SVEUČILIŠTE U ZAGREBU

FAKULTET PROMETNIH ZNANOSTI

Hršak Patrik, Miloš Josip

Utjecaj razmještaja zona ograničenja brzine na

sustav upravljanja promjenjivim ograničenjem brzina na gradskim autocestama

ZAGREB, 2021.

Ovaj rad izrađen je u Zavodu za inteligentne transportne sustave Fakulteta prometnih znanosti u Zagrebu pod vodstvom izv. prof. dr. sc. Edouarda Ivanjka i predan je na natječaj za dodjelu Rektorove nagrade u akademskoj godini 2020/2021.

Sadržaj rada

[1. Uvod 1](#_Toc75958960)

[2. Princip upravljanja promjenjivim ograničenjem brzine 4](#_Toc75958961)

[3. Zone ograničenja brzine i zone ubrzanja 8](#_Toc75958962)

[3.1. Prostorni razmještaj zona ograničenja 8](#_Toc75958963)

[3.2. Potreba za zonom ubrzanja 9](#_Toc75958964)

[4. Jednostavni proporcionalni regulator ograničenja brzine 10](#_Toc75958965)

[5. Simulacijsko okruženje i prometni scenariji 12](#_Toc75958966)

[5.1. Simulacijski parametri 13](#_Toc75958967)

[5.2. Model autoceste i scenariji prijevozne potražnje 14](#_Toc75958968)

[5.3. Prikupljanje i obrada simulacijskih rezultata 17](#_Toc75958969)

[6. Simulacijski rezultati 18](#_Toc75958970)

[6.1. Analiza prometnih pokazatelja 21](#_Toc75958971)

[6.2. Analiza ekoloških pokazatelja 29](#_Toc75958972)

[6.3. Rasprava dobivenih rezultata 30](#_Toc75958973)

[7. Zaključak 32](#_Toc75958974)

[Literatura 34](#_Toc75958975)

[Sažetak 36](#_Toc75958976)

[Summary 37](#_Toc75958977)

[Popis slika 38](#_Toc75958978)

[Popis grafičkih prikaza 39](#_Toc75958979)

[Popis tablica 40](#_Toc75958980)

1. Uvod

Autoceste u urbanim sredinama s velikim brojem priljevnih i odljevnih rampi poznate su pod nazivom gradske autoceste. Svojim dizajnom omogućuju višu razinu uslužnosti (engl. *Level of Service - LoS*) u odnosu na druge vrste cesta. LoS ujedno predstavlja izraz koji kvalitativno opisuje operativne uvjete prometnog toka na osnovu čimbenika kao što su brzina, vrijeme putovanja, kašnjenje i sigurnost [1]. Ponašanje prometnih tokova na gradskim autocestama se opisuje osnovnim dijagramom (engl. *Fundamental Diagram*) koji daje odnos između toka ili brzine te gustoće prometnog toka. Prijelomna točka u osnovnom dijagramu jest kritična gustoća [2]. Kada prometni volumen na određenim segmentima gradske autoceste postane veći od operativnog kapaciteta dolazi do pojave zagušenja. Pojave zagušenja karakterizirane su malim brzinama i velikom gustoćom prometnog toka što za negativnu posljedicu ima smanjenje LoS-a. Prometnice u urbanim sredinama podložne su zagušenjima koja se događaju periodično u vršnim satima ili neperiodično kao posljedica prometnih nezgoda i nesreća, vremenskih uvjeta i izvanrednih događaja. Prema [3] najčešći uzroci pojave zagušenja na gradskim autocestama su veliki broj relativno blizu razmještenih priljevnih i odljevnih rampi koje uzrokuju izraženo međudjelovanje između prometnih tokova s rampi i glavnog toka gradske autoceste. To međudjelovanje se posebno očituje u periodima vršnih sati kada mjesta smještaja priljevnih i odljevnih rampi postaju mjesta pojave zagušenja. Problem gradskih autocesta očituje se i u povezanosti s lokalnom gradskom prometnom mrežom koja predstavlja velik generator prometne potražnje. Priljevne rampe predstavljaju mjesto spajanja prometne potražnje lokalne gradske prometne mreže i gradske autoceste. Na tom mjestu se pojavljuje zagušenje i naziva se usko grlo (engl. *Bottleneck*). Aktivno usko grlo u prometu često se smatra osnovnim uzrokom zagušenja na autocestama ili gradskim cestama i predstavlja prostorni diskontinuitet u kojem je smanjen operativni kapacitet cestovne prometnice [4]. Kao negativna posljedica aktivnog uskog grla javlja se pojava nastanka širenja zagušenja u obliku udarnog (šok) vala (engl. *Shockwave*) koji narušava harmonizaciju brzine glavnog prometnog toka. Posebno kada se poremećaj u vidu šok vala počne širiti suprotno smjeru vožnje vozila u pripadnoj traci cestovne prometnice.U slučaju velike potražnje na priljevnoj rampi i aktivnog uskog grla može doći do efekta prelijevanja (engl. *Spillback*) zagušenja s priljevnih rampi na lokalnu gradsku prometnu mrežu [5]*.* Uz navedeno smanjenje razine uslužnosti, učestalost zagušenja na prometnicama uzrokuje i povećanje emisije štetnih plinova te potrošnje goriva.

Uzme li se u obzir nemogućnost širenja gradskih autocesta zbog ograničenosti slobodnog prostora u urbanim sredinama, danas se traže drugačiji pristupi rješavanju problema zagušenja. Jedno od rješenja jest primjena servisa iz domene inteligentnih transportnih sustava (engl. *Inteligent Transport Systems – ITS*). Prema [6] ITS se može definirati kao holistička, upravljačka i informacijsko-komunikacijska nadogradnja klasičnog sustava prometa i transporta kojim se postižu učinkovita poboljšanja performansi, odvijanje prometa, učinkovitiji transport putnika i robe, poboljšanje sigurnosti u prometu, udobnost i zaštita putnika i manja onečišćenja okoliša. Domena ITS-a omogućuje rješavanje postojećih problema zagušenja gradskih autocesta i primjenom razvijenih naprednih sustava upravljanja za gradske autoceste, kao što su upravljanje priljevnim tokovima (engl. *Ramp Metering - RM*), preporuka za promjenu vozne trake te promjenjivo ograničenje brzine (engl. *Variable Speed Limit – VSL*) u svrhu smanjenja zagušenja i pojave šok valova te povećanja LoS-a.

VSL sustav predstavlja pristup upravljanju prometom na autocestama koji izračunava ograničenje brzine na osnovu trenutnog stanja u prometu ili meteoroloških uvjeta i prikazuje informacije o ograničenju brzine na promjenjivim znakovima (engl. *Variable Message Signs – VMS).* VSL sustav sastoji se od jedne ili više VSL zona i zone ubrzavanja. VSL zone predstavljaju mjesta upravljanja ograničenjem brzine i postavljaju se uzvodno od područja aktivacije uskog grla, a zona ubrzavanja predstavlja prostor između VSL zone i područja uskog grla. Ako je ograničenje brzine u VSL zoni iznosa manjeg od takozvane kritične brzine *Vc*, potrebno je osigurati zonu ubrzanja kako bi se omogućilo vozilima da dostignu *Vc*. Razlog tome je relacija (*Vc* ) iz osnovnog dijagrama (Slika 1) tj. za kritičnu brzinu postiže se kritična gustoća za koju je protok vozila najveći [2], a time i pražnjenje uskog grla najefikasnije. Kako je prikazano u radu [7], odabir različitih duljina VSL zona i zona ubrzanja uvelike utječe na performanse VSL regulatora samim time i na upravljanje uskim grlom. Na temelju tih rezultata u ovom radu je napravljena proširena analiza utjecaja različitih duljina dvije uzastopno povezane VSL zone s različitim duljinama zone ubrzanja ne bi li se pronašla optimalna konfiguracija VSL zona s ciljem efikasnijeg upravljanja uskim grlom. Da bi se prikazao utjecaj VSL zona i zona ubrzanja, ispitane su konfiguracije duljina VSL zona od 100, 300 i 500 [m], uz duljine zona ubrzanja od 100, 200 i 300 [m]. Prije samog testiranja upravljačkog algoritma na izrađenom modelu autoceste očekivalo se smanjenje ukupnog utrošenog vremena (engl. *Total Time Spent – TTS*), smanjenje emisije štetnih plinova, povećanje prosječne brzine te smanjenje gustoće u prometnoj situaciji s gustoćom blizu kritične vrijednosti, poboljšanje prema harmonizaciji prometnog toka i veća protočnost autoceste. Sve u ovisnosti o odabranim duljinama zona promjenjivog ograničenja brzine i zone ubrzavanja. Prije same implementacije VSL sustava potrebno je odabrati odgovarajući model upravljanja. Za odabir modela upravljanja potrebno je izvršiti niz testiranja u smislu simulacija takvog upravljačkog modela unutar odgovarajućeg simulacijskog okruženja. Korišteni simulacijski model izrađen je unutar *SUMO* mikroskopskog simulatora za simuliranje urbane mobilnosti (engl. *Simulation of Urban MObility – SUMO*) [9]. Model autoceste sastoji se od dvije priljevne i jedne odljevne rampe ukupne duljine 8 [*km*]. Upravljački algoritam zasnovan na jednostavnom proporcionalnom regulatoru za promjenjivo ograničenje brzine (engl. *Simple Proportional Speed Controller - SPSC-VSL)* implementiran je unutar MATLAB programske platforme. Različite konfiguracije VSL zona i zona ubrzanja testirane su na tri različita prometna scenarija uključujući malu, srednju i visoku prometnu potražnju.

Rad je podijeljen u šest poglavalja. Nakon prvog uvodnog poglavlja, drugo poglavlje opisuje principe upravljanja promjenjivim ograničenjem brzine. U trećem poglavlju objašnjena je veza između SPSC-VSL-a i zone upravljanja, objašnjen je i opisan prostorni razmještaj zona upravljanja ograničenjem brzine te potreba za zonom ubrzanja. Četvrtim poglavljem opisan je princip rada analiziranog SPSC-VSL regulatora. U petom poglavlju prikazan je detaljan opis simulacijskog okruženja, modela autoceste, scenariji prometne potražnje te način prikupljanja i obrade simulacijskih rezultata. U šestom poglavlju prikazani su rezultati simulacijskog testiranja modela gradske autoceste s upravljačkim algoritmom i različitim konfiguracijama VSL zona. Na kraju ovog rada je na osnovu obrađenih podataka donesen zaključak.

1. Princip upravljanja promjenjivim ograničenjem brzine

Upravljanje prometom na gradskim autocestama moguće je izvesti na osnovu sljedećih kriterija: (i) na osnovu sigurnosti i upravljanja sigurnošću prometa na autocestama, koja postaje sve značajnija, te (ii) na osnovu dodatnog kriterija upravljanja protočnošću. Upravljanje protočnošću prometa se provodi kako bi se smanjilo zagušenje, no međutim postoje dva glavna problema koji uzrokuju zagušenje. To su priljevni tokovi, te nehomogene brzine vozila u glavnom toku. Kako bi se riješili navedeni prometni problemi na autocestama koriste se napredna tehnološka rješenja, koja su se pokazala posebno učinkovita, a to su [10]:

* Strategije za smanjenje zagušenja, kao što je RM koji upravlja priljevnim tokom vozila na ulaznim rampama koja se priključuju na glavni tok gradske autoceste,
* VSL koji izravno regulira prometni tok vozila na gradskim autocestama izmjenom ograničenja brzine na VMS-u, kako bi se smanjila pojava šok valova,
* Preporuka za promjenu vozne trake kako bi se olakšao priljev i odljev vozila s priljevnih i odljevnih rampi autoceste.

Ovakvi sustavi rade na osnovu trenutne razmjene podataka prikupljenih od osjetila na prometnoj infrastrukturi i slanja upravljačkih informacija vozačima preko VMS-ova odnosno semafora. Razmjena podataka postiže se pomoću odgovarajuće informacijsko - komunikacijske infrastrukture putem koje se podatci šalju, analiziraju te razmjenjuju između korisnika i pružatelja usluga unutar samog sustava.

Unutar ovog rada obrađeni su VSL sustavi koji mijenjaju vrijednosti ograničenja brzine u odnosu na trenutnu prometnu situaciju korištenjem odgovarajućeg algoritma upravljanja. Pri tome je bitno napomenuti da je problem nejednolikih brzina značajan faktor aktivacije uskog grla. Razlike brzina vozila u glavnom toku i vozila koja se uključuju s priljevne rampe dovodi do međudjelovanja između glavnih i priljevnih prometnih tokova. Vozila koja se prestrojavaju s trake za ubrzanje u glavni tok prilikom uključivanja kreću se sporije u odnosu na vozila u glavnom toku prilikom čega može doći usporavanja vozila koja se kreću u glavnom toku. U slučaju dolaska većeg broja vozila s priljevne rampe međudjelovanje je izraženije te se glavni tok značajno usporava čime se narušava protok odnosno aktivira usko grlo. Pri slučaju aktivnog prometnog uskog grla, prometni se zastoj širi gradskom autocestom u smjeru suprotnom od smjera vožnje vozila. Tada se također povećava vjerojatnost sudara, jer na mjestima gdje vozila s velikim prilazećim brzinama dolaze do kraja repa čekanja nailaze na spora ili mirujuća vozila pa postoji velika razlika u brzinama i potreba za naglim usporavanjem čime se efekt šok vala dodatno pojačava. Vožnja u takvim uvjetima izaziva nepravilnosti u odvijanju prometnog toka te izaziva stres i frustraciju vozača zbog onemogućavanja putovanja ujednačenom brzinom. Nakon implementacije, VSL sustav mijenja dopušteno ograničenje brzine na segmentu dionice čime se utječe na dinamiku kretanja vozila te time i na prometni tok u cjelini. Ako se promatra prometni tok opisan osnovnim odnosom veličina protok-gustoća (osnovni dijagram) djelovanje VSL-a postaje vidljivo kako je prikazano na slici 1, gdje krivulja bez VSL-a predstavlja brzinu toka za slučaj kada se ne koristi VSL, dok krivulje VSL1 i VSL2 predstavljaju ponašanje u slučaju primjene ograničenja brzine postavljene od strane VSL sustava. Odnos iznosa ograničenja bez primjene VSL-a, te uz ograničenja VSL1 i VSL2 opisan je izrazom: . Promjenom ograničenja brzine na manji iznos smanjuje se protok vozila, a smanjene protoka za posljedicu ima pomicanje granice kritične gustoće prometnog toka na veću vrijednost. Kritična gustoća predstavlja gustoću prometnog toka pri kojoj je protok vozila najveći i sustav upravljanja želi zadržati prometni tok u ovoj točki [2]. Ovakav pristup omogućava stvaranje kontroliranog uskog grla uzvodno od područja aktivnog uskog grla s ciljem smanjenja dotoka vozila u zagušeno područje s ciljem održavanja gustoće u uskom grlu oko . Važno je naglasiti da je slika 1 aproksimacija osnovnog dijagrama.

Shape

Description automatically generated

*Slika 1. Nagib osnovnog dijagrama prometnog toka bez VSL-a i s VSL-om*

*Izvor:* [11]

VSL je prvi puta predstavljen u Njemačkoj prije više od pet desetljeća [12]. S obzirom na poboljšanje protočnosti prometnice postoje dva glavna principa implementacije VSL sustava. Prvi pristup daje naglasak na homogenizacijski učinak, odnosno proces smanjivanja razlike brzine između vozila što za posljedicu ima homogeniji, stabilniji i sigurniji prometni tok. Drugi pristup sprječava pojavu ili rješavanje postojećih zagušenja smanjenjem brzina nadolazećih vozila pomoću VSL-a. Srednje brzine vozila smanjuje se do vrijednosti koje ne mogu izazvati kritičnu gustoću prometnog toka, a samim time i posljedično prelazak prometnog toka u nestabilno (desna strana u osnovnom dijagramu) područje i nastajanje zagušenja. Pristup poboljšanja trenutnog stanja prometnog toka upravlja brzinom i gustoćom što za cilj ima rješavanje zagušenja ograničavanjem dotoka vozila u područje aktivnog uskog grla te time zadržava volumen prometa u uskom grlu oko operativnog kapaciteta. VSL sustavi se najčešće dijele u dvije grupe [11]:

* VSL sustavi zasnovani na meteorološkim uvjetima koji se koriste na gradskim autocestama gdje se pojavljuju magle, kiše, led ili drugi vremenski nepovoljni uvjeti odnosno često utjecajni faktori sigurnosti prometnice. Sustav radi na način da se prilikom pogoršavanja vremenskih uvjeta do kritične točke smanjuje ograničenje brzine na prikladnu brzinu, a da bi se smanjile mogućnosti nastanka incidentnih situacija, odnosno sustavi koji se koriste preventivno,
* VSL sustavi zasnovani na zagušenjima koji aktiviraju upravljačku strategiju kojom se smanjuje ograničenje brzine kada volumeni i/ili brzine upravljanog prometnog toka prijeđu određenu unaprijed postavljenu granicu.

Smanjenje brzine se može obavljati automatski prema već određenim algoritmima upravljanja ili ručno putem centra za upravljanje autocestom od strane stručnog osoblja. Glavni operativni razlozi uvođenja VSL sustava na autocesti su:

* smanjenje vremena putovanja u slučaju zagušenja,
* pouzdanija vremena putovanja,
* povećanje prosječne brzine glavnog toka,
* smanjenje emisija štetnih plinova,
* veća iskoristivost prometnih traka,
* ujednačeniji vremenski interval slijeđenja,
* smanjenje broja incidentnih situacija,
* povećanje propusnosti autoceste.

Za učinkovitiji rad VSL sustava zasnovanih na zagušenjima, potrebno je dobro predvidjeti kritičnu lokaciju na gradskoj autocesti odnosno točnu prostornu lokaciju gdje se periodično ponavljaju zagušenja. Za ovu VSL strategiju potrebno je uložiti mnogo resursa i znanja za određivanje kritične lokacije aktivacije uskog grla što joj je jedan od nedostataka. Također mora postojati i svjesnost o mogućem pomaku kritične lokacije aktivacije uskog grla zbog promjene meteoroloških uvjeta na gradskoj autocesti ili povećanjem relativnog udjela teretnih vozila na dionici gradske autoceste. Ovaj problem se može riješiti tako da se koristi pristup evaluacije kritičnih uvjeta na cesti mjerenjima dobivenim primjenom prometnih osjetila kao što su induktivne petlje, kamere, radari u mikrovalnom te milimetarskom području itd. Ovaj pristup se zasniva na kritičnim vrijednostima gustoće prometnog toka, što je vrlo slično načinu funkcioniranja metode RM-a. Također ova se metoda pokazala vrlo preciznom pri procjeni kritične vrijednosti gustoće autoceste na dionicama s učestalim periodičnim promjenama prometne potražnje. Da bi se dobila procjena gustoće, VSL sustav koristi dijagram protok – gustoća (Slika 1) gdje se nagib krivulje koristi za procjenu kritičnih vrijednosti gustoće. Ovaj se pristup, pomoću algoritama odlučivanja i prilagođenim modulom procjene kritičnih točaka, koristi u većini VSL sustava u svrhu aktivacije u pravom trenutku. Ovakav pristup omogućava izbjegavanje potrebe umjeravanja VSL sustava u različitim uvjetima rada, zbog praćenja uvjeta stvarnog prometnog toka [13].

1. Zone ograničenja brzine i zone ubrzanja

Kako je navedeno unutar drugog poglavlja, VSL sustavi imaju za cilj povećati propusnost autoceste kontrolirajući glavni prometni tok. Duljina i prostorni razmještaj VSL zona i zona ubrzanja znatno utječu na značajke prometnog toka. Analiza u [7] pokazala je kako prekratka zona ubrzanja te predugačka zona ograničenja može negativno utjecati na performanse VSL sustava. Stoga su u sljedećim podpoglavljima opisani utjecaji različitih prostornih razmještaja VSL zona i zona ubrzanja.

## Prostorni razmještaj zona ograničenja

VSL sustavi upravljanjem održavaju glavni tok prometa prije zone zagušenja na dovoljno niskoj razini da bi se izbjeglo nastajanje zagušenja i pad kapaciteta u zoni nastanka uskog grla odnosno zoni zagušenja. Takvim pristupom VSL sustavi izazivaju kontrolirano zagušenje unutar zona upravljanja (VSL zona) koje se nalaze prije zone zagušenja što za posljedicu ima izbjegavanje pada kapaciteta i povećanje protoka u uskom grlu (Slika 2) [7]. Kontrolirano zagušenje je blaže od onoga koje bi se pojavilo u zoni zagušenja bez VSL upravljanja čime se ukupni LoS gradske autoceste povećava. Zona između VSL-a i uskog grla naziva se zonom ubrzanja (Slika 2) i njezine su karakteristike detaljnije objašnjene sljedećem podpoglavlju.

A screenshot of a video game

Description automatically generated with low confidence

Slika 2. VSL zona upravljanja, zona ubrzanja te zona zagušenja na dionici autoceste

*Izvor:* [7]

Implementacija VSL-a izvedena je pomoću VMS-a, pri čemu vozila prilagođavaju brzinu prilikom prolaska pored VMS-a i zadržavaju brzinu sve dok novi VMS ne ukaže na drugačije ograničenje brzine u smjeru gibanja vozila. Ovakvim pristupom promjena ograničenja brzine utječe samo na vozila koja dolaze u zonu VSL-a, bez utjecaja na vozila koja se već nalaze u njoj. Prilikom navedene primjene VSL-a, dulje zone VSL-a dovode do dužih kašnjenja i sporijeg sustava. Prema [7] najbolji rezultati postignuti su na VSL zonama manjim od 100 [m] za slučajeve vrlo zagušenih prometnih tokova gdje prosječne brzine padaju i ispod 40 [km/h]. Unatoč boljim simulacijskih rezultatima iz [7] na kratkim višestrukim uzastopnim zonama VSL-a, u slučaju implementacije na terenu višestruki usko razmaknuti VMS-ovi mogu dovesti do zbunjivanja vozača.

## Potreba za zonom ubrzanja

Kako bi vozila bila u mogućnosti dostignuti kritičnu brzinu u zoni uskog grla potrebno im je osigurati zonu ubrzanja između VSL zone i uskog grla. Duljina zone ubrzanja znatno utječe na brzinu kojom vozilo pristiže u zonu zagušenja odnosno prometnog uskog grla. Prekratkom duljinom zone ubrzanja onemogućuje se vozilu ubrzanje do kritične brzine uskog grla. Pristizanje vozila u usko grlo brzinom manjom od kritične narušava se propusna moć uskog grla te se time smanjuje efikasnost VSL sustava. Sukladno tome potrebno je odrediti optimalnu duljinu ili raspon duljina za zonu ubrzanja [7]. Primjerom obrađenim u [7] pokazano je kako su najbolji rezultati u pogledu smanjenja TTS-a postignuti s dužinom zone ubrzanja od 175 [m], jer su dulje zone uzrokovala kašnjenja, dok kraće zone nisu bile dovoljne duljine da bi vozila uspjela ubrzati do potrebne kritične brzine prije ulaska u usko grlo.

1. Jednostavni proporcionalni regulator ograničenja brzine

SPSC-VSL predstavlja jednostavniju inačicu regulatora promjenjivog ograničenja brzine zasnovanog na upravljanju tokova (engl. *Mainline Virtual Metering – MVM*) [3]. MVM regulator koristi odnos protok – brzina (osnovni dijagram) za mapiranje ograničenja brzine. Princip rada MVM-a zasniva se na RM-u, odnosno povećanje propusnosti gradske autoceste postiže se ograničavanjem protoka vozila s rampe u glavni tok [14]. Pri tome kod MVM-a prethodni segment autoceste *i-1* predstavlja „priljevnu prividnu rampu“ u sljedeći segment *i* koja pomoću ograničenja brzine upravlja [3] tokom vozila koja ulaze u nizvodni segment *i*. Na taj način MVM kontrolira volumen prometa na upravljanim segmentima autoceste. U odnosu na MVM, SPSC-VSL je jednostavan regulator zasnivan na povratnoj vezi koji svojim mogućnostima može odgovoriti na promjene gustoće toka koje su nastale zbog zagušenja na upravljanim segmentima autoceste čime ne zahtjeva model umjerenog osnovnog dijagrama. Upravljanje ograničenjem brzine obično je aktivno kada je volumen glavnog prometnog toka visok. Bitna značajka regulatora namijenjenih VSL-u je stabilan odziv u promjenjivim uvjetima prometnog toka [15].

Graphical user interface

Description automatically generated

Slika 3. Ilustracija dionice jednog smjera autoceste podijeljene u N segmenata

*Izvor: [3]*

Uzme li se za pretpostavku da je dionica autoceste podijeljena u *N* segmenata (Slika 3), i da se zagušenje dogodilo u segmentu autoceste *N*, tada glavni segmenti autoceste za upravljanje, koji se nalaze prije segmenta *N*, reagiraju na promjenu gustoće na osnovu izraza (1). SPSC-VSL pokušava prilagoditi ograničenje brzine prometnog toka prije zagušenog segmenta u svrhu smanjivanja dotoka vozila u zagušeno područje autoceste i umanjivanja razlike izmjerene gustoće iz prethodnog *t-1* i trenutnog vremenskog koraka upravljanja *t* [15]:

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  |  |

gdje je:

– nova vrijednost ograničenja brzine,

– vrijednost ograničenja brzine iz prethodnog vremenskog koraka *t-1*,

– pozitivno proporcionalno povećanje,

– razlika zbroja izmjerenih gustoća iz prethodnog vremenskog koraka *t-1*,

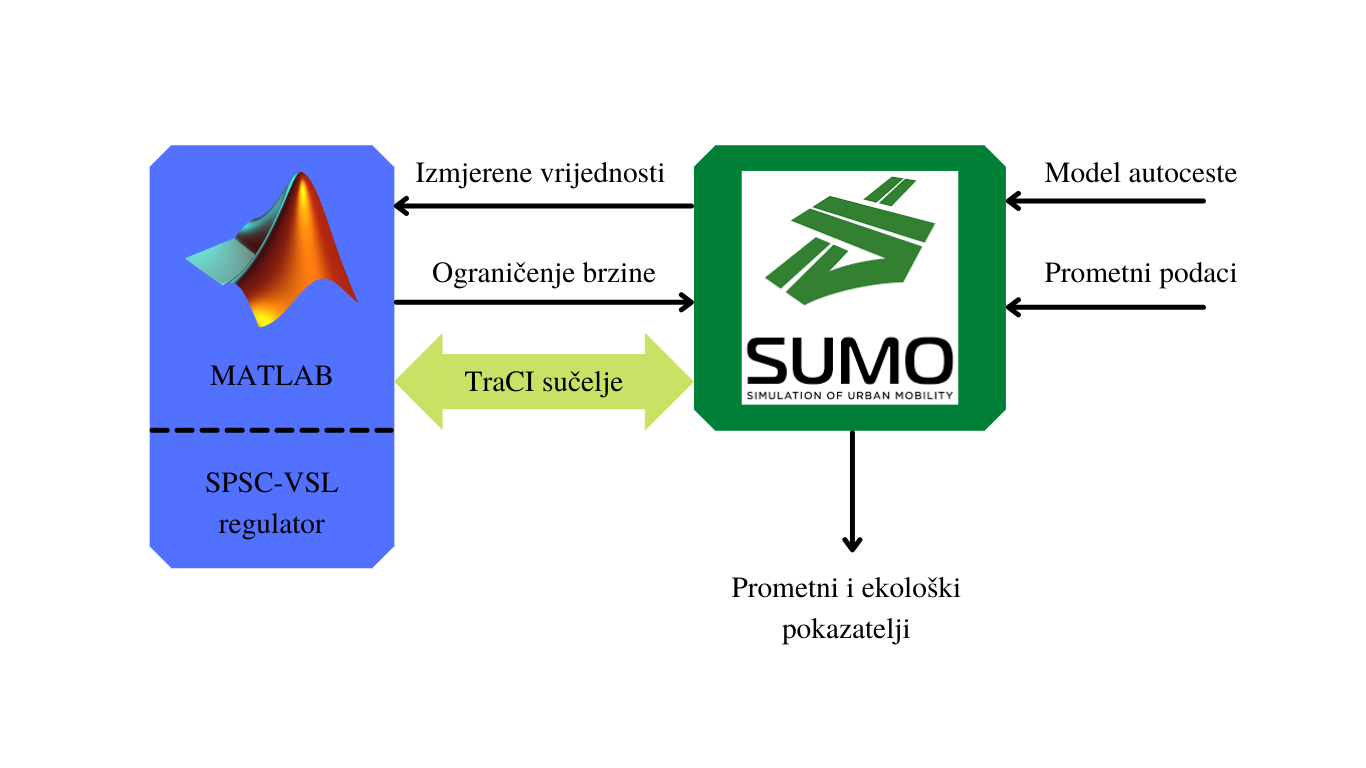
– razlika zbroja izmjerenih gustoća iz trenutnog vremenskog koraka *t*.

Da bi se ostvarilo upravljanje, SPSC-VSL generira upravljački signal svakih *t* sekundi prema izrazu , gdje *t0* označava vrijeme uzrokovanja, a *Nc* pozitivan cijeli broj (engl. *Positive Design Integer*). Upravljanje SPSC-VSL zasniva na aktivnosti upravljačke varijable *Ci* [16]. Brzina kretanja vozila u svakom segmentu autoceste ograničena je izrazom  
 gdje *Vmax* predstavlja najveću dopuštenu brzinu, a *Vmin* najmanju dopuštenu brzinu. Ukoliko upravljačka varijabla *Ci*, u trenutku *t* nije aktivna, ograničenje brzine se ne mijenja te ostaje isto kao u trenutku *t-1*. Aktivno stanje upravljačke varijable *Ci* pobuđuje izračun nove vrijednosti ograničenja brzine [3]. U svrhu sprječavanja negativnih posljedica nagle promjene brzine i velike oscilacije između dva uzastopna ograničenja brzine na upravljanom dijelu autoceste, novo ograničenje brzine ograničeno je pomoću izraza (2) [3]. Parametar *Cv* predstavlja najveću moguću promjenu brzinu u vremenskom trenutku *t* upravljanja i iznosi 20 [*km/h*] [16].

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  |  |

1. Simulacijsko okruženje i prometni scenariji

Simulacijsko okruženje sastavljeno je od programske platforme MATLAB i mikroskopskog simulatora SUMO uz programski dodatak TraCI4Matlab (Slika 4). TraCI4Matlab omogućuje interakciju SUMO simulatora i programske platforme MATLAB primjenom odgovarajućeg MATLAB programskog kôda koji izvršava sam algoritam SPSC-VSL-a [17]. U sljedećim podpoglavljima detaljno su opisani parametri SUMO simulatora, model autoceste i scenariji prometne potražnje primijenjeni unutar simulacija i način prikupljanja te obrade podataka.



Slika 4. Simulacijsko okruženje

Postoje makroskopske i mikroskopske simulacije. Makroskopske simulacije promatraju prometni tok u cjelini, kao fluid i opisuju ponašanje na osnovu pravila mehanike fluida. Mikroskopske simulacije u odnosnu na makroskopske, prometni tok raščlanjuju na pojedine entitete gdje se svaki entitet (vozilo, pješak, itd.) simulira na individualnoj razini [18]. SUMO predstavlja mikroskopski simulacijski alat otvorenog kôda (engl. *Open-source*) namijenjen simulaciji prometa. Omogućuje modeliranje intermodalnih prometnih sustava uključujući cestovna vozila, javni prijevoz i pješake. SUMO nudi mogućnost korištenja različitih sučelja za programiranje aplikacija (engl*. Application Programming Interface – API*) namijenjene daljinskom upravljanju simulacijom [9].

## Simulacijski parametri

U ovom radu je za vremensko trajanje svake simulacije postavljen iznos od 1,5 [*h*]. Nominalna vrijednost ograničenja brzine slobodnog toka na glavnom toku iznosi 120 [*km/h*], dok na svim priljevnim i odljevnim tokovima ograničenje brzine iznosi 65 [*km/h*]. Nakon proračuna novog ograničenja brzine, novo ograničenje šalje se na VMS-ove svakih 2,5 [*min*]. Vrijednosti parametara regulatora *Kv*i *Ci* odabrani su na osnovu većeg broja simulacija u odnosu na smanjenje vrijednosti TTS-a i prikazani su u tablici 1. Ograničenje brzine SPSC-VSL u uvjetima slobodnog toka ograničeno je na 120 [*km/h*], dok pri nastanku zagušenja ograničenje brzine smanjuje se korakom od 20 [*km/h*] do minimalne brzine od 60 [*km/h*]. Dinamika kretanja vozila modelirana je pomoću Kraussovog modela za praćenje vozila sa zadanim parametrima implementiranim u korištenom simulatoru SUMO [9].

Tablica 1. Vrijednosti parametara Kv i Ci za pojedinu konfiguraciju duljina VSL zona i slučaj prometne potražnje

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| Slučaj niske prometne potražnje | | | |
| Konfiguracija | 100-100 | 300-300 | 500-500 |
| *Kv* | 4,5 | 4,5 | 4,5 |
|  |
| *Ci* [*voz/km/traku*] | 23 | 29 | 29 |  |
|  |
| Slučaj srednje prometne potražnje | | | |  |
| Konfiguracija | 100-100 | 300-300 | 500-500 |
| *Kv* | 4,5 | 4,5 | 4,5 |  |
|  |
| *Ci* | 23 | 23 | 26 |  |
|  |
| Slučaj visoke prometne potražnje | | | |  |
| Konfiguracija | 100-100 | 300-300 | 500-500 |
| *Kv* | 2,5 | 4,5 | 2,5 |  |
|  |
| *Ci* | 26 | 23 | 29 |  |
|  |

## Model autoceste i scenariji prijevozne potražnje

Za ovaj rad, primijenjeni model autoceste zasniva se na modelu korištenom u istraživanju opisanom u [19]. Model autoceste sastoji se od dvije priljevne rampe (*r1* i *r3*) i jedne odljevne rampe (*r2*). Ukupna duljina modela iznosi 8 [*km*], duljina svake priljevne i odljevne rampe iznosi 0,5 [*km*]. Model sadržava tri glavne zone namijenjene SPSC-VSL upravljanju. VSL zone (*L1* i *L2*) upravljane SPSC-VSL-om ovisno o prometnoj potražnji i stanju prometa smanjuju ili povećavaju ograničenje brzine na implementiranim VMS-ovima. Zona zagušenja (*L3*) predstavlja prometno usko grlo čija se aktivacija i lokacija (te prostorno širenje zagušenja) mijenja ovisno o trenutnoj prometnoj situaciji i prometnom opterećenju (Slika 5).

Diagram

Description automatically generated

Slika 5. Model autoceste

*Izvor: [19]*

Za testiranje SPSC-VSL-a generirana su tri različita scenarija prometnog opterećenja. Na grafičkom prikazu 1 vidljiv je scenarij niskog prometnog opterećenja. Tijekom simulacije na glavnom prometnom toku generira se promjenjivi iznos prometnog toka. Minimalan iznos glavnog prometnog toka iznosi 2.650 [*voz/h*], a maksimalni iznos (impuls) je 3.000 [*voz/h*]. Priljevni tok *r1* ima konstantan tok od 200 [*voz/h*], dok priljevni tok *r3* ima promjenjiv iznos prometnog toka s minimalnim iznosom od 200 [*voz/h*] i maksimalnim iznosom od 1.300 [*voz/h*].

Na grafičkom prikazu 2 vidljiv je scenarij srednjeg prometnog opterećenja. Na glavnom prometnom toku srednjeg scenarija generira se promjenjivi prometni tok s minimalnim iznosom od 2.650 [*voz/h*] i maksimalnim impulsom u iznosu od 3.600 [*voz/h*]. Na priljevnoj rampi *r1* generira se konstantan tok od 200 [*voz/h*]. Na priljevnom rampi *r3* generira se promjenjivi tok s minimalnim iznosom od 200 [*voz/h*] i maksimalnim iznosom od 1.300 [*voz/h*].

Posljednji scenarij visoke prometne potražnje vidljiv je na grafičkom prikazu 3. Na glavnom prometnom toku unutar scenarija visoke prometne potražnje generira se promjenjivi tok s minimalnim iznosom od 2.650 [*voz/h*] i maksimalnim iznosom (impulsom) od 3.800 [*voz/h*]. Na priljevnoj rampi *r1* generira se konstantan tok od 200 [*voz/h*] dok se na priljevnoj rampi *r3* generira promjenjivi prometni tok s minimalnim iznosom od 200 [*voz/h*] i maksimalnim iznosom od 1.300 [*voz/h*].

Chart

Description automatically generated

Grafički prikaz 1. Generirana prometna potražnja za slučaj niskog prometnog opterećenja

Chart

Description automatically generated

Grafički prikaz 2. Generirana prometna potražnja za slučaj srednjeg prometnog opterećenja

Chart

Description automatically generated

Grafički prikaz 3. Generirana prometna potražnja za slučaj visokog prometnog opterećenja

## Prikupljanje i obrada simulacijskih rezultata

Kako bi se procijenila učinkovitost implementiranog regulatora SPSC-VSL i prikazala prostorno-vremenska raspodjela brzine i gustoće, model autoceste podijeljen je u manje segmente od 50 [*m*]. Podjelom modela na tako male segmente omogućena je prezentacija prometnog stanja simulirane mreže autoceste u bilo kojem određenom vremenskom trenutku za svaki segment posebno. Primjenom SUMO simulatora i MATLAB programskog kôda, prometne značajke glavnog toka, poput prosječne brzine i gustoće dohvaćani su svakih 10 [*s*]. Zbog svoje specifičnosti i sve veće važnosti u prometnim studijama, ekološki pokazatelji poput količine emisija štetnih ispušnih plinova ugljični dioksid (*engl. Carbon Dioxide – CO2*), ugljični monoksid (engl. *Carbon Monoxide – CO*) i dušikovi oksidi (engl. *Nitrogen Oxide – NOx*) te krutih čestica (engl. *Particulate Matter – PMx*), dohvaćani su svake sekunde. Kao glavni pokazatelj poboljšanja, TTS, mjeren je za cijeli model autoceste uključujući glavni tok i sve odljevne i priljevne tokove. TTS predstavlja kumulativnu mjeru provedenog vremena svih vozila u prometnoj mreži tijekom simulacije i izražava se jedinicom [*voz\*h*]. Na taj način se tijekom svake simulacije za svaki pojedini segment autoceste prikupljaju svi bitni prometni i ekološki pokazatelji za detaljnu analizu utjecaja različitih konfiguracija VSL zona i zona ubrzanja na efikasnost implementiranog regulatora SPSC-VSL.

1. Simulacijski rezultati

Unutar ovog poglavalja prikazani su i opisani simulacijski rezultati dobiveni primjenom prometnog modela gradske autoceste. Rezultati su podijeljeni u dva podpoglavlja. Unutar prvog podpoglavlja opisani su prometni pokazatelji karakteristični za prometni tok. Drugim podpoglavljem opisani su značajni ekološki pokazatelji utjecaja prometnog toka na okolinu.

Za izračun i grafički prikaz rezultata korišteno je simulacijsko okruženje opisano u poglavlju 5. Simuliranjem su ispitane različite konfiguracije VSL zona i zona ubrzanja uz djelovanje različitih iznosa prometnih tokova. Odabrane konfiguracije VSL zona iznosile su 100-100 [*m*], 300-300[*m*], 500-500 [*m*] gdje se prva vrijednost odnosi na duljinu VSL zone *L1*, a druga na *L2* i tri zone ubrzanja 100, 200 i 300 [*m*]. Zone *L1* i *L2* su susjedne jedna drugoj i prostorno su prilagođene tako da je *L2* zona uvijek susjedna zoni ubrzanja. Ukupno je simulirano 27 različitih konfiguracija. Za referentnu vrijednost rezultata korišten je slučaj bez primjene VSL-a. Dobiveni rezultati najboljih konfiguracija VSL-a prikazani su tablicama 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9 i 10. Važno je naglasiti da svrha ovog rada nije procijeniti u kojoj mjeri SPSC-VSL može poboljšati prometne parametre, već istražiti kako različite konfiguracije VSL zona utječu na rad SPSC-VSL-a. Prema tome, poboljšanje u odnosu na slučaj bez VSL-a uglavnom treba smatrati mjerom usporedbe između dvije različite postavke scenarija upravljanja, a ne apsolutnom mjerom poboljšanja.

Tablica 2. Dobiveni rezultati VSL-a za segmente 100-100 i različite zone ubrzanja za slučaj niskog zagušenja



Tablica 3. Dobiveni rezultati VSL-a za segmente 300-300 i različite zone ubrzanja za slučaj niskog zagušenja



Tablica 4. Dobiveni rezultati VSL-a za segmente 500-500 i različite zone ubrzanja za slučaj niskog zagušenja



Tablica 5. Dobiveni rezultati VSL-a za segmente 100-100 i različite zone ubrzanja za slučaj srednjeg zagušenja



Tablica 6. Dobiveni rezultati VSL-a za segmente 300-300 i različite zone ubrzanja za slučaj srednjeg zagušenja



Tablica 7. Dobiveni rezultati VSL-a za segmente 500-500 i različite zone ubrzanja za slučaj srednjeg zagušenja



Tablica 8. Dobiveni rezultati VSL-a za segmente 100-100 i različite zone ubrzanja za slučaj visokog zagušenja



Tablica 9. Dobiveni rezultati VSL-a za segmente 300-300 i različite zone ubrzanja za slučaj visokog zagušenja



Tablica 10. Dobiveni rezultati VSL-a za segmente 500-500 i različite zone ubrzanja za slučaj visokog zagušenja



## Analiza prometnih pokazatelja

Da bi se procijenio utjecaj promjene duljina VSL zona i zona ubrzanja na rad SPSC-VSL-a za analizu su korišteni sljedeći prometni pokazatelji: TTS, prosječna vrijednost brzine i gustoće na segmentu *L3*. Kao referentna vrijednost prometnih pokazatelja uzete su vrijednosti slučaja Bez VSL prikazanog u tablici 2. Provedene su simulacije na prometnim potražnjama opisanim poglavljem 5. U tablicama 2, 3 i 4 vidljivi su rezultati simulacija provedeni na niskom prometnom opterećenju. Prema odabranim prometnim pokazateljima, najbolja konfiguracija duljine VSL zona iznosila je 100 [*m*] uz duljinu zone ubrzanja 300 [*m*]. Za slučaj Bez VSL izmjerena vrijednost TTS-a iznosila je 416,05 [*voz\*h*], dok je vrijednost TTS-a najbolje konfiguracije iznosio 401,40 [*voz\*h*], što je smanjenje u iznosu od 14,65 [*voz\*h*] ili za 3,52 [*%*] (Slika 6). Prosječna vrijednost brzine na segmentu *L3* za slučaj Bez VSL iznosila je 80,33 [*km/h*], dok je kod najbolje konfiguracije iznosila 86,75 [*km/h*], što je povećanje za 6,49 [*km/h*] ili poboljšanje od 7,99 [*%*] (Slika 7). Prosječna vrijednost gustoće na promatranom segmentu *L3* za slučaj bez VSL-a iznosila je 28,32 [*voz/km/traku],* dok je za najbolji slučaj 24,10 [*voz/km/traku*] ostvareno je smanjenje od 4,22 [*voz/km/traku*], što je za 14,89 [*%*] bolje u odnosu na referentni slučaj (Slika 8).

Odnos slučaja bez VSL i dobivene najbolje konfiguracije prikazan je prostorno-vremenskim dijagramima brzine i gustoće na slici 9. Dijagramima (a) i (b) na slici 9 prikazana je prostorno-vremenska raspodjela brzine i gustoće za slučaj bez VSL. Dijagrami (c) i (d) na slici 9 predstavljaju vrijednost brzine i gustoće za najbolju dobivenu konfiguraciju duljina VSL zona i zona ubrzanja. Vidljivo je znatno smanjenje prosječne vrijednosti gustoće i povećanje brzine.

Slika 6. Izmjereni TTS s duljinama VSL zona i zona ubrzanja za slučaj niske prometne potražnje

Slika 7. Promjena prosječne brzine u segmentu L3 s duljinama VSL zona i zona ubrzanja za slučaj niske prometne potražnje

Slika 8. Promjena prosječne gustoće u segmentu L3 s duljinama VSL zona i zona ubrzanja za slučaj niskog zagušenja

Graphical user interface

Description automatically generated

Slika 9. Prostorno-vremenski dijagrami za najbolje dobivene VSL konfiguracije za slučaj niskog prometnog opterećenja

Tablicama 5, 6 i 7 prikazani su dobiveni rezultati za slučaj srednjeg opterećenja (Grafički prikaz 2). Referentne vrijednosti slučaja bez upravljanja prikazane su tablicom 5, gdje je vidljiv iznos TTS-a od 430,63 [*voz\*h*], vrijednost prosječne brzina na segmentu *L3* u iznosu od 79,00 [km/h] i vrijednost prosječne gustoće na segmentu *L3* u iznosu od 29,22 [*voz/km/traku*]. Usporedbom dobivenih prometnih parametara najbolja konfiguracije duljine VSL zona iznosila je 300 [*m*] uz duljina zone ubrzanja od 100 [*m*]. Navedenom konfiguracijom dobiven je TTS u iznosu 424,69 [*voz\*h*], poboljšanje u odnosu na referentnu vrijednost iznosi 5,94 [*voz\*h*] odnosno 1,38 [*%*] (Slika 10). Prosječna vrijednost brzine na segmentu *L3* iznosila je 79,64 [*km/h*]. Dobiveno povećanje brzine iznosi 0,64 [*km/h*] (Slika 11), ostvareno je poboljšanje od 0,81 [*%*] u odnosu na referentni slučaj. Izmjerena vrijednost prosječne vrijednosti gustoće na segmentu *L3* iznosila je 28,54 [*voz/km/traku*]. Usporede li se prosječne vrijednosti gustoće na segmentu *L3*, može se primijetiti poboljšanje u iznosu od 2,33 [*%*] (Slika 12) što je za 0,68 [*voz/km/traku*] manje u odnosu na referentni slučaj. Odnos slučaja bez VSL-a i najbolje dobivene konfiguracije prikazan je prostorno-vremenskim dijagramima na slici 13. Dijagramima prikazima (a) i (b) na slici 13 prikazana je prostorno-vremenska raspodjela brzine i gustoće za slučaj bez VSL, dok je dijagramima (c) i (d) na slici 13 prikazana najbolja dobivena konfiguracija. Vidljivo je znatno smanjenje prosječne gustoće i povećanje brzine tijekom zagušenja odnosno od 0,75 [*h*] do 1,25 [*h*] trajanja simulacije.

Slika 10. Izmjereni TTS s duljinama VSL zona i zona ubrzanja za slučaj srednje prometne potražnje

Slika 11. Promjena prosječne brzine u segmentu L3 s duljinama VSL zona i zona ubrzanja za slučaj srednje prometne potražnje

Slika 12. Promjena prosječne gustoće u segmentu L3 s duljinama VSL zona i zona ubrzanja za slučaj srednjeg zagušenja

Graphical user interface, chart

Description automatically generated

Slika 13. Prostorno-vremenski dijagrami za najbolje dobivene VSL konfiguracije za slučaj srednjeg prometnog opterećenja

Rezultati slučaja visokog prometnog opterećenja (Grafički prikaz 3) prikazani su tablicama 8, 9 i 10. Vrijednosti referentnog slučaja bez upravljanja prikazane su tablicom 8. vrijednost TTS-a iznosila je 440,40 [*voz/h*], vrijednost prosječne brzine na segmentu *L3* u iznosu od 77,18 [*km/h*] i vrijednost prosječne gustoća segmentu *L3* u iznosu od 30,53 [*voz/km/traku*]. Obradom dobivenih rezultata, najbolja konfiguracija duljine VSL zona iznosi 300 [*m*] koliko je dobiveno i za duljinu zone ubrzanja 300 [*m*]. Dobiveni TTS za dobivenu konfiguraciju iznosi 431,44 [*voz\*h*] ili smanjenje za 8,96 [*voz\*h*], odnosno 2,03 [*%*] (Slika 14). Prosječna vrijednost brzine na segmentu *L3* iznosila je 81,74 [km/h] i povećana je za 4,56 [*km/h*], ostvareno poboljšanje u postotcima iznosi 5,91 [*%*] (Slika 15). Prosječna vrijednost gustoće na promatranom segmentu *L3* iznosila je 27,73 [*voz/km/traku*] i smanjena je za 2,8 [*voz/km/traku*] (Slika 16) što je za 9,16 [*%*] bolje u odnosu na referentni slučaj bez upravljanja. Odnos slučaja bez VSL-a i najbolje dobivene konfiguracije za slučaj visoke prometne potražnje prikazan je prostorno-vremenskim dijagramima na slici 17. Dijagramima (a) i (b) na slici 17 prikazana je prostorno-vremenska raspodjela brzine i gustoće za slučaj bez VSL, dok je dijagramima (c) i (d) na slici 17 prikazana najbolja dobivena konfiguracija. Vidljivo je znatno smanjenje prosječne gustoće i povećanje brzine od 0,6 [*h*] do 1,25 [*h*] trajanja simulacije.

Slika 14. Izmjereni TTS s duljinama VSL zona i zona ubrzanja za slučaj visoke prometne potražnje

Slika 15. Promjena prosječne brzine u segmentu L3 s duljinama VSL zona i zona ubrzanja za slučaj visoke prometne potražnje

Slika 16. Promjena prosječne gustoće u segmentu L3 s duljinama VSL zona i zona ubrzanja za slučaj visokog zagušenja

Graphical user interface, chart

Description automatically generated

Slika 17. Prostorno-vremenski dijagrami za najbolje dobivene VSL konfiguracije za slučaj visokog prometnog opterećenja

## Analiza ekoloških pokazatelja

U ovom podpoglavlju analizirani su rezultati ekološkog utjecaja generiranog prometom. Dobiveni podaci generirani su SUMO simulatorom. Od ispušnih plinova mjereni su CO2, CO i NOx. Uz navedene ispušne plinove mjerena je i emisija PMx. Kao referentna vrijednost za izračun poboljšanja uzeta je dobivena vrijednost navedenih onečišćenja prometnog toka bez VSL.

Simulacijama su obrađena tri slučaja prometnog zagušenja s različitim duljinama VSL zona i zona ubrzanja. Slučaj niskog prometnog opterećenja prikazan je tablicama 1, 2 i 3. Poboljšanje odabranih ekoloških pokazatelj nalazi se u intervalu od 0-3 [*%*]. Tablicama 4, 5 i 6 prikazan je slučaj srednjeg prometnog opterećenja. Unutar ovog slučaja dobivena poboljšanja nalaze se u istom intervalu kao i kod slučaja niskog zagušenja, 0-3 [*%*]. Rezultati ekoloških pokazatelja za slučaj visokog prometnog opterećenja prikazani su tablicama 7, 8 i 9. Također kao i u prethodnim slučajevima dobivena poboljšanja nalaze se u istom intervalu od 0-3 [*%*].

## Rasprava dobivenih rezultata

Na dijagramima (a) i (b) prikazanim na slikama 9, 13 i 17 vidljivo je kako je poremećaj prometnog toka zbog djelovanja visoke prometne potražnje neizbježan. Navedenim problemom pojavljuje se nemogućnost potpunog sprječavanja zagušenja primjenom SPSC-VSL bez obzira koja konfiguracija duljine zona ograničenja i ubrzanja je primijenjena. Ovakav događaj se u osnovnom dijagramu javlja kada je gustoća prometnog toka iznad kritične gustoće (Slika 1).

Unutar ovog rada simulirane su različite konfiguracije duljine VSL zona upravljanja i zona ubrzanja s različitim prometnim opterećenjima. Dobivenim rezultatima prikazanim unutar tablica 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8 i 9 pokazano je kako duljina VSL zona kao i duljina zona ubrzanja znatno utječe na ponašanje prometnog toka. Odabirom duljih VSL zona postiže se negativan učinak na TTS. Razlog tomu je dulje vrijeme putovanja vozila zbog nižih ograničenja brzina postavljenih od VSL-a. Uzme li se prevelika zona ubrzanja, određena vozila bi mogla ubrzati iznad kritične brzine neposredno prije ulaska u usko grlo prilikom većih iznosa ograničenja brzine što bi moglo dodatno uzrokovati prometne nesreće i nezgode odnosno povećati vjerojatnost za njihovu pojavu jer vozila ponovno moraju smanjivat brzinu prilikom naleta na vozila koja se kreću manjim brzinama u uskom grlu. Odabirom kraćih VSL zona, povećava se i mogućnost zbunjivanja vozača učestalom promjenom ograničenja brzine. Kraće duljine zona ubrzanja uzrokuju nemogućnost postizanja kritične brzine kojom vozila trebaju ući u usko grlo da bi se postigao maksimalni protok vozila što za negativnu posljedicu ima stvaranje dodatnog zagušenja. Kako bi se postigla najbolja poboljšanja potrebno je pronaći optimalnu duljinu VSL zona i zona ubrzanja.

Za slučaj niskog prometnog opterećenja (Grafički prikaz 1) najbolja dobivena konfiguracija duljine VSL zona iznosila je 100 [*m*], a duljina zone ubrzanja 300 [*m*]. Sagleda li se slučaj srednjeg prometnog opterećenja (Grafički prikaz 2) najbolja dobivena konfiguracija duljine VSL zona iznosila je 300 [*m*], a duljina zone ubrzanja 100 [*m*]. Nadalje kao posljednji slučaj uzeta je visoka prometna potražnja (Grafički prikaz 3). Najbolja dobivena konfiguracija duljine VSL zona za slučaj visoke prometne potražnje iznosila je 300 [*m*] uz duljinu zone ubrzanja od 300 [*m*].

Navedene konfiguracije doprinijele su smanjenju brzine na dijelu gradske autoceste prije zone zagušenja što je uzrokovalo smanjenje dotoka vozila u zagušeni dio. Smanjen dotok vozila uzrokovao je rasterećenje nizvodnog zagušenja unutar uskog grla. Pozitivan učinak uz smanjenje zagušenja očitao se i poboljšanjem prometnih i ekoloških parametara.

1. Zaključak

Unatoč tome što svojim konstrukcijskim značajkama autoceste omogućavaju višu razinu LoS, u određenim vremenskim razdobljima povećanje prometne potražnje može doći do zagušenja. Ovakva pojava najčešće se javlja kod gradskih autocesta s velikim brojem priljevnih i odljevnih rampi, a karakterizirana je niskim brzinama i povećanom gustoćom prometnog toka. Posljedica ove pojave očituje se u smanjenju LoS-a, frustracije vozača, povećanjem prometnih nesreća i nezgoda te povećanjem emisije štetnih plinova. Kako bi se smanjili negativni učinci nastalog zagušenja razvijeni su različiti sustavi upravljanja prometnim tokom iz domene ITS-a. Jedan od razvijenih sustava je i sustav VSL odnosno upravljanje promjenjivim ograničenjem brzine.

VSL sustavi omogućavaju homogenizaciju brzine i posljedično smanjuju negativan utjecaj zagušenja na prometni tok i okoliš. U ovom radu analiziran je utjecaj različitih duljina zona VSL i zona ubrzanja na zonu zagušenja s aktivnim uskim grlom (područje uplitanja priljevnih tokova s rampe u glavni prometni tok). Algoritam upravljanja zasniva se na stvarnovremenskim podacima o stanju prometa dobivenih iz osjetila. Prikupljeni podaci o brzini i gustoći obrađuju se u SPSC-VSL regulatoru ograničenja brzine i na osnovu obrade podataka izračunava se trenutno ograničenje brzine. Navedeni algoritam upravljanja implementiran je u programskoj platformi MATLAB, a prometni tok i model gradska autoceste simuliran u mikroskopskom simulatoru SUMO.

Analizom dobivenih rezultata pokazano je kako duljine VSL zona i zona ubrzanja znatno utječu na prometne i ekološke značajke. Odabir duljih VSL zona rezultira povećanim TTS-om, a razlog tomu jest dulje putovanje vozila nižim ograničenim brzinama postavljenim od strane VSL-a. Odabirom kraćih VSL zona postiže se negativan učinak na vozače, učestalo mijenjanje brzine na kraćim dionicama autoceste može rezultirati zbunjivanjem vozača. Uzme li se u obzir odabir duljine zone ubrzanja, duljim zonama ubrzanja povećava se mogućnost prekoračenja kritične brzine prometnog toka što za posljedicu može uzrokovati nastanak prometnih nesreća i nezgoda prilikom naleta vozila s visokim brzinama u zonu zagušenja gdje se nalaze vozila manjih brzina. Suprotno tome, odabirom kraćih zona ubrzanja javlja se nemogućnost dostizanja kritične brzine prometnog toka od strane vozila. Ovakva pojava može dodatno uzrokovati zagušenja. Kako bi se postigla najbolja poboljšanja potrebno je pronaći optimalnu duljinu VSL zona i zona ubrzanja. Simuliranjem različitih slučajeva prometne potražnje, kao najbolje dobivene su sljedeće konfiguracije. Za slučaj niske prometne potražnje najbolja dobivena konfiguracija VSL zone iznosila je 100 [*m*], a duljina zone ubrzanja 300 [*m*], za slučaj srednje prometne potražnje najbolja dobivena konfiguracija VSL zone iznosila je 300 [*m*], a duljina zone ubrzanja 100 [*m*] i za slučaj visoke prometna potražnja najbolja dobivena konfiguracija VSL zone iznosila je 300 [*m*] uz zonu ubrzanja od 300 [*m*]. Iako u težištu rada nije bilo prikazati u kojoj mjeri SPSC-VSL može poboljšati prometni tok, već istražiti kako različite konfiguracije VSL zona utječu na SPSC-VSL, dobiveni rezultati ukazuju na znatna poboljšanja.

Kao krajnji zaključak zasnovan na sveobuhvatnoj analizi dobivenih rezultata može se zaključiti da se odabirom optimalne duljine VSL zona i zona ubrzanja znatno poboljšava učinkovitost implementiranog SPSC-VSL-a. Također odabir optimalne konfiguracije zona ograničenja brzine i zone ubrzanja, ovisi o količini prometa koju autocesta opslužuje. Navedeno predstavlja izazov i motivaciju za daljnji rad i istraživanje u ovom području sa ciljem postizanja još boljih rezultata sustava upravljanja promjenjivim ograničenjem brzine. Kao prijedlog za daljnji rad predlaže se pronalazak i obrada najboljih metoda određivanja optimalnih duljina VSL zona i zona ubrzanja ovisno o prometnoj potražnji i konstrukcijskim značajkama autoceste uz naglasak na stvarnovremenski rad u okolini umreženih vozila.

Literatura

[1] P. N. The *et al.*, “Real time ARM-based traffic Level of Service classification system,” *2016 13th Int. Conf. Electr. Eng. Comput. Telecommun. Inf. Technol. ECTI-CON 2016*, 2016, doi: 10.1109/ECTICon.2016.7561413.

[2] I. Bošnjak, *Osnove prometnog inženjerstva*. Zagreb: Fakultet prometnih znanosti, 2005.

[3] M. Gregurić, E. Ivanjko, N. Korent, and K. Kusić, “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] W. Yue, C. Li, and G. Mao, “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] H. Yu, M. Diagne, L. Zhang, and M. Krstic, “Bilateral Boundary Control of Moving Shockwave in LWR Model of Congested Traffic,” *IEEE Trans. Automat. Contr.*, vol. 66, no. 3, pp. 1429–1436, 2021, doi: 10.1109/TAC.2020.2994031.

[6] I. Bošnjak, *Inteligentni transportni sustavi ITS -1*. Zagreb: Fakultet prometnih znanosti, 2006.

[7] E. R. Müller, R. C. Carlson, W. Kraus, and M. Papageorgiou, “Microsimulation Analysis of Practical Aspects of Traffic Control With Variable Speed Limits,” vol. 16, no. 1, pp. 512–523, 2015.

[8] A. Hegyi, S. P. Hoogendoorn, M. Schreuder, H. Stoelhorst, and F. Viti, “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.

[9] P. A. Lopez *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.

[10] M. Barth and K. Boriboonsomsin, “Real-world carbon dioxide impacts of traffic congestion,” *Transp. Res. Rec.*, vol. 2058, no. 2058, pp. 163–171, 2008, doi: 10.3141/2058-20.

[11] M. Papageorgiou, E. Kosmatopoulos, and I. Papamichail, “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.

[12] H. Zackor, “Speed Limitation on Freeways: Traffic-Responsive Strategies,” 1991.

[13] R. Öörni, S. Innamaa, and R. Kulmala, “Road Weather Information Service in Finland,” in *Data and Mobility*, 2010, pp. 187–201.

[14] E. Ivanjko, K. Kušić, and M. Gregurić, “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.

[15] F. Vrbanić, D. Čakija, K. Kušić, and E. Ivanjko, “Traffic Flow Simulators with Connected and Autonomous Vehicles: A Short Review,” in *Transformation of Transportation*, M. Petrović and L. Novačko, Eds. Cham: Springer International Publishing, 2021, pp. 15–30.

[16] K. Kušić, N. Korent, M. Gregurić, and E. Ivanjko, “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.

[17] A. F. Acosta, J. E. Espinosa, and J. Espinosa, “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.

[18] I. Dadić, G. Kos, M. Ševrović, and D. Budimir, *Teorija Prometnog Toka*, Treće. Zagreb: Fakultet prometnih znanosti Zavod za prometno planiranje, 2014.

[19] K. Kušić, I. Dusparic, M. Guériau, M. Gregurić, and E. Ivanjko, “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.

Sažetak

Autoceste svojim konstrukcijskim značajkama u odnosu na druge vrste cesta omogućavaju veću razinu uslužnosti (engl. *Level of Service - LoS*). Unatoč mogućnosti pružanja većeg prometnog kapaciteta pri određenim slučajevima može doći do preopterećenja prometnog toka što za posljedicu ima nastanak zagušenja. Zagušenja karakteriziraju duža vremena putovanja i veća onečišćenja zraka. Kako bi se smanjili utjecaji zagušenja prometnog toka razvijeni su različiti sustavi upravljanja iz domene inteligentnih transportnih sustava (engl. *Inteligent Transport Systems - ITS*). Najrašireniji upravljački sustavi na autocestama su upravljanje priljevnim tokovima (engl. *Ramp Metering - RM*) i promjenjivim ograničenjem brzine (engl. *Variable Speed Limit – VSL*). Upravljački sustavi, osobito VSL, često se proučavaju kao rješenja za poboljšanje LoS-a na gradskim autocestama. Međutim, učinkovitost VSL-a snažno ovisi o prostornom rasporedu VSL zona. Budući da optimalna duljina VSL zone i njihova udaljenost od uskog grla izravno utječu na dinamiku prometa, ključno je odrediti optimalnu duljinu i mjesto VSL zona za najbolju učinkovitost. U ovom radu izvedena je analiza utjecaja različitih duljina VSL zona i njihovih položaja na efektivnost jednostavnog proporcionalnog regulatora za promjenjivo ograničenje brzine (engl. *Simple Proportional Speed Controller - SPSC-VSL)*. Analizirane su različite konfiguracije VSL zona i njihov utjecaj na upravljanje prometnim tokom primjenom SUMO simulatora na scenarijima niske, srednje i visoke prometne potražnje. Dobiveni rezultati pokazali su značajan utjecaj VSL zona i zona ubrzanja na učinkovitost SPSC-VSL-a. Također su dobivene najbolje konfiguracije duljina VSL-a zona i zona ubrzanja za testirane prometne scenarije. Konačno, prometni i ekološki pokazatelji učinkovitosti prikazuju poboljšanja SPSC-VSL-a za najbolje dobivene konfiguracije.

Ključne riječi: gradske autoceste, inteligentni transportni sustavi, razina uslužnosti, promjenjivo ograničenje brzine, jednostavni proporcionalni regulator ograničenja brzine.

Summary

With their construction features compared to other types of roads, motorways enable a higher Level of Service (LoS). Despite the possibility of providing greater traffic capacity in certain cases, traffic flow can be overloaded, which results in congestion. Congestion is characterized by longer travel times and higher air pollution. To reduce the effects of traffic congestion, various control systems in the field of Intelligent Transportation Systems (ITS) have been developed. The most common control systems on motorways are Ramp Metering and Variable Speed Limit (VSL). Control systems, especially VSL, are often studied as solutions to improve LoS on urban motorways. However, the effectiveness of VSL strongly depends on the spatial arrangement of VSL zones. Since the optimal length of the VSL zone and their distance from the bottleneck directly affect traffic dynamics, it is crucial to determine the optimal length and placement of the VSL zones to maximize efficiency. In this paper, the analysis of different lengths of VSL zones and their positions using a Simple Proportional Speed Controller (SPSC-VSL) is performed. Different configurations of VSL zones and their influence on traffic flow control using SUMO simulators in low, medium, and high traffic demand scenarios were analyzed. The obtained results showed significant dependence of VSL zone allocation on the effectiveness of SPSC-VSL; the best configurations of VSL zone and acceleration zone length for tested scenarios were also obtained. Finally, obtained traffic and environmental performance indicators show SPSC-VSL improvements for the best configurations.

Keywords: urban motorways, intelligent transport systems, level of service, variable speed limit, simple proportional speed controller.

Title: Impact of Speed Limit Zone Collocation on Variable Speed Limit Control on Urban Motorways

Popis slika

[Slika 1. Nagib osnovnog dijagrama prometnog toka bez VSL-a i s VSL-om 5](#_Toc75958915)

[Slika 2. VSL zona upravljanja, zona ubrzanja te zona zagušenja na dionici autoceste 8](#_Toc75958916)

[Slika 3. Ilustracija dionice jednog smjera autoceste podijeljene u N segmenata 10](#_Toc75958917)

[Slika 4. Simulacijsko okruženje 12](#_Toc75958918)

[Slika 5. Model autoceste 14](#_Toc75958919)

[Slika 6. Izmjereni TTS s duljinama VSL zona i zona ubrzanja za slučaj niske prometne potražnje 22](#_Toc75958920)

[Slika 7. Promjena prosječne brzine u segmentu L3 s duljinama VSL zona i zona ubrzanja za slučaj niske prometne potražnje 23](#_Toc75958921)

[Slika 8. Promjena prosječne gustoće u segmentu L3 s duljinama VSL zona i zona ubrzanja za slučaj niskog zagušenja 23](#_Toc75958922)

[Slika 9. Prostorno-vremenski dijagrami za najbolje dobivene VSL konfiguracije za slučaj niskog prometnog opterećenja 24](#_Toc75958923)

[Slika 10. Izmjereni TTS s duljinama VSL zona i zona ubrzanja za slučaj srednje prometne potražnje 25](#_Toc75958924)

[Slika 11. Promjena prosječne brzine u segmentu L3 s duljinama VSL zona i zona ubrzanja za slučaj srednje prometne potražnje 25](#_Toc75958925)

[Slika 12. Promjena prosječne gustoće u segmentu L3 s duljinama VSL zona i zona ubrzanja za slučaj srednjeg zagušenja 26](#_Toc75958926)

[Slika 13. Prostorno-vremenski dijagrami za najbolje dobivene VSL konfiguracije za slučaj srednjeg prometnog opterećenja 26](#_Toc75958927)

[Slika 14. Izmjereni TTS s duljinama VSL zona i zona ubrzanja za slučaj visoke prometne potražnje 27](#_Toc75958928)

[Slika 15. Promjena prosječne brzine u segmentu L3 s duljinama VSL zona i zona ubrzanja za slučaj visoke prometne potražnje 28](#_Toc75958929)

[Slika 16. Promjena prosječne gustoće u segmentu L3 s duljinama VSL zona i zona ubrzanja za slučaj visokog zagušenja 28](#_Toc75958930)

[Slika 17. Prostorno-vremenski dijagrami za najbolje dobivene VSL konfiguracije za slučaj visokog prometnog opterećenja 29](#_Toc75958931)

Popis grafičkih prikaza

[Grafički prikaz 1. Generirana prometna potražnja za slučaj niskog prometnog opterećenja 15](#_Toc75958911)

[Grafički prikaz 2. Generirana prometna potražnja za slučaj srednjeg prometnog opterećenja 16](#_Toc75958912)

[Grafički prikaz 3. Generirana prometna potražnja za slučaj visokog prometnog opterećenja 16](#_Toc75958913)

Popis tablica

[Tablica 1. Vrijednosti parametara Kv i Ci za pojedinu konfiguraciju duljina VSL zona i slučaj prometne potražnje 13](#_Toc75958901)

[Tablica 2. Dobiveni rezultati VSL-a za segmente 100-100 i različite zone ubrzanja za slučaj niskog zagušenja 18](#_Toc75958902)

[Tablica 3. Dobiveni rezultati VSL-a za segmente 300-300 i različite zone ubrzanja za slučaj niskog zagušenja 19](#_Toc75958903)

[Tablica 4. Dobiveni rezultati VSL-a za segmente 500-500 i različite zone ubrzanja za slučaj niskog zagušenja 19](#_Toc75958904)

[Tablica 5. Dobiveni rezultati VSL-a za segmente 100-100 i različite zone ubrzanja za slučaj srednjeg zagušenja 19](#_Toc75958905)

[Tablica 6. Dobiveni rezultati VSL-a za segmente 300-300 i različite zone ubrzanja za slučaj srednjeg zagušenja 20](#_Toc75958906)

[Tablica 7. Dobiveni rezultati VSL-a za segmente 500-500 i različite zone ubrzanja za slučaj srednjeg zagušenja 20](#_Toc75958907)

[Tablica 8. Dobiveni rezultati VSL-a za segmente 100-100 i različite zone ubrzanja za slučaj visokog zagušenja 20](#_Toc75958908)

[Tablica 9. Dobiveni rezultati VSL-a za segmente 300-300 i različite zone ubrzanja za slučaj visokog zagušenja 21](#_Toc75958909)

[Tablica 10. Dobiveni rezultati VSL-a za segmente 500-500 i različite zone ubrzanja za slučaj visokog zagušenja 21](#_Toc75958910)