

# Utjecaj duljine zone promjenjivog ograničenja brzine i zone ubrzanja na protočnost prometa gradskih autocesta

---

**Topić, Nikola**

**Undergraduate thesis / Završni rad**

**2022**

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

*Permanent link / Trajna poveznica:* <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:119:207151>

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

*Download date / Datum preuzimanja:* **2024-07-11**



*Repository / Repozitorij:*

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



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

**Nikola Topić**

**Utjecaj duljine zone promjenjivog ograničenja brzine i zone  
ubrzanja na protočnost gradskih autocesta**

**ZAVRŠNI RAD**

**Zagreb, 2022.**

**SVEUČILIŠTE U ZAGREBU**

Zagreb, 5. svibnja 2022.

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

## ZAVRŠNI ZADATAK br. 6854

Pristupnik: **Nikola Topić (0135256813)**  
Studij: **Inteligentni transportni sustavi i logistika**  
Smjer: **Inteligentni transportni sustavi**

Zadatak: **Utjecaj duljine zone promjenjivog ograničenja brzine i zone ubrzanja na protočnost prometa gradskih autocesta**

### Opis zadatka:

Gradske autoceste dizajnirane su za kretanje motoriziranog prometa pri velikim brzinama, te omogućuju višu razinu uslužnosti od ostalih vrsta prometnica. Međutim, u nekim slučajevima može doći do zagušenja prometnog toka i primjenjuje se upravljanje prometom kao jedna od usluga iz domene inteligentnih transportnih sustava radi smanjivanja zagušenja. Pritom se koriste znakovi promjenjivih poruka za postavljanje primjerenog ograničenja brzine zasnovano na trenutnoj meteorološkoj i/ili prometnoj situaciji. U završnom radu potrebno je opisati upravljanje prometom na gradskim autocestama zasnovano na promjenjivom ograničenju brzine, te na postojećem modelu gradske autoceste izrađenom u programskim paketima SUMO/Matlab analizirati utjecaj duljine zone promjenjivog ograničenja brzine i zone ubrzanja na protočnost prometa.

Mentor:

Predsjednik povjerenstva za  
završni ispit:

  
izv. prof. dr. sc. Edouard Ivanjko

**FAKULTET PROMETNIH ZNANOSTI**

**ZAVRŠNI RAD**

**Utjecaj duljine zone promjenjivog ograničenja brzine i zone  
ubrzanja na protočnost gradskih autocesta**

**Influence of Variable Speed Limit and Acceleration Zone  
Lengths on Urban Motorway Traffic Throughput**

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

**Neposredni voditelj: Filip Vrbanić, mag. ing. traff.**

**Student: Nikola Topić, 0135256813**

**Zagreb, 2022.**

## UTJECAJ DULJINE ZONE PROMJENJIVOG OGRANIČENJA BRZINE I ZONE UBRZANJA NA PROTOČNOST GRADSKIH AUTOCESTA

### SAŽETAK

Zbog povećane prijevozne potražnje na gradskim autocestama može doći do nastanka zagušenja. Iz tog razloga se javlja potreba za uvođenjem sustava upravljanja prometom. U svrhu izbjegavanja ili ublažavanja posljedica zagušenja se koristi niz rješenja iz domene inteligentnih transportnih sustava, od kojih su na gradskim autocestama najkorišteniji upravljanje priljevnim tokovima i promjenjivo ograničenje brzine. Fokus ovoga završnoga rada je analiza utjecaja različitih duljina zona promjenjivog ograničenja brzine, kao i različitih duljina zona ubrzanja na učinkovitost jednostavnog proporcionalnog regulatora za promjenjivo ograničenje brzine. Ispitane su različite konfiguracije zona promjenjivog ograničenja brzine i zone ubrzanja, te njihov utjecaj na protočnost gradskih autocesta korištenjem mikroskopskog simulatora SUMO u scenarijima niskog, srednjeg i visokog prometnog opterećenja.

**KLJUČNE RIJEČI:** gradske autoceste; promjenjivo ograničenje brzine; inteligentni transportni sustavi; mikroskopska simulacija prometa; jednostavni proporcionalni regulator promjenjivog ograničenja brzine

## INFLUENCE OF VARIABLE SPEED LIMIT AND ACCELERATION ZONE LENGTHS ON URBAN MOTORWAY TRAFFIC THROUGHPUT

### Abstract

Due to increased traffic demand on urban motorways, congestion can occur. For this reason, there is a need to introduce traffic control systems. In order to avoid or mitigate the consequences of congestion, a number of solutions from the domain of intelligent transport systems are used, of which the most frequently used on urban motorways are ramp metering and variable speed limit control. The focus of this undergraduate thesis is the influence of different lengths of variable speed limit zones, as well as different lengths of acceleration zones on the efficiency of the simple proportional speed limit controller. Different configurations of variable speed limit control zones and acceleration zones and their influence on urban motorway throughput were analyzed using the microscopic simulator SUMO in low, medium and high traffic demand scenarios.

**KEYWORDS:** urban motorways; variable speed limit control; intelligent transport systems; microscopic traffic simulation; simple proportional speed limit controller

## Sadržaj

1. Uvod .....	1
2. Upravljanje prometom na gradskim autocestama korištenjem promjenjivog ograničenja brzine .....	5
3. Zone upravljanja ograničenjem brzine i zona ubrzanja .....	9
3.1. Duljina VSLC zona .....	9
3.2. Duljina zone ubrzanja .....	10
4. Algoritmi za upravljanje promjenjivim ograničenjem brzine .....	11
5. Simulacijsko okruženje SUMO/MATLAB .....	14
5.1. Model gradske autoceste i scenariji prijevozne potražnje .....	15
5.2. Simulacijski parametri .....	18
5.3. Prostorno-vremenska mjerenja prometnih parametara .....	19
6. Rezultati simulacija .....	21
6.1. Analiza prometnih pokazatelja .....	23
6.2. Rasprava dobivenih rezultata .....	33
7. Zaključak .....	35
Literatura .....	37
Popis slika .....	40
Popis tablica .....	41
Popis grafičkih prikaza .....	42

## 1. Uvod

Današnji način života u gradovima zahtjeva veliku mobilnost stanovništva zbog potreba svakodnevnih putovanja. Budući da je, uzevši u obzir mentalitet ljudi u Republici Hrvatskoj, najkorištenije prijevozno sredstvo u ovim područjima osobni automobil, sve je veća prijevozna potražnja u gradovima [1]. Zbog navedenog porasta prijevozne potražnje, gradske prometnice podliježu manjku kapaciteta, posebice u vršnim satima. Širenje prometnica ili izgradnja novih prometnica najčešće ne dolazi u obzir, zbog prostornog ograničenja u gradovima. Iz tog razloga grade se gradske autoceste. Gradske autoceste rasterećuju gradske prometnice preuzimanjem dijela gradskog prometa, te dodatno, preuzimaju tranzitni promet kojemu prolaz kroz samo središte gradova nije neophodno.

Gradske autoceste dizajnirane su za kretanje motoriziranog prometa pri velikim brzinama, karakterizirane su velikim brojem priljevnih i odljevnih rampi, te omogućuju višu razinu uslužnosti od ostalih vrsta prometnica. Prema [2], razina uslužnosti (engl. *Level of Service – LoS*) definirana je kao kvalitativni pokazatelj operativnih uvjeta prometnice zasnovanih na faktorima kao što su brzina, vrijeme putovanja, manevarska sposobnost, kašnjenje i sigurnost. Iako gradske autoceste imaju mogućnost pružanja većeg prometnog kapaciteta, zbog povećane prijevozne potražnje u vršnim satima, te kao posljedica incidentnih događaja i/ili nepovoljnih vremenskih uvjeta, sve češće dolazi do pojave zagušenja.

Zagušenja nastaju kada je operativni kapacitet prometnice manji od prometnog volumena, te su popraćena malim brzinama i velikom gustoćom prometnog toka, što uzrokuje smanjenje razine uslužnosti. Budući da priljevne i odljevne rampe predstavljaju mjesta sučeljavanja lokalne gradske prometne mreže s gradskom autocestom, one mogu generirati veliku prijevoznu potražnju. Stoga su, zbog interakcije prometnih tokova rampi i glavnog toka, zagušenjima posebno podložne gradske autoceste s velikim brojem priljevnih i odljevnih rampi koje su međusobno blizu smještene [3].

Mjesta koja najčešće izazivaju nastanak zagušenja nazivaju se i uskim grlima (engl. *Bottleneck*). Prema [4], aktivna uska grla su glavni uzrok velikog udjela slučajeva



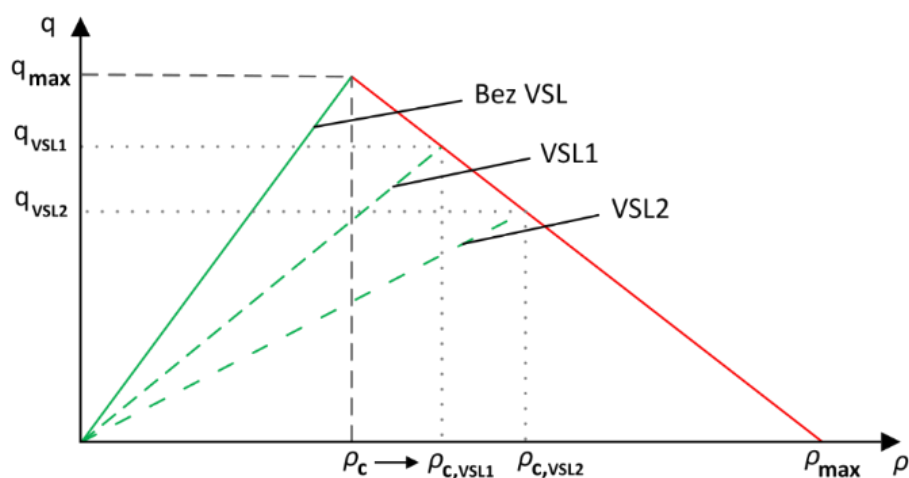
zagušenja, te označavaju područja značajnog prekida prometnog toka. Dodatno, jedna od mogućih pojava uzrokovana aktivnim uskim grlom jest širenje zagušenja suprotno od smjera kretanja prometnog toka, odnosno tzv. šok val (engl. *Shockwave*) [5]. Kao posljedica šok vala, sva vozila koja ulaze na autocestu na području prije zagušenog segmenta, moraju proći sam zagušeni segment, što produljuje vrijeme putovanja, potencijalno stvara sigurnosne opasnosti, te povisuje razinu buke i zagađenja okoliša [5]. Također, osim pojave šok valova, aktivno usko grlo može uzrokovati prelijevanje (engl. *Spillback*) zagušenja s priljevnih rampi na lokalnu gradsku prometnu mrežu, kada je prijevozna potražnja na priljevnim rampama u takvim situacijama velika [6].

Gradske autoceste najčešće se ne mogu širiti, ili je njihovo širenje ekonomski neisplativo. Stoga, za nošenje s dodatnim prometnim opterećenjima sve se više traže rješenja kojima bi se moglo unaprijediti vođenje prometa sa svrhom povećanja propusnosti na već postojećoj prometnoj infrastrukturi gradske autoceste. U današnje vrijeme postoje razni pristupi upravljanju prometa iz područja inteligentnih transportnih sustava (engl. *Intelligent Transport Systems - ITS*). Općenito, ITS se može definirati kao holistička, upravljačka i informacijsko-komunikacijska nadgradnja klasičnog sustava prometa i transporta kojim se postiže znatno poboljšanje performansi odvijanja prometa kroz učinkovitiji transport putnika i roba, poboljšanje sigurnosti u prometu, udobnost i zaštita putnika, smanjenje onečišćenja okoliša itd. [7].

Jedno od rješenja iz domene ITS-a koje se koristi za izbjegavanje zagušenja, pojave šok valova, te povećanja LoS-a na autocestama jest upravljanje promjenjivim ograničenjem brzine (engl. *Variable Speed Limit – VSL*). VSL je sustav upravljanja prometom koji računa prikladno ograničenje brzine, te ga prikazuje na promjenjivim znakovima (engl. *Variable Message Signs – VMS*). Navedeno ograničenje brzine računa se na osnovu trenutnog stanja prometnog toka i/ili meteoroloških uvjeta. VSL se može integrirati i raditi sinkrono s drugim ITS uslugama kao što je upravljanje priljevnim tokovima (engl. *Ramp Metering – RM*) kako bi se osiguralo učinkovito upravljanje prometa ako VSL nije u mogućnosti održati željeni protok vozila unutar zagušenog dijela autoceste [8].

Sustavi VSL-a sačinjeni su od jedne ili više VSL zona, te zone ubrzanja. VSL zonama se nazivaju segmenti na kojima se primjenjuje upravljanje ograničenjem brzine. Budući da zbog ograničenja brzine vozila mogu napustiti VSL zonu malim brzinama, VSL zone moraju biti postavljene dovoljno prije samog uskog grla kako bi

vozila mogla postići kritičnu brzinu  $V_c$  [9]. Zona ubrzanja predstavlja segmente između VSL zona i samog uskog grla. Potreba za zonom ubrzanja očituje se u činjenici da je protok vozila  $q_{max}$  najveći pri kritičnoj brzini kojom se postiže kritična gustoća  $\rho_c$ , te je samim time i pražnjenje uskog grla najefikasnije. Relacija ( $V_c \rightarrow \rho_c \rightarrow q_{max}$ ) vidljiva je na osnovnom dijagramu (engl. *Fundamental Diagram*) prikazanim na Slici 1 [10]. Pritom, kritična gustoća  $\rho_c$  definirana je kao gustoća prometnog toka pri kojoj je protok vozila najveći, dok kritična brzina  $V_c$  predstavlja brzinu prometnog toka kojom se postiže maksimalan protok  $q_{max}$  [10].



Slika 1. Nagib osnovnog dijagrama prometnog toka bez primjene VSL-a i primjenom VSL-a [11]

Učinak duljine zona VSL-a i zone ubrzanja na performanse VSL sustava analiziran je u [9]. Zasnovano na rezultatima dobivenim u [9], u [11] su napravljena dodatna ispitivanja utjecaja različitih duljina dvije uzastopne povezane VSL zone s različitim duljinama zone ubrzanja u svrhu određivanja optimalne konfiguracije VSL zona, te samim time i učinkovitijeg upravljanja uskim grlom. Također, u [11] je analizirano korištenje dviju VSL zona kako bi se ispitaio učinak poboljšane harmonizacije brzine, te kako bi se više ublažio intenzitet zagušenja. Nadalje, u [11] odabrane su i analizirane konfiguracije VSL zona od 100, 300 i 500 [m] uz duljine zone ubrzanja od 100,200 i 300 [m]. Istraživanje u ovome završnome radu nadovezuje se na analizu napravljenu u [11]. Na osnovu simulacijskih rezultata dobivenih u [11]

ispitan je učinak različitih konfiguracija VSL zona i zone ubrzanja na protočnost gradskih autocesta, te je prikazan odnos između primjenjene konfiguracije, scenarija prometnog opterećenja, ukupnog potrošenog vremena (engl. *Total Time Spent – TTS*) i protoka u zoni zagušenja.

Prije nego što se VSL sustav može implementirati, potrebno je odabrati prikladan model upravljanja testiranjem modela unutar odgovarajućeg simulacijskog okruženja. Za analizu u ovome završnome radu korišten je model gradske autoceste ukupne duljine 8 [km] sačinjen od dvije priljevne i jedne odljevne rampe, te izrađen unutar simulacijskog okruženja SUMO (engl. *Simulation of Urban MObility – SUMO*). SUMO je paket za mikroskopsku simulaciju prometa otvorenog kôda koji, uz samu aplikaciju za simuliranje, uključuje i razne alate za podršku, uglavnom za modeliranje prijevozne potražnje i generiranje prometne mreže [12]. Upravljački algoritam korišten u ispitivanju zasnovan je na jednostavnom proporcionalnom regulatoru za promjenjivo ograničenje brzine (engl. *Simple Proportional Speed Controller – SPSC*), te je implementiran unutar MATLAB programske platforme. Tri različita prometna scenarija male, srednje i visoke prijevozne potražnje generirana u [11] korištena su u svrhu testiranja različitih konfiguracija VSL zona i zone ubrzanja.

Ovaj završni rad je podijeljen na šest poglavlja. Iza prvog uvodnog poglavlja slijedi drugo poglavlje, u kojemu su istaknute osnovne činjenice o upravljanju promjenjivim ograničenjem brzine. U trećem poglavlju dan je uvid u utjecaj prostornog razmještaja VSL zona i zone ubrzanja na efikasnost SPSC-VSL-a. Četvrto poglavlje opisuje način rada i značajke SPSC regulatora. U petom poglavlju objašnjeno je simulacijsko okruženje, opisan je korišteni model gradske autoceste, navedeni su scenariji prometnog opterećenja korišteni u svrhu testiranja SPSC-VSL-a, te su prikazani simulacijski parametri. Nadalje, u šestom poglavlju vidljivi su rezultati simulacija, te je dano obrazloženje dobivenih rezultata. Konačno, na temelju obrađenih podataka donesen je zaključak u zadnjem sedmom poglavlju.

## **2. Upravljanje prometom na gradskim autocestama korištenjem promjenjivog ograničenja brzine**

Upravljanje prometom na gradskim autocestama moguće je na osnovu nekoliko kriterija. Neki od kriterija su sigurnost i upravljanje sigurnošću prometa na autocestama, te upravljanje protočnošću prometa sa ciljem smanjenja zagušenja. Dva glavna izazova, odnosno dva glavna izvora zagušenja pri upravljanju protočnošću prometa su priljevni prometni tokovi i nehomogene brzine vozila u glavnom prometnom toku. Sukladno ranije navedenome, izuzetno učinkovitim rješenjima prometnih problema na autocestama pokazala su se sljedeća napredna tehnološka rješenja:

- Strategije sa svrhom smanjenja zagušenja poput RM-a koje se zasnivaju na upravljanju količinom vozila na priljevnim rampama koja se priključuju na glavni tok autoceste;
- VSL koji promjenom ograničenja brzine na VMS-u izravno regulira prometni tok vozila na gradskim autocestama kako bi se smanjila pojava šok valova [13].

Rad navedenih sustava se zasniva na stvarnovremenskoj razmjeni podataka, koji se prikupljaju pomoću osjetila na prometnoj infrastrukturi, te na informiranju vozača putem VMS-ova i semafora. Kako bi se podatci mogli slati, analizirati, te razmjenjivati između korisnika i pružatelja usluga unutar samog sustava, potrebno je postojanje odgovarajuće informacijsko-komunikacijske infrastrukture.

U ovome završnome radu analizirani su sustavi mijenjanja ograničenja brzine na osnovu trenutne prometne situacije korištenjem odgovarajućeg upravljačkog algoritma, odnosno VSL sustavi. Važno je istaknuti kako nejednolikost brzina na dionici pojedine prometnice pridonosi aktivaciji uskih grla, odnosno pojavi zagušenja. Razlog tome jest taj da razlike brzina vozila u glavnom prometnom toku i vozila koja se priključuju s priljevne rampe stvaraju međudjelovanje glavnih i priljevnih prometnih tokova. Navedeno međudjelovanje posebno je izraženo u slučaju dolaska većeg broja vozila s priljevne rampe, što posljedično znatno usporava glavni prometni tok, te se samim time narušava protok, odnosno dolazi do stvaranja uskog grla. Kao što je ranije navedeno, aktivno usko grlo dovodi do širenja zagušenja suprotno od smjera gibanja prometa gradskom autocestom. U tom slučaju povećava se vjerojatnost nastanka

sudara, zbog znatnih razlika u brzinama na segmentima gdje vozila s velikim brzinama dolaze do kraja repa čekanja, te nailaze na spora ili mirujuća vozila. Iz tog razloga dolazi do potrebe za naglim usporavanjem, što dodatno pojačava efekt šok vala. Takvi uvjeti vožnje izazivaju nepravilnosti u odvijanju prometnog toka, te frustraciju i stres vozača jer im je onemogućeno putovanje ujednačenom brzinom.

Implementacijom VSL sustava vrši se promjena nad osnovnim dijagramom odgovarajućeg segmenta autoceste. Djelovanje VSL-a na prometni tok opisan osnovnim dijagramom prikazano je na slici 1. Pritom krivulja bez VSL-a predstavlja brzinu prometnog toka u slučaju kada se ne koristi upravljanje promjenjivim ograničenjem brzine, dok krivulje VSL1 i VSL2 predstavljaju brzine kada se primjenjuje VSL sustav. Izraz *Bez VSL* > *VSL1* > *VSL2* opisuje odnos iznosa brzine bez primjene VSL-a, te uz ograničenja brzine VSL1 i VSL2. Smanjenjem ograničenja brzine također se smanjuje i protok vozila, što povećava granicu kritične gustoće  $\rho_c$  prometnog toka. Upravljački sustav nastoji zadržati prometni tok u točki kritične gustoće. U svrhu održavanja gustoće u uskom grlu oko  $\rho_c$ , VSL omogućuje stvaranje upravljanog uskog grla prije segmenta gdje se nalazi aktivno usko grlo kako bi se smanjio dotok vozila u zagušeni segment. Bitno je napomenuti da je slika 1 aproksimacija osnovnog dijagrama.

S obzirom na poboljšanje protočnosti prometnice, postoje dva glavna principa implementacije VSL sustava. Prvom pristupu, odnosno homogenizacijskom pristupu namjera je smanjiti razliku u brzini između vozila u prometnom toku, čime se postiže sigurniji i stabilniji protok. Drugi pristup orijentiran je na sprječavanje pojave ili rješavanje postojećih prometnih zastoja smanjenjem brzine nadolazećih vozila pomoću VSL-a. Ograničenje brzine postavlja se na vrijednost nižu od kritične brzine, sa ciljem ograničavanja dotoka vozila u segment aktivnog uskog grla, čime se prometni volumen u uskom grlu zadržava oko operativnog kapaciteta. Prema [14], sprječavanjem nestabilnih prometnih uvjeta može se postići veća propusna moć u odnosu na homogenizacijskim pristupom. Generalno, VSL sustavi najčešće se dijele u dvije skupine:

- VSL sustavi zasnovani na vremenskim (meteorološkim) uvjetima. Ovakvi sustavi koriste se na gradskim autocestama gdje nepovoljni uvjeti poput pojave kiše, leda, magle stvaraju sigurnosni problem u odvijanju

prometa. Kada se vremenski uvjeti pogoršaju do predefiniране kritične točke smanjuje se ograničenje brzine na prikladnu brzinu u svrhu smanjenja mogućnosti nastanka incidentnih situacija. Jedan od algoritama korištenih u ovakvim sustavima jest napravljen kao proširenje algoritma Alineja koji je inicijalno osmišljen za RM [3]. Sustavi u ovoj skupini djeluju preventivno;

- VSL sustavi zasnovani na zagušenjima koji se koriste prilikom povećanja prometnog volumena i pojave zagušenja. U ovakvim sustavima upravljačka strategija kojom se smanjuje ograničenje brzine aktivira se kada volumen i/ili gustoća prometnog toka pređe određenu predefiniранu granicu.

Smanjenje brzine može se postaviti automatski prema već određenim algoritmima upravljanja, ili ručno preko centra za upravljanje prometom. U ovome završnome radu analiziran je pristup automatskog smanjenja brzine korištenjem upravljačkog algoritma. Glavni operativni razlozi uvođenja VSL sustava na autocesti su:

- smanjenje vremena putovanja,
- pouzdanija vremena putovanja,
- smanjenje broja pada prosječne brzine glavnog prometnog toka,
- smanjenje emisije štetnih plinova,
- veća iskorištenost prometnih traka,
- ujednačeniji vremenski interval slijeđenja,
- smanjenje broja incidentnih situacija,
- povećanje propusnosti autoceste.

Preduvjet učinkovitog rada VSL sustava zasnovanih na zagušenjima jest dobro predviđena kritična lokacija, odnosno lokacija nastanka aktivnog uskog grla. Nedostatak navedene VSL strategije očituje se u činjenici da je potrebno uložiti mnogo resursa, kao i znanja kako bi se mogle dobro odrediti kritične vrijednosti za odabrani segment autoceste. Nadalje, potrebna je osvješćenost o mogućnosti pomaka stvarne

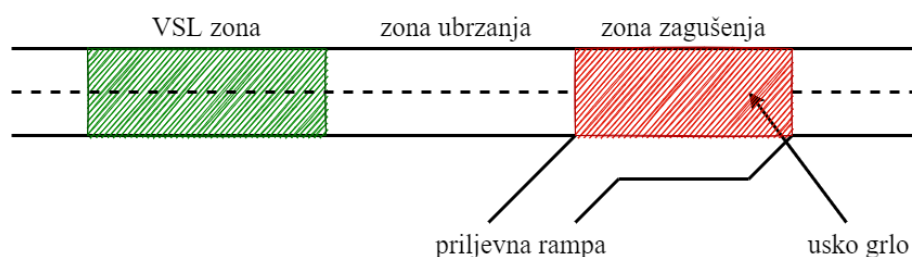
kritične točke prometnog toka uzrokovanog promjenama meteoroloških uvjeta ili povećanjem relativnog udjela teretnih vozila na dionici autoceste [16]. Kako bi se navedeni problem riješio, moguće je koristiti pristup evaluacije kritičnih uvjeta na cesti mjerenjima dobivenih putem raznih prometnih osjetila, primjerice induktivne petlje, kamere, radari u mikrovalnom te milimetarskom području i sl. Ovakav pristup je zasnovan na kritičnim vrijednostima gustoće prometnog toka, te je vrlo sličan načinu funkcioniranja metode RM-a. Istodobno, ova metoda se pokazala izuzetno preciznom pri procjeni kritične vrijednosti gustoće autoceste na segmentima s učestalim periodičnim promjenama prijevozne potražnje [16]. Uz pomoć algoritama odlučivanja, te prilagođenim modulom procjene kritičnih točaka, ovakav pristup se koristi u većini VSL sustava kako bi se aktivirali u pravom trenutku [16]. Također, ovakvim pristupom se izbjegava potreba za umjeravanjima sustava u različitim radnim uvjetima, budući da se prate uvjeti stvarnog prometnog toka.

### 3. Zone upravljanja ograničenjem brzine i zona ubrzanja

Sukladno ranije navedenome, jedna od svrha VSL sustava jest povećanje propusnosti gradske autoceste upravljanjem značajkama glavnog prometnog toka. Rezultati analize u [9] se pokazali snažnu korelaciju prostornog razmještaja VSL zona i zona ubrzanja, kao i njihovih duljina, odnosno njihove udaljenosti od zone uskog grla, s optimizacijom prometnog toka. Također, istraživanja u [9] su istaknula negativni utjecaj prekratke zone ubrzanja, kao i predugačke VSL zone na efikasnost VSL sustava. U podpoglavljima 3.1. i 3.2. dan je uvid u utjecaje različitih prostornih razmještaja VSL zona, te zona ubrzanja.

#### 3.1. Duljina VSLC zona

Ideja korištenja VSL sustava u svrhu povećanja propusnosti gradske autoceste jest održavanje glavnog prometnog toka na području prije samog uskog grla na odgovarajuće niskoj razini kako bi se izbjeglo zagušenje i pad kapaciteta na samoj lokaciji uskog grla odnosno zagušenja. Time se uspostavlja maksimalan mogući protok i inducira upravljano prividno zagušenje na zoni primjene VSL-a (Slika 2) [9]. Međutim, budući da se navedeno zagušenje nalazi prije samog uskog grla gledano smjer gibanja prometa, takvim se pristupom izbjegava pad kapaciteta upravljane prometnice, te se povećavaju protok i brzina u odnosu na slučaj bez upravljanja.



Slika 2. Prikaz VSL zone, zone ubrzanja i zone zagušenja na dionici gradske autoceste [11]



Budući da VSL sustavi koriste VMS-ove za prikaz postavljenog ograničenja brzine, vozila prilagođavaju brzinu pri prolasku pored VMS-a i održavaju ju sve dok sljedeći VMS dalje u smjeru gibanja prometa ne indicira drugačije ograničenje brzine. Stoga, promjena ograničenja brzine ima utjecaj samo na vozila koja ulaze u VSL zonu, a nema utjecaja na vozila koja se u njoj već nalaze. Iz navedenog razloga, dulje VSL zone povećavaju kašnjenja, te rezultiraju sporijim sustavom, što je nepoželjno. Istraživanja u [9] ukazuju na to da kraće VSL zone povećavaju performanse sustava, te su uočeni najbolji rezultati s VSL zonama duljine od samo 100 [m], no, rezultati s VSL zonama od 50 [m] bili su vrlo slični. Iako rezultati simulacije u [9] pokazuju bolju izvedbu s kratkim VSL zonama, mora se uzeti u obzir da prilikom terenske primjene dva ili više sukobljena VMS-ova vrlo blizu jedan drugome mogu biti zbunjujuća vozačima.

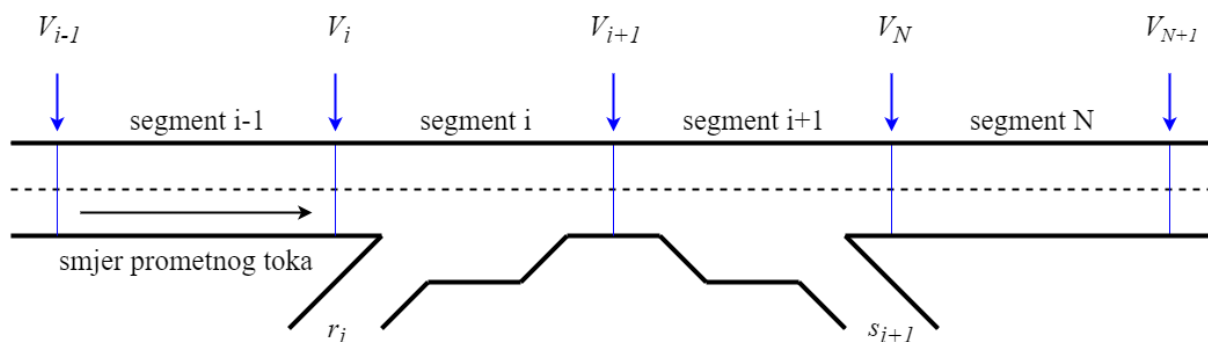
### **3.2. Duljina zone ubrzanja**

Segment gradske autoceste između VSL zone i zone uskog grla se naziva zonom ubrzanja (Slika 2). Kao što je ranije navedeno, zona ubrzanja omogućuje vozilima da dostignu kritičnu brzinu pri ulasku u zonu uskog grla. Duljina zone ubrzanja znatno utječe na brzinu kojom vozila dolaze do uskog grla. Primjerice, prekratka zona ubrzanja može biti neodgovarajuća za vozila da prije ulaska u zonu uskog grla ubrzaju do kritične brzine, čime se smanjuje propusnost uskog grla, kao i performanse VSL sustava [9]. Sa druge strane, dulja zona ubrzanja može dovoditi do većih kašnjenja VSL sustava, budući da vozila koja napuštaju VSL zonu moraju preći veću udaljenost do uskog grla [9]. Međutim, navedeno kašnjenje trebalo bi biti manje izraženo u odnosu na kašnjenje uzrokovano duljom VSL zonom, zbog toga što vozila obično putuju znatno većom brzinom u zoni ubrzanja nego u VSL zoni [9]. Iz toga slijedi da je potrebno odrediti optimalnu duljinu ili raspon duljina za zonu ubrzanja [9]. U istraživanjima napravljenim u [9] najbolji rezultati postignuti su s duljinom zone ubrzanja od 175 [m].

## 4. Algoritmi za upravljanje promjenjivim ograničenjem brzine

Sukladno ranije navedenome, VSL sustavi prema načinu primjene se mogu podijeliti u dvije skupine. Prva skupina se odnosi na VSL sustave kojima se ograničenje brzine mijenja na osnovu odluke od strane operativnog osoblja u upravljačkom centru pripadne autoceste, te se oni najčešće koriste u slučaju prometnih nesreća, nepovoljnih meteoroloških uvjeta i sl. Navedeni sustavi nisu analizirani u ovome završnome radu. Druga skupina se odnosi na reaktivne VSL sustave koji djeluju na osnovu stvarnih uvjeta na autocesti. Korištenjem podataka prikupljenih na osjetilima pripadni upravljački algoritmi izračunavaju prikladna ograničenja brzine. Takav pristup se pretežno koristi u svrhu povećanja performansi prometnog toka. Jednostavni reaktivni regulatori zasnivaju se na klasičnoj negativnoj povratnoj vezi. Jedna od poželjnih karakteristika VSL regulatora je njihovo stabilno ponašanje u promjenjivim prometnim uvjetima. Istodobno, poželjno je imati manje složen regulator kako bi se mogao implementirati i testirati u simulaciji, te lako prilagoditi u stvarnom svijetu. Za analizu napravljenu u ovome završnome radu korišten je SPSC regulator, čije su značajke, kao i način rada opisani u nastavku.

SPSC je jednostavan regulator ograničenja brzine na gradskoj autocesti zasnovan na negativnoj povratnoj vezi, te je razvijen sa ciljem pojednostavljivanja regulatora promjenjivog ograničenja brzine zasnovanog na upravljanju tokom (engl. *Mainline Virtual Metering – MVM*) [17]. Pristup upravljanju regulatora MVM-a je dizajniran na osnovu koncepta RM-a koji povećava propusnost gradske autoceste ograničavanjem protoka vozila s priljevne rampe u glavni prometni tok [18]. Princip rada MVM-a jest generalizacija navedenog pristupa, na način da se prethodni segment gradske autoceste  $i-1$  smatra ulaznom rampom u sljedeći segment  $i$  [17]. Dionica gradske autoceste podijeljena u  $N$  segmenata prikazana je na Slici 3. Osnova ideja jest preslikati radnje upravljanja prometnog toka prethodnog segmenta gradske autoceste u radnje upravljanja brzinom temeljene na odnosu protok – brzina (osnovni dijagram) [17]. Za razliku od MVM-a, koji održava konstantnu željenu gustoću, SPSC može odgovarajuće odgovoriti na promjene gustoće u prometnom toku nakon upravljanog segmenta [17].



Slika 3. Ilustracija dionice jednog smjera gradske autoceste podijeljene na  $N$  segmenata [11]

Pretpostavimo da je dionica gradske autoceste podijeljena u  $N$  segmenata, kao što je prikazano na Slici 3, te da se zagušenje dogodilo u zadnjem segmentu  $N$  gledano smjer gibanja prometnog toka. Upravljeni segmenti smješteni prije segmenta  $N$  reagiraju na promjene gustoće u slijedećim segmentima sukladno Izrazu (1). Stoga, SPSC nastoji prilagoditi ograničenje brzine prometnog toka u segmentima prethodnim od  $N$  kako bi se smanjio dotok vozila u zagušeni segment  $N$ , te minimizirale razlike između gustoća izmjerenih iz prethodnog i trenutnog vremenskog koraka upravljanja [19]:

$$\bar{V}_i(t) = V_i(t-1) + K_v \left[ \sum_{j=i+1}^{N+1} \rho_j(t-1) - \sum_{j=i+1}^{N+1} \rho_j(t) \right], \quad (1)$$

pri čemu je:

$\bar{V}_i(t)$  – nova vrijednost ograničenja brzine,

$V_i(t-1)$  – vrijednost ograničenja brzine iz prethodnog vremenskog koraka  $t-1$ ,

$K_v$  – koeficijent pozitivnog proporcionalnog povećanja,

$\rho_j(t-1)$  – izmjerena gustoća na segmentu  $j$  u prethodnom vremenskom koraku  $t-1$ ,

$\rho_j(t)$  – izmjerena gustoća na segmentu  $j$  u trenutnom vremenskom koraku  $t$ .

Nedostatak SPSC regulatora očituje se u čestim promjenama ograničenja brzine uzrokovanim prirodom Izraza (1) [19]. Kako bi se SPSC regulator dodatno stabilizirao, uvodi se dodatna varijabla  $C_i$  [voz/km/traka] za upravljanje aktivacijom

regulatora [19]. Kada upravljačka varijabla  $C_i$  nije aktivna, ograničenje brzine se ne mijenja. Međutim, ako je gustoća u susjednom segmentu  $i$  u vremenskom koraku  $t$  veća od unaprijed definiranog praga aktivacije  $C_i$ , potreban je novi izračun ograničenja brzine u segmentu  $(i-1)$ , što pobuđuje aktivno stanje upravljačke varijable  $C_i$  [19]. Stoga, kako bi se postigle glatke promjene brzine, te spriječile velike oscilacije između dva uzastopna ograničenja brzine, novo ograničenje brzine uvjetovano je Izrazom (2) [19]. Parametar  $C_v$  predstavlja maksimalnu dopuštenu promjenu brzine po vremenskom koraku  $t$  i postavljen je na 20 [km/h] [19].

$$V_i(t) = \begin{cases} V_i(t-1) - C_v, & \text{ako je } \bar{V}_i(t) \leq \bar{V}_i(t) - C_v \\ V_i(t-1) + C_v, & \text{ako je } \bar{V}_i(t) \geq \bar{V}_i(t) + C_v \\ \bar{V}_i(t), & \text{u suprotnom} \end{cases} \quad (2)$$

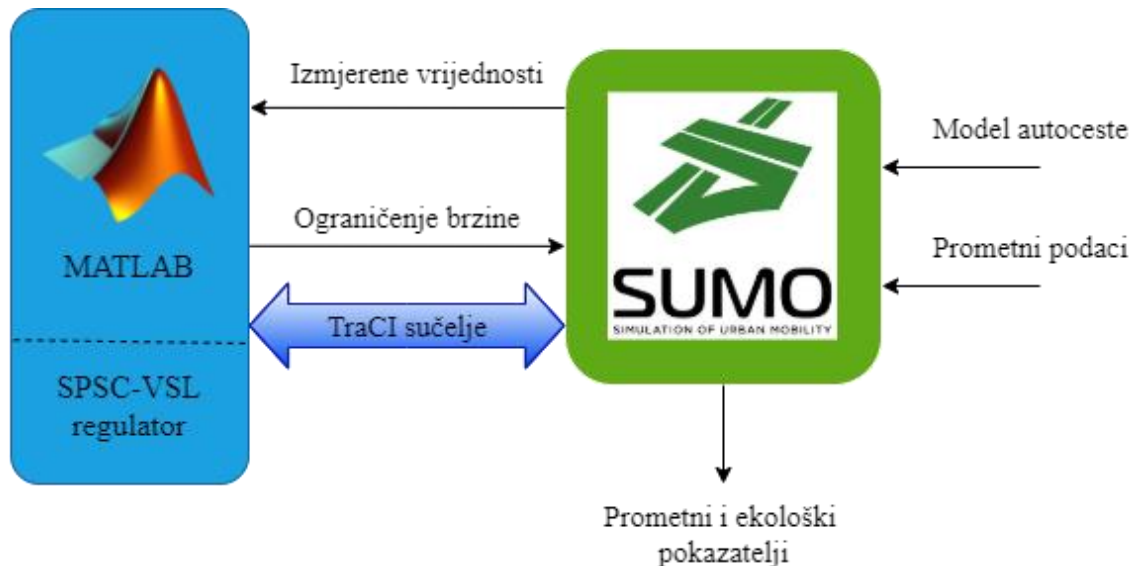
## 5. Simulacijsko okruženje SUMO/MATLAB

Za implementaciju rješenja upravljanja prometom potrebno je točno poznavanje prometnih uvjeta i dinamike odvijanja prometa. Programski paketi za simulaciju prometa pružaju koristan alat za odgovaranje na složena istraživačka ili stručna pitanja, te za procjenu ili testiranje strategija upravljanja prometom i njihovih utjecaja. Alati za simulaciju prometa se uglavnom mogu podijeliti u četiri različite skupine:

- Makroskopski, kojima se simuliraju prosječne dinamike vozila poput gustoće, brzine ili iznosa toka vozila za izdvojeni dio prometnice,
- Mikroskopski, u kojima se svako vozilo i njegova dinamika modelira individualno,
- Mezoskopski, koji predstavljaju mješavinu makroskopskih i mikroskopskih,
- Submikroskopski, u kojima su osim svakog vozila, također eksplicitno simulirane i funkcije unutar vozila kao što je primjerice mjenjač brzine, što je bitno kod današnjih novih mješovitih prometnih tokova koji sadrže i autonomna, te umrežena vozila [20].

Prednost makroskopskih modela obično je njihova velika brzina izvršavanja. Međutim, detaljna simulacija mikroskopskih modela je preciznija [20]. Simulacijsko okruženje korišteno u svrhu ovoga završnoga rada, prikazano na Slici 4, sastavljeno je od mikroskopskog simulatora SUMO i programskog paketa MATLAB, uz programski dodatak TraCI4MATLAB.

SUMO omogućuje visoku razinu fleksibilnosti, dopuštajući korisniku da dohvati i modificira objekte u simulaciji [21]. Sa druge strane, MATLAB je programski alat s programskim jezikom namijenjen tehničkim složenijim izračunima, te se koristi u mnogim zadacima simulacije, upravljanja, optimizacije i sl. Programski dodatak TraCI4MATLAB služi kao poveznica između alata SUMO i MATLAB.



Slika 4. Blok shema simulacijskog okruženja [11]

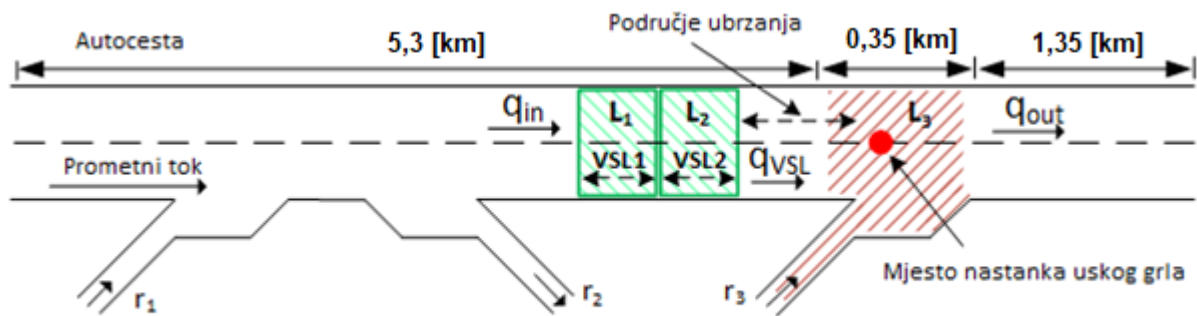
SPSC regulator implementiran je unutar programskog paketa MATLAB. Korištenjem TraCI4MATLAB-a je omogućena međusobna interakcija između SUMO simulatora i programskog paketa MATLAB. Simulacijom se u potpunosti upravlja pomoću programskog kôda napisanog u MATLAB-u, dok se sama simulacija izvršava u SUMO-u. U MATLAB-u su kreirane funkcije pomoću kojih se prikupljaju i računaju podaci o prometnom toku. Na temelju navedenih podataka, SPSC regulator predlaže trenutne odluke o ograničenju brzine, koje se izravno šalju u SUMO na pripadne VMS-ove.

U nadolazećim podpoglavljima je opisan model gradske autoceste, kao i scenariji prijevozne potražnje generirani u [11] korišteni za testiranje SPSC regulatora. Također, dan je uvid u simulacijske parametre, te način prikupljanja i obrade podataka.

### 5.1. Model gradske autoceste i scenariji prijevozne potražnje

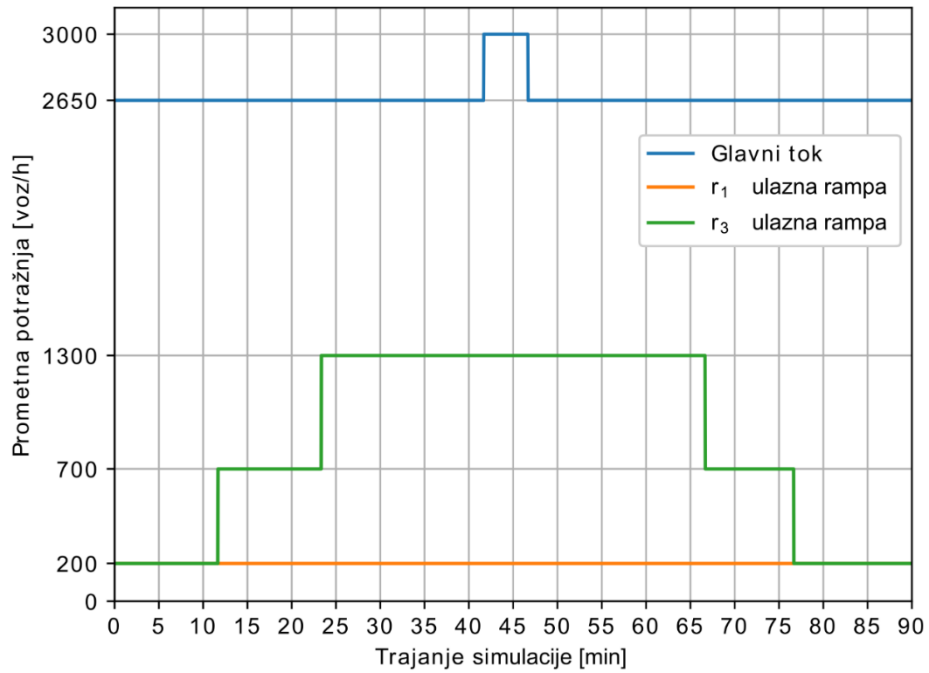
Model gradske autoceste korišten u svrhu analize napravljene u ovome završnome radu zasniva se na simulacijskom modelu upotrijebljenom u [22]. Ukupna duljina modela iznosi 8 [km], te sadrži dvije priljevne rampe ( $r_1$  i  $r_3$ ) i jednu odljevnu rampu ( $r_2$ ), od kojih je svaka duljine 0,5 [km]. Model sadrži tri glavne zone koje se koriste za SPSC-VSL upravljanje, prikazane na Slici 5, a to su VSL zone ( $L_1$  i  $L_2$ ) i zona

zagušenja ( $L_3$ ). Na početku svake VSL zone implementiran je VMS, te se pomoću njega, ovisno o prijevoznoj potražnji, smanjuje ili povećava ograničenje brzine. Zona zagušenja ( $L_3$ ) jest segment u kojem nastaje aktivno usko grlo, te se njena dimenzija mijenja ovisno o trenutnoj prometnoj situaciji.

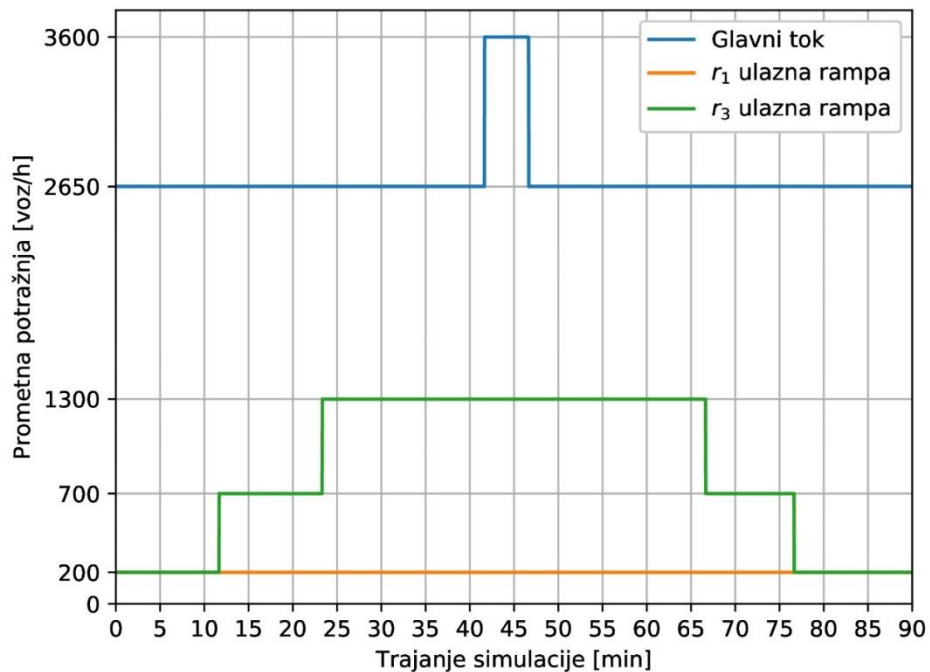


Slika 5. Model gradske autoceste [11]

Sa ciljem ispitivanja SPSC-VSL-a korištena su tri različita scenarija prometnog opterećenja generirana u [11]. U sva tri scenarija na priljevnoj rampi  $r_1$  generira se konstantan prometni tok od 200 [voz/h], dok se na priljevnoj rampi  $r_3$  generira promjenjivi prometni tok minimalnog iznosa od 200 [voz/h], a maksimalnog iznosa od 1.300 [voz/h]. U scenariju niskog prometnog opterećenja, vidljivom na grafičkom prikazu 1, na glavnom prometnom toku se generira promjenjivi prometni tok minimalnog iznosa 2.650 [voz/h], a maksimalnog iznosa 3.000 [voz/h]. Na grafičkom prikazu 2 vidljiv je scenarij srednjeg prometnog opterećenja. Glavni prometni tok srednjeg scenarija prijevozne potražnje karakteriziran je promjenjivim prometnim tokom minimalnog iznosa 2.650 [voz/h] i maksimalnog iznosa 3.600 [voz/h]. Konačno, za scenarij visokog prometnog opterećenja, vidljiv na grafičkom prikazu 3, na glavnom prometnom toku se generira prometni tok koji se mijenja između minimalnog iznosa 2.650 [voz/h] i maksimalnog iznosa 3.800 [voz/h].

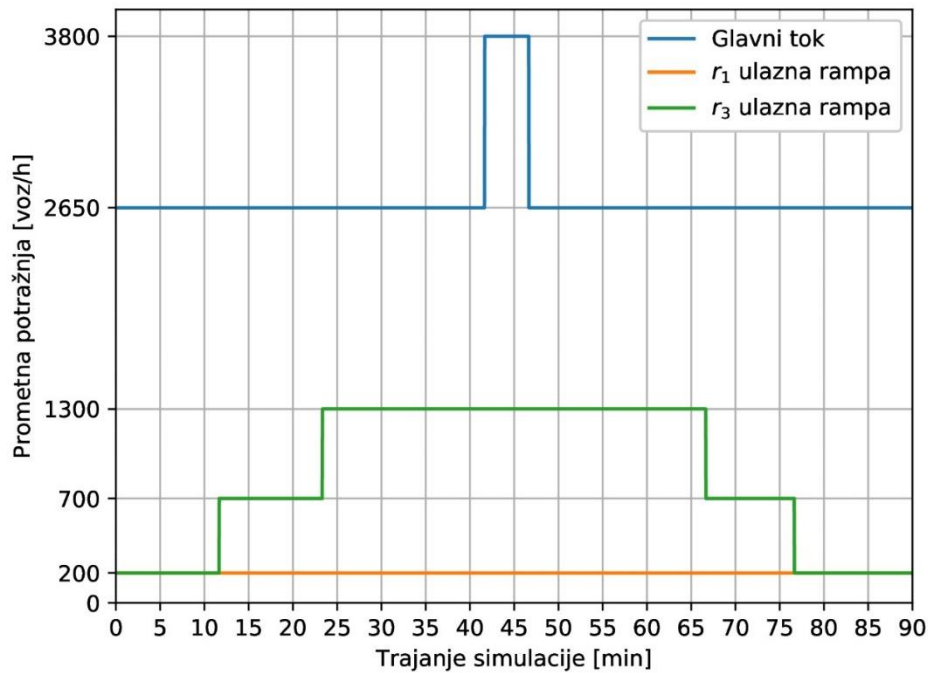


Grafički prikaz 1. Generirana prijevozna potražnja za scenarij niskog prometnog opterećenja [11]



Grafički prikaz 2. Generirana prijevozna potražnja za scenarij srednjeg prometnog opterećenja [11]





Grafički prikaz 3. Generirana prijevozna potražnja za scenarij visokog prometnog opterećenja [11]

## 5.2. Simulacijski parametri

Vrijeme trajanja svake od simulacija testiranih u ovom radu iznosi 1,5 [h]. Nazivna vrijednost ograničenja brzine na glavnom prometnom toku u uvjetima slobodnog prometnog toka postavljena je na 120 [km/h], dok se pri nastanku zagušenja ograničenje brzine može smanjiti do 60 [km/h] korakom od 20 [km/h]. Na priljevnim i odljevnim rampama ograničenje brzine postavljeno je na 65 [km/h]. Nakon računanja novog ograničenja brzine, nova vrijednost ograničenja brzine šalje se VMS-u svakih 2,5 [min]. Parametri regulatora  $K_v$  i  $C_i$  su odabrani na osnovu većeg broja simulacija napravljenih u [11], uzimajući u obzir kriterij minimizacije TTS-a, te su prikazani u tablici 1. Konačno, dinamika kretanja vozila je modelirana Krausovim modelom praćenja vozila sa zadanim parametrima preuzetih iz [20].

Tablica 1. Vrijednosti parametara  $K_v$  i  $C_i$  za pojedinu konfiguraciju duljina VSL zona i scenarij prijevozne potražnje [11]

Scenarij niske prijevozne potražnje			
Konfiguracija	100-100	300-300	500-500
$K_v$	4,5	4,5	4,5
$C_i$ [voz/km/trak]	23	29	29
Scenarij srednje prijevozne potražnje			
Konfiguracija	100-100	300-300	500-500
$K_v$	4,5	4,5	4,5
$C_i$	23	23	26
Scenarij visoke prijevozne potražnje			
Konfiguracija	100-100	300-300	500-500
$K_v$	2,5	4,5	2,5
$C_i$	26	23	29

### 5.3. Prostorno-vremenska mjerenja prometnih parametara

U svrhu ispitivanja učinkovitosti SPSC-VSL-a, te prikaza prostorno-vremenske distribucije protoka po promatranj dionici gradske autoceste, simulirani model gradske autoceste je podijeljen na manje segmente duljine 50 [m]. Na taj način je omogućena detaljna prezentacija prometnog stanja simulirane mreže gradske autoceste u bilo kojem vremenskom koraku za svaki pojedini segment, čime se omogućuje prostorno-vremenska analiza ponašanja prometnog toka tijekom simulacije. Parametri glavnog prometnog toka kao što su prosječna brzina vozila, gustoća prometnog toka i protok su mjereni svakih 10 [s] pomoću SUMO simulatora i MATLAB programskog kôda. Također, ukupni TTS, kao i TTS u 2,5 [min] intervalima simulacije je mjeran duž cijelog modela gradske autoceste, uključujući glavni prometni tok, kao i sve rampe. TTS je odabran kao jedna od mjera jer su vrijeme putovanja na glavnom prometnom toku gradske autoceste, kao i vrijeme čekanja na rampama

uključeni u samo jednu mjeru koja predstavlja stanje prometa na cjelokupnoj mreži gradske autoceste.

## 6. Rezultati simulacija

U ovom poglavlju prikazani su dobiveni rezultati simulacija modela gradske autoceste napravljenih u [11]. Poglavlje je podijeljeno na dva podpoglavlja. U prvom podpoglavlju je prikazan i opisan utjecaj različitih konfiguracija VSL zona i zone ubrzanja na protočnost gradskih autocesta, te je dan prikaz odnosa konfiguracije zona, scenarija prometnog opterećenja, TTS-a i protoka u zoni zagušenja. U drugom podpoglavlju obrazloženi su i raspravljani dobiveni rezultati.

Utjecaj duljina VSL zona i zone ubrzanja na protočnost gradskih utjecaja analiziran je na osnovu rezultata simulacija različitih konfiguracija VSL zona i zone ubrzanja u tri različita scenarija prometnog opterećenja napravljenih u [11]. U ovome završnome radu ispitane su tri konfiguracije VSL zona, koje su susjedne jedna drugoj,  $L_1$  i  $L_2$ , duljina 100-100 [m], 300-300 [m], te 500-500 [m], s duljinama zone ubrzanja, koja slijedi nakon VSL zone  $L_2$ , 100 [m], 200 [m] i 300 [m]. Postoji 27 različitih konfiguracija, te se u svrhu usporedbe dobivenih rezultata kao referentna vrijednost uzima slučaj bez primjene VSL-a. Bitno je napomenuti da cilj ove analize nije ustanoviti koliko SPSC-VSL može poboljšati protočnost, nego razmotriti utjecaj različitih konfiguracija VSL zona i zone ubrzanja na efikasnost SPSC-VSL-a. Stoga bi se poboljšanje u odnosu na slučaj bez VSL-a generalno trebalo smatrati mjerom usporedbe između dvije različite postavke scenarija upravljanja, a ne apsolutnom mjerom performansi. Pritom su se koristili rezultati simulacija napravljenih u [11], a prikazani su tablicama 2, 3, i 4.

**Tablica 2. Dobiveni rezultati simulacija napravljenih u [11] u scenariju niskog prometnog opterećenja**

Duljina VSL zona [m]	Duljina zone ubrzanja [m]	TTS [voz*h]		Prosječni protok u L3 [voz/h/trak]		Prosječna brzina u L3 [km/h]		Prosječna gustoća u L3 [voz/km/trak]	
		Izmjereno	Poboljšanje	Izmjereno	Poboljšanje	Izmjereno	Poboljšanje	Izmjereno	Poboljšanje
Bez VSL-a		408,42	/	2293,23	/	78,73	/	29,13	/
100-100	100	417,02	2,10%	2335,79	1,86%	78,16	-0,72%	29,88	2,60%
	200	410,66	0,55%	2225,91	-2,94%	81,08	2,99%	27,45	-5,75%
	300	409,24	0,20%	2251,72	-1,81%	82,19	4,39%	27,40	-5,94%
300-300	100	415,19	1,66%	2336,18	1,87%	77,53	-1,53%	30,13	3,45%
	200	418,10	2,37%	2311,92	0,81%	76,52	-2,80%	30,21	3,72%
	300	420,33	2,92%	2349,73	2,46%	78,07	-0,84%	30,10	3,33%
500-500	100	421,18	3,12%	2312,96	0,86%	78,06	-0,86%	29,63	1,73%
	200	417,48	2,22%	2325,79	1,42%	77,49	-1,58%	30,02	3,05%
	300	417,37	2,19%	2313,14	0,87%	78,02	-0,90%	29,65	1,79%

**Tablica 3. Dobiveni rezultati simulacija napravljenih u [11] u scenariju srednjeg prometnog opterećenja**

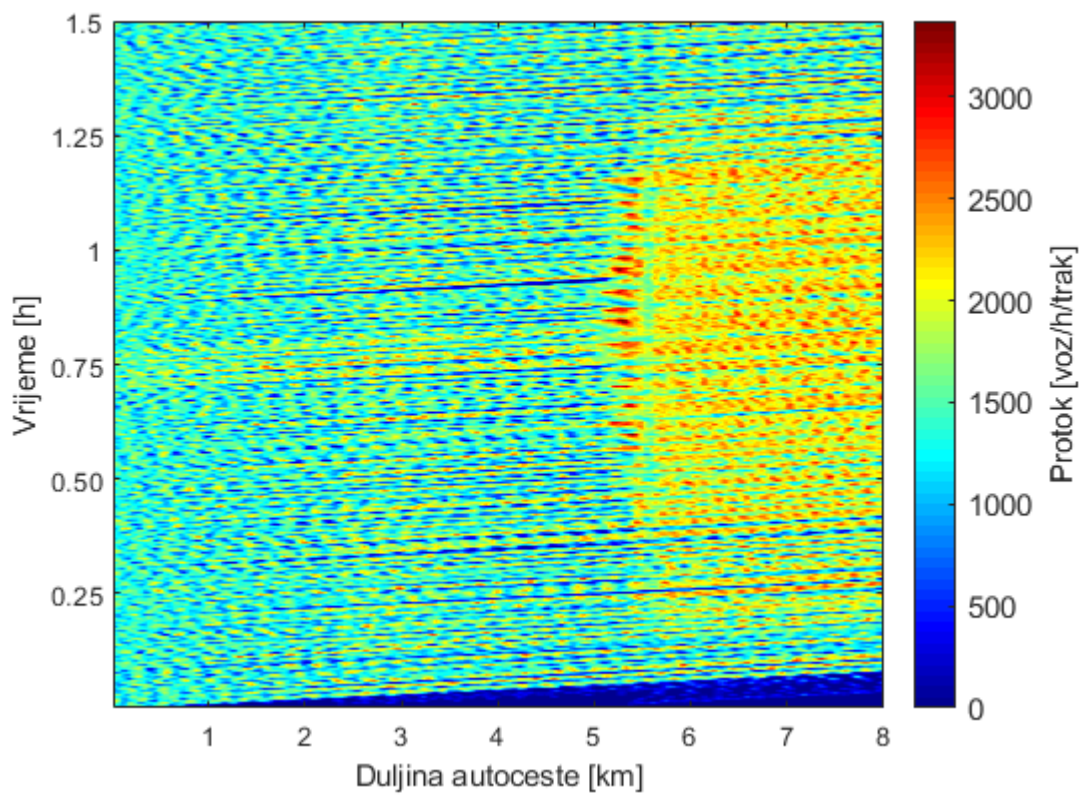
Duljina VSL zona [m]	Duljina zone ubrzanja [m]	TTS [voz*h]		Prosječni protok u L3 [voz/h/trak]		Prosječna brzina u L3 [km/h]		Prosječna gustoća u L3 [voz/km/trak]	
		Izmjereno	Poboljšanje	Izmjereno	Poboljšanje	Izmjereno	Poboljšanje	Izmjereno	Poboljšanje
Bez VSL-a		428,19	/	2310,33	/	78,81	/	29,31	/
100-100	100	425,01	-0,74%	2312,76	0,11%	79,05	0,30%	29,26	-0,20%
	200	431,31	0,73%	2331,88	0,93%	78,33	-0,61%	29,77	1,55%
	300	436,17	1,86%	2390,79	3,48%	76,42	-3,03%	31,28	6,71%
300-300	100	426,74	-0,34%	2276,04	-1,48%	81,23	3,07%	28,02	-4,42%
	200	429,17	0,23%	2299,07	-0,49%	79,55	0,93%	28,90	-1,41%
	300	426,08	-0,49%	2290,65	-0,85%	80,38	1,99%	28,50	-2,79%
500-500	100	429,70	0,35%	2316,80	0,28%	79,10	0,37%	29,29	-0,09%
	200	436,04	1,83%	2346,35	1,56%	77,64	-1,49%	30,22	3,10%
	300	423,60	-1,07%	2264,65	-1,98%	80,93	2,68%	27,98	-4,54%

**Tablica 4. Dobiveni rezultati simulacija napravljenih u [11] u scenariju visokog prometnog opterećenja**

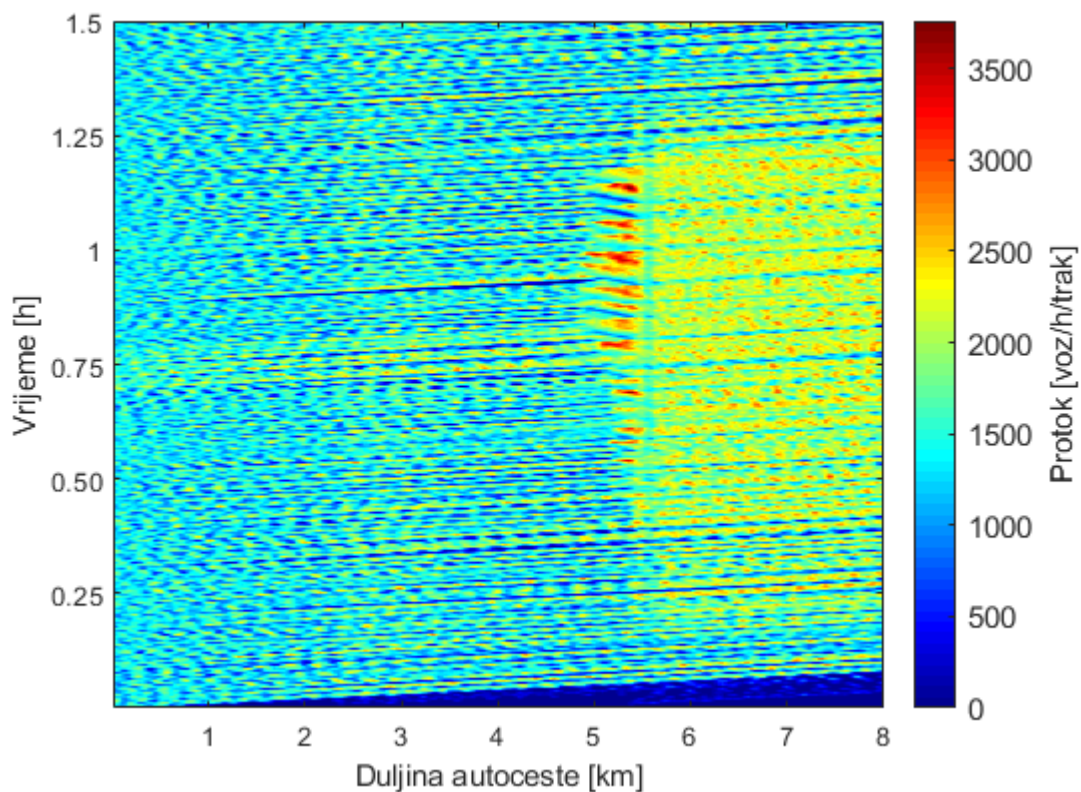
Duljina VSL zona [m]	Duljina zone ubrzanja [m]	TTS [voz*h]		Prosječni protok u L3 [voz/h/trak]		Prosječna brzina u L3 [km/h]		Prosječna gustoća u L3 [voz/km/trak]	
		Izmjereno	Poboljšanje	Izmjereno	Poboljšanje	Izmjereno	Poboljšanje	Izmjereno	Poboljšanje
Bez VSL-a		443,21	/	2355,03	/	77,49	/	30,39	/
100-100	100	423,26	-4,50%	2225,85	-5,49%	82,72	6,75%	26,91	-11,46%
	200	442,16	-0,24%	2405,01	2,12%	75,93	-2,01%	31,67	4,21%
	300	436,64	-1,48%	2335,61	-0,82%	77,13	-0,46%	30,28	-0,37%
300-300	100	426,68	-3,73%	2243,10	-4,75%	82,06	5,89%	27,34	-10,05%
	200	438,52	-1,06%	2323,75	-1,33%	79,66	2,80%	29,17	-4,01%
	300	436,32	-1,55%	2321,05	-1,44%	78,76	1,64%	29,47	-3,03%
500-500	100	443,21	0,00%	2347,52	-0,32%	77,24	-0,32%	30,39	0,00%
	200	434,05	-2,07%	2340,77	-0,61%	79,67	2,81%	29,38	-3,32%
	300	443,79	0,13%	2400,21	1,92%	76,01	-1,92%	31,58	3,91%

## 6.1. Analiza prometnih pokazatelja

Kao što je već navedeno, cilj ovoga rada jest analizirati utjecaj različitih duljina VSL zona i zone ubrzanja na protočnost gradskih autocesta. Referentne vrijednosti, odnosno vrijednosti slučaja bez VSL-a u svakom od tri scenarija prometnog opterećenja prikazane su tablicama 2, 3 i 4. Rezultati simulacija scenarija niskog prometnog opterećenja napravljenih u [11] prikazani su tablicom 2. S obzirom na protok u zoni zagušenja  $L_3$ , najbolja konfiguracija u scenariju niskog prometnog opterećenja sačinjena je od VSL zona duljina 300 [m], te zone ubrzanja duljine 300 [m]. U odnosu na slučaj bez VSL-a, u kojemu je izmjerena prosječna vrijednost protoka u  $L_3$  od 2.293,23 [voz/h/trak], prosječna vrijednost protoka u  $L_3$  navedene konfiguracije iznosi 2.349,73 [voz/h/trak], što je za 2,46 [%] više. Međutim, primjenom navedene konfiguracije također se uzrokuje porast TTS-a od 2,92 [%]. Na prostorno-vremenskim dijagramima protoka, vidljivim na slikama 6 i 7, prikazana je usporedba slučaja bez VSL-a i dobivene najbolje konfiguracije. Dijagram na slici 6 predstavlja prostorno-vremensku raspodjelu protoka za slučaj bez VSL-a, dok je dijagramom na slici 7 prikazana prostorno-vremenska raspodjela protoka za najbolju dobivenu konfiguraciju duljina VSL zona i zone ubrzanja. Može se uočiti porast protoka u zoni zagušenja u vremenskom razdoblju od 0,75 [h] do 1,25 [h] trajanja simulacije.



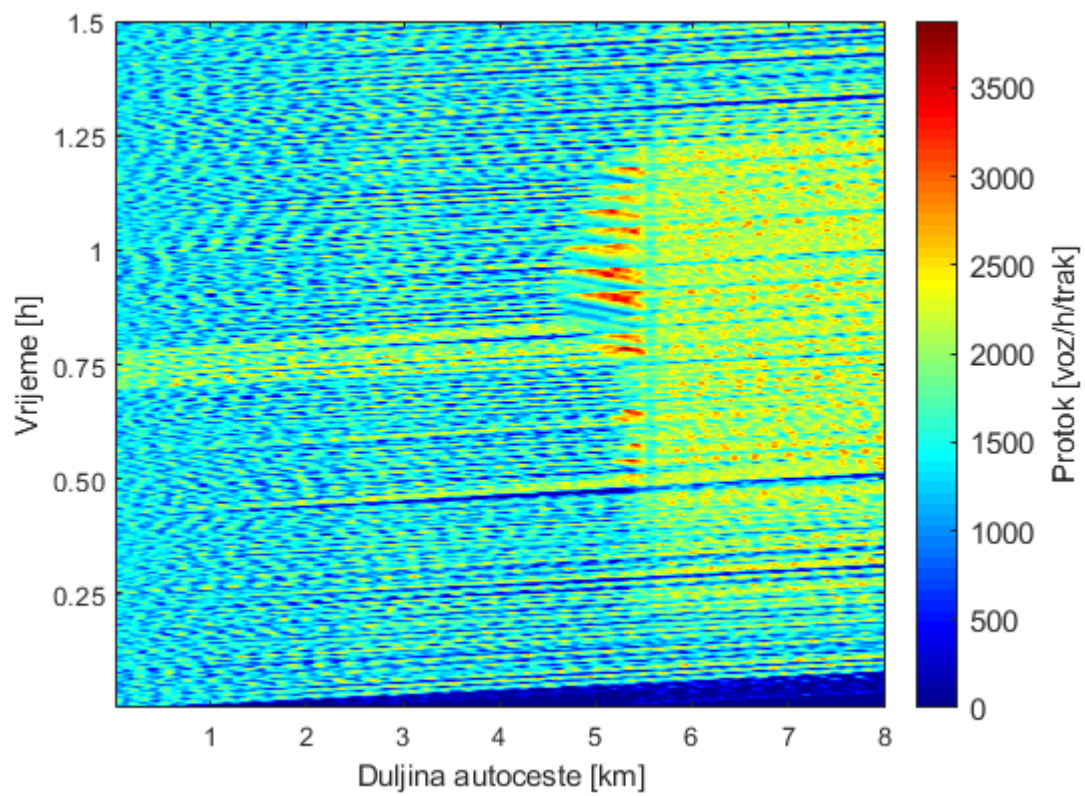
*Slika 6. Prostorno-vremenski dijagram protoka za slučaj bez VSL-a u scenariju niskog prometnog opterećenja*



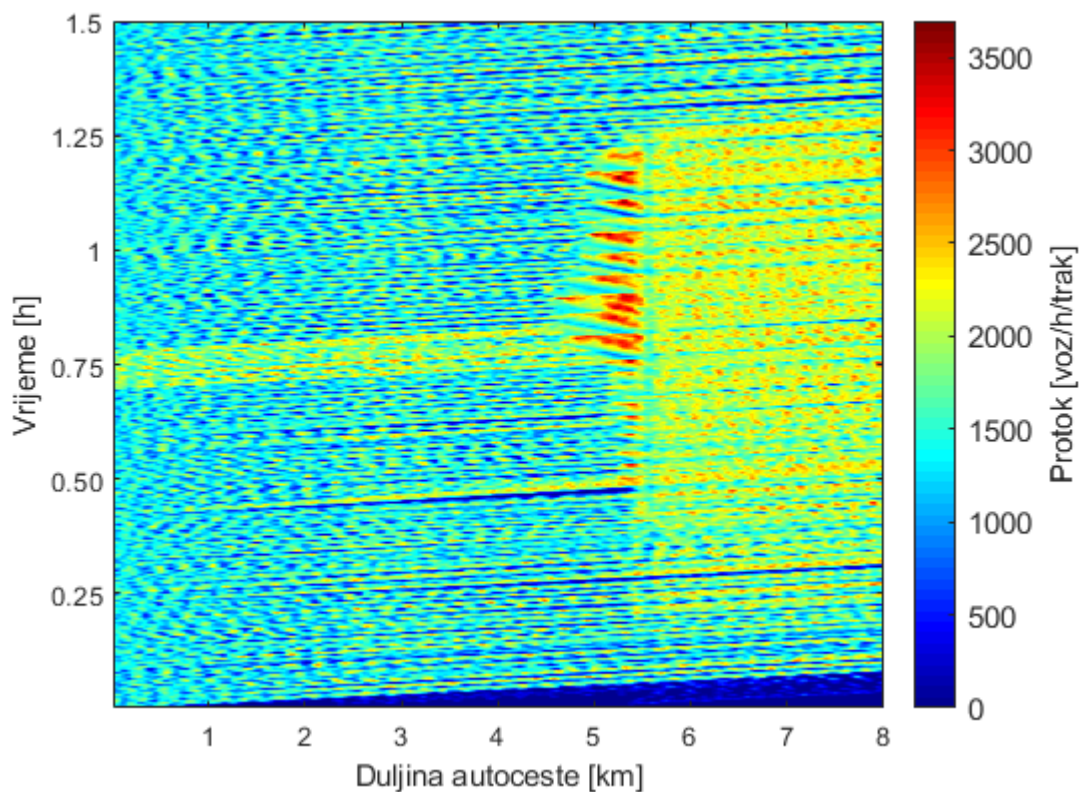
*Slika 7. Prostorno-vremenski dijagram protoka za najbolju dobivenu konfiguraciju u scenariju niskog prometnog opterećenja*

Rezultati simulacija scenarija srednjeg prometnog opterećenja napravljenih u [11] vidljivi su u tablici 3. Prema izmjerenim prosječnim vrijednostima protoka u  $L_3$ , najbolja konfiguracija VSL zona i zone ubrzanja jest konfiguracija s duljinama VSL zona 100 [m], te zone ubrzanja 300 [m]. Izmjerena je prosječna vrijednost protoka u  $L_3$  u iznosu od 2.390,79 [voz/h/trak], što je povećanje od 3,48 [%] u odnosu na referentni slučaj bez VSL-a. Sa druge strane, primjena navedene konfiguracije rezultira u povećanju TTS-a od 1,86 [%]. Na slikama 8 i 9 prikazana je prostorno-vremenska distribucija protoka za slučaj bez VSL-a, te slučaj primjene najbolje konfiguracije. Dijagram na slici 8 označava prostorno-vremensku distribuciju protoka za slučaj bez VSL-a, dok dijagram na slici 9 prikazuje slučaj primjene najbolje konfiguracije. Primjetno je znatno povećanje protoka u zoni zagušenja u vremenskom razdoblju od 0,75 [h] do 1,25 [h] trajanja simulacije.



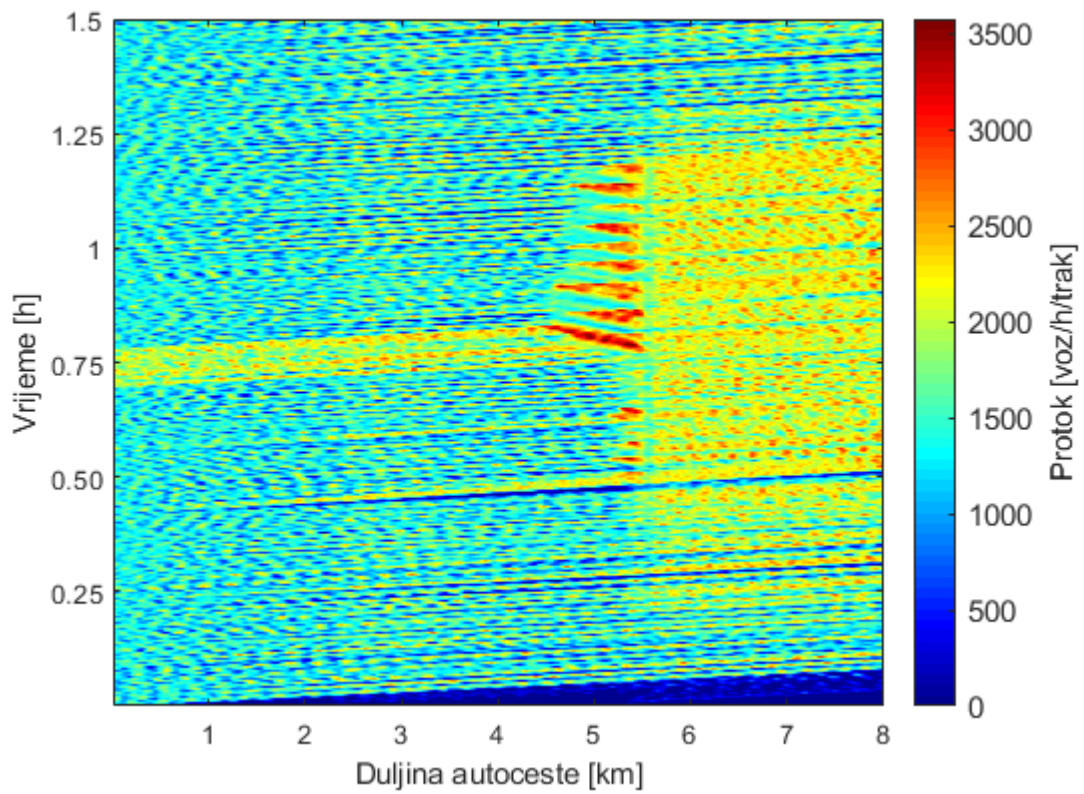


*Slika 8. Prostorno-vremenski dijagram protoka za slučaj bez VSL-a u scenariju srednjeg prometnog opterećenja*

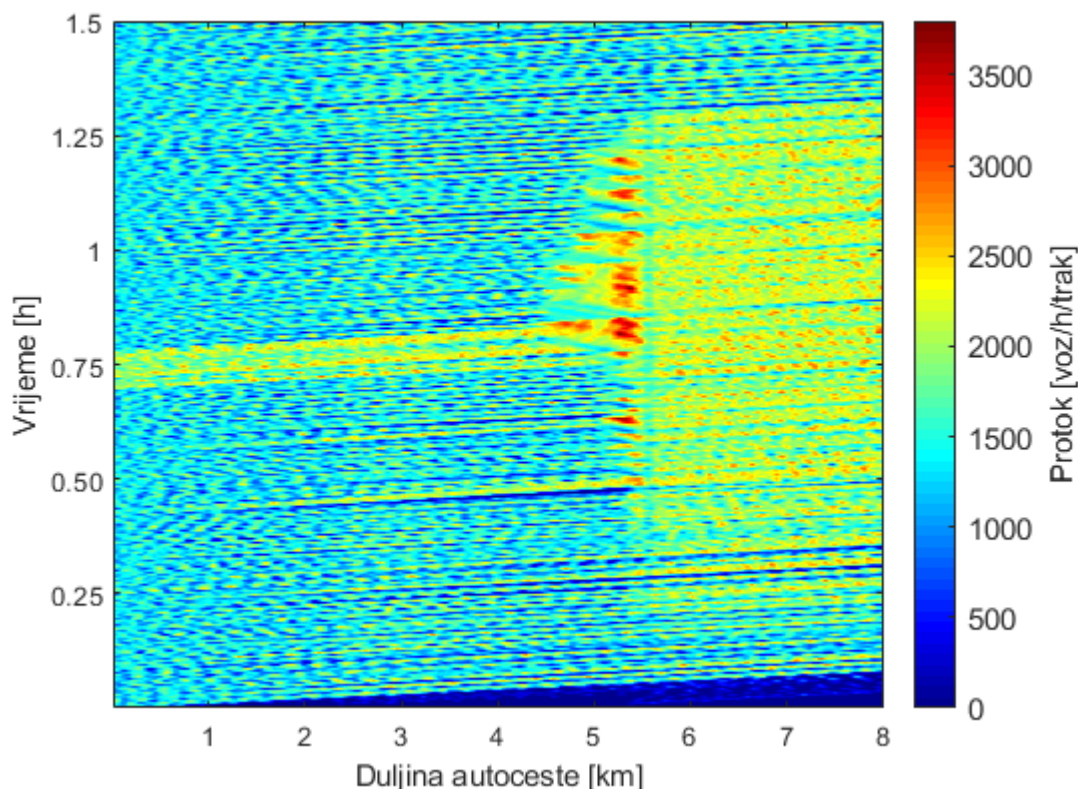


*Slika 9. Prostorno-vremenski dijagram protoka za najbolju dobivenu konfiguraciju u scenariju srednjeg prometnog opterećenja*

Rezultati simulacija scenarija visokog prometnog opterećenja napravljenih u [11] vidljivi su u tablici 4. Najbolji rezultati postignuti su primjenom konfiguracije duljina VSL zona od 100 [m], uz duljinu zone ubrzanja 200 [m]. Za navedenu konfiguraciju izmjeren je prosječni protok u  $L_3$  u iznosu od 2.405,01 [voz/h/trak], te je ostvareno poboljšanje od 2,12 [%] u odnosu na slučaj bez VSL-a. Također, izmjereno je smanjenje TTS-a od 0,24 [%]. Na slikama 10 i 11 dijagramima je prikazan odnos prostorno-vremenske distribucije protoka za slučaj bez VSL-a i slučaj primjene najbolje konfiguracije u scenariju visokog prometnog opterećenja. Dijagram na slici 10 odnosi se na slučaj bez VSL-a, dok dijagram na slici 11 predstavlja slučaj primjene najbolje konfiguracije. Iako je primjenom navedene konfiguracije postignut porast prosječnog protoka u  $L_3$ , na dijagramu prikazanom na slici 11 vidljivo je blago smanjenje protoka u odnosu na slučaj bez VSL-a.



*Slika 10. Prostorno-vremenski dijagram protoka za slučaj bez VSL-a u scenariju visokog prometnog opterećenja*

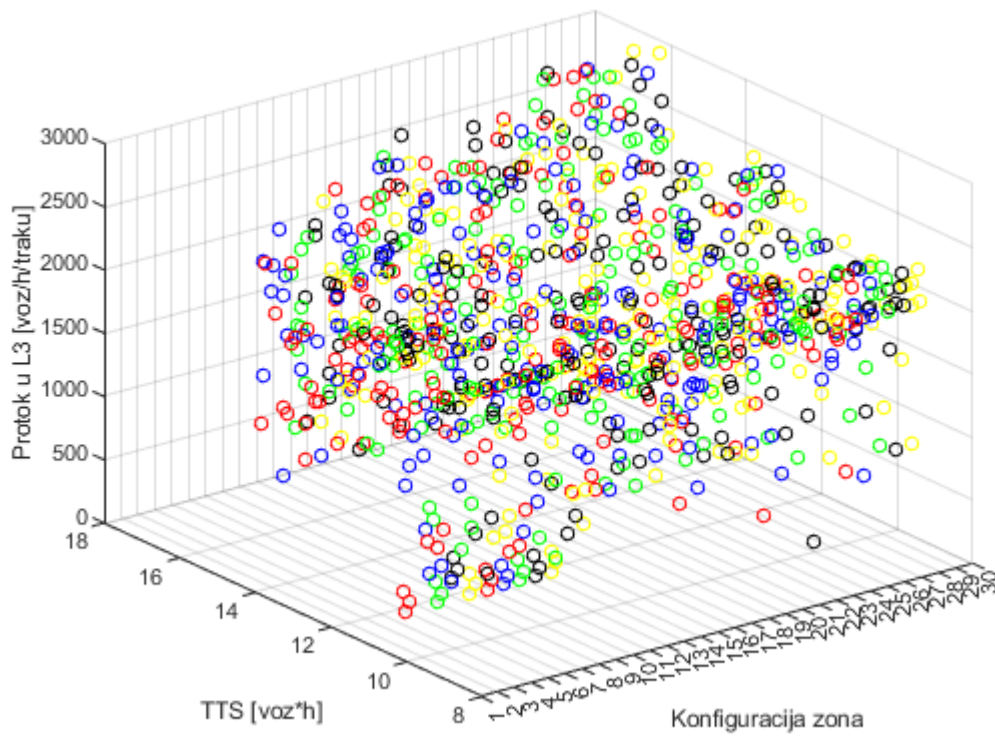


*Slika 11. Prostorno-vremenski dijagram protoka za najbolju dobivenu konfiguraciju u scenariju visokog prometnog opterećenja*

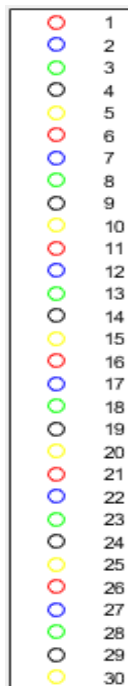
Na dijagramu vidljivom na slici 12 prikazana je ovisnost protoka u zoni zagušenja  $L_3$  o konfiguraciji zona, scenariju prometnog opterećenja i TTS-u. Nadalje, na dijagramu vidljivom na slici 13 prikazan je odnos konfiguracije zona, scenarija prometnog opterećenja i protoka u  $L_3$ . Konačno, na dijagramu vidljivom na slici 14 prikazan je odnos konfiguracije zona, scenarija prometnog opterećenja i TTS-a. Za prikaz uzeta su mjerenja TTS-a na cijelom modelu, te protoka u  $L_3$  u intervalima od 2,5 [min]. Pritom, konfiguracija zona i scenarij prometnog opterećenja na dijagramu predstavljeni su brojevima. U tablici 5 vidljive su konfiguracije zona i scenariji prometnog opterećenja koje navedeni brojevi predstavljaju na dijagramu. Može se uočiti kako je ovisnost protoka u  $L_3$  o TTS-u slaba.

Tablica 5. Konfiguracije zona i scenariji prometnog opterećenja predstavljeni brojevima

Broj	Konfiguracija	Scenarij prometnog opterećenja
1	Bez VSL-a	Nisko
2	100-100-100	Nisko
3	100-100-200	Nisko
4	100-100-300	Nisko
5	300-300-100	Nisko
6	300-300-200	Nisko
7	300-300-300	Nisko
8	500-500-100	Nisko
9	500-500-200	Nisko
10	500-500-300	Nisko
11	Bez VSL-a	Srednje
12	100-100-100	Srednje
13	100-100-200	Srednje
14	100-100-300	Srednje
15	300-300-100	Srednje
16	300-300-200	Srednje
17	300-300-300	Srednje
18	500-500-100	Srednje
19	500-500-200	Srednje
20	500-500-300	Srednje
21	Bez VSL-a	Visoko
22	100-100-100	Visoko
23	100-100-200	Visoko
24	100-100-300	Visoko
25	300-300-100	Visoko
26	300-300-200	Visoko
27	300-300-300	Visoko
28	500-500-100	Visoko
29	500-500-200	Visoko
30	500-500-300	Visoko

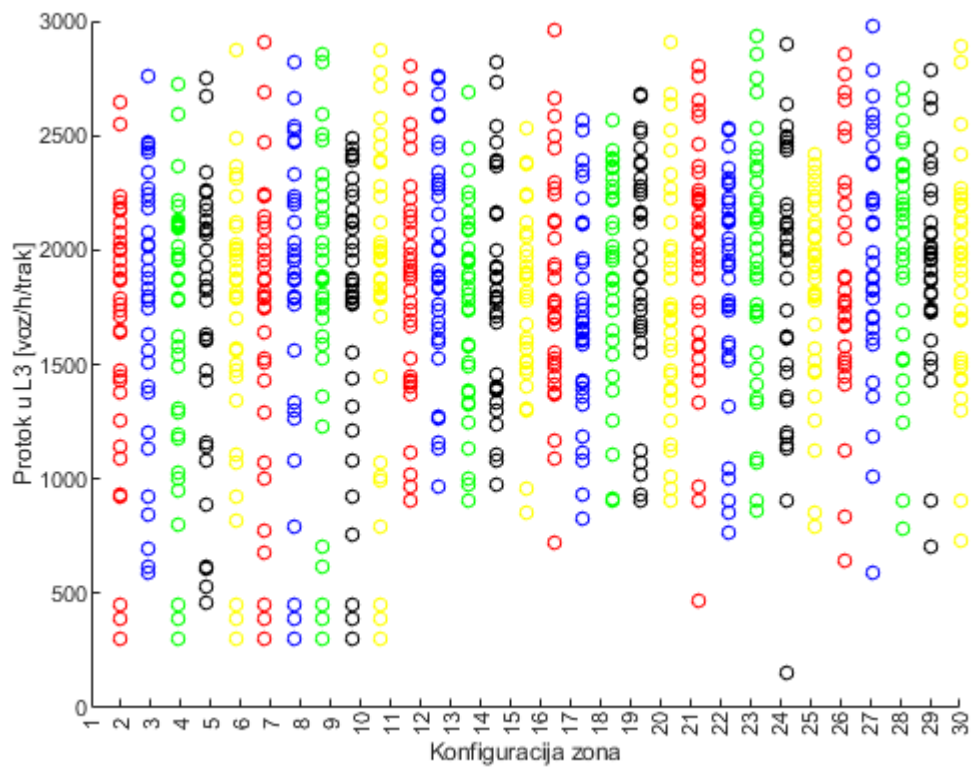


(a)

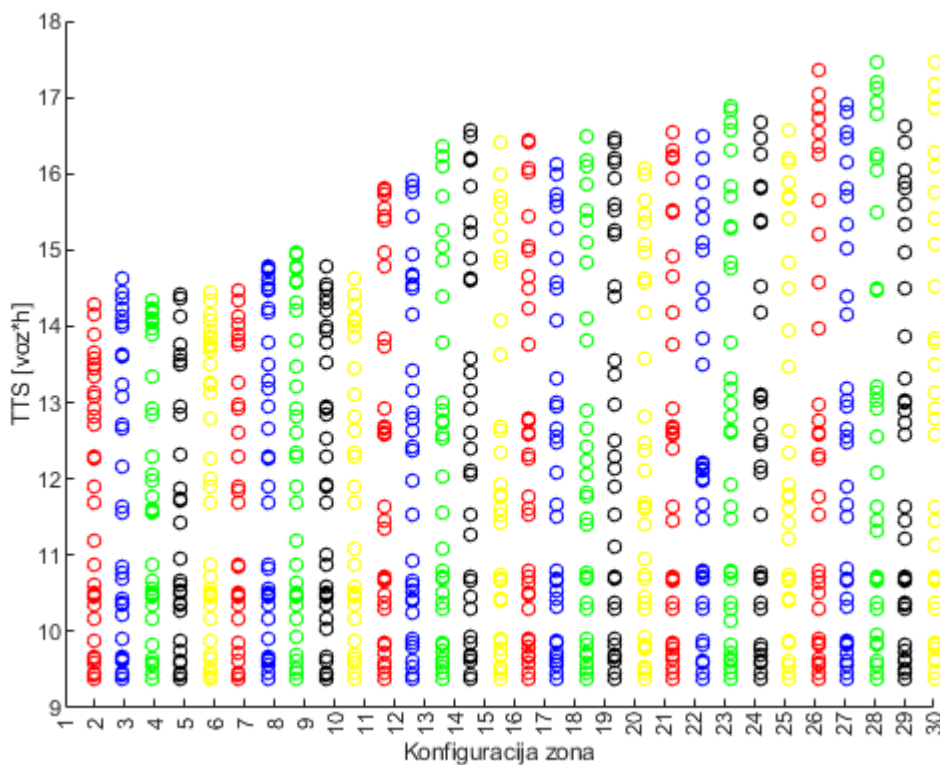


(b)

Slika 12. Ovisnost protoka u zoni zagušenja o konfiguraciji zona, scenariju prometnog opterećenja i TTS-u na cijelom modelu: (a) dijagram (b) legenda



Slika 13. Ovisnost protoka u L<sub>3</sub> o konfiguraciji zona i scenariju prometnog opterećenja



Slika 14. Ovisnost TTS-a na cijelom modelu o konfiguraciji zona i scenariju prometnog opterećenja

## 6.2. Rasprava dobivenih rezultata

Rezultatima simulacija napravljenih u [11] vidljivim u tablicama 2, 3, i 4 istaknut je utjecaj duljina VSL zona i zone ubrzanja na ponašanje prometnog toka. Prema rezultatima simulacija napravljenih u [11], prostorno-vremenskim dijagramima protoka prikazanim na slikama 7, 9 i 11, te dijagramu ovisnosti protoka u  $L_3$  o konfiguraciji zona i scenariju prometnog opterećenja prikazanom na slici 13 vidljivo je kako različite konfiguracije duljina VSL zona i zone ubrzanja imaju znatan utjecaj na protok. U scenariju niskog prometnog opterećenja, najbolji rezultati postignuti su s duljinama VSL zona od 300 [m]. Što se tiče zone ubrzanja, iako su općenito bolji rezultati postignuti s kraćom zonom ubrzanja, najveći porast prosječnog protoka u  $L_3$  postignut je sa zonom ubrzanja duljine 300 [m]. U scenariju srednjeg prometnog opterećenja kraće VSL zone rezultirale su većim porastom prosječnog protoka u  $L_3$ . Također,



usprkos činjenici da su kraćom zona ubrzanja generalno postignuti bolji rezultati s obzirom na prosječni protok u  $L_3$ , najveći porast prosječnog protoka u  $L_3$  je dobiven sa zonom ubrzanja duljine 300 [m]. U scenariju visokog prometnog opterećenja primjenom zone ubrzanja duljine od 100 [m] znatno se smanjio prosječni protok u  $L_3$ , dok je najveće povećanje postignuto s duljinom zone ubrzanja od 200 [m]. Također, u scenariju visokog prometnog opterećenja VSL zone duljina od 300 [m] negativno utječu na prosječni protok u  $L_3$ . Nadalje, općenito su najbolji utjecaj na prosječni protok u  $L_3$  imale VSL zone duljine 500 [m]. Međutim, najveći je porast prosječnog protoka u  $L_3$  postignut primjenom VSL zona duljine 100 [m].

S obzirom na dobivene rezultate simulacija napravljenih u [11] može se uočiti kako povećanje prosječnog protoka u  $L_3$  nije u svim slučajevima rezultiralo smanjenjem TTS-a, odnosno, iako je SPSC-VSL uspješno povećao protočnost u zoni zagušenja  $L_3$ , vozila su ukupno provela više vremena u mreži. Iz toga se može zaključiti da protok na segmentu od 350 [m] nije dobar pokazatelj u odnosu na ukupnih 8 [km] autoceste. Također, može se konstatirati da TTS pokazuje bolju cjelokupnu sliku, te stanje prometne mreže. Konačno, uzevši u obzir rezultate simulacija napravljenih u [11], kao i dijagram prikazan na slici 12, te dijagrame prikazane na slikama 13 i 14, vidljivo je kako je ovisnost protoka u zoni zagušenja o TTS-u i obratno slaba, odnosno, protok u  $L_3$  i TTS nisu značajno recipročni niti uzročno povezani.

## 7. Zaključak

Usprkos činjenici da gradske autoceste imaju mogućnost pružanja većeg prometnog kapaciteta, kao posljedica povećane prijevozne potražnje u vršnim satima ili izvanrednih situacija može doći do pojave zagušenja. Pojave zagušenja popraćene su smanjenjem razine uslužnosti, te su izraženije na gradskim autocestama s velikim brojem priljevnih i odljevnih rampi. Sa ciljem izbjegavanja pojave zagušenja, ili smanjenjem posljedica već nastalih zagušenja, koriste se različiti pristupi upravljanja prometom iz domene ITS-a. Jedan od takvih pristupa jest sustav VSL, odnosno upravljanje promjenjivim ograničenjem brzine.

VSL sustavi ograničavanjem brzine smanjuju dotok vozila u zonu zagušenja, te samim time omogućuju efikasnije pražnjenje uskog grla. Rad VSL sustava zasniva se na prikupljanju stvarnovremenskih podataka pomoću osjetila na prometnoj infrastrukturi. Sukladno prikupljenim i obrađenim podacima o gustoći i brzini, sustav određuje novo ograničenje brzine, koje se potom postavlja na VMS. Kao upravljački algoritam korišten je SPSC regulator, koji je implementiran u programskoj platformi MATLAB, dok je prometni tok gradske autoceste simuliran u mikroskopskom simulatoru SUMO.

U ovome završnome radu analiziran je utjecaj duljina VSL zona i zone ubrzanja na protočnost gradskih autocesta. Dobiveni simulacijski rezultati pokazuju znatan utjecaj duljina VSL zona i zone ubrzanja na prometne parametre kao što su protok i TTS. Dulje VSL zone rezultiraju sporijim sustavom, budući da promjena ograničenja brzine ima utjecaj samo na vozila koja prolaze ispod VMS-a. Suprotno tome, odabirom kraćih VSL zona udaljenost između VMS-ova je manja, što može uzrokovati zbunjivanje vozača. Što se tiče duljine zone ubrzanja, kraće zone ubrzanja mogu biti nedostatne vozilima za postizanje kritične brzine prije ulaska u zonu zagušenja, čime se može dodatno uzrokovati zagušenje. Naprotiv, dulja zona ubrzanja može povećati kašnjenja VSL sustava, budući da vozila koja izlaze iz VSL zone moraju preći veću udaljenost do uskog grla. Osim toga, u slučaju dulje zone ubrzanja javlja se mogućnost prekoračenja kritične brzine, čime se potencijalno narušava sigurnost prometnog toka.

Sa ciljem postizanja najboljih rezultata, potrebno je pronaći optimalnu konfiguraciju duljina VSL zona i zone ubrzanja. Simuliranjem različitih scenarija

prometnog opterećenja, dobiveni rezultati ukazali su na sljedeće konfiguracije kao najbolje: u scenariju niskog prometnog opterećenja najbolja konfiguracija sastavljena je od VSL zona duljina 300 [m] i zone ubrzanja duljine 300 [m], u scenariju srednjeg prometnog opterećenja najbolja konfiguracija sačinjena je od VSL zona duljine 100 [m], te zone ubrzanja 300 [m] i, konačno, u scenariju visokog prometnog opterećenja najbolja konfiguracija sastojala se od VSL zona duljine 100 [m], a zone ubrzanja 200 [m].

Uzevši u obzir sve dobivene rezultate, može se ustvrditi da se odabirom optimalne konfiguracije VSL zona i zone ubrzanja značajno poboljšava efikasnost SPSC-VSL-a. Naime, odabir optimalne konfiguracije VSL zona i zone ubrzanja ovisan je o prometnom opterećenju na autocesti. Spomenuta činjenica predstavlja izazov, te motivaciju za daljnje istraživanje sa ciljem ostvarenja još boljih rezultata. Kao prijedlog za daljnji rad predlaže se otkrivanje i analiza metoda određivanja optimalnih konfiguracija VSL zona i zone ubrzanja na osnovu prometnog opterećenja, te konstrukcijskih značajka upravljane gradske autoceste.

## Literatura

1. Centar za vozila Hrvatske, Broj novih i rabljenih vozila – vrsta vozila M1 (2007-2021), <https://www.cvh.hr/tehnicki-pregled/statistika/> [pristupljeno 24. Kolovoza 2022.]
2. Barcelo J. "Fundamentals of Traffic Simulations," *Springer Science Business Media, LLC*. 2010.
3. Gregurić M, Ivanjko E, Korent N, Kušić K, "Short Review of Approaches for Variable Speed Limit Control," in *International Scientific Conference on Science and Transport Development (ZIRP 2016)*; 2016, pp. 41–52.
4. Yue W, Li C, Mao G, "Urban traffic bottleneck identification based on congestion propagation," *IEEE Int. Conf. Commun.*, vol. 2018-May, pp. 1–6, 2018, doi: 10.1109/ICC.2018.8422108.
5. Hegyi A, Hoogendoorn SP, Schreuder M, Stoelhorst H, Viti F, "Specialist: A dynamic speed limit control algorithm based on shock wave theory," *IEEE Conf. Intell. Transp. Syst. Proceedings, ITSC*, pp. 827–832; 2008, doi: 10.1109/ITSC.2008.4732611.
6. Gordon RL. Algorithm for Controlling Spillback from Ramp Meters. *Transportation Research Record*. 1996;1554(1):162-171. doi:10.1177/0361198196155400120
7. I. Bošnjak. *Inteligentni transportni sustavi ITS -1*. Zagreb: Fakultet prometnih znanosti Sveučilišta u Zagrebu; 2006.
8. Ma M, Liang S, Zhang H. A Dynamic Competition Control Strategy for Freeway Merging Region Balancing Individual Behaviour and Traffic Efficiency. *PROMET-Traffic&Transportation*. 2020;32(5):595-09. doi: 10.7307/ptt.v32i5.3367
9. Müller ER, Carlson RC, Kraus W, Papageorgiou M. Microsimulation Analysis of Practical Aspects of Traffic Control with Variable Speed Limits. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, vol. 16, no. 1, pp. 512-523, 2015, doi: 10.1109/TITS.2014.2374167.
10. I. Bošnjak, *Osnove prometnog inženjerstva*. Zagreb: Fakultet prometnih znanosti Sveučilišta u Zagrebu; 2005.
11. Miloš J, Hršak P, "Utjecaj razmjesta zona ograničenja brzine na sustav

- upravljanja promjenjivim ograničenjem brzina na gradskim autocestama," Rektorova nagrada, Fakultet prometnih znanosti, Zagreb, 2021.
12. Krajzewicz D, Erdmann J, Behrisch M, Bieker L: Recent development and applications of SUMO - Simulation of Urban MObility. *International Journal On Advances in Systems and Measurements* 5(3&4), 128–138, 2012.
  13. Barth M, Boriboonsomsin K, "Real-world carbon dioxide impacts of traffic congestion," *Transp. Res. Rec.*, vol. 2058, no. 2058, pp. 163–171, 2008, doi: 10.3141/2058-20.
  14. Papageorgiou M, Kosmatopoulos E, Papamichail I, "Effects of variable speed limits on motorway traffic flow," *Transp. Res. Rec.*, vol. 2047, no. 2047, pp. 37–48, 2008, doi: 10.3141/2047-05.
  15. Tafti MF: An Investigation on the Approaches and Methods used for Variable Speed Limit Control, *8th Transportation and Traffic Engineering Conference of Iran, Teheran*, 2009.
  16. 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.
  17. Ivanjko E, Kušić K, Gregurić M, "Simulational analysis of two controllers for variable speed limit control," *Proc. Inst. Civ. Eng. - Transp.*, vol. 0, no. 0, pp. 1–13, doi: 10.1680/jtran.19.00069.
  18. Kušić K, Korent N, Gregurić M, Ivanjko E, "Comparison of two controllers for variable speed limit control," *Proc. Elmar - Int. Symp. Electron. Mar.*, vol. 3, pp. 101–106, 2016, doi: 10.1109/ELMAR.2016.7731764.
  19. Miloš J, Hršak P, Topić N, Jakšić L, Kušić K, Vrbanić F, Ivanjko E. Influence of Spatial Placement of Variable Speed Limit Zones on Urban Motorway Traffic Control. *Promet*. 2022; 34(4). doi.org/10.7307/ptt.v34i4.4073.
  20. Lopez PA *et al.*, "Microscopic Traffic Simulation using SUMO," in *IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems, Proceedings, ITSC*, 2018, pp. 2575–2582, doi: 10.1109/ITSC.2018.8569938.
  21. Acosta AF, Espinosa JE, Espinosa J, "TraCI4Matlab: Enabling the integration of the SUMO road traffic simulator and Matlab® through a software re-engineering process," *Lect. Notes Control Inf. Sci.*, vol. 13, pp. 155–170, 2015, doi: 10.1007/978-3-319-15024-6\_9.
  22. Kušić K, Dusparic I, Guériau M, Gregurić M, Ivanjko E, "Extended Variable

Speed Limit control using Multi-agent Reinforcement Learning,” in *2020 IEEE 23rd International Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC)*, 2020, pp. 1–8, doi: 10.1109/ITSC45102.2020.9294639.

## Popis slika

Slika 1. Nagib osnovnog dijagrama prometnog toka bez primjene VSL-a i primjenom VSL-a [11].....	3
Slika 2. Prikaz VSL zone, zone ubrzanja i zone zagušenja na dionici gradske autoceste [11].....	9
Slika 3. Ilustracija dionice jednog smjera gradske autoceste podijeljene na N segmenata [11].....	12
Slika 4. Blok shema simulacijskog okruženja [11] .....	15
Slika 5. Model gradske autoceste [11].....	16
Slika 6. Prostorno-vremenski dijagram protoka za slučaj bez VSL-a u scenariju niskog prometnog opterećenja .....	24
Slika 7. Prostorno-vremenski dijagram protoka za najbolju dobivenu konfiguraciju u scenariju niskog prometnog opterećenja .....	25
Slika 8. Prostorno-vremenski dijagram protoka za slučaj bez VSL-a u scenariju srednjeg prometnog opterećenja .....	26
Slika 9. Prostorno-vremenski dijagram protoka za najbolju dobivenu konfiguraciju u scenariju srednjeg prometnog opterećenja.....	27
Slika 10. Prostorno-vremenski dijagram protoka za slučaj bez VSL-a u scenariju visokog prometnog opterećenja.....	28
Slika 11. Prostorno-vremenski dijagram protoka za najbolju dobivenu konfiguraciju u scenariju visokog prometnog opterećenja .....	29
Slika 12. Ovisnost protoka u zoni zagušenja o konfiguraciji zona, scenariju prometnog opterećenja i TTS-u na cijelom modelu: (a) dijagram (b) legenda	31
Slika 13. Ovisnost protoka u $L_3$ o konfiguraciji zona i scenariju prometnog opterećenja.....	32
Slika 14. Ovisnost TTS-a na cijelom modelu o konfiguraciji zona i scenariju prometnog opterećenja.....	33

## Popis tablica

Tablica 1. Vrijednosti parametara $K_v$ i $C_i$ za pojedinu konfiguraciju duljina VSL zona i scenarij prijevozne potražnje [11].....	19
Tablica 2. Dobiveni rezultati simulacija napravljenih u [11] u scenariju niskog prometnog opterećenja.....	22
Tablica 3. Dobiveni rezultati simulacija napravljenih u [11] u scenariju srednjeg prometnog opterećenja.....	22
Tablica 4. Dobiveni rezultati simulacija napravljenih u [11] u scenariju visokog prometnog opterećenja.....	22
Tablica 5. Konfiguracije zona i scenariji prometnog opterećenja predstavljeni brojevima.....	30



## Popis grafičkih prikaza

Grafički prikaz 1. Generirana prijevozna potražnja za scenarij niskog prometnog opterećenja [11].....	17
Grafički prikaz 2. Generirana prijevozna potražnja za scenarij srednjeg prometnog opterećenja [11].....	17
Grafički prikaz 3. Generirana prijevozna potražnja za scenarij visokog prometnog opterećenja [11].....	18

Sveučilište u Zagrebu  
Fakultet prometnih znanosti  
Vukelićeva 4, 10000 Zagreb

## IZJAVA O AKADEMSKOJ ČESTITOSTI I SUGLASNOSTI

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

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

Svojim potpisom potvrđujem i dajem suglasnost za javnu objavu završnog/diplomskog rada pod naslovom Utjecaj duljine zone promjenjivog ograničenja brzine i zone ubrzanja na protočnost gradskih autocesta, u Nacionalni repozitorij završnih i diplomskih radova ZIR.

Student/ica:

U Zagrebu, 6.9.2022

Nikola Topić, Nikola Topić  
(ime i prezime, potpis)