinova, moguće je proučavati emisiju zagađenja kao posljedica prometa koji se odvijao tijekom simulacije. EnViVer je u mogućnosti izračunati emisije CO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub> i PM10 štetnih ispušnih plinova na osnovu podataka dobivenih iz simulacije koji se spremaju na računalo nakon svake uspješno izvršene simulacije u programskom paketu VISSIM. Osim izračuna emisije, EnViVer može grafički prikazati koncentracije emisije štetnih plinova i njihove vrijednosti na modelu korištenom u simulaciji. Pri tome koristi brzine, akceleracije, tipove vozila i količinu prometnog toka iz rezultata prometne simulacije te parametre vozila podešene u EnViVer programskom paketu kako bi izračunao konkretne emisije štetnih plinova. U ovom diplomskom radu odabrane su postavke dostupne u EnViVer programskom paketu iz 2016. godine kao parametri tipova vozila. Dostupni parametri su:

- vrste prometnice na kojoj se odvija simulacija (autocesta ili urbano područje),
- tip vozila za odabranu kategoriju koji odgovara podacima iz VISSIM simulatora (teški tip vozila, srednji tip vozilo i laki tip vozila, odnosno kamioni, autobusi i automobili),
- statistička raspodjela zastupljenosti goriva za odabrani tip vozila koji odgovara podacima iz VISSIM simulatora,

- distribuciju starosti vozila, gdje je vidljivo kako je prosječna starost automobila 7,7 godina, donja granica prosječne vrijednosti je 19 godina, a maksimalna starost 40 godina,
- raspodjela o legislaciji emisija, takozvani Euro (vidljivo je kako je najviše zastupljeno područja Euro 5, 4 i 3),
- podaci o prosječnoj emisiji CO<sub>2</sub>.

Primjer parametara je vidljiv na slici *Slika 9*.

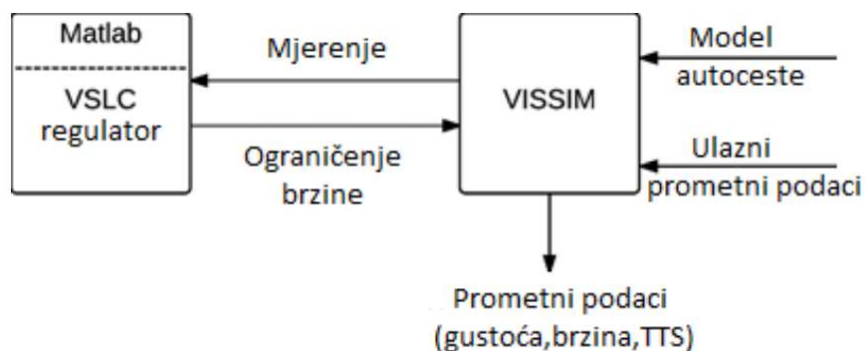


Slika 9 - Postavke dostupne u EnViVer programskom paketu iz 2016. godine

### 5.3. Povezivanje VISSIM-a i MATLAB-a

U svrhu testiranja upravljačkih algoritama za VSLC napravljen je, već spomenuti, model autoceste sa četiri ćelije unutar mikroskopskog simulatora VISSIM. Upravljački

algoritam implementiran je unutar MATLAB paketa, a oba alata povezana su preko COM sučelja čime je omogućena međusobna interakcija između dva programa. Time se omogućuje interakcija tijekom simulacije što je već ranije spomenuto. Simulacijom se potpuno upravlja pomoću programskog koda napisanog u MATLAB programskom paketu, a izvršava se u VISSIM-u. Podaci o prometnom toku prikupljaju se i računaju pomoću funkcija kreiranih u MATLAB-u koje pristupaju postavljenim sensorima preko spomenutog COM sučelja u VISSIM-u. Trenutne odluke o ograničenju brzine koje predlažu algoritmi VSLC-a izravno se šalju u VISSIM na pripadne VMS sustave. Na slici 10 Prikazana je blokovska shema simulacijskog okruženja za testiranje algoritama VSLC-a.



Slika 10 - Blokovska shema simulacijskog okruženja za testiranje algoritama VSLC-a

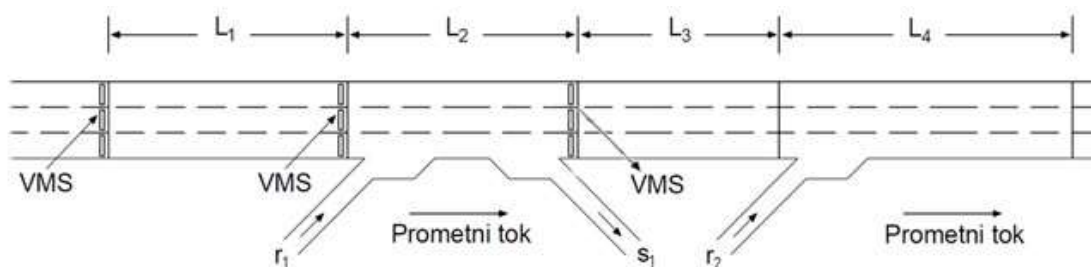
Proces izvršavanja simulacija za svaki od algoritma je isti, a počinje pokretanjem MATLAB skripte koja prvo inicijalizira COM sučelje preko kojeg poziva VISSIM i otvara model (*inpx*, *layx* i *sig* datoteke). Prva sadrži podatke o parametrima mikrosimulacijskog modela kao što su poveznice (engl. *links*) pomoću kojih je izrađen model, iznose zadane prometne potražnje, podatke o tipovima vozila, distribucije brzina pojedinog tipa vozila, model slijeđenja vozila, model prestrojavanja vozila itd.. Druga datoteka sadrži podatke o okolini koja se nalazi oko same prometne mreže kao što su npr. veličina radnog sučelja, povećanje pojedinog dijela mreže, izbor atributa u radnom sučelju itd.. Posljednja se učitava treća datoteka, nastavka *sig* koja sadrži informacije o svim signalnim grupama, detektorima i područjima mjerenja prometa. Nakon što su se sve datoteke učitale pokreće se inicijalizacija početnih atributa simulacije poput duljine trajanja simulacije, inicijalne brzine vozila, broj simulacija, sjeme simulacije (engl. *simulation seed*) i postavljanje parametara  $T$  i  $T_c$ . Pomoću različitih ulaznih

vrijednosti, odnosno parametra sjemena, mijenjaju se načini generiranja vozila tako da nisu uvijek isti tipovi vozila generirani u istom trenu te da vozila izlaze na raznim područjima urbane autoceste (silazna rampa ili glavni tok) i slično čime se osigurava stohastično ponašanje prometnog toka tj. sve se razlikuju po distribucijama tokova zavisno o ulaznoj vrijednosti navedenog parametra [3]. Nakon inicijalizacije pokreće se glavni dio petlje unutar koje se pokreće simulacija u VISSIM-u. Svaka iteracija u toj petlji pomakne simulaciju za jedan vremenski korak simulatora. Jedna iteracija navedene petlje odgovara trajanju koraka simulacije  $T_v$  u iznosu od 0,1 [s]. Ovom izvedbom dobiva se dojam kontinuirane simulacije jer se zbog računalne snage neprimjetno brzo odvija svaki korak. Unutar svakog simulacijskog koraka odvija se reakcija detektora u VISSIM-u na podražaje, odnosno registriraju vozila koja prolaze iznad njih. Impulsi dobiveni tim putem kontinuirano se pohranjuju unutar MATLAB-a u matricu predviđenu za detektorske impulse, a ovisno o tipu podatka prikupljenog sa detektora. Razlikujemo prisutnost vozila nad detektorom i brzinu kojom je vozilo prošlo detektor. Svakih 30 [s] (parametar  $T$ ) odvijaju se proračuni parametara toka i ograničenja brzine. Ukoliko se poklapa vremenska rezolucija sa vremenskim odsječkom, ulazi se u dio algoritma koji dohvaća spremljene podatke iz matrica i pomoću kreiranih funkcija izračunava gustoću, srednju brzinu i protok vozila za svaku ćeliju. Tako dobivene varijable služe kao osnova ocjene kvalitete i rad VSLC algoritma, a pohranjuju se u konačnu matricu rezultata algoritma. Svakih 300 [s] (parametar  $T_c$ ) dolazi se do aktivacije algoritma VSLC-a. VSLC dohvaća prethodno izračunate vrijednosti varijabli iz matrice rezultata te na osnovu njih i pravila algoritama, koje su u ovom slučaju SPSC (engl. *Simple proportional speed controller*) i MVM regulatora određeni u obliku formula, a u slučaju regulatora zasnovanog na neizrastoj logici određeni su pomoću seta pravila opisanih u prethodnom poglavlju. Vrijednost ograničenja brzine se također bilježi u matrici rezultata, a cijeli proces se ponavlja tijekom simulacije. Kada simulacije dođe do svog kraja, svi podaci se spremaju na disk, proces počinje ponovo za novu simulaciju, a traje do zadanog broja simulacija. U ovom diplomskom napravljeno je preko 200 simulacija, a rezultati su uzeti iz zadnjeg skupa od 10 simulacija za svaki od 3 algoritama i slučaj bez upravljanja nad kojima će se vršiti usporedba.

## 5.4. Prometni model i postavke

Pomoću mikroskopskog simulatora VISSIM, tvrtke PTV VISSIM, napravljen je model autoceste s tri prometne trake na glavnom toku te dvije ulazne i jedne izlazne rampe. Upravljačka logika za svaki od algoritama VSLC-a implementirana je i pokretana u MATLAB programskom paketu čija je komunikacija sa simulatorom omogućena pomoću sučelja VISSIM COM. Na taj se način omogućuje upravljanje prometnom simulacijom pomoću programskog koda napisanog u MATLAB paketu. Posljednji korišten programski alat bio je EnViVer, koji je koristio za izračun emisija štetnih plinova i koji je bio dobiven kao dodatak programskom paketu VISSIM.

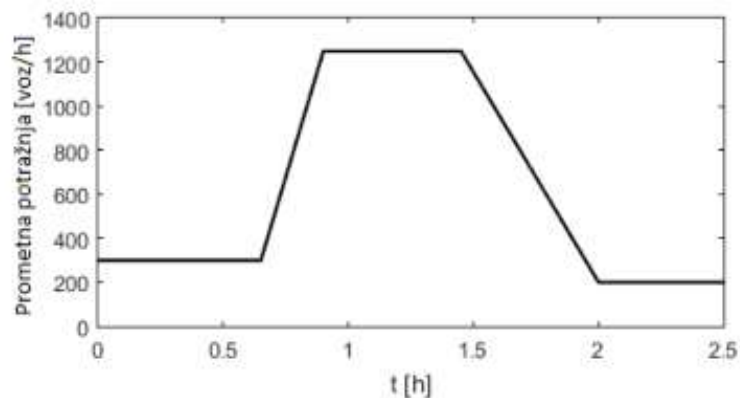
Model autoceste koji je preuzet iz izvora [3] podijeljen je na četiri ćelije. Raspored ćelija označen je na slici 11 gdje je prikazana skica modela urbane autoceste korištenog u simulaciji. U prve tri ćelije vrše se promjene ograničenja brzine s obzirom na ćeliju nizvodno, odnosno u smjeru odvijanja prometa (gledajući sa lijeva na desno). Pošto ćelija četiri nema nastavak na slijedeću ćeliju, ne postoje podaci u stvarnom vremenu o prometnoj situaciji te zato nije moguće izvršiti promjene ograničenja brzine unutar iste. Duljine ćelija, počevši od ćelije jedan pa do ćelije četiri su 1 [km], 800 [m], 700 [m] i 2 [km]. Ćeliji dva ima ulaznu rampu  $r_1$  i izlaznu rampu  $s_1$  dok se preostala ulazna rampa  $r_2$  nalazi na ćeliji četiri. Protok vozila na  $r_1$  i glavnom toku u prosjeku je povećan za 10% u odnosu na model iz [3].



Slika 11 - Skica modela urbane autoceste korištenog u simulaciji

VMS za prikaz promjenjivog ograničenja brzine nalaze se na početku svake ćelije, osim ćelije L4. Prometni tok u slučaju simulacijskog testiranja u ovom radu čine automobili (oko 96%), teretna vozila (oko 2%) i autobusi (oko 2%). Glavni tok ima konstantnu prometnu potražnju od 4.200 [voz/h], od toga 95% prometa ostaje na glavnom toku dok ostali silaze na izlaznoj rampi  $s_1$ . Isto je i s prvom ulaznom rampom gdje je prometni tok konstantan i iznosi

1.350 [voz/h]. Ulazni tok vozila na drugoj ulaznoj rampi mijenja se tijekom simulacije prema funkciji koja je prikazana na grafikonu vidljivom na slici 12.



Slika 12 - Promjena toka vozila na drugoj ulaznoj rampi

Maksimalna vrijednost opterećenja postiže se oko prvog sata simulacije i traje otprilike pola sata. Taj vremenski interval se označava kao  $t_k$  (*t-kritično*). Vrijednost prometne potražnje za taj period iznosi 1.250 [voz/h]. Ovakvim podešavanjem prometne potražnje potencirano je stvaranje prometne gužve u području oko ulazne rampe  $r_2$ . Zagušenje se postepeno širi glavnim tokom unatrag prelijevajući se u ćeliju  $L_3$  te stvara poremećaj u normalnom odvijanju prometa. Ovako stvorena prometna situacija predstavlja glavni test za implementirane VSLC regulatore postavljene u ćelijama  $L_1$ ,  $L_2$  i  $L_3$ . Umjeravanje prometnog modela nije bila rađena niti se to smatra potrebnim zbog teoretske prirode samog modela, odnosno ne predstavlja reprodukciju realne okoline za koju se traži varijantno rješenje, već je cilj uvidjeti razlike između upravljanja uz pomoć algoritama nasuprot slučaja bez upravljanja ograničenjem brzine. Bitno je naglasiti kako se pokušalo stvoriti što realniju situaciju priključivanja te isključivanja vozila na i s glavnog toka. Način na koji vozila ulaze i izlaze s glavnog toka ovisi o nekoliko bitnih parametara kao što su interval slijeđenja vozila, najveća vrijednost ubrzanja pojedinih tipova vozila i parametri kod promjene prometnih traka. Kako bi simulacija bila što vjernija realnim uvjetima, podešeni su parametri koji su model približili stvarnom ponašanju vozila na autocesti u svrhu dobivanja što relevantnijih i vjernijih rezultata. Praćenje vozila podešeno je na Wiedemann 99 model. Kao bitniji parametri Wiedemann 99 modela mogu se istaknuti udaljenosti između vozila tijekom zastoja u iznosu od 1,5 [m], vremenski interval slijeđenja od

0,9 [s], varijacije slijedenja koje mogu biti i do 4 metra, oscilacije akceleracije do 0,25 [ $m/s^2$ ], akceleracija s mjesta do 2,5 [ $m/s^2$ ] i akceleracija pri brzini od 80 [km/h] iznosi 1,5 [ $m/s^2$ ]. Svi parametri Wiedemann 99 modela prikazani su na slici 13, parametri promjene trake prikazani su na slici 14, a parametri bočnih radnji prikazani su na slici 15.

The screenshot shows a software interface for configuring the Wiedemann 99 car following model. It includes tabs for 'Following', 'Lane Change', 'Lateral', and 'Signal Control'. The 'Following' tab is active, showing various distance and attention parameters. The 'Car following model' section is expanded, displaying a dropdown menu set to 'Wiedemann 99' and a table of model parameters.

Parameter	Value	Unit
CC0 (Standstill Distance):	1.50	m
CC1 (Headway Time):	0.90	s
CC2 ('Following' Variation):	4.00	m
CC3 (Threshold for Entering 'Following'):	-8.00	
CC4 (Negative 'Following' Threshold):	-0.35	
CC5 (Positive 'Following' Threshold):	0.35	
CC6 (Speed dependency of Oscillation):	11.44	
CC7 (Oscillation Acceleration):	0.25	$m/s^2$
CC8 (Standstill Acceleration):	3.50	$m/s^2$
CC9 (Acceleration with 80 km/h):	1.50	$m/s^2$

Slika 13 - Parametri Wiedemann 99 modela



Following Lane Change Lateral Signal Control

General behavior: Slow lane rule

Necessary lane change (route)	Own	Trailing vehicle
Maximum deceleration:	-4.00 m/s <sup>2</sup>	-3.00 m/s <sup>2</sup>
- 1 m/s <sup>2</sup> per distance:	300.00 m	100.00 m
Accepted deceleration:	-1.00 m/s <sup>2</sup>	-1.00 m/s <sup>2</sup>

Waiting time before diffusion: 60.00 s

Min. headway (front/rear): 0.50 m

To slower lane if collision time is above 15.00 s

Safety distance reduction factor: 0.60

Maximum deceleration for cooperative braking: -3.00 m/s<sup>2</sup>

Overtake reduced speed areas

Advanced merging

Consider subsequent static routing decisions

Cooperative lane change

Maximum speed difference: 10.80 km/h

Maximum collision time: 10.00 s

Lateral correction of rear end position

Maximum speed: 3.00 km/h

Active during time period from 1.00 s until 10.00 s after lane change start

Slika 14 - Parametri promjene trake

Following Lane Change Lateral Signal Control

Desired position at free flow: Middle of lane

Keep lateral distance to vehicles on next lane(s)

Diamond shaped queuing

Consider next turning direction

Collision time gain: 2.00 s

Minimum longitudinal speed: 1.00 km/h

Time between direction changes: 0.00 s

Default behavior when overtaking vehicles on the same lane

Overtake on same lane	Minimum lateral distance
<input checked="" type="checkbox"/> On left	Distance standing: 1.00 m at 0 km/h
<input type="checkbox"/> On right	Distance driving: 1.00 m at 50 km/h

Slika 15 - Parametri bočnih radnji

Svaka iteracija simulacije traje 9.000 [s], odnosno 2,5 [h]. Simulacija tijekom jedne iteracije ima korak od 0,1 [s] te je time omogućena precizna detekcija vozila na implementiranim detektorima unutar modela. Prikupljeni podaci zatim se akumuliraju unutar MATLAB-a i svakih 30 [s] te se na osnovu njih računaju potrebne varijable koje opisuju prometni tok (gustoća, brzina i protok), a koje se zatim spremaju u konačnu matricu rezultata. Gustoća se zasniva na omjeru razlike broja ulaznih i izlaznih vozila u svakoj ćeliji i duljine ćelije. Ta vrijednost pribraja se gustoći u ćeliji iz prethodnog intervala uzorkovanja. Izraz za iterativni postupak izračuna gustoće za  $i$ -tu ćeliju izgleda:

$$\rho_i^t = \rho_i^{t-1} + \left( \frac{N_{ulazi}^t - N_{izlazi}^t}{l_i} \right), \quad (9)$$

gdje su:

- $\rho_i^t$  - trenutna gustoća u  $i$ -toj ćeliji [km/voz/trak],
- $\rho_i^{t-1}$  – gustoća prije u  $i$ -toj ćeliji [km/voz/trak],
- $N_{ulazi}^t$  – broj ulaznih vozila u  $i$ -tu ćeliju,
- $N_{izlazi}^t$  – broj izlaznih vozila iz  $i$ -te ćelije,
- $l_i$  – duljina  $i$ -te ćelije [km].

Izraz 9 predstavlja zadovoljavajuću točnost izračuna gustoće iz razloga što u VISSIM-u svi detektori rade idealno, odnosno ne postoje greške mjerenja. U stvarnom okruženju ovaj pristup ima nedostatke zbog stvarne greške detektora koju nije moguće izbjeći. Nakon dužeg akumuliranja greška bi mogla biti prevelika te je formulu potrebno prilagoditi ili potpuno promijeniti pristup određivanja gustoće toka. Ovo je samo nota koja može poslužiti za buduća istraživanja jer se ovaj rad nije bavio tematikom realne implementacije tehnike mjerenja gustoće. Vidljivo je kako formula izračuna toka ima ukupnu gustoću izmjerenu sa senzora pa je tako potrebno rezultat podijeliti s brojem traka u prometnici kako bi se dobila gustoća po prometnoj traci koja se koristi u algoritmima.

Srednja brzina predstavlja kvantitativnu mjeru koja dobro opisuje stanje prometnog toka. U ovom radu izračun srednje brzine predstavlja aritmetičku sredinu prosječne brzine na ulazu u ćeliju i izlazu iz iste ćelije:

$$\bar{v}_i^t = \left( \frac{\frac{\sum_n v_n}{n} + \frac{\sum_m v_m}{m}}{2} \right), \quad (10)$$

gdje su:

- $\bar{v}_i^t$  – srednja brzina u ćeliji  $i$ ,
- $\frac{\sum_n v_n}{n}$  – suma brzina detektiranih vozila na detektorima na ulazu u  $i$ -tu ćeliju izmjerena unutar vremenskog intervala  $\langle t - 1, t \rangle$  te podijeljena s brojem detektiranih vozila  $n$ ,
- $\frac{\sum_m v_m}{m}$  – suma brzina detektiranih vozila na detektorima na izlazu  $i$ -te ćelije izmjerena unutar vremenskog intervala  $\langle t - 1, t \rangle$  te podijeljena s brojem detektiranih vozila  $m$ ,
- $\langle t - 1, t \rangle$  - vremenski interval između svakog izračuna prometnih parametara iznosi 30 [s].

Izraz 10 ima jedan nedostatak. U slučaju kada nema vozila, a dešava se na početku ili na kraju ćelije, unutar intervala  $\langle t - 1, t \rangle$  jedan od izvora u brojniku poprima vrijednost nula. Tako dobivena brzina ustvari je upola manja od stvarne jer se još dodatno cijeli izraz dijeli s dva. Kao notu za daljnji rad ostavlja se povećanje preciznosti mjerenja brzine tako da se implementira dodatna grupa detektora na sredini svake od ćelija. Prilikom kreiranja modela pokušalo se što više držati stvarnih mogućnosti i načina implementacije sustava koji je primjenjiv u stvarnoj situaciji, dakle sustav u kojem postoje ograničenja poput broja senzora, načina prikupljanja podataka i vrste podataka dostupnih sa senzora.

Protok na detektorima počiva na ukupnom broju detektiranih vozila dijeljeno s vremenom trajanja uzorkovanja  $\langle t - 1, t \rangle$ . Kako je to vrijeme kraće od jednog sata potrebna je prilagodba izraza kako bi se protok vozila prikazao u mjernoj jedinici [voz/h]. Nakon svakih pet minuta regulator za VSLC pristupa podacima brzine i gustoće te izračunava novo ograničenje brzine koju daje kao izlaznu vrijednost. MVM i SPSC regulator imaju oštro definirana pravila za određivanje novih ograničenja brzine na osnovu formula dok regulator zasnovan na neizrazitoj logici ima pravila u obliku skupova neizrazitih vrijednosti koje se zatim pomoću FIS paketa u MATLAB-u pretvaraju u konkretnu brojčanu vrijednost pomoću postupka pretvorbe neizrazite u izrazitu vrijednost (engl. *defuzzification*).

Osim spomenutih postavki simulatora i parametara modela dodatno je postavljeno ograničenje teretnih vozila i autobusa kako bi bile u skladu s prometnim zakonom za razliku od originalnog izvora modela. Problem se manifestirao prilikom predloženih ograničenja brzine koje su bile veće od 90 [km/h] (kod teških teretnih vozila), odnosno 100 [km/h] za autobuse. Ukoliko bi VSLC regulator postavio veću brzinu od toga, tada bi sva vozila poštivala tu brzinu te bi ubrzali preko 100 ili 90 [km/h]. Takvo ponašanje kamiona i autobusa nije prema prometnim pravilima pa su uvedene dodatne provjere unutar samog algoritma pri predlaganju novih ograničenja brzine. Tako se sada, ukoliko je predložena brzina veća od zakonski dopuštene, za autobuse i kamione postavlja posebno ograničenje brzine koje nikada ne prelazi zakonske maksimume unatoč ograničenju brzine koje algoritam predlaže. Osim toga, implementirana je i logika postepenog povećavanja ograničenja brzine iz ćelije u ćeliju. Naime, ukoliko bi se desila promjena ograničenja brzine u ćeliji  $L_3$  sa 130 [km/h] na 80 [km/h], a ćelija  $L_2$  ostane na 130 [km/h] nastala situacija predstavlja narušavanje cestovne sigurnosti zbog prevelike razlike u ograničenjima brzine. Zbog toga je dodan dio logike koji služi za provjeru i usklađivanje navedenog. Dakle, ukoliko bi se desilo navedeno stanje na ćeliji 3, algoritam bi u istoj vremenskoj iteraciji postavio ograničenje na ćeliju  $L_2$  od 90 [km/h], a na ćeliju  $L_1$  ograničenje od 100 [km/h] kako bi se zagladio skok ograničenja brzine i izbjegla nagla kočenja koja narušavaju sigurnost. Treba istaknuti kako se navedena situacija događa samo ukoliko algoritam ne predlaže dodatna ograničenja brzine na spomenutim ćelijama. Ukoliko algoritam postavi ograničenje na ćeliju 3 od 80 [km/h], a na ćeliju 2 ograničenje od 70 [km/h], tada se to ograničenje brzine naknadno ne mijenja, unatoč logici navedenoj ranije.

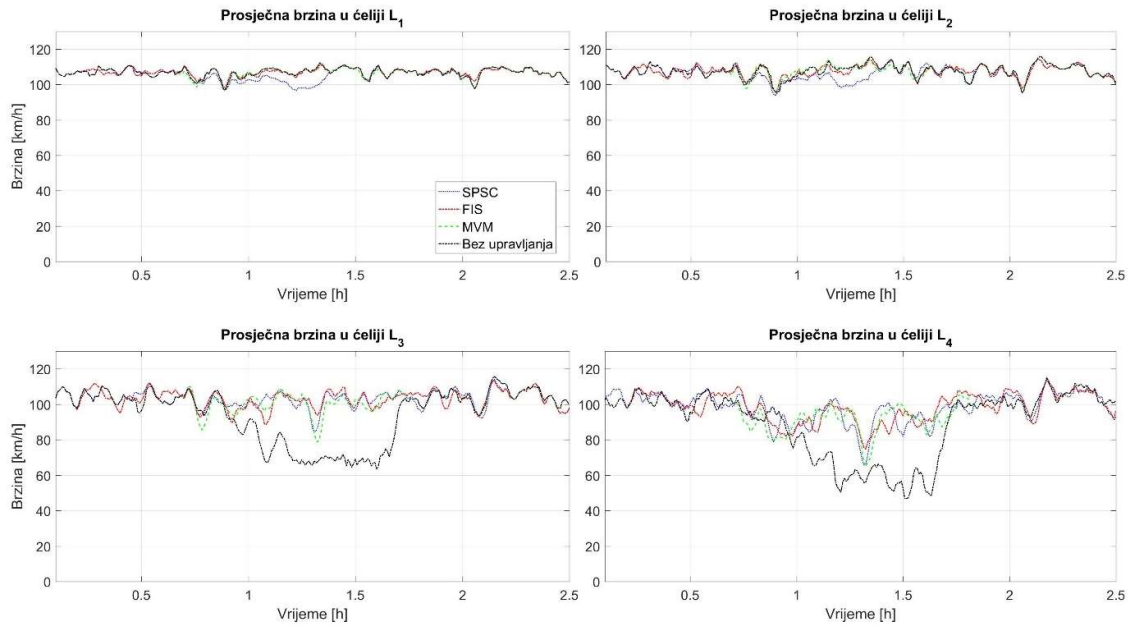
Nakon što se izvrši jedna iteracija simulacije od 9.000 [s], simulacija se prekida, svi podaci se pohranjuju na računalo i pokreće se nova simulacija. Proces se ponavlja sve dok se ne izvrši predeterminirani broj simulacija za pojedini algoritam. U slučaju ovog diplomskog rada broj simulacija za pojedini ciklus bio je 10. Uzmemo li u obzir da se radi o 3 upravljačka algoritma i stanjem bez upravljanja koje služi kao polazna točka usporedbe, dolazi se do brojke od 40 simulacija po ciklusu izvršavanja. Spremljeni se rezultati, nakon završetka glavnog ciklusa, prikazuju pomoću grafičkih alata dostupnih u MATLAB-u radi lakše analize. Prikaz svih rezultata, odnosno usporedba algoritama, bit će izneseni u sljedećem poglavlju.

## 6. Simulacijski rezultati

U ovom poglavlju bit će dana usporedba algoritama i prikaz dobivenih rezultata simulacija prometnog modela urbane autoceste. Prometni model korišten za postizanje ovih rezultata i dijelovi logike bili su iznijeti u prethodnom poglavlju, a sažetije verzije se mogu pronaći i u prošlim radovima autora [3], [4] i [2]. Rezultati opisuju karakteristične parametre prometnog toka na osnovu kojih su uspoređeni odabrani algoritmi za upravljanje ograničenjem brzine. Osim toga, prikazat će se izlazne vrijednosti algoritama koje su u obliku ograničenja brzina za svaku od ćelija u kojoj su algoritmi implementirani, odnosno u kojima djeluju. Za ovaj diplomski rad algoritmi su bili implementirani u prve tri ćelije dok je četvrta ćelija bez upravljanja. Kako je ovaj diplomski rad kumulacija dvogodišnjeg rada, istraživanja algoritama za VSLC, implementacije i testiranja istih uz mnoge evolucije rada koje su rezultat prethodnih zaključaka na prijašnjim radovima autora dok je fokus ovog rada bio na finalnu usporedbu tri algoritama koja su bila proučavani i implementirani. Prijašnje rezultate i istraživanja koja su doveli do ove faze moguće je pronaći u radovima [2], [3] i [4]. U ovom diplomskom napravljeno je preko 300 simulacija, a za prikaz rezultata odabran je zadnji ciklus od 10 simulacija po algoritmu. Od toga je izabran 8. simulacijski ciklus za prikaz grafičkih rezultata dok će rezultati svih 10 simulacija biti prikazani tablično. Na osnovu tih rezultata napraviti će se usporedba algoritma zasnovanog na neizrastoj logici, SPSC i MVM VSLC-a. Rezultati simulacija ovise o nasumično generiranom sjemenu, odnosno reakciji algoritama na nastale prometne situacije i njihove sposobnosti da utječu na prometni tok pomoću mjerenja dostupnih preko senzora, izračuna prometnih parametara i izlaznih vrijednosti u obliku ograničenja brzine pomoću kojih djeluju na prometni tok i nastalu prometnu situaciju.

### 6.1. Brzina

U ovom podpoglavlju prikazani su rezultati izmjerenih brzina za svaki od algoritama u kombiniranim grafovima za sva četiri slučaja po svakoj ćeliji. Vrijednosti su izračunavane nakon svakog intervala uzorkovanja  $T$  koji iznosi 30 [s] tijekom cijelog trajanja simulacije. Na rezultatima se mogu vidjeti plavom bojom označen SPSC regulator, crvenom bojom regulator zasnovan na neizrastoj logici (na grafu prikazan kraticom FIS), zelenom bojom označen je MVM regulator, a crnom bojom označen je slučaj simulacije bez upravljačkog algoritma.



Grafikon 1 - Rezultati brzina

Iz gornjih grafova vidljivo je kako je prosječna brzina u ćelijama  $L_1$  i  $L_2$  približno ista te da nema većih odstupanja koje bi narušavale homogenost toka iako postoji manji pad brzine u slučaju SPSC regulatora naspram ostalih slučajeva u ćeliji  $L_2$  što je posljedica prelijevanja zagušenja iz ćelije  $L_3$ . Preventivno djelovanje VSLC-a u vidu povremenog smanjenja ili povećanja ograničenja brzine u aktivnim ćelijama rezultira promjenom prosječnih brzina unutar ćelija, a najizraženije je kod ćelije  $L_3$  i  $L_4$ . Ranije je već spomenuto kako se na drugoj ulaznoj rampi generira promjenjivi prometni tok, odnosno nakon 40-ak minuta povećava se prometna potražnja na drugoj rampi na 1.250 [voz/h]. Generiranjem dodatnog opterećenja dehomogenizirao se tok i time su se poremetili prometni parametri ustaljenosti toka. Zbog toga je potrebno proći vrijeme kada se tok može ponovo ustaliti, kada vrijednosti padnu ispod kritične. Navedeno je najbolje vidljivo u obliku pada prosječne brzine u ćeliji  $L_4$ , a kako se postepeno povećava potražnja tako prosječna brzina vozila opada sve više u slučaju bez upravljanja ograničenjem brzine. Ostali algoritmi pokazuju manji pad prosječne brzine na istom području. Ukoliko usporedimo algoritme međusobno, u ćeliji  $L_2$  SPSC algoritam bilježi manji pad prosječne brzine naspram ostalih slučajeva. Upravljački algoritam zasnovan na neizrastitoj logici ostaje otprilike na istoj prosječnoj brzini kao i slučaj bez upravljanja uz zanemarive promjene. Slučaj MVM upravljačkog algoritma za spomenutu ćeliju u najvećem dijelu rezultira povećanjem prosječne brzine u malim postocima, no nezamjetna je razlika iznosi tek 1,3 [km/h].

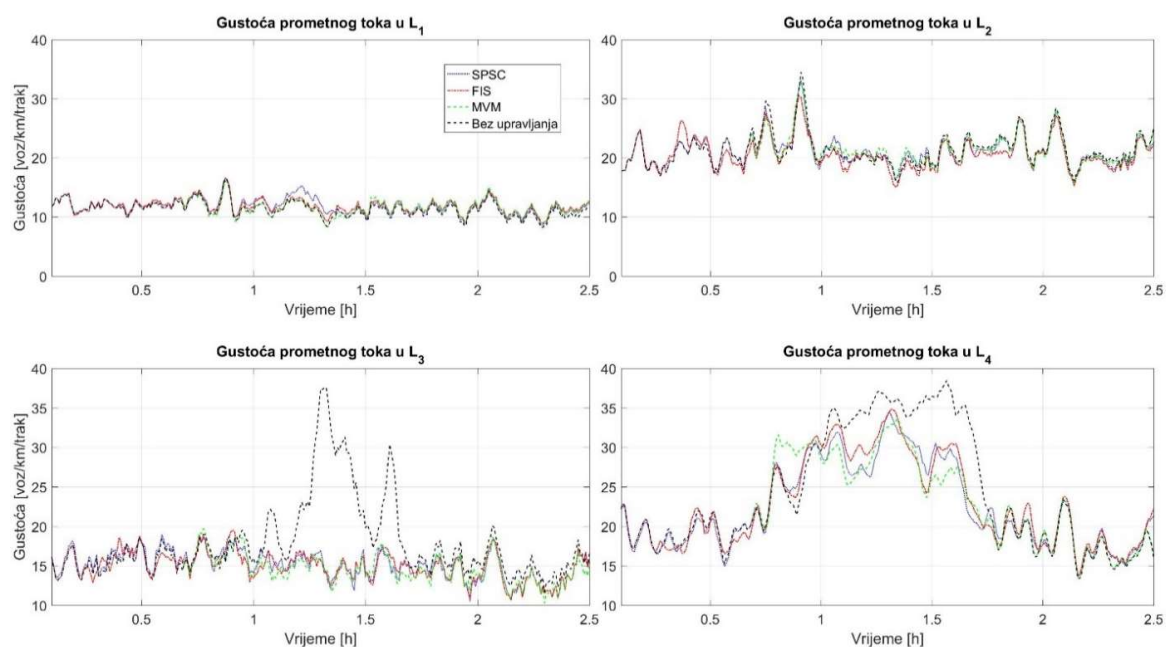
Pri ćeliji  $L_3$  algoritmi rezultiraju boljom prosječnom brzinom, a najveću i približno jednaku prosječnu brzinu imaju SPSC algoritam i algoritam zasnovan na neizrazitoj logici u iznosu od 102,4 [km/h]. MVM slučaj upravljačkog algoritma ima nešto veći pad u području oko 1,3 [h] simulacije nego što je vidljiv u slučaju ostala dva algoritma. Svakako je bitno napomenuti kako su sva tri algoritma u ovoj simulaciji pokazali mnogo boljima nego slučaj bez upravljanja. U ćeliji  $L_4$  ne djelujemo VMS-om, odnosno nema ograničenja brzine, ali posljedice ranijeg upravljanja brzinom su svakako očita tako da je smanjen utjecaj povećanja prometne potražnje na drugoj ulaznoj rampi. Tako je ublažen pad prosječne brzine koji je vidljiv u slučaju bez upravljanja, osim u području oko 1,3 [h] gdje se brzina naglo smanjila zbog situacije nastale na ulaznoj rampi na koju ne djelujemo. Stvaranjem dodatnog opterećenja na glavni tok s druge ulazne rampe pojavljuje se šok val koji se širi uzvodno te je njegov utjecaj vidljiv na padu prosječne brzine u ćeliji  $L_3$  za slučaj bez upravljanja ograničenjem brzine. Također, može se vidjeti kako su brzine ujednačenije i pad brzine je manji i kraće traje što znači da su pogodniji po pitanju cestovne sigurnosti zbog manjih promjena u brzinama za razliku od slučaja bez upravljanja kada brzine padnu naglo i do 50 [km/h] što predstavlja veliki sigurnosni rizik. Ciljevi VSLC-a svih tipova su u preventivnom djelovanju, odnosno sprječavanju zagušenja i poboljšanja vremena putovanja te harmonizaciji prometnog toka. Smanjenjem brzine nadolazećeg toka vozila na zagušeni dio dionice smanjuje se brzina propagacije šok valova izazvanih zagušenjem u blizini rampe  $r_2$  (odnosno pri području ćelija  $L_3$  i  $L_4$ ) uzvodno uz autocestu. Iz grafova je vidljivo da je upravljanjem tokom pomoću ograničenja brzine smanjen pad prosječne brzine u području povećane prometne potražnje. Usporedbe radi, izračunata je prosječna brzina za svaki od slučaja upravljanja tijekom cijelog trajanja simulacije po ćeliji. Prosjek izmjerenih brzina prikazanih u grafikonu 1 dane su u tablici 2.

Tablica 2 - Prosjek izmjerenih brzina prikazanih u grafikonu 1

	Prosječna brzina			
	L1 [km/h]	L2 [km/h]	L3 [km/h]	L4 [km/h]
<b>SPSC</b>	105,12	105,82	102,40	97,51
<b>MVM</b>	106,20	106,92	101,75	96,72
<b>Neizrazita logika</b>	106,35	106,90	102,41	97,99
<b>Bez upravljanja</b>	106,64	107,30	93,93	89,39

## 6.2. Gustoća

U ovom podpoglavlju prikazani su rezultati izmjerenih gustoća za svaki od algoritama u kombiniranim grafovima za sva četiri slučaja po svakoj ćeliji. Vrijednosti su izračunavane, jednako kao i za brzinu, nakon svakog intervala uzorkovanja  $T$  koji iznosi 30 [s] tijekom cijelog trajanja simulacije. Na rezultatima se mogu vidjeti plavom bojom označen SPSC regulator, crvenom bojom regulator zasnovan na neizrastoj logici (na grafu prikazan kraticom FIS), zelenom bojom je označen MVM regulator, a crnom bojom označen je slučaj simulacije bez upravljačkog algoritma.



Grafikon 2 - Rezultati gustoće

Iz grafova je vidljivo da ćelija  $L_1$  i  $L_2$  nemaju većih promjena u gustoći toka dok je najveća razlika u toku primjetna na ćeliji  $L_3$ . U trenutku  $t_k$  primjećuje se naglo povećanje gustoće prometnog toka u ćeliji  $L_4$ . Jednako se povećava za sva 3 upravljačka algoritma i slučaj bez upravljanja, ali vidljivo je kako slučajevi s upravljanjem ograničenjem brzine uspiju djelovati na način da smanje gustoću bliže ispod nadkritične vrijednosti (koja je u ovom slučaju 30 [voz/km/trak]) dok primjer bez upravljanja ostaje dulje visoke gustoće, odnosno toliko dugo dokle traje  $t_k$  nakon čega se počinje smanjivati. Povećanje svih vrijednosti gustoće u sva 3



upravljačka algoritma ćelije  $L_4$  objašnjiv je time što se druga ulazna rampa nalazi na početku ćelije  $L_4$ , a generirana prometna potražnja druge ulazne rampe počinje rasti sa 250 [voz/h] na 1.250 [voz/h]. *Efekt* prelijevanja na ćeliju  $L_3$  vidljiv je i na grafikonu gdje gustoća dostiže nadkritične vrijednosti u primjeru bez upravljačkog algoritma dok primjeri sa upravljačkim algoritmima uspiju preventivno djelovati ograničenjem brzine pa gustoća nema naglih porasta unatoč povećanoj prometnoj potražnji na drugoj ulaznoj rampi koja se nalazi u ćeliji  $L_4$ . Vidljivo je da upravljački algoritmi u ćeliji  $L_3$  uspijevaju smanjiti utjecaj prelijevanja, odnosno povećanje gustoće do kritične vrijednosti čime uspijevaju zadržati gustoću blizu one slobodnog toka. Osim toga, u ćeliji  $L_4$  algoritmi smanjuju gustoću prometnog toka ispod one nadkritične u nekoliko navrata tijekom trajanja vremena  $t_k$ , čime se postiže veća vrijednost prosječne brzine toka što je vidljivo je na grafikonu 2. U ćeliji  $L_4$  vidljivo je kako MVM algoritam uzrokuje povećanje prometnog toka svojim djelovanjem u prethodnoj ćeliji što uzrokuje veću gustoću u spomenutoj ćeliji naspram ostalih algoritama i slučaja bez upravljanja, no bitno je primijetiti kako kasnije MVM algoritam ima najmanju zabilježenu gustoću u danim trenucima naspram ostalih algoritama. U tablici 3 dane su prosječne vrijednosti gustoće za svaki slučaj upravljanja i slučaj bez upravljanja, po svakoj ćeliji.

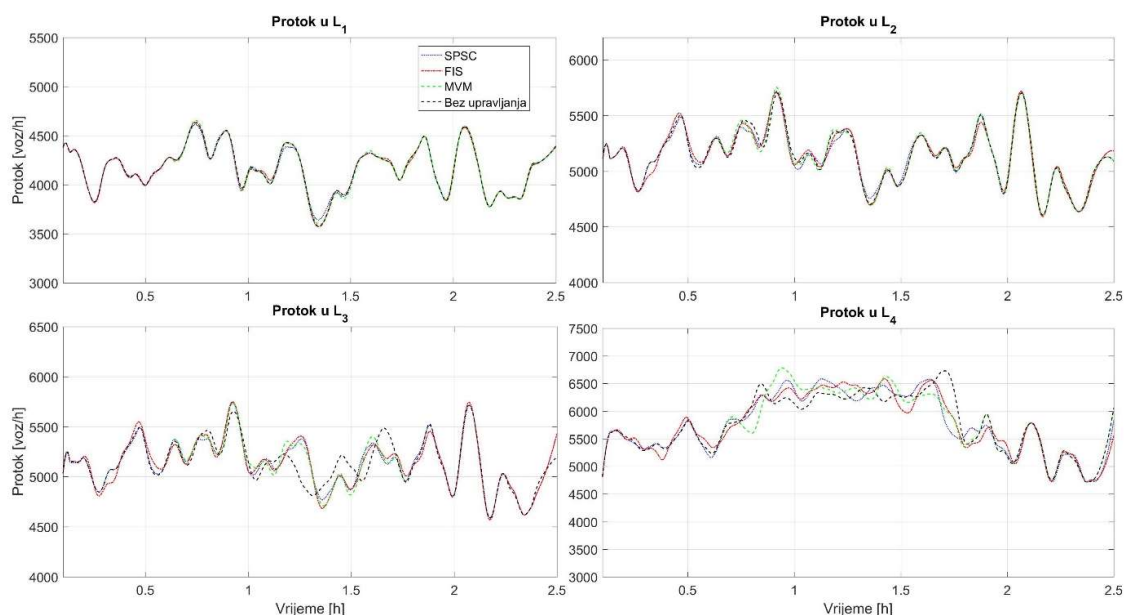
Tablica 3 - Prosječne vrijednosti gustoće za svaki slučaj upravljanja i slučaj bez upravljanja, po svakoj ćeliji

	Prosječna gustoća			
	L1 [voz/km/trak]	L2 [voz/km/trak]	L3 [voz/km/trak]	L4 [voz/km/trak]
<b>SPSC</b>	11,77	20,95	14,98	22,02
<b>MVM</b>	11,60	20,98	14,75	22,04
<b>Neizrazita logika</b>	11,80	20,49	14,83	22,34
<b>Bez upravljanja</b>	11,35	21,09	17,67	23,67

### 6.3. Protok

Kao i u ranijim poglavljima, u ovom će se prikazati rezultati izmjerenog protoka za svaki od algoritama u kombiniranim grafikonima za sva četiri slučaja po svakoj ćeliji. Vrijednosti su izračunavane, jednako kao i za brzinu i gustoću, nakon svakog intervala

uzorkovanja  $T$  koji iznosi 30 [s] tijekom cijelog trajanja simulacije. Na rezultatima se mogu vidjeti plavom bojom označen SPSC regulator, crvenom bojom regulator zasnovan na neizrazitoj logici (na grafikonu prikazan kraticom FIS), zelenom bojom označen je MVM regulator, a crnom bojom označen je slučaj simulacije bez upravljačkog algoritma.



Grafikon 3 - Rezultati protoka

U ćeliji  $L_4$  postoji značajno povećanje protoka u vremenima  $t_k$  što je očekivano zbog povećane potražnje na ulaznoj rampi i zbog relacije prometnih parametara. Unatoč padu brzine na prometnici, poremećaju u gustoći i djelovanju upravljačkih algoritama protok nije bio značajnije poremećen. U pojedinim trenutcima primjećuju se povećanja protoka u usporedbi sa slučajem bez upravljanja u ćelijama  $L_4$  i  $L_3$ . U tablici 4 vidljive su iznesene prosječne vrijednosti protoka po ćelijama za svaki od upravljačkih algoritama.

Tablica 4 - Prosječne vrijednosti protoka po ćelijama za svaki od upravljačkih algoritama

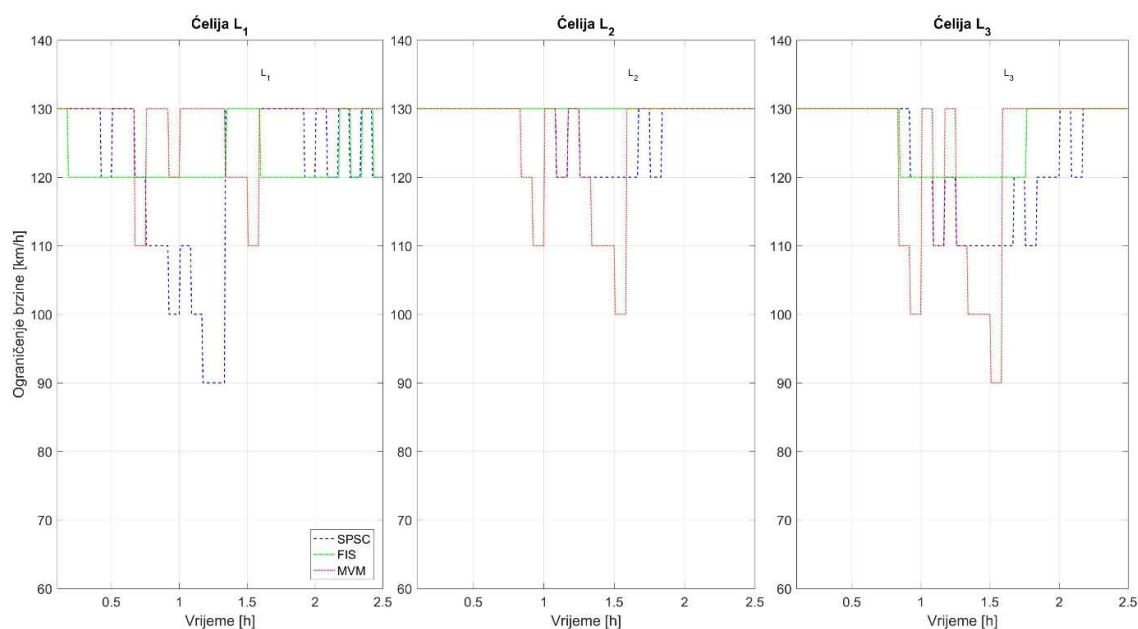
	Prosječni protok			
	L1 [voz/h]	L2 [voz/h]	L3 [voz/h]	L4 [voz/h]
<b>SPSC</b>	4.142,60	4.127,48	5.075,48	5.064,72
<b>MVM</b>	4.142,59	4.127,84	5.073,89	5.062,33
<b>Neizrazita logika</b>	4.142,59	4.127,44	5.075,48	5.064,72
<b>Bez upravljanja</b>	4.142,59	4.128,64	5.074,29	5.061,53

Iz tablice prosječne vrijednosti protoka vidljivo je kako protok ćelije  $L_1$  i  $L_2$  ostaje jednak za sva 4 slučaja, odnosno uz zanemarive razlike. Vrijednosti u  $L_3$  i  $L_4$  imaju manjih promjena gdje se razlikuju za manje od 1%, a radi se o razlici od 1 [voz/h] manje za MVM algoritam i 2 [voz/h] za SPSC i algoritam zasnovan na neizrazitoj logici naspram slučaja bez upravljanja. Sustavi upravljanja prometnim tokom pomoću ograničenja brzine uspijevaju zadržati približno isti protok vozila unatoč djelovanju na glavni tok.

#### 6.4. Ograničenja brzine

Princip rada VSLC upravljačkih algoritama zasnovan je na pravovremenoj detekciji zagušenja u prometnom toku te preventivnom djelovanju pomoću ograničenja brzine. Glavni je cilj zadržati prometne parametre unutar prihvatljivih vrijednosti. Zbog specifičnosti prometnog toka, čije se karakteristike dinamično mijenjaju u prostoru i vremenu, bitna je pravovremena i ažurirana vrijednost ograničenja brzine za svaku pojedinu ćeliju. Osim toga, bitno je da promjene ograničenja brzine nisu prečeste kako bi ju vozači mogli prihvatiti kao relevantnu. Prilikom vožnje, ukoliko bi se ograničenja brzine previše brzo mijenjala, vozači ne bi stigli prilagođavati svoje brzine što bi dovelo do potpunog ignoriranja zadanih ograničenja brzine. Također je bitno napomenuti kako se ograničenjem brzine utječe direktno na prometni tok što znači da su česte oscilacije nepoželjne i narušavaju prometnu sigurnost. Kako bi se zadovoljili sve navedeni uvjeti promjene brzine, mogu se odvijati svakih 5 minuta pod uvjetom da postoji potreba za promjenom brzine značeći da izlazna veličina upravljačkog algoritma mora biti različita od trenutno postavljenog ograničenja brzine. Ranije je spomenuto kako su postavljena ulančana ograničenja brzine što je jasno vidljivo na grafikonu 4. Crvenom bojom

prikazano je ograničenje brzine za MVM algoritam, plavom SPSC, a zelenom algoritam zasnovan na neizrastoj logici. Na grafikonu ćelije  $L_3$  u trenutku 1,5[h] postavljeno je ograničenje brzine od 90 [km/h] u slučaju MVM regulatora, a u ćeliji  $L_2$  za isti trenutak postavljeno je ograničenje brzine od 100 [km/h] što je rezultat ulanćavanja. Ulanćavanje je napravljeno s ciljem izbjegavanja naglih koćenja i promjena brzine ukoliko u ćeliji ispred nije postavljeno ograničenje brzine za dati trenutak. Ovime je postignuto postepeno smanjenje brzine, time se dodatno djeluje preventivno i u ćelijama ispred, a istovremeno povećava i sigurnost odvijanja prometa. Stepnasti izgled grafikona ogranićenja pripisuje se tome što su odluke ogranićenja brzine cjelobrojni brojevi faktora deset iako regulatori, a posebice onaj zasnovan na neizrastoj logici, mogu na svom izlazu dati decimalne vrijednosti. Razlog decimalnih vrijednosti ogranićenja brzine na izlazu regulatora je činjenica što prometni parametri koji se koriste za izračun ogranićenja brzine nisu cjelobrojne, već stvarne vrijednosti dobivene mjerenjem sa senzora.



Grafikon 4 - Rezultati ogranićenja brzine

Osim implementacije ulanćanih ogranićenja brzine, također je implementirana i maksimalna moguća promjena ogranićenja brzine. Najveća moguća promjena ogranićenja brzine koje se može postaviti je 20 [km/h] veće od trenutno postavljenog ogranićenja brzine, odnosno ukoliko je trenutno ogranićenje brzine 130 [km/h] najmanje ogranićenje brzine koje se

može postaviti u slijedećem trenutku iznosi 110 [km/h]. Bitno je napomenuti kako se ograničenje brzine ukinuti, odnosno postaviti natrag na 130 [km/h] bez takvog ograničenja. Primjer navedenog moguće je vidjeti na MVM upravljačkom algoritmu u trenutku 1,5 [h] gdje je u ćeliji  $L_3$  postavljeno ograničenje brzine od 90 [km/h], u ćeliji  $L_2$  postavljeno je ograničenje brzine od 100 [km/h], a na ćeliji  $L_1$  110 [km/h]. Promjena ograničenja brzine posljedica je prometnih veličina izmjerenih na sensorima koje na ulazu regulatora rezultiraju izlazom ograničenja brzine na pojedinoj ćeliji, a u svrhu preventivnog djelovanja zagušenja. Na ćeliji  $L_1$  najizraženije djelovanje ima regulator zasnovan na SPSC upravljačkom algoritmu koji postavlja ograničenje brzine na čak 90 [km/h] na osnovu izmjerenih parametara u ćeliji  $L_2$ , u području povećanog prometnog toka sa druge ulazne rampe odnosno situacije izlivanja prometnog toka sa ćelije  $L_3$  u ćeliju  $L_2$ . Nakon ukidanja ograničenja brzine od 90 [km/h] upravljački algoritam nije aktivan sve dok ne dođe do područja titranja algoritma koje započne 35 minuta prije samog kraja simulacije. Regulator zasnovan na MVM upravljačkom algoritmu u najmanjoj mjeri i tek par puta postavlja ograničenja brzine od kojih je najmanja brzina postavljena kao ograničenje u iznosu od 110 [km/h]. Regulator zasnovan na neizrazitoj logici reagira praktički na samom početku i zadržava se na istom ograničenju sve do trenutka od 1,4 [h] kada ukida postavljeno ograničenje brzine. Nakon 15 minuta ograničenje brzine se ponovo aktivira i traje sve dok se ne dođe u područje titranja, zadnjih 20 minuta trajanja simulacije.

U ćeliji  $L_2$  vidljivo je kako regulator zasnovan na neizrazitoj logici nema reakciju, odnosno ne postavlja ograničenja brzine za nastalu situaciju što znači da prometni parametri gustoće i protoka nisu u području djelovanja regulatora. Za razliku od slučaja u prvoj ćeliji ovdje je izraženije djelovanje MVM regulatora koje najviše djeluje u kritičnom području kao posljedica ulančavanja ograničenja brzine vođeno ograničenjem iz ćelije  $L_3$ . SPSC upravljački algoritam djeluje samo ograničenjem brzine od 120 [km/h] koje se također nalazi u kritičnom području, a također je posljedica ulančavanja ograničenja brzina iz ćelije  $L_3$ . Treća ćelija ima ograničenje brzine najizraženije u kritičnom području, a postavlja ju MVM upravljački algoritam. SPSC algoritam ima slabije djelovanje po pitanju ograničenja brzine, no unatoč tome što je ograničenje brzine manje djeluje nešto dulje od MVM regulatora. Regulator zasnovan na neizrazitoj logici ovdje djeluje jednim kontinuiranim ograničenjem brzine. Ukupno gledano, najizraženije djelovanje u ćelijama  $L_2$  i  $L_3$  ima MVM regulator, zatim SPSC, a najslabije djelovanje ima regulator zasnovan na neizrazitoj logici. U ćeliji  $L_1$  najizraženije djelovanje je SPSC regulatora, zatim MVM, a na posljatku regulatora zasnovanog na neizrazitoj logici. Može se zaključiti kako regulator zasnovan na neizrazitoj logici globalno djeluje najslabije. Bitno je

istaknuti kako su pravila neizrazite logike bile postavljene na osnovu metode pokušaja i promašaja, a kako bi se poboljšali rezultati i mogućnosti djelovanja bilo bi potrebno iskoristiti neku od metoda učenja ili strojnog podešavanja pravila za određivanje ograničenja brzine pomoću neizrazite logike poput neuronske mreže ili metode učenja putem nagrade i kazne takozvana metoda Q-učenja.

## 6.5. Vrijeme putovanja, ukupno utrošeno vrijeme i duljina red čekanja

Kao mjerilo učinkovitosti uzeta je vrijednost vremena putovanja pojedinog vozila da prođe od početka do kraja modela mjereno na glavnom toku. Osim toga, izračunato je i ukupno utrošeno vrijeme svih vozila u mreži tijekom simulacije. Ukoliko je vrijeme kraće, znači da su vozila provela manje vremena u samoj mreži tijekom cijele simulacije – TTS (engl. *total time spent*). Ukoliko su vozila kraće bila u prometnoj mreži, prometni tok se brže odvijao, odnosno prometni parametri su bili povoljniji za odvijanje prometa, odnosno ukoliko nastane zagušenje unutar simuliranog modela TTS proporcionalno raste s povećanjem intenziteta zagušenja (povećanje gustoće prometnog toka). U slučaju kada VSLC reagira povećanim smanjenjem izlaznih ograničenja brzina, povećava se vrijeme putovanja za isti prevaljeni put (duljina ćelije u kojoj je VSLC reagirao povećano) pa samim time i raste TTS. Opisuje se mjernom jedinicom umnoška vozila i vremena provedenog u prometnoj mreži [*voz-h*], računa se prema slijedećoj formuli:

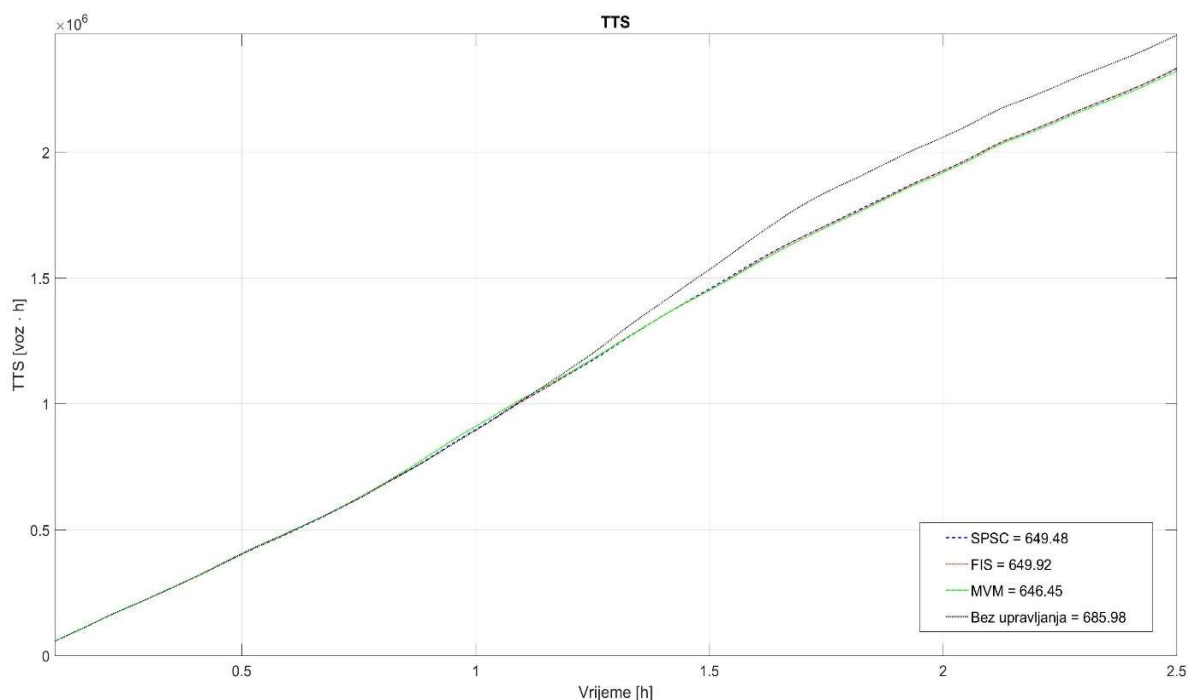
$$TTS = T \sum_{k=1}^k \sum_{i=1}^N L_i * \rho_i(k), \quad (11)$$

gdje su:

- $\rho_i(k)$  – gustoća u segmentu  $i$ ,
- $L_i$  – duljina segmenta  $i$ ,
- $N$  – ukupan broj segmenata,
- $k$  – vrijeme trajanja simulacije,
- $T$  – korak simulacije.

U grafikonu 5 prikazan je ukupan TTS za cijelo trajanje simulacije. Vrijednosti za TTS bez VSLC iznosi 685,98 [*voz-h*] što je najveća vrijednost za sva četiri slučaja i na grafikonu je

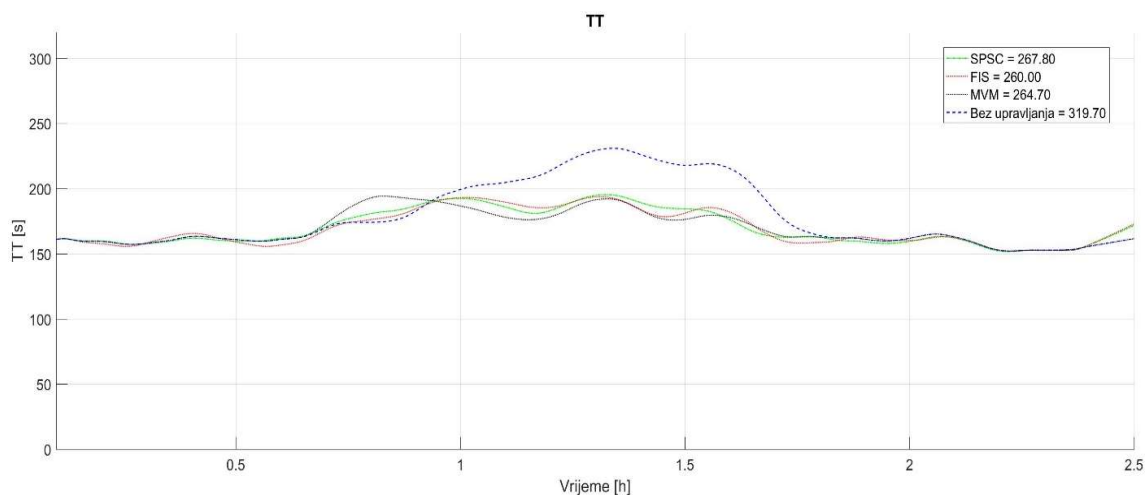
označena crnom bojom. Primjenom VSLC regulatora smanjen je TTS za otprilike 5%, a iznose 646,45 [voz·h] za slučaj MVM regulatora (na grafikonu Grafikon 5, zelenom bojom), 649,92 [voz·h] za regulator zasnovan na neizrastioj logici (na grafikonu Grafikon 5, crvenom bojom) i 649,92 [voz·h] za slučaj SPSC regulatora (na grafikonu Grafikon 5, plavom bojom).



Grafikon 5 - Ukupan TTS za cijelo trajanje simulacije

Osim toga, dan je podatak o vremenu putovanja TT (engl. *Travel time*). Vrijeme putovanja jednostavna je mjera koja odgovara na pitanje koliko je vremena potrebno jednom vozilu da prođe duž glavnog toka. Ukoliko bi došlo do povećanog djelovanja upravljačkog algoritma koje bi uzrokovalo zagušenje, posljedično bi vozilu trebalo više vremena da prođe dužinu glavnog toka nego onima u kojima ne postoji zagušenje. Time se može vidjeti utjecaj VSLC algoritma na glavnom toku. Kako se ne radi o ukupnom zbroju vremena putovanja, već o vremenu potrebnom za svako pojedino vozilo da prođe kroz glavni tok, na grafikonu su prikazane srednje vrijednosti TT. Razlog tome je zaglađenost krivulja i činjenica da postoji više Y točaka za pripadajuću joj X točku pošto u svakom trenutku iz mreže izađe više od jednog vozila istovremeno. Prosječne vrijednosti TT prikazane su na grafikonu 6, a maksimalne vrijednosti TT-a za svaki pojedini slučaj istaknute su u legendi. SPSC regulator prikazan je zelenom bojom i maksimalan TT iznosi 267,80 [s], regulator zasnovan na neizrastioj logici označen je crvenom bojom na grafikonu i maksimalna vrijednost TT iznosi 260,00 [s]. Slučaj

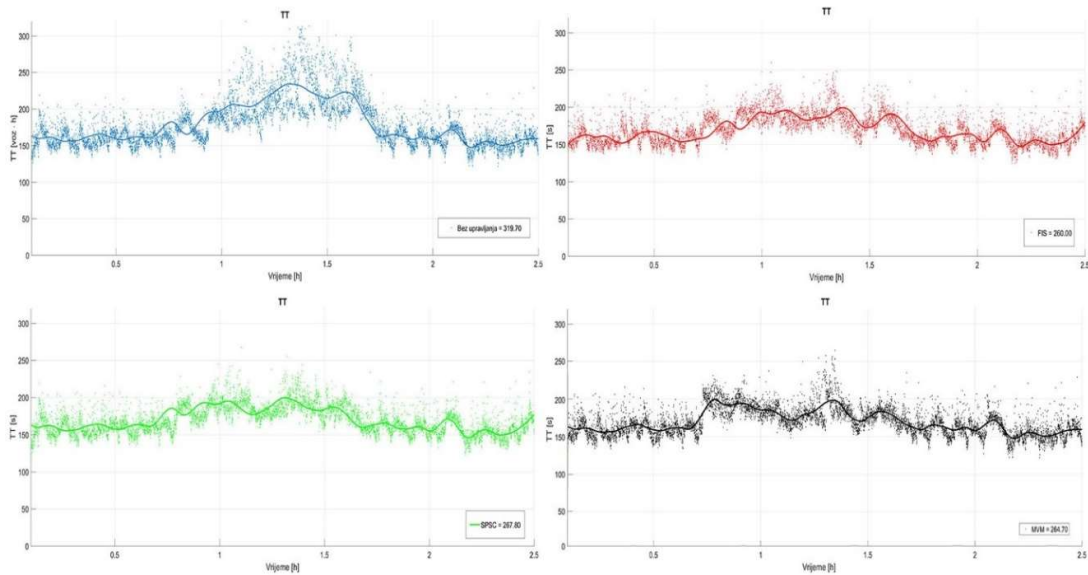
za MVM regulator prikazan je na grafikonu crnom bojom i iznosi 264,70 [s] dok je slučaj bez upravljanja istaknut plavom bojom i maksimalna TT vrijednost iznosi 319,70 [s] za taj slučaj. Iz grafikona je vidljivo kako su prosječne vrijednosti TT za većinu trajanja simulacije smanjene naspram situaciji bez upravljanja. Točnije, vozilima za vrijeme trajanja  $t_k$  treba manje vremena za proći glavni tok nego što je to u slučaju bez upravljanja. Razlog tome je što se ograničenjem brzine uspije preventivno djelovati na nastala zagušenja kako bi se spriječio efekt šok valova koji uzrokuje veći pad brzina i produljuje vrijeme potrebno svakom vozilu za proći sve ćelije. Na početku je vidljivo kako MVM regulator ima nešto veće odstupanje u prosječnom TT-u dok su slučajevi sa SPSC i regulatorom zasnovanom na neizrastoj logici nešto manjeg povećanja TT-a od MVM regulatora. Radi se o vremenu kada počinje povećana prometna potražnja na drugoj ulaznoj rampi pa regulatori počinju preventivno djelovati na situaciju prometnog toka te time inicijalno malo povećaju vrijednost TT, ali kasnije rezultiraju boljim prosječnim vremenima putovanja od slučaja bez upravljanja.



Grafikon 6 - Prosječne vrijednosti TT

Na grafikonu 7 vidljive su sve TT vrijednosti, za svaki od četiri slučajeve uz prosječnu vrijednost koja je iscrtana punom linijom, tako se zornije može vidjeti prosječan TT i sve izmjerene vrijednosti.





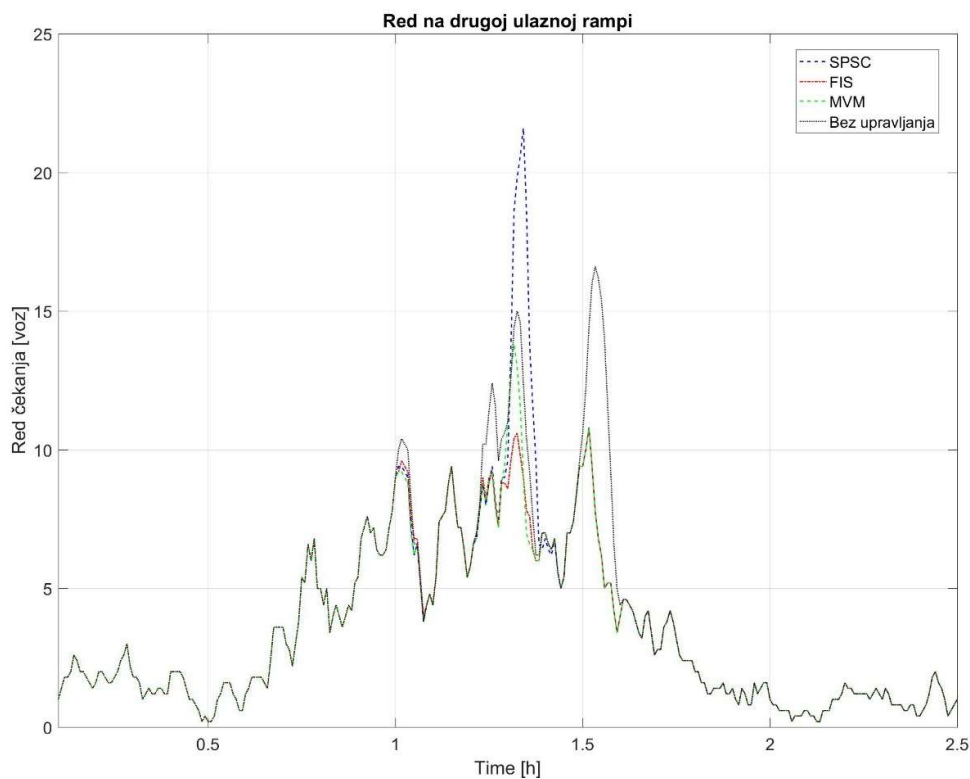
Grafikon 7 - Sve TT vrijednosti

Vidljivo je kako su vremena putovanja u slučaju bez upravljanja (plavi grafikon) raspršenija i u trenutku  $t_k$  ostaju u višoj razini nego što je to slučaj sa upravljačkim algoritmima. Ranije je spomenuto kako su vrijednosti maksimuma u slučaju bez upravljanja daleko iznad onih sa upravljačkim algoritmima, no iz gornjih grafikona vidljivo je kako je utjecaj upravljačkih algoritama uspio preventivnim djelovanjem zadržati niže vrijednosti TT, uz manja odstupanja od srednjih vrijednosti. Bitno je naglasiti kako je manja vrijednost TT bolja, odnosno označava manje vrijeme putovanja pojedinog automobila kroz glavni tok modela.

## 6.6. Red čekanja na drugoj ulaznoj rampi ( $r_2$ )

Duljina reda čekanja vozila na rampi  $r_2$ , izražena u broju vozila koji čekaju priključivanje na glavni tok u zavisnosti je učinka VSLC-a u aktivnim ćelijama  $L_1$ ,  $L_2$  i  $L_3$ . Kako se povećava prometna potražnja na rampi  $r_2$ , tako se red čekanja povećava ukoliko se na glavnom toku ne smanjuje zagušenje u blizini rampe. Kako je glavna ideja VSLC sustava upravo preventivno djelovanje zagušenja na glavnom toku, tada bi se trebalo lakše moći uključiti u glavni tok sa ulazne rampe. Takvim djelovanjem smanjuje se duljina reda čekanja na spomenutoj rampi  $r_2$ . Bitno je naglasiti kako u vremenu putovanja nisu uključene ulazne rampe, već se gleda samo glavni prometni tok pa je tako ovaj grafikon potrebno promatrati bez povlačenja relacije s tim vremenima. Na grafikonu 8 prikazane su krivulje za sva četiri slučaja

gdje je plavom bojom označen SPSC regulator, crvenom regulator zasnovan na neizrazitoj logici, zelenom MVM regulator, a crnom bojom slučaj bez upravljanja VSLC-om. Bitno je napomenuti kako se radi o grafikonu zaglađenih vrijednosti radi lakše ilustracije pa maksimalne vrijednosti nisu vidljive na samom grafikonu, one će biti iznesene u tekstu, usporedbe radi.



Grafikon 8 - Duljina reda čekanja vozila na ulaznoj rampi r<sub>2</sub>

Iz grafikona je vidljivo da SPSC algoritam ima u najgorem slučaju jedan veliki red čekanja, no za ostalo vrijeme trajanja simulacije nema drugih većih povećanja. Slučaj aktivnog MVM algoritma ima također jednu veću vrijednosti reda čekanja, ali je znatno niža od vrijednosti u slučaju upravljanja pomoću SPSC algoritma i nešto manja od slučaja bez upravljanja ograničenjem brzine. U slučaju algoritma zasnovanog na neizrazitoj logici primjećuju se najmanji redovi čekanja od sva četiri slučaja. Maksimalne vrijednosti algoritama su 18 vozila za slučaj bez upravljanja, 30 vozila za slučaj upravljanja SPSC-om, 18 vozila za slučaj upravljanja MVM-om i 13 vozila za slučaj upravljanja algoritmom zasnovanog na neizrazitoj logici. U tablici 5 dane su maksimalne i prosječne vrijednosti reda čekanja za sva četiri slučaja uz postotak poboljšanja naspram slučaja bez upravljanja za prosječne vrijednosti.

Tablica 5 - Maksimalne i prosječne vrijednosti duljine reda čekanja

Regulator	Prosječna duljina reda čekanja [voz]	Maksimalna duljina reda čekanja [voz]	Poboljšanje (%)
SPSC	3,62	30	4,23
MVM	3,41	18	9,79
Neizrazita logika	3,39	13	10,32
Bez upravljanja	3,78	18	-

Može se primijetiti kako su u sva tri slučaja prosječne vrijednosti poboljšane, a najviše je to izraženo u slučaju upravljanja neizrazitom logikom. Uglavnom, slučaj upravljanja neizrazitom logikom može biti bolje definiran i tako finije djelovati na prometni tok zbog skupa neizrazitih pravila kojima je postavljen te time poboljšati stanje reda čekanja znatno bolje nego što se može postići sustavom upravljanja kao MVM ili SPSC koji imaju čvrsto određen izraz prema kojem se računa vrijednost ograničenja brzine za nastalu situaciju.

## 6.7. Rezultati simulacije ispušnih plinova i čestica

U ovom podpoglavlju analizirat će se rezultati koji opisuju ekološki utjecaj prometa na okoliš. Ranije su opisani parametri korišteni u simulaciji ispušnih plinova i čestica programskog alata EnViVer, a najbitnije je napomenuti kako se radi o tri kategorije vozila na urbanom području autoceste za srednja, teška i mala vozila. Osim što će se iznijeti srednje vrijednosti ispušnih plinova, također će se dati reprezentativni primjer grafičkog izgleda koncentracije zagađenja. Grafički su ostale simulacije iste, bitno je samo istaknuti koja su područja autoceste najveće koncentracije zagađenja. Grafički prikaz uključuje model koji je ispunjen kontrastima boja ovisno o količini ispušnih plinova i čestica, a boje variraju od tamno plave do žarko crvene za područja male koncentracije do najveće koncentracije zagađenja.

Od ispušnih plinova mjereni su  $CO_2$  (uglični dioksid) i  $NO_x$  (dušikovi oksidi). Uz njih je mjerena i emisija štetnih čestica  $PM_{10}$ . U to spadaju sve lebdeće čestice koje su manje od 10  $\mu m$ . Kao temeljna referenca uzet je rezultat vrijednosti ispušnih plinova dobivenih iz prosječnih vrijednosti za 10 iteracija simulacijskog slučaja bez upravljanja pomoću VSLC sustava. Na osnovu tih rezultata napravljena je usporedba prosječnih vrijednosti 10 iteracija simulacijskog slučaja za svaki od upravljačkih algoritama (SPSC, MVM i upravljanja zasnovanog na

neizrastitoj logici). Smanjenje emisija ispušnih plinova i čestica kod primjene VSLC prikazano je u postotcima, a radi lakše usporedbe rezultati su dani u tablici 6.

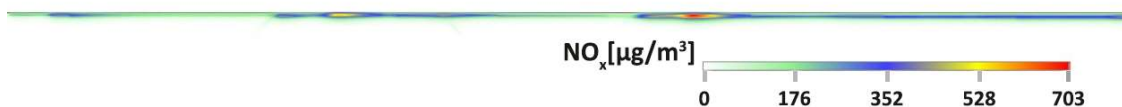
Tablica 6 - Smanjenje emisija ispušnih plinova i čestica kod primjene VSLC

	Bez upravljanja	SPSC	MVM	Neizrastita logika	Poboljšanje SPSC/MVM/NL (%)
CO <sub>2</sub>	1,626 *10 <sup>7</sup> g	1,619 *10 <sup>7</sup> g	1,615 *10 <sup>7</sup> g	1,621 *10 <sup>7</sup> g	0,43/0,68/0,31
	6,497 *10 <sup>6</sup> g/h	6,476 *10 <sup>6</sup> g/h	6,460 *10 <sup>6</sup> g/h	6,484 *10 <sup>6</sup> g/h	
	2,395 *10 <sup>2</sup> g/kg	2,390 *10 <sup>2</sup> g/kg	2,379 *10 <sup>2</sup> g/kg	2,388 *10 <sup>2</sup> g/kg	
NO <sub>x</sub>	3,673 *10 <sup>4</sup> g	3,637 *10 <sup>4</sup> g	3,605 *10 <sup>4</sup> g	3,611 *10 <sup>4</sup> g	0,98/1,85/1,69
	1,470 *10 <sup>4</sup> g/h	1,455 *10 <sup>4</sup> g/h	1,442 *10 <sup>4</sup> g/h	1,445 *10 <sup>4</sup> g/h	
	0,5411 g/kg	0,5369 g/kg	0,5311 g/kg	0,5320 g/kg	
PM10	1,562 *10 <sup>3</sup> g	1,555 *10 <sup>3</sup> g	1,560 *10 <sup>3</sup> g	1,564 *10 <sup>3</sup> g	0,45/0,13/-0,13
	6,247 *10 <sup>2</sup> g/h	6,220 *10 <sup>2</sup> g/h	6,240 *10 <sup>2</sup> g/h	6,255 *10 <sup>2</sup> g/h	
	0,023 g/kg	0,02296 g/kg	0,02298 g/kg	0,02304 g/kg	

Iz tablice je vidljivo kako se prosječne vrijednosti za SPSC i slučaj bez upravljanja razlikuju do 1%. Ukoliko bi zbrojili postotke poboljšanja po svakoj od kategorija čestica, dolazi se do poboljšanja od 1,86%. U slučaju MVM regulatora postižu se niže vrijednosti ukupnog zagašenja po česticama od 2,66% naspram slučaja bez upravljanja dok se u upravljanju zasnovanom na neizrastitoj logici radi o poboljšanju od 1,94%. Ovime rezultati iz tablice idu u prilog primjeni VSLC sustava. Postignuta poboljšanja, odnosno smanjenja emisije štetnih tvari u okviru od 1% do 3% nisu upечатljiva, ali potrebno je naglasiti kako je trajanje simulacije samo dva i pol sata. Uzme li se u obzir da su situacije na prometnicama periodičnog karaktera i da se ponavljaju po određenom pravilu (poput dnevnih putovanja stanovništva, vikend putovanja ili turističke sezone) u trajanju od nekoliko sati svaki put, dolazi do značajnih poboljšanja gledano na godišnjoj razini. Naročito ako se u obzir uzme masa ispušnih plinova i štetnih čestica za duži vremenski period. U nastavku su prikazane spomenute ilustracije koncentracija ispušnih plinova. Kao što je i za očekivati, područja najveće gustoće prometa su ona koja imaju i najveću koncentraciju štetnih ispušnih tvari. U ovom slučaju radi se o području ulaznih rampi gdje je najveća koncentracija na području druge ulazne rampe. Na slici 17 prikazana je koncentracija CO<sub>2</sub>, na slici 18 prikazan je NO<sub>x</sub>, a na slici 19 prikazane su PM10 koncentracije ispušnih čestica.



Slika 16 - Koncentracija CO<sub>2</sub>



Slika 17 - Koncentracija NO<sub>x</sub>



Slika 18 - Koncentracija PM10

## 6.8. Tablice vrijednosti svih simulacija

Kao što je već ranije spomenuto, za analizu rezultata u ovom diplomskom radu odabrana je 8. simulacija iz zadnjeg skupa simulacija od 10 po slučaju. Svaki par od tih 10 simulacija imao je 10 različito generiranih sjemena kojim se osigurava različito ponašanje generiranih vozila. Time se dobiva na stohastičnosti uzoraka prilikom izvršavanja simulacija, čime se poprilično dobro osigurava vjeran prikaz prometnog ponašanja. U nastavku slijede tablice s najbitnijim parametrima za sve simulacije spomenutog zadnjeg skupa.

Tablica 7 - Prosječne vrijednosti prometnih parametara za SPSC Regulator

Duljina reda čekanja	Prosječna brzina				Prosječna gustoća				Prosječni protok			
	L <sub>1</sub>	L <sub>2</sub>	L <sub>3</sub>	L <sub>4</sub>	L <sub>1</sub>	L <sub>2</sub>	L <sub>3</sub>	L <sub>4</sub>	L <sub>1</sub>	L <sub>2</sub>	L <sub>3</sub>	L <sub>4</sub>
3,96	106,08	105,99	90,65	86,39	13,39	19,11	21,57	23,98	4.193,62	4.177,28	5.118,94	5.103,79
4,52	104,22	98,76	85,98	86,50	11,85	26,09	27,05	24,62	4.194,02	4.176,88	5.162,39	5.146,05
3,11	106,26	106,72	100,92	97,40	12,82	19,82	15,89	21,03	4.153,36	4.137,01	5.084,25	5.077,87
3,19	106,14	106,64	102,75	98,54	11,96	20,20	16,37	20,04	4.123,06	4.105,91	5.038,01	5.022,46
3,65	105,09	102,32	86,24	84,73	12,73	21,21	26,82	24,69	4.202,39	4.186,45	5.155,22	5.140,86
3,18	103,86	102,30	92,33	90,37	12,44	22,56	22,32	22,68	4.146,18	4.129,04	5.079,87	5.067,11
3,62	106,16	102,23	88,02	87,96	12,45	21,97	27,01	23,44	4.180,07	4.166,11	5.132,09	5.115,35
3,61	105,12	105,82	102,39	97,50	11,77	20,95	14,98	22,02	4.142,59	4.127,84	5.075,48	5.064,72
3,17	106,98	107,66	103,84	100,06	12,93	19,79	15,02	21,01	4.181,26	4.172,49	5.085,05	5.074,29
3,37	106,48	107,23	101,34	97,33	13,26	18,86	16,79	21,27	4.176,48	4.160,13	5.041,20	5.030,03

Tablica 8 - Prosječne vrijednosti prometnih parametara za MVM regulator

Duljina reda čekanja	Prosječna brzina				Prosječna gustoća				Prosječni protok			
	L1	L2	L3	L4	L1	L2	L3	L4	L1	L2	L3	L4
3,95	104,87	103,53	89,49	86,78	13,42	19,78	22,14	23,80	4.193,62	4.177,67	5.119,34	5.104,58
4,66	103,00	96,83	85,18	85,45	12,57	26,77	25,91	24,12	4.194,82	4.177,67	5.162,39	5.148,04
3,13	106,27	106,69	100,26	97,27	12,36	19,59	16,81	21,18	4.153,36	4.137,81	5.085,45	5.076,28
3,18	106,00	106,23	102,20	98,57	11,92	20,02	16,60	20,06	4.122,66	4.105,51	5.038,41	5.022,46
3,54	104,14	101,31	88,86	86,92	13,11	21,28	22,28	24,00	4.202,39	4.186,05	5.154,42	5.143,26
3,14	105,38	104,42	95,14	91,99	11,98	21,50	19,08	22,24	4.146,18	4.128,24	5.081,06	5.068,31
3,75	104,65	100,45	89,00	89,85	12,73	22,12	25,80	23,44	4.180,07	4.166,51	5.131,69	5.115,35
3,41	106,20	106,92	101,75	96,72	11,60	20,98	14,75	22,04	4.142,59	4.127,84	5.073,89	5.062,33
3,17	106,98	107,63	103,69	99,98	12,89	19,51	15,80	20,83	4.181,26	4.172,89	5.085,45	5.073,89
3,37	106,47	107,09	101,33	97,22	12,96	19,17	16,34	21,04	4.176,48	4.160,93	5.041,20	5.030,43

Tablica 9 - Prosječne vrijednosti prometnih parametara za regulator zasnovan na neizrazitoj logici

Duljina reda čekanja	Prosječna brzina				Prosječna gustoća				Prosječni protok			
	L1	L2	L3	L4	L1	L2	L3	L4	L1	L2	L3	L4
4,22	105,23	103,45	88,94	86,58	12,83	20,32	26,92	23,94	4.193,62	4.178,07	5.120,13	5.106,18
4,45	102,74	97,50	87,47	86,71	12,56	26,56	26,04	23,84	4.194,02	4.177,67	5.160,80	5.146,45
3,10	106,42	107,13	103,44	99,90	12,63	19,35	15,95	20,50	4.153,36	4.137,41	5.085,45	5.077,87
3,20	106,46	106,84	101,51	97,13	12,40	19,20	16,85	20,87	4.123,06	4.105,12	5.036,81	5.020,47
4,41	104,88	102,81	87,98	85,67	12,67	21,53	24,63	24,30	4.202,79	4.187,24	5.154,82	5.140,47
3,22	104,67	101,93	91,41	89,90	12,35	22,29	22,99	22,32	4.146,18	4.128,64	5.081,46	5.069,10
3,60	105,28	103,38	91,17	88,61	12,42	21,50	23,03	23,47	4.180,07	4.166,51	5.131,69	5.120,13
3,39	106,35	106,90	102,42	97,78	11,80	20,48	14,83	22,34	4.142,59	4.127,44	5.075,48	5.064,72
3,22	106,95	107,59	102,54	98,18	12,63	20,16	15,10	21,65	4.181,26	4.173,69	5.084,25	5.073,09
3,42	106,35	107,01	97,67	94,14	12,41	19,48	17,77	22,22	4.176,48	4.161,33	5.041,20	5.030,83

Tablica 10 - Prosječne vrijednosti prometnih parametara za slučaj bez upravljanja

Duljina reda čekanja	Prosječna brzina				Prosječna gustoća				Prosječni protok			
	L1	L2	L3	L4	L1	L2	L3	L4	L1	L2	L3	L4
3,74	106,23	104,99	89,39	85,99	13,61	19,56	24,54	24,09	4.193,62	4.176,48	5.118,14	5.104,98
4,20	104,79	99,49	86,95	87,16	11,68	26,17	26,15	24,37	4.194,02	4.177,28	5.162,39	5.148,04
3,10	106,39	106,94	100,49	97,49	12,57	19,22	16,89	21,40	4.153,36	4.137,41	5.085,45	5.076,28
3,18	106,29	106,80	102,95	99,50	12,02	20,13	16,20	20,04	4.123,06	4.105,51	5.038,01	5.022,46
3,44	105,86	105,79	94,50	90,76	12,91	20,48	17,92	23,22	4.203,59	4.186,45	5.154,02	5.142,86
3,17	106,16	106,84	98,11	93,80	11,92	20,81	16,45	22,16	4.146,18	4.127,84	5.081,46	5.069,10
4,06	106,30	103,94	91,28	89,76	12,41	21,05	24,41	23,77	4.180,07	4.166,11	5.131,30	5.115,35
3,76	106,29	106,94	17,67	89,09	11,35	21,09	17,67	23,67	4.142,59	4.128,64	5.074,29	5.061,53
3,17	106,97	107,70	103,90	100,50	12,90	19,88	15,29	20,81	4.181,26	4.172,89	5.084,65	5.073,89
3,37	106,41	107,07	100,92	97,19	12,83	19,52	15,80	21,57	4.176,48	4.161,33	5.040,80	5.032,03

## 7. Zaključak

Implementacijom naprednih upravljačkih rješenja iz domene ITS-a poboljšava se razina uslužnosti na urbanim autocestama. Jedno od takvih rješenja su VSLC sustavi (upravljanje promjenjivim ograničenjem brzine na autocesti). U radu su implementirana i testirana tri jednostavna algoritma za ograničenje brzine, MVM, SPCS i upravljački algoritam zasnovan na neizrastoj logici. Algoritmi mijenjaju ograničenja brzine na osnovu trenutnih prometnih parametara (gustoće, brzine i protoka prometnog toka), izmjerenih pomoću senzora, s ciljem regulacije prometa na upravljanim dionicama autoceste. Algoritmi su implementirani u programskom paketu MATLAB, a simulacija se odvijala u programskom paketu VISSIM. Testni model autoceste na kojem su se odvijale simulacije sa sustavom VSLC-a predstavlja dionicu autoceste s dvije ulazne i jednom izlaznom rampom. Model je prilagođen na način da omogućuje analizu utjecaja promjenjivog ograničenja brzina. Analiza rezultata zasnovana je na simulacijama provedenim na modelu autoceste s primjenom sva tri sustava upravljanja, odnosno algoritama, te bez primjene VSLC sustava. Primjenom upravljačkih algoritama postignuto je poboljšanje u smanjenju štetnih ispušnih plinova do 3% u odnosu na stanje bez primjene VSLC sustava. Osim toga postignuta je veća razina homogenizacije toka, veće prosječne brzine, a TTS se smanjio za 5% što je već obrađeno u poglavlju analize rezultata.

Povećanjem stupnja harmonizacije brzine primjenom VSLC smanjena su zagušenja na kritičnim područjima urbane autoceste oko ulaznih rampi. U području druge ulazne rampe u trenutku prevelike prometne potražnje dolazi do kritičnih zagušenja (povećanja gustoća prometnog toka), a uz primjenu algoritma VSLC znatno se smanjuje gustoća prometnog toka u spomenutom području. Izmjerenom poboljšanje gustoće s algoritmom u odnosu na rezultate simulacije bez algoritma doseže u pojedinim trenucima i do 49%. Ovakvo poboljšanje pridonosi smanjenju intenziteta zagušenja i brzine širenja šok valova, što za posljedicu ima smanjenje emisijama ispušnih plinova i vremena putovanja. Kod analize vremena putovanja postignuto je bolje prosječno vrijeme putovanja glavnim tokom u iznosu od 13% za slučaj simuliran uz primjenu VSLC.

Detaljnijom analizom zaključuje se da su lokacije najvećih prometnih problema upravo mjesta nastanka uskog grla, odnosno na mjestima priključivanja ulaznih rampi na glavni tok. Kao krajnji zaključak, zasnovan na sveobuhvatnoj analizi dobivenih rezultata može se konstatirati da pravovremenim preventivnim djelovanjem, VSLC sustava na brzinu nadolazećeg prometnog toka koji se nalazi ispred zagušenog dijela prometnice, daje pozitivna

poboljšanja u odnosu na sustav bez VSLC. Iako su poboljšanja dobivena za smanjenje zagađenja minimalna u periodu trajanja simulacije od 2,5 [h]. Na godišnjoj razini, s obzirom da su pojave u prometu periodičke, ti iznosi bi bili mnogo veći. MVM i SPSC algoritmi jednostavni su za implementaciju i zasnovani su na jednostavnim algoritmima koji koriste ulazne vrijednosti sa senzora kojima se izračunavaju nova ograničenja brzine. Definirani su oštrim pravilima i teško ih je mijenjati. Algoritam zasnovan na neizrazitoj logici nešto je složeniji za implementaciju jer je najprije potrebno definirati skupove pravila i pravila temeljena na ekspertnom znanju kako bi se dobro umjerio, ali je elastičniji jer se može jednostavno prilagoditi putem težinskih faktora svake od ulaznih vrijednosti.

Spomenuto predstavlja izazov i motivaciju za daljnji rad i istraživanje u ovom području s ciljem postizanja još boljih rezultata. Kao prijedlog za daljnji rad predlaže se fino podešavanje algoritama, a posebice algoritma zasnovanog na neizrazitoj logici, kako bi se smanjila razina područja titranja i utjecaj titranja u sustavu sveo na minimum. Također se predlaže veći broj simulacija, kako bi se dobio širok spektar mogućih događaja te se preciznije odredile prosječne vrijednosti sustava i njihova poboljšanja. Na kraju se predlaže i određivanje prikladne dionice autoceste u Republici Hrvatskoj, prikupljanje realnih podataka za istu s ciljem analize i usporedbe postojećeg stanja s rezultatima koji bi se dobili s primjenom VSLC sustava.



## Literatura

- [1] Galić, I., Usporedba metoda za upravljanje priljevnim tokovima na primjeru zagrebačke obilaznice, Diplomski rad: Sveučilište u Zagrebu, Fakultet prometnih znanosti, 2015.
- [2] Gregurić, M., Ivanjko, E., Korent, N., Kušić, K., "Short Review of Approaches for Variable Speed Limit Control," *Proceedings of the International Scientific Conference Perspectives on Croatian 3pl Industry in Acquiring International Cargo Flows ZIRP2016*, pp. 41-52, 12.04.2016.
- [3] Korent, N., Kušić, K., "Analiza utjecaja promjenjivog ograničenja brzine na protočnost prometa i zagađenje okoliša," Rektorova nagrada, Fakultet prometnih znanosti, Zagreb, 2016.
- [4] Kušić, K., Korent, N., Gregurić, M., Ivanjko, E., "Comparison of Two Controllers for Variable Speed Limit Control," *Proceedings of 58th International Symposium ELMAR-2016, Special session Intelligent Transport Systems, Zadar*, pp. 101-106, 12.-14.09.2016.
- [5] Li, D., Ranjitkar, P., "A fuzzy logic-based variable speed limit controller," *Journal of Advanced Transportation*, vol. 49, pp. 913-927, 2015.
- [6] Barcelo, J., "Fundamentals of Traffic Simulations," *Springer Science Business Media, LLC*, 2010.
- [7] Gregurić, M., Upravljanje priljevnim tokovima na zagrebačkoj obilaznici, Diplomski rad: Sveučilište u Zagrebu, Fakultet prometnih znanosti, 2011.
- [8] Bošnjak, I., Inteligentni transportni sustavi 1, Zagreb: Sveučilište u Zagrebu, Fakultet prometnih znanosti, 2006.
- [9] Barth, M., Boriboonsomsin, K., "Real-World Carbon Dioxide Impacts of Traffic Congestion," *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, vol. 2058, pp. 163-171, 2009.

- [10] Papageorgiou, M.; Kosmatopoulos, E.; Papamichail, I., "Effects of Variable Speed Limits on Motorway Traffic Flow," *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, no. 2047, pp. 37-48, 2008.
- [11] Rämä, P., Raitio, J., Antilla, V., Schirokoff, A., "Effects of weather controlled speed limits on driver behaviour on a two-lane road," in *International Conference: Traffic Safety on Three Continents*, Moscow, 19. - 21.09.2001.
- [12] Hadjipollas, M., Lestas, M., Ioannou, P., Hadjipollas, G., Pitsillides, A., "Evaluation of new ramp metering and variable speed limit algorithms on the Cyprus Highway Network," *International Trade and Freight Transportation Conference*, pp. 171-177, 2008.
- [13] Grabec, I., "Forecasting of Traffic Jams at Disturbed Sections of High-ways," *Journal of Computational and Applied Mathematics*, 2014.
- [14] Papageorgiou, M., Hadj-Salem, H., Blosseville, J.M., "ALINEA: A local feedback control law for on-ramp metering," *Transportation Research Record*, 1991.
- [15] W. Yun, "Dynamic variable speed limit control: design, analysis and benefits," *PhD thesis, Faculty of the USC graduate school, University of Southern California*, 2011.
- [16] Korent, N., "Mogućnosti primjene MATsim simulatora cestovnih prometnih mreža, završni rad," Sveučilište u Zagrebu, Fakultet prometnih znanosti, Zagreb, 2015.

## Popis slika

Slika 1 - Mjesto formiranja uskog grla i efekti preljeva prometa [7].....	4
Slika 2 - Nagib fundamentalnog dijagrama prometnog toka bez VSL-a i s VSL-om [10] .....	6
Slika 3 - Strogo rastuća funkcija $f(Q)$ od $(Q_{min}, Q_{max})$ do $(V_{min}, V_c)$ [2] .....	10
Slika 4 - Ilustracija odsjeka jednosmjerne autoceste podijeljene u N dijelova [3] .....	11
Slika 5 – Funkcija pripadnosti varijable protoka .....	16
Slika 6 – Funkcija pripadnosti varijable gustoće .....	16
Slika 7 - Funkcija pripadnosti izlazne varijable.....	17
Slika 8 – Blok shema upravljanja simulacijom uz pomoć MATLAB-a i izračun emisije štetnih plinova [3].....	18
Slika 9 - Postavke dostupne u EnViVer programskom paketu iz 2016. godine .....	20
Slika 10 - Blokvska shema simulacijskog okruženja za testiranje algoritama VSLC-a.....	21
Slika 11 - Skica modela urbane autoceste korištenog u simulaciji .....	23
Slika 12 - Promjena toka vozila na drugoj ulaznoj rampi .....	24
Slika 13 - Parametri Wiedemann 99 modela .....	25
Slika 14 - Parametri promjene trake.....	26
Slika 15 - Parametri bočnih radnji.....	26
Slika 17 - Koncentracija $CO_2$ .....	46
Slika 18 - Koncentracija $NO_x$ .....	46
Slika 19 - Koncentracija $PM_{10}$ .....	46

## Popis tablica

Tablica 1 - Baza pravila neizrazitog VSL algoritma.....	17
Tablica 2 - Prosjek izmjerenih brzina prikazanih u grafikonu 1.....	32
Tablica 3 - Prosječne vrijednosti gustoće za svaki slučaj upravljanja i slučaj bez upravljanja, po svakoj ćeliji .....	34
Tablica 4 - Prosječne vrijednosti protoka po ćelijama za svaki od upravljačkih algoritama ...	36
Tablica 5 - Maksimalne i prosječne vrijednosti reda čekanja.....	44
Tablica 6 - Smanjenje emisija ispušnih plinova i čestica kod primjene VSLC .....	45
Tablica 7 - SPSC Regulator .....	46
Tablica 8 - MVM regulator.....	47
Tablica 9 - Regulator zasnovan na neizrazitoj logici .....	47
Tablica 10 - Slučaj bez upravljanja .....	47

## Popis grafikona

Grafikon 1 - Rezultati brzina .....	31
Grafikon 2 - Rezultati gustoće .....	33
Grafikon 3 - Rezultati protoka .....	35
Grafikon 4 - Rezultati ograničenja brzine.....	37
Grafikon 5 - Ukupan TTS za cijelo trajanje simulacije.....	40
Grafikon 6 - Prosječne vrijednosti TT .....	41
Grafikon 7 - Sve TT vrijednosti .....	42
Grafikon 8 - Duljina reda čekanja vozila na ulaznoj rampi $r_2$ .....	43



Sveučilište u Zagrebu  
Fakultet prometnih znanosti  
10000 Zagreb  
Vukelićeva 4

## IZJAVA O AKADEMSKOJ ČESTITOSTI I SUGLASNOST

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

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

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

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

Svojim potpisom potvrđujem i dajem suglasnost za javnu objavu \_\_\_\_\_ diplomskog rada


pod naslovom USPOREDBA ALGORITAMA ZA UPRAVLJANJE PROMJENJIVIM

OGRANIČENJEM BRZINE NA URBANIM AUTOCESTAMA

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

U Zagrebu, 31.8.2017

Student/ica:



(potpis)