

Upravljanje sigurnošću prometa na autocestama promjenjivim ograničenjem brzine

Katava, Davor

Master's thesis / Diplomski rad

2015

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

Permanent link / Trajna poveznica: <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:119:203294>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2024-04-17**



Repository / Repozitorij:

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



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET PROMETNIH ZNANOSTI

Davor Katava

UPRAVLJANJE SIGURNOSTI PROMETA NA AUTOCESTAMA
PROMJENJIVIM OGRANIČENJEM BRZINE

DIPLOMSKI RAD

Zagreb, 2015.

Sveučilište u Zagrebu
Fakultet prometnih znanosti

DIPLOMSKI RAD

**UPRAVLJANJE SIGURNOSTI PROMETA NA AUTOCESTAMA
PROMJENJIVIM OGRANIČENJEM BRZINE**

**MANAGEMENT OF FREEWAY TRAFFIC SAFETY BY VARIABLE
SPEED LIMIT**

Mentor: izv. prof. dr. sc. Sadko Mandžuka

Student: Davor Katava, 0135217818

Zagreb, rujan 2015.

SAŽETAK

Tematika diplomskog rada vezana je uz upravljanje sigurnošću prometa na dionici autoceste primjenom promjenjivog ograničenja brzine prikazanog na promjenjivim prometnim znakovima. S obzirom na izrazitu ovisnost razine sigurnosti o stupnju poštivanja ograničenja brzine, koja su prikazana na promjenjivim prometnim znakovima, istražen je stupanj poštivanja ograničenja brzine od strane vozača. U radu je utvrđena mogućnost utjecaja promjenjivog ograničenja brzine na harmonizaciju brzina vozila u prometnom toku na autocesti. Utvrđene zakonitosti primijenjene su u sklopu definiranja sudarnog potencijala, pri čemu je rad usmjeren na koeficijent varijacije brzina kao jednog od najvažnijih čimbenika funkcije sudarnog potencijala. Vrijednosti koeficijenta su dobivene iz računalnih simulacija prometnih tokova na autocesti u ovisnosti o stupnju iskorištenosti kapaciteta autoceste i stupnju poštivanja promjenjivih ograničenja brzine od strane vozača. Na temelju simulacijom određenih vrijednosti koeficijenata varijacije brzina, izvedena je njihova usporedba i utvrđena mogućnost utjecaja promjenjivih ograničenja brzine na sigurnost prometnog toka na dionici autoceste.

KLJUČNE RIJEČI:

inteligentni transportni sustavi, upravljanje sigurnošću prometa na autocestama, sustav promjenjivih ograničenja brzine, sudarni potencijal

SUMMARY

This thesis is related to the management of safety on freeway section by the application of variable speed limits that are displayed on variable traffic signs. Considering the extreme independence of the safety level on degree of driver compliance of variable speed limits, driver compliance of variable speed limits is explored. The paper identified the possibility of the impact of the variable speed limits on vehicle speed harmonization on freeways. Identified independence has been applied as a part of a crash potential, where the focus of the paper is on the coefficient of variation of speed, which is one of the most important parts of the crash potential function. Coefficient values are obtained from computer simulations of the traffic flow on the freeway section, depending on the capacity utilization and the level of driver's compliance of introduced variable speed limits. Based on the values of coefficients of variation of speeds that are obtained from simulations, their comparison has been made, and the possibility of variable speed limits on freeway traffic safety has been established.

KEY WORDS:

Intelligent transport system, Freeway traffic safety management, Variable speed limit system, Crash potential

SADRŽAJ

1. Uvod	1
2. Primjena inteligentnih transportnih sustava na sigurnost cestovnog prometa	3
2.1. Značaj sigurnosti cestovnog prometa	3
2.2. Značajke ITS-a u području povećanja sigurnosti cestovnog prometa.....	5
2.3. pristupi upravljanja sigurnošću prometa na autocestama	12
3. Primjena sustava promjenjivog ograničenja brzine	13
3.1. pristupi i metode razvoja VSLC-a	14
3.1.1. pristupi u razvoju VSLC-a	14
3.1.2. Metode za primjenu VSLC-a	16
3.2. Poštivanje promjenjivog ograničenja brzine od strane vozača	18
3.3. Metode prikupljanja podataka i mehanizmi njihove obrade i prikaza	20
3.3.1. Metode prikupljanja podataka	20
3.3.2. Mehanizmi obrade podataka	22
3.3.3. Prikaz dinamičkog ograničenja brzine	23
3.4. Oblikovanje upravljačkih algoritama za VSLC sustav	25
3.5. Primjena stvarnovremenskih podataka o prometnom toku	26
3.6. Sudarni potencijal.....	27
4. Utjecaj varijacija brzine na sigurnost cestovnog prometa.....	30
4.1. Utjecaj promjenjivog ograničenja brzine na smanjenje varijacije brzina	35
4.2. Značaj modeliranja i simuliranja u prometu.....	41
4.3. Modeliranje simulacije sustava upravljanja sigurnošću prometa na dionici autoceste ..	43
5. Simulacije, rezultati i rasprava	47
5.1. Kriteriji i rezultati simulacija	47
5.2. Rasprava	59
5.3. Inteligentna prilagodba brzine.....	64
6. Zaključak	66
Literatura	68
Popis slika	73
Popis tablica	74
Popis grafikona.....	74

1. Uvod

Aktivnosti upravljanja sigurnošću prometa na prometnicama odnose se na širok spektar metoda kojima je zajednički cilj smanjiti broj i posljedice prometnih nesreća. Velik dio tih aktivnosti odnosi se na jedan od glavnih čimbenika koji utječu na smanjenje stupnja sigurnosti prometa, a to je brzina. U sklopu politike upravljanja brzinama na prometnicama, pa tako i autocestama, u obzir se moraju uzeti njihovi pozitivni i negativni učinci. Pozitivan je učinak svakako skraćivanje vremena putovanja, kao i optimalno korištenje raspoloživih prometnih kapaciteta. Međutim, ciljevi upravljanja brzinama uključuju smanjenje brzine radi smanjenja broja i posljedica prometnih nesreća kao primarni cilj, te smanjenje brzine radi smanjenja potrošnje goriva, emisije ispušnih plinova i buke. Upravljanje brzinom obuhvaća niz mjera u cilju uravnoteženja sigurnosti i efikasnosti brzina vozila na cestovnoj mreži. Ono treba smanjiti učestalost prebrze vožnje i osigurati poštivanje ograničenja brzine.

Na autocestama se već provode brojne mjere upravljanja brzinom u sklopu upravljanja sigurnošću prometa. Uz različite vrste obavijesti i ograničenja brzine, te mjera prisile poštivanja ograničenja brzine, zadnjih desetljeća aktivno se radi na unaprjeđenju sustava promjenjivog ograničenja brzine.

Radi se o mjeri koja u ovisnosti o uvjetima koji vladaju na prometnici, u konkretnom slučaju na autocesti, mijenja ograničenje brzine koje je prikazano na promjenjivom prometnom znaku. Promjenom ograničenja brzine nastoji se djelovati na prometni tok kako bi on u prvom redu postao brzinski homogeniji.

Poznato je da pri velikim raspršenostima brzina kretanja vozila od prosječne brzine prometnog toka postoji velika mogućnost sudara pa su takvi uvjeti na autocesti izrazito nepovoljni sa stajališta sigurnosti. Takva vožnja izaziva nepravilnosti u odvijanju prometnog toka, te uz povećanje rizika od sudara, izaziva stres i frustraciju vozača jer im onemogućava putovanje ujednačenom brzinom koja je i subjektivno doživljena kao prirodnija.

Homogeniziranjem prometnog toka omogućuje se postizanje ujednačenosti karakteristika kretanja većine pojedinačnih vozila u prometnom toku, a svako smanjenje odstupanja vodi povećanju sigurnosti. Uz učinak homogenizacije, smanjuje se i brzina kretanja vozila čime se smanjuje i broj i posljedice prometnih nesreća.

Međutim, budući da smanjenje brzine kretanja uvelike ovisi o subjektivnom doživljaju vozača, potrebno je vozače prisiliti na pojačano uvažavanje prikazanih ograničenja, što je posebice slaba točka kod promjenjivog ograničenja brzine. Rad je usmjeren na istraživanje povećanja razine sigurnosti prometa na autocestama primjenom ovakvog sustava dinamičke promjene ograničenja brzine te prikazivanje stupnja djelovanja ovog sustava na stvarni prometni tok.

Diplomski rad podijeljen je u 6 poglavlja.

Drugo poglavlje prikazuje značaj i primjenu inteligentnih transportnih sustava u području povećanja razine sigurnosti prometa.

U trećem poglavlju izložene su odlike sustava promjenjivog ograničenja brzine, prikazana je njegova primjena, funkcionalnost i prednosti te je obrađen problem poštivanja takvih ograničenja od strane vozača. U istom poglavlju bit će riječi i o funkciji sudarnog potencijala.

Četvrto poglavlje donosi pregled utjecaja sustava promjenjivog ograničenja brzine na varijaciju brzina vozila u prometnom toku. Definiran je pojam i značaj prometnog modeliranja i simuliranja u izboru najbolje varijante predloženih rješenja. U poglavlju je opisan model simulacije čiji su scenariji detaljno prikazani u petom poglavlju.

Peto poglavlje uz scenarije i podscenarije simulacije prikazuje rezultate provedenih simulacija i raspravu o dobivenim rezultatima. Rezultati se odnose na izračun koeficijenta varijacije brzina vozila u prometnom toku u ovisnosti o stupnju iskorištenosti kapaciteta autoceste, stupnju poštivanja promjenjivih ograničenja brzine, te u ovisnosti o vrijednosti ograničenja brzine i razmaku između dvaju promjenjivih prometnih znakova. Zadnji dio poglavlja posvećen je potencijalnom pristupu za rješavanje problema poštivanja ograničenja brzine od strane vozača – inteligentnoj prilagodbi brzine vozila.

2. Primjena inteligentnih transportnih sustava na sigurnost cestovnog prometa

Pojam inteligentnih transportnih sustava koristi se pri opisivanju sustava prometa gdje su vozila u interakciji s okolinom i jedna s drugima, sa svrhom pružanja boljeg iskustva vožnje, pri čemu inteligentna infrastruktura poboljšava sigurnost i kapacitet cestovnog sustava. U poglavlju je prikazan značaj koju sigurnost ima u sustavu cestovnog prometa te uloga koju primjena inteligentnih transportnih sustava ima u podizanju razine sigurnosti.

2.1. Značaj sigurnosti cestovnog prometa

Razvojem cestovnog prometnog sustava i velikim povećanjem broja motornih vozila na prometnicama, pojavila se potreba za unaprjeđenjem sigurnosti. Mnogo poginulih i teško ozlijeđenih u prometnim nesrećama objašnjava se i neprilagođenošću prometnica zahtjevima suvremenog prometa, nedovoljno razvijenom sviješću sudionika u prometu o načinu ponašanja i djelovanja u prometu, neadekvatnom opremljenošću prometnica prometnom signalizacijom, određenim udjelom tehnički neispravnih vozila na prometnicama, slabom preventivom i kaznenim mjerama i slično [1]. Sigurnost cestovnog prometa može se definirati kao skup mjera i metoda kojima se omogućuje zaštita sudionika u cestovnom prometu i smanjenje rizika od njihovog stradavanja. Najteže posljedice nedovoljne sigurnosti u prometnom sustavu su prometne nesreće. Prometne nesreće na cestovnim prometnicama s ekonomskog gledišta rezultiraju velikim gubicima za društvo u cjelini.

Značaj sigurnosti cestovnog prometa za svaku zemlju, pa tako i za Republiku Hrvatsku, je višestruk. Postojeća razina sigurnosti nije na zadovoljavajućoj razini zbog velikog broja poginulih i stradalih osoba u prometnim nesrećama na hrvatskim cestama. Svaka poginula i ozlijeđena osoba, osim osobne tragedije, predstavlja izravan gubitak društva. Budući da je čovjek jedan od osnovnih resursa za razvoj gospodarstva, država znatno ulaže u razvoj njegovih sposobnosti. Stoga, prometne nesreće s poginulima i ozlijeđenima predstavljaju izravan ekonomski gubitak društva zbog nemogućnosti doprinosa pojedinca sveukupnom razvoju gospodarstva. Također, s obzirom na izgrađenost mreže autocesta i njihovu kvalitetu, sigurne autoceste su jedan od elemenata privlačenja znatnog broja turista iz europskih

zemalja. Prema tome, značaj sigurnosti prometa na cestama moguće je indirektno dovesti u vezu s razvojem ukupnog hrvatskog gospodarstva, a posebno sektora turizma.

Budući da sve države svijeta kontinuirano provode razne mjere i akcije kako bi se utjecalo na smanjenje stradavanja u prometnim nesrećama, značaj sigurnosti u cestovnom prometu prepoznat je na međunarodnoj razini.

Okvir za povećanje aktivnosti usmjerenih na spašavanje života državama i regionalnim/lokalnim zajednicama pružen je u studenom 2009. godine u Moskvi, kada je održana 1. ministarska konferencija o sigurnosti cestovnog prometa. U sklopu konferencije usvojena je Moskovska deklaracija kojom se poziva na desetljeće akcije za sigurnost cestovnog prometa.

Nakon toga, Generalna skupština Ujedinjenih naroda izglasala je 2. ožujka 2010. "Desetljeće akcije za sigurnost cestovnog prometa" za razdoblje od 2011. do 2020. godine. Riječ je o rezoluciji koju je podržalo 100 zemalja i kojom se promiče cilj stabilizacije i smanjenja broja žrtava na cestama, odnosno da se do 2020. godine predviđeni broj žrtava na cestama smanji za 50 posto.

U srpnju iste godine Europska komisija usvojila je 4. akcijski program za sigurnost cestovnog prometa za razdoblje od 2011. do 2020. godine, koji treba biti okvir za nacionalne strategije svih zemalja EU.

Slijedeći navedene međunarodne aktivnosti, hrvatska vlada donijela je 14. travnja 2011. godine novi Nacionalni program sigurnosti cestovnog prometa Republike Hrvatske 2011 - 2020 godine (NN, 59/2011). Osim razdoblja trajanja, i cilj Nacionalnog programa usklađen je s Desetljećem akcije za sigurnost cestovnog prometa i 4. Akcijskim programom Europske komisije. Glavni cilj Nacionalnog programa sigurnosti cestovnog prometa RH 2011-2020 godine je smanjenje broja poginulih u prometnim nesrećama za 50 posto, odnosno 213 poginulih osoba na hrvatskim prometnicama do kraja 2020. godine [2].

Osim Nacionalnog programa, pravnu potporu sigurnosti cestovnog prometa u Republici Hrvatskoj daje Zakon o sigurnosti prometa na cestama (NN, 67/2008).

Sigurnost sudionika u cestovnom prometu značajan je pokazatelj kvalitete cestovnog prometnog sustava svake države i pokazatelj njene sposobnosti da zaštiti stanovništvo i gospodarstvo.

2.2. Značajke ITS-a u području povećanja sigurnosti cestovnog prometa

Budući da je sigurnost cestovnog prometa definirana kao razina sigurnosti pri kojoj se promet ljudi i dobara cestom može postići bez ozljeda, smrti ili oštećenja imovine [3], potrebno je unaprijediti postojeću razinu sigurnosti s obzirom na štetne posljedice razine sigurnosti kakva postoji danas. U ispunjavanju tog cilja prepoznat je doprinos inteligentnih transportnih sustava.

Uvriježeno se inteligentni transportni sustavi (ITS) definiraju kao holistička, upravljačka i informacijsko-komunikacijska (kibernetika) nadgradnja klasičnog prometnog sustava kojom se postiže poboljšanje performansi, odvijanje prometa, učinkovitiji transport putnika i robe, unaprjeđenje sigurnosti u prometu, povećana udobnost i zaštita putnika, manje onečišćenje okoliša i sl. Nadogradnjom klasičnog prometnog inženjerstva uvođenjem ITS-a želi se postići veća sigurnost, učinkovitost i pouzdanost prijevoza uz smanjeni utjecaj na okoliš i društvo u cjelini (smanjenje emisije štetnih plinova, onečišćenja, buke i slično). To se postiže primjenom informacijsko-komunikacijskih tehnologija, primjenom naprednih senzorskih i upravljačkih tehnologija. Suštinu ITS-a čine sustavna upravljačka i informacijsko-komunikacijska rješenja ugrađena u prometnu infrastrukturu, vozila, upravljačke centre i različite komunikacijsko-računalske terminale [4].

ITS obuhvaća široko područje informacija zasnovanih na bežičnim komunikacijama, kontroli i elektroničkim tehnologijama. Kad su uklopljene u infrastrukturu sustava prometovanja i u sama vozila, te tehnologije pomažu u kontroli i upravljanju prometnih tokova, smanjenju zakrčenosti prometovanja, pronalaženju alternativnih putova za putnike, unaprjeđenju proizvodnosti, te čuvanju ljudskih života, okoliša, vremena i novca [5].

ITS uključuje široki spektar tehnologija i primjena. Aplikacije ITS-a mogu se grupirati u 5 glavnih kategorija [6]:

1. Napredni sustavi putnih informacija, koji daju vozačima stvarnovremenske podatke, poput tranzitnih ruta i planova, navigacijskih uputa, informacija o zastojevima uzrokovanih zagušenjima, prometnim nesrećama, vremenskim uvjetima ili radovima na kolniku;
2. Napredni sustavi upravljanja prometom, koji se odnose na upravljanje prometnim tokovima u mreži prometnica u gradovima i izvan njih, a uključuju centre za upravljanje prometom, upravljačke uređaje poput prometnih svjetala, sustava

upravljanja priljevnim tokovima (kontrola pristupa na autocestu), promjenjivih znakova s obavijestima vozačima – promjenjivi prometni znakovi, sustava kontrole brzine, sustava upravljanja parkiranjem i slično;

3. Sustavi koji omogućuju naplatu temeljem ITS-a, a koji uključuju sustave poput elektroničke naplate cestarine, naplate zagušenja, sustave naplate temeljem prijeđene udaljenosti i slično;
4. Napredni sustavi javnog prijevoza koji, primjerice, omogućavaju vlakovima i autobusima izvještavanje o lokaciji kako bi putnici mogli biti informirani u stvarnom vremenu (informacije o polasku i dolasku);
5. Potpuno integrirani inteligentni transportni sustavi poput integracije vozilo-infrastruktura VII (*vehicle-to-infrastructure*) i vozilo-vozilo V2V (*vehicle-to-vehicle*), koji omogućuju komunikaciju između elemenata prometnog sustava (primjerice komunikacija vozila sa senzorima postavljenima na cesti, s prometnim svjetlima, s drugim vozilima i slično).

U sklopu naprednih sustava upravljanja prometom postoje operativni prometni centri (*TOC – Traffic Operation Center*) koji predstavljaju središte upravljanja prometom i koji se koriste informacijskim tehnologijama za povezivanje senzora i opreme na cesti, sonde na vozilima, kamera, znakova s porukama i drugih uređaja u integrirani sustav praćenja prometnog toka, kako bi se detektirale potencijalne i nastale incidentne situacije, opasni vremenski uvjeti i slično. Na temelju detektiranih situacija, na temelju stvarnovremenskih informacija omogućuje se donošenje odluka o upravljanju prometom na danoj lokaciji. Time se postiže pozitivan utjecaj primjene ITS-a na sigurnost prometa.

Značaj ITS-a prepoznala je i Europska unija Direktivom 2010/40/EC [7]. Direktiva, među ostalima, aplikacije ITS-a u području cestovne sigurnosti i zaštite, te povezivanje vozila s prometnom infrastrukturom, ubraja u prioritetna područja za razvoj. Međutim, uvođenje ITS usluga i dalje je fragmentirano i neusklađeno i ne može osigurati zemljopisni kontinuitet usluga ITS-a u cijeloj Uniji i na njenim vanjskim granicama [8].

Između tri čimbenika koji utječu na prometne nesreće – čovjeka, vozila i prometnice, najznačajniji su čimbenik ljudi [9]. U zatvorenom sustavu čovjek-vozilo-prometnica, vozači su najvažniji procesor informacija i donositelj odluka u sustavu. Vozači manipuliraju kretanjem vozila neprestanim prikupljanjem i obradom informacija da bi donijeli odluke u skladu sa svojim osjećajima, znanjem i iskustvom. Međutim, psihološka i fizička ograničenja i razlike izazivaju mnoge greške te su upravo vozači slaba karika u ovom zatvorenom sustavu.

Praksa u sustavu cestovne sigurnosti prepoznaje ove slabosti i pokušava dizajnirati i upravljati sustavom na način da se minimiziraju rizici i posljedice ljudskih pogreški. Stoga se poduzimaju brojne mjere za unaprijeđenje cestovne sigurnosti. Da bi se to postiglo, potrebno je vozača informirati o postojanju opasnosti dovoljno rano te poduzeti preventivne mjere unaprijed. Potrebno je unaprijediti mogućnost detekcije rizika, smanjenje ozljeda i učinkovitost žurnih službi nakon nastanka incidenata. ITS je stvoren upravo u tu svrhu, budući da on može integrirati ljude, vozila i prometnice u zatvoreni, stabilni sustav kroz uvođenje opreme za prikupljanje dodatnih informacija te komunikacijske opreme u vozilo i na prometnicu.

ITS tehnologija često odaje dojam visoko-tehnološkog sustava s visokim troškovima i poteškoćama u održavanju. Međutim, u praksi, mnoga relativno jednostavna i relativno nisko-troškovna oprema ITS-a može postići dobre rezultate u povećanju cestovne sigurnosti [9]. Primjer za to je uporaba svjetlosnog sustava upozoravanja vozača na opasnost, uporaba promjenjivih prometnih znakova, uporaba dinamičkog GPS sustava za nadzor vozila i slično.

Mogućnosti ITS-a u poboljšanju sigurnosti u prometu mogu se sagledavati kroz tehnološke cjeline. Osnovne, ključne cjeline, mogu se svrstati u tri skupine [4, 10]:

1. Sustavi vezani uz infrastrukturu (ceste, mostovi, tuneli),
2. Sustavi vezani uz vozila,
3. Sustavi zasnovani na kooperaciji.

Sustavi vezani uz infrastrukturu se prvenstveno sastoje od senzora na prometnicama koji prikupljaju informacije te opreme na cesti koja prikazuje upozorenja i savjete [11]. Prednost ovakvih sustava je detekcija pojava koje senzori u vozilima ne mogu detektirati, poput vremenskih uvjeta, prepreka i događaja u prometu na određenoj udaljenosti. Tipični primjeri su komunikacije između kontrolnih centara i informacijski sustavi obavijesti vozačima [12]. Ovi sustavi mogu upravljati prometnim tokovima, kao i preusmjeravati promet. Promjenjivi podaci mogu biti prikazani na prometnim znakovima, a informacije su dostupne svima u blizini na koje utječe neka prometna situacija. Dakle, putnicima se ovakvi sustavi prikazuju putem vizualnog sučelja. Problem sa sustavima vezanima uz infrastrukturu je taj što podaci moraju biti standardizirani kako bi unaprijedili razumijevanje vozača za pruženu informaciju.

Sustavi vezani uz infrastrukturu su [13]:

- Sustavi upravljanja prometom na autocestama (promjenjivi prometni znakovi, ramp metering),
- Detekcija incidenata u prometu,
- Sustavi za potporu provedbe zakona (mjerjenje brzine i video zapis nedozvoljenih radnji),
- Napredni postupci upravljanja prometom na raskrižjima,
- Napredni sustavi upozorenja,
- Sustavi na pružnim prijelazima,
- Cestovni meteo sustavi.

Sigurnosne tehnologije unutar vozila (**sustavi vezani uz vozila**) primarno uključuju senzore u vozilu koji prikupljaju podatke, te jedinice unutar vozila (*OBU – On Board Unit*) koje izdaju upozorenja ili preuzimaju djelomičnu kontrolu nad vozilom. Prednost ovakvih sustava je što mogu upozoravati vozača na potencijalne opasnosti ili preuzeti, do određene razine, vozačevu kontrolu nad vozilom u pokušaju sprječavanja sudara. Ove prednosti su dostupne samo vozilima opremljenima s ovakvom opremom. Neki neriješeni problemi tiču se javljanja potrebe za osiguravanjem pouzdanosti i uspostave standarda sustava za sprječavanje zbunjivanja vozača te potencijalnih opasnosti zbog varijacija u komercijalno dostupnim OBU-ima. Nadalje, važno je osvijestiti vozače do koje granice je sustav u mogućnosti smanjiti opasnost kako bi se smanjila pretjerana oslonjenost na OBU. U posljednje vrijeme značajni rezultati su postignuti u opremanju vozila ovakvim sustavima. Njihova temeljna podjela je na autonomne sustave i sustave namijenjene savjetu vozača. Najpoznatiji među njima su [12, 14]:

- ABS – Anti Blocking System (regulacija sile kočenja),
- ASS – Aktivni sustavi stabilizacije,
- AYC – Aktivni sustavi za kontrolu zanošenja vozila,
- LDWS – Sustav upozorenja napuštanja cestovne trake,
- ACS – Sustav kontrole brzine i držanja odstojanja,
- APS – Automatski parking sustav,
- BLIS – Poboljšanje stražnje preglednosti,
- Sustavi upozoravanja na opasnost od sudara
- Inteligentno upravljanje zračnim jastucima
- Adaptivno upravljanje krstarenjem vozila (Adaptive Cruise Control) i dr.

Sustavi zasnovani na kooperaciji [11] koriste i sustave zasnovane na infrastrukturi i na vozilima s komunikacijskim poveznicama između njih. Prednost ovih sustava je što se informacije primaju s infrastrukture (npr. ograničenje brzine, stanje prometa i kolnika) te se dinamički dostavljaju pojedinačnim vozilima. Informacije se, također, mogu slati i u suprotnom smjeru, tj. od vozila prema infrastrukturi, primjerice kako bi se automatski obavijestile žurne službe pri nastanku sudara. Ove usluge mogu se pružati samo vozilima opremljenima OBU-ima. Digitalne mape i tehnologije određivanja točne lokacije također se smatraju dijelom kooperativne tehnologije, budući da se informacije vezane uz sigurnost mogu kombinirati s kartama spremljenima u opremu ugrađenu u vozila. Problemi ovih sustava su potreba za održavanjem ravnoteže između sigurnosti, pouzdanosti i troškova sustava te standardizacija sučelja čovjek-uređaj (*HMI – Human-machine Interface*).

Danas se najznačajnija istraživanja rade u području kooperativnog upravljanja vozila i njegovog okruženja (druga vozila, cestovna infrastruktura, centri vođenja prometa, križanja i dr.). U tom smislu danas su već vrlo izgrađeni i djelomično normirani standardi za pojedine oblike komunikacije (V2V – vozila s vozilom, V2R – vozilo s cestom).

Danas djelotvorni sustavi u ovom području su [13, 14]:

- Navigacijski sustavi i sustavi putnog informiranja,
- Sustavi uzbuđivanja žurnih službi
- Upravljanje vozilima žurnih službi,
- Inteligentni sustavi upravljanja brzinama,
- Sustavi potpore komercijalnim vozilima i dr.

Sustav upravljanja prometom na autocestama važan je dio tehnološke cjeline ITS-a pod nazivom sustavi vezani uz infrastrukturu. U Republici Hrvatskoj i nekim drugim članicama EU već su se počele uvoditi aplikacije tih tehnologija u sektoru cestovnog prometa, posebice na autocestama. Za razvoj i uvođenje ITS-a u Republici Hrvatskoj od posebnog je značenja bio upravo program izgradnje autocesta. Hrvatske autoceste smatraju se jednim od najmodernijih i najsigurnijih u Europi [15], što je posljedica i primijenjenih ITS tehnologija, posebno u dijelu upravljanja prometom te sustavima upravljanja incidentima u tunelima. Autoceste su opremljene suvremenim informacijsko-komunikacijskim sustavima za razmjenu informacija koje mogu biti podatkovne, govorne i slikovne. U Centrima za održavanje i kontrolu prometa ugrađeni su sustavi za središnje upravljanje prometom koji se sastoje od nekoliko podsustava poput prometne centrale, prometne radne stanice, informacijskog sustava vremenskih uvjeta na prometnicama, podsustava za video nadzor i sl. U slučaju da postoje i tuneli na nadziranoj dionici, dodaju se i podsustav za daljinsko upravljanje i kontrolu energetske postrojenja, podsustav upravljanja ventilacijom te nadzor i upravljanje ostalih sustava koji se ugrađuju u tunel. Najveća korist od uvođenja ITS-a na autocestama je prvenstveno u povećanju stupnja sigurnosti kroz sustav upravljanja sigurnošću prometa na autocestama.

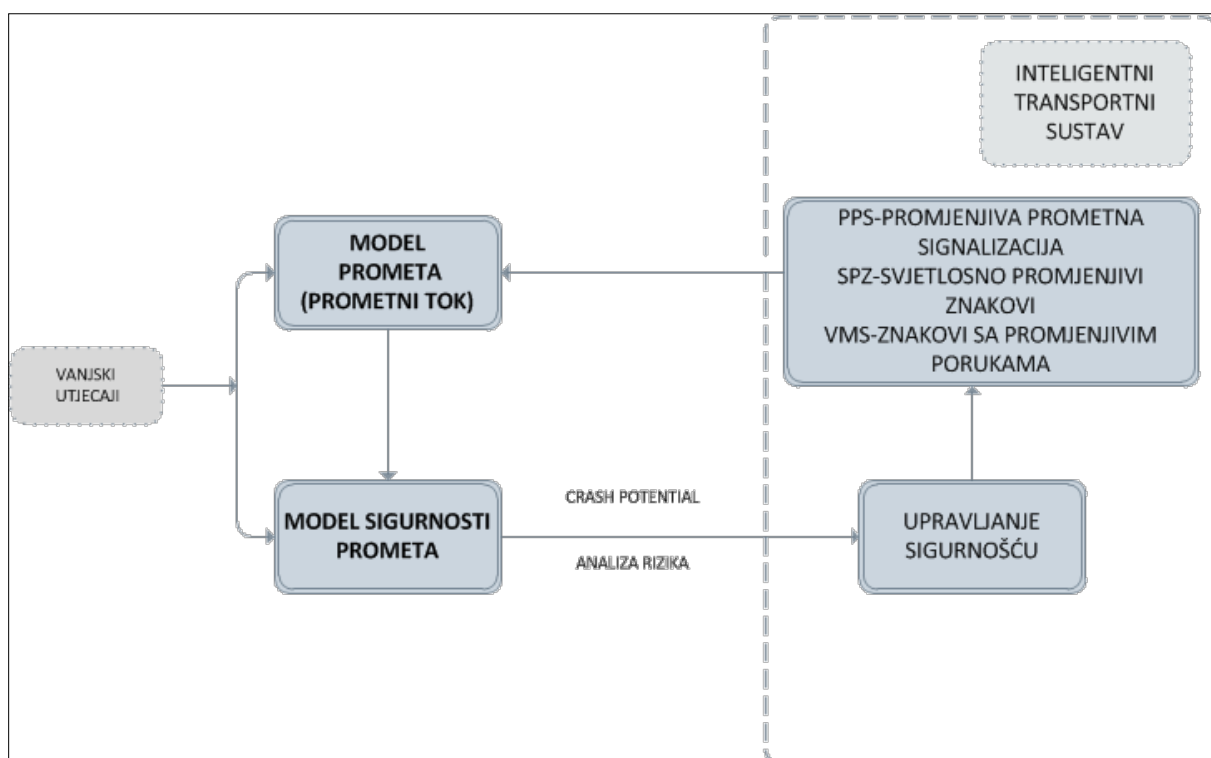
Prema nekim autorima [8] pojam i sama definicija „Upravljanje sigurnošću prometa na autocestama“ predstavlja daljnju nadogradnju prometnog sustava u prometnoj znanosti, osobito u cestovnom prometu. Nužan je čimbenik u povećanju sigurnosti odvijanja prometa na autocestama, kao i smanjenja troškova saniranja posljedica prometnih nesreća. Sustav upravljanja sigurnošću predstavlja interdisciplinarni i sveobuhvatni model smanjenja rizika od nastanka prometnih nesreća.

Sustavi upravljanja prometom na autocestama upravljaju prometnim tokovima duž autoceste koristeći tehnologije prometnih detektora, prometnih signala i drugih sredstava informiranja putnika. Ovi sustavi koriste informacije prikupljene s nadzornih uređaja da bi harmonizirali prometni tok duž autoceste te šire važne informacije o uvjetima putovanja tehnologijama dinamičkih promjenjivih znakova s porukama vozačima i slično.

Ovi sustavi uključuju sljedeće [12]:

- Nadzor prometa korištenjem detektora i video-opreme
- Mjere upravljanja prometom na ulaznim rampama korištenjem senzora i podataka za optimizaciju brzine putovanja na autocesti i vremena čekanja na rampama
- Upravljanje prometnim trakovima za optimizaciju efektivnog kapaciteta autocesta i promoviranje korištenja visokih zauzeća vozila
- Sustave upravljanja posebnim događajima za kontrolu utjecaja zagušenja na sportskim igralištima ili kongresnim centrima
- Upravljanje dinamičkim znakovima s porukama vozačima (promjenjivi prometni znakovi)

Shematski se sustav upravljanja sigurnošću može prikazati slikom 1.



Slika 1. Shematski prikaz upravljanja sigurnošću, [8]

2.3. pristupi upravljanja sigurnošću prometa na autocestama

Upravljanje sigurnošću prometa na autocestama podrazumijeva djelovanje na prometni tok temeljem podataka o njemu, kako bi se utjecalo na smanjenje opasnosti od nastanka prometnih nesreća i drugih incidentnih situacija. Naglašena je potreba definiranja mjerljivosti rizika u cestovnom prometu kao preduvjet za ocjenu stanja sigurnosti i na osnovu toga pronalaženje primjerenih preventivnih mjera za povećanje razine sigurnosti odvijanja prometa na autocestama [16].

Zbog velikih brzina koje postižu vozila, prometne nesreće na autocestama imaju posebno velike posljedice. Od samih početaka nastoji se te prometne nesreće smanjiti na najnižu moguću razinu pri čemu su se koristili različiti pristupi [17]. Jedan od prvih takvih bio je pasivni pristup. Taj se pristup zasniva na klasičnom ograničenju brzine statičnim prometnim znakovima i zakonskoj prisili poštovanja istoga. Zakonska se prisila (*law enforcement*), pritom, postiže policijskim nadzorom dionice autoceste ili postavljanjem kamera za bilježenje brzina vozila, pretjecanja i registarskih oznaka vozila.

Aktivni pristup obuhvaća prikupljanje stvarnovremenskih podataka o prometnom toku i inteligentno odlučivanje na temelju prikupljenih i obrađenih podataka. Donesenim odlukama nastoji se preventivno djelovati na prometni tok kako bi se smanjio rizik od nastanka prometne nesreće.

Dobar primjer aktivnog pristupa jest sustav promjenjivih ograničenja brzine (*Variable Speed Limit Control - VSLC*) koji se posljednjih desetljeća ubrzano razvija i ugrađuje na autoceste diljem svijeta.

3. Primjena sustava promjenjivog ograničenja brzine

U svijetu se posljednjih nekoliko desetljeća intenzivno radi na unaprjeđenju sustava promjenjive prometne signalizacije. Veliki potencijal za povećanje sigurnosti cestovnog prometa prepoznat je u sustavu upravljanja promjenjivim ograničenjem brzine (*Variable Speed Limit Control* - *VSLC*). Istraživanja [18] su pokazala da najveći rizik od nastanka prometnih nesreća na autocestama postoji u situaciji kada su velike razlike u brzinama pojedinih vozila i razlike brzina u pojedinim prometnim trakovima.

VSLC je primarno dizajniran u svrhu smanjenja razlike u brzinama na opasnim dionicama autocesta čime se postiže harmonizacija prometnog toka, što, pak, za posljedicu ima smanjenje naleta na prednje vozilo i smanjenje broja pretjecanja, čime se izravno utječe na podizanje razine sigurnosti autoceste. VSLC se već koristi za smanjenje vjerojatnosti nastanka uskih grla, budući da omogućava blagu tranziciju između gornjih i donjih dijelova prometnog toka pri čemu se sprječava nastanak fenomena šok-valova¹ i utječe na povećanje protočnosti autoceste [19, 20]. VSLC sustav omogućuje dinamičku promjenu postavljenog ograničenja brzine ovisno o uvjetima prometnog toka, uvjeta na prometnicama i vremenskim uvjetima (nepovoljne vremenske prilike poput magle, jakog vjetra ili snježnih nanosa) [21]. Podatke o vremenu VSLC sustav zaprima putem senzora, a podatke o stanju prometnog toka (protok, brzina i gustoća prometnog toka) najčešće putem detektora induktivne petlje (*Inductive Loop Detectors*) ili nadzornih kamera [22].

Prema istraživanjima u Nizozemskoj [23] VSLC sustav omogućuje smanjenje varijacije u brzinama, utječe na smanjenje srednje brzine te smanjuje učestalost pojave šok-valova. Zaključeno je da navedeni utjecaj na homogenizaciju prometnog toka može podignuti razinu sigurnosti na autocestama.

¹ Fenomen šok-vala nastaje pri skokovitim promjenama osnovnih parametara prometnog toka. Uglavnom se kreće duž prometnice u smjeru suprotnom od smjera prometnog toka.

VSLC sustav se sastoji od promjenjivih znakova (PPZ) raspoređenih na autocestama i povezanih komunikacijskim sustavom u centar za upravljanje prometom [24]. PPZ imaju prednost u primjeni nad statičkim prometnim znakovima jer vozači bolje uočavaju ovakvu vrstu prometne signalizacije. Međutim, žalosti činjenica da vozači nedovoljno poštuju ovakve znakove. Na navedenim promjenjivim znakovima prikazuje se ograničenje brzine ili preporučena brzina, omogućavajući upraviteljima sustava na autocesti dinamičku promjenu brzine ispisane na promjenjivom znaku ovisno o prevladavajućim uvjetima prometnog toka i vremenskim prilikama [25].

Ograničenja brzine se najčešće postavljaju iznad prometnih trakova. To omogućuje povećanu uočljivost PPZ-a u odnosu na statične prometne znakove koji se nalaze uz rub kolnika. Kada nema potrebe za ograničenjem brzine, promjenjivi znakovi prikazuju uobičajeno ograničenje brzine ili preporučenu brzinu da bi podsjetili vozače na održavanje sigurne putne brzine [26].

3.1. pristupi i metode razvoja VSLC-a

U svjetlu rastuće potražnje za daljnjom primjenom VSLC-a, važno je osigurati da su ovi sustavi dovoljno robusni za ostvarenje zahtijevanih rezultata i da bi ostvarili ciljeve svoje primjene. Stupanj uspjeha VSLC-a uvelike ovisi o temeljnim pristupima i metodama korištenima u njegovoj algoritamskoj logici.

Metodologija za određivanje prikladnog ograničenja brzine u različitim uvjetima nije jednostavna i ne postoji jedan „pravi“ odgovor na svaku situaciju. Potreban je kompromis između sigurnosti korisnika, vremena putovanja, propusne moći, praktičnosti primjene i drugih čimbenika važnih za vozače i upravitelje prometa.

3.1.1. Pristupi u razvoju VSLC-a

U svijetu se trenutno koristi nekoliko pristupa u primjeni VSLC-a, ovisno o željenom utjecaju VSLC-a na prometni tok. Ti pristupi [27] se ugrubo mogu podijeliti u sljedeće grupe:

- Pristupi usmjereni na učinke harmonizacije primjenom VSLC-a (homogenizacija znači stvaranje ravnomjernosti brzina i prometnog toka unutar prometnih trakova i između njih, te prema tome znači i smanjenje rizika od nastanka šok-valova, sudara i prometnog zagušenja);

- pristupi usmjereni na sprječavanje prometnih slomova (*traffic breakdowns*) smanjenjem prekomjernog prometnog toka primjenom ograničenja brzine

Homogenizacijskim pristupom namjerava se smanjiti razlika u brzini između vozila u prometnom toku, čime se može postići sigurniji i stabilniji protok. Ovaj pristup koristi ograničenja brzine koja su iznad kritične brzine (kritična brzina je brzina koja odgovara maksimalnom protoku ili kapacitetu) tako da se ne ograničava protok. Učinci homogenizacijskog pristupa su:

- blago smanjenje prosječne brzine i blagi porast gustoće;
- sigurniji i stabilniji prometni tok;
- ne dolazi do znatnijeg povećanja prometnog toka;
- u teoriji, može odgoditi nastanak zagušenja, ali ne može suzbiti nastanak šok-valova.

Pristup sprječavanja nastanka prometnih slomova orijentira se na sprječavanje nestabilnih uvjeta prometa. To se postiže postavljanjem ograničenja brzine koja su niža od kritične brzine, sa svrhom ograničavanja dotjecanja vozila u područja uskih grla. Sprječavajući nestabilne prometne uvjete može se postići veća propusna moć u odnosu na homogenizacijski pristup [27].

3.1.2. Metode za primjenu VSLC-a

Metode koje se koriste za primjenu VSLC-a mogu se svrstati u sljedeće kategorije: [27]

1. Teorijske metode temeljene na naprednim upravljačkim metodologijama;
2. Praktične metode temeljene na jednostavnoj, na pravilima zasnovanoj heuristici;
3. Znanstveno utemeljene metode zasnovane na tehnikama umjetne inteligencije poput fuzzy² logike i ekspertnih sustava.

Teorijske metode obično se temelje na makroskopskim modelima prometnog toka na dionici ceste. Stanje prometa se procjenjuje na temelju podataka o brzini i propusnoj moći prikupljenih s relevantnih mjesta. Na temelju podataka o stanju prometa na relevantnim mjestima i koristeći model prometnog toka, može se dizajnirati optimalna strategija za optimalno postavljanje signala.

Praktične metode obično se temelje na upravljačkoj logici gdje se promjena vrijednosti ograničenja brzine zasniva na prometnom toku, brzini ili gustoći. U nekim slučajevima prebacivanje između vrijednosti ograničenja brzine također se temelji na posebnim okolnostima, kao što su klimatski uvjeti, doba dana ili varijacija brzina.

Znanstveno utemeljene metode generiraju rješenje (odnosno upravljačku mjeru) za trenutnu situaciju u prometu koristeći mehanizme rasuđivanja. Trenutno se ove metode uglavnom koriste u drugim područjima upravljanja prometom, poput upravljanja priljevnim tokovima na autocestama (*ramp metering*), ali se također ozbiljno razmatra njihova primjena u VSLC sustavima, pogotovo tijekom radova na kolniku i nepovoljnih vremenskih uvjeta.

U svijetu se trenutno primjenjuju uglavnom metode za upravljanje VSLC-om temeljene na praktičnim metodama [27]. Međutim, ne postoji specifična praktična metoda koja je široko

² Fuzzy logika predstavlja uopćenje klasične logike i koristi približna umjesto točnih zaključivanja. U usporedbi s binarnom logikom gdje varijable mogu poprimiti vrijednosti „istina“ ili „laž“, varijable fuzzy logike mogu imati istinite vrijednosti koje se kreću u intervalu između 0 i 1. Fuzzy logika je razvijena za razrađivanje koncepta djelomične istine kada istinite vrijednosti mogu biti negdje između potpuno istinitih i potpuno lažnih vrijednosti.

prihvaćena i korištena u svijetu, nego je svaka dizajnirana kako bi se postigli određeni ciljevi.

Primarni ciljevi primjene VSLC-a su [27, 28, 29]:

- harmoniziran prometni tok;
- smanjenje vremena putovanja i povećanje pouzdanosti vremena putovanja;
- povećanje iskorištenosti prometnih trakova;
- smanjenje učestalosti stani-kreni vožnje;
- povećanje sigurnost;
- smanjenje stresa u vožnji.

Dakle, glavne prednosti primjene VSLC sustava su smanjenje razlike brzine između vozila u različitim trakama (primjena na autocestama pri većem prometnom opterećenju), te omogućavanje ujednačenog i stabilnog prometnog toka u svim prometnim trakovima, zbog čega se stvara uniforman i prihvatljiv interval slijeđenja vozila [30].

3.2. Poštivanje promjenjivog ograničenja brzine od strane vozača

Jasna je činjenica da učinkovitost same uporabe VSLC sustava znatno ovisi o stupnju poštivanja ovakve vrste dinamičkog ograničenja brzine od strane vozača. Dakako, na vozača se može utjecati različitim represivnim mjerama, ali taj faktor nije jedini. Na pristanak vozača na poštovanje promjenjivih ograničenja znatno utječe vrsta i stupanj ograničenja brzine [31] te vidljivost i tip prometnog znaka. Prema istraživanjima [32] vozači općenito voze brzo koliko to dozvoljava zakon, a pri tome malo pozornosti pridaju uvjetima na kolniku. Mnogi vozači ograničenje brzine smatraju preporučenom brzinom što dovodi do blagog povećanja prosječne brzine [33]. Potrebno je kod vozača postići uvjerenje da brzina propisana VSLC sustavom (prikazana na promjenjivim prometnim znakovima) nije samo prijedlog, nego i brzina iza koje stoji zakonska regulativa o obveznosti poštovanja jer vozači manje poštuju ograničenje brzine ako ono znatno odstupa od brzine koju bi inače odabrali.

Istraživanje [32] pokazuje da korištenje VSLC-a može znatno smanjiti srednju brzinu vozila, ali je moguće da VSLC nema pozitivan utjecaj na smanjenje varijacije brzina.³ Prema drugom istraživanju [34], uočeno je da korelacija manja kada je razlika između trenutne brzine i ograničenja brzine veća, što dovodi do zaključka da će vozači manje poštovati ograničenje brzine propisano VSLC-om ako ono znatno odstupa od brzine koju bi vozači inače odabrali.

Detaljnijim istraživanjem iz 2010. godine [35] došlo se do zaključaka da koristi od uvođenja VSLC-a rastu (iako ne linearno) kako razina poštovanja VSLC-a raste. Prema provedenoj simulaciji, povećanje stupnja poštovanja promjenjivog ograničenja brzine u svim scenarijima dovelo je do povećanja sigurnosti u prometu. Isto tako, stupanj poštovanja ograničenja brzine pomoću VSLC sustava imalo je i utjecaj na vrijeme putovanja. Kako je bilo i očekivano, s povećanjem stupnja poštovanja VSLC-a raslo je i vrijeme putovanja.

U Republici Hrvatskoj provedena je „Analiza poštivanja znakova ograničenja brzina na autocestama u Republici Hrvatskoj“ [36] u okviru Znanstveno-istraživačkog projekta 7. okvirnog programa EU komisije „Intelligent Cooperative Sensing for Improved Traffic Efficiency“ 2012-2013. Istraživanjem se nastojalo utvrditi u kojoj mjeri vozači na autocestama poštuju znakove ograničenja brzine. Rezultati su pokazali da vozači percipiraju i daju određenu važnost upozorenjima promjenjive prometne signalizacije te reagiraju

³ Rezultati ovog istraživanja nisu generalne prirode budući da je istraživanje izvršeno na dionici ceste I-90 Snoqualmie Pass, Washington, koja ima specifičnu geometriju, teren i vremenske prilike

smanjenjem brzine. Iako je smanjenje prosječne brzine u odnosu na brzinu ograničenu prometnim znakom malo, ipak je utvrđeno postojanje ovisnosti. Isto tako, pokazalo se da zbog postojanja vozača koji ne poštuju ograničenje brzine dolazi do povećanja raspršenosti brzina, te da se veliki dio njih ne pridržava ograničenja brzine.

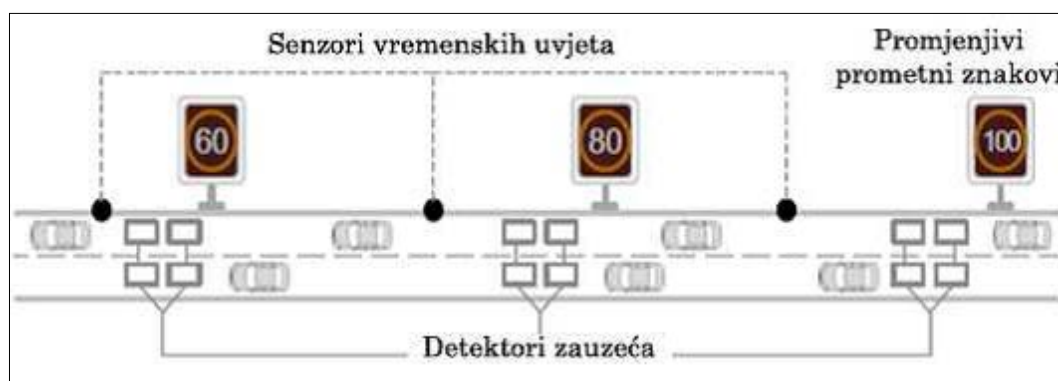
Ograničenja brzine na promjenjivim prometnim znakovima su obvezatna za vozače. Automatizirana provedba je uobičajena praksa i obično se provodi koristeći radarske tehnologije. Provedba se osigurava uporabom opreme, u prvom redu kamera. Kamere su montirane sa stražnje strane prometnog znaka na autocesti iznad svakog prometnog traka. Smještene su u sigurna, voodootporna kućišta. Detektori identificiraju vozila koja voze brzinom većom od prikazane na PPZ-u te kamera fotografira registracijsku tablicu vozila sa stražnje strane. Kamere, primjerice, u Velikoj Britaniji koriste bljeskalice za osvjetljenje pri fotografiranju [26]. Za vozače koji krše propisana ograničenja slijede kazne.

Naravno, ako u trenutku prolaska vozila ispod promjenjivog prometnog znaka dođe do promjene ograničenja brzine, ta vozila neće biti registrirana da su u prekršaju jer se može ostaviti određeno vrijeme za vozače da prilagode svoju brzinu novom ograničenju [37]. Mjere provedbe su ključne u osiguravanju poštivanja promjenjivih ograničenja brzine od strane vozača. Pri tome je bitno napomenuti da svrha cijelog sustava nije represija vozača, nego unaprjeđenje sigurnosti na autocesti.

Jedan od nedostataka promjenjivog ograničenja brzine je taj da se vozači naviknu oslanjati na PPZ za upozorenje o opasnostima. Zbog toga, kada ti znakovi nisu uključeni, vozači automatski pretpostavljaju da nema nikakvih problema. Drugim riječima, ako dođe do problema u radu PPZ-a, ne samo da vozači neće biti upozoreni na opasnost, nego će oni pretpostavljati da uopće nema opasnosti ispred njih. Tu je i pitanje odgovornosti budući da primjena promjenjivih prometnih znakova prebacuje veću odgovornost na inženjere i upravitelje prometom, a manju na vozače pri odabiru odgovarajuće brzine pri određenim uvjetima na kolniku.

3.3. Metode prikupljanja podataka i mehanizmi njihove obrade i prikaza

VSLC sustav obuhvaća stvarnovremensko prikupljanje podataka o stanju u prometu i o vremenskim prilikama, obradu podataka i zaslone za prikaz promjenjivog ograničenja brzine, koji su nužni za ispravnost funkcioniranja cijelog sustava. Nekoliko je metoda i tehnologija za prikupljanje i obradu podataka, te prikaz informacija. Osnovni princip rada cijelog sustava naznačen je na slici 2.



Slika 2. Osnovni princip rada VSLC sustava, [30]

3.3.1. Metode prikupljanja podataka

Prikupljanje stvarnovremenskih podataka je često dio šireg razvoja inteligentnih transportnih sustava. Najčešća metoda za prikupljanje stvarnovremenskih podataka je uporaba detektora induktivne petlje. Ti detektori su smješteni u sam kolnik i omogućavaju brojanje vozila, gustoće i brzine vozila. Ova metoda koristi se u nekim američkim državama, u Nizozemskoj (autocesta između Amsterdama i Utrechta), dijelu londonskog prstena M25, u Njemačkoj, Australiji i slično [26].

Druge metode obuhvaćaju korištenje radara (često korištena metoda u Francuskoj) i video nadzora (CCTV - Closed Circuit Television) koji se često koristi u Velikoj Britaniji. Da bi se unaprijedila točnost procjene prometnih podataka, često se kombiniraju ove tri metode. Primjerice, u Velikoj Britaniji se razmatra kombinacija video nadzora i detektora induktivne petlje, dok u Nizozemskoj ograničenje brzine određuje kombinacija podatka iz detektora induktivne petlje i automatske detekcije incidenata. VSLC sustav u Australiji kombinira podatke iz detektora induktivne petlje s podacima iz detektora vidljivosti. Tehnologija senzora vidljivosti se koristi uspješno u drugim sustavima poput onoga u Nizozemskoj koji potiče na

sigurniju vožnju tijekom maglovitog vremena. U tom sustavu, ako vidljivost padne ispod 140 m, ograničenje brzine se smanjuje sa 100 km/h na 80 km/h. Daljnje smanjenje vidljivosti na 70 m rezultira smanjenjem ograničenja brzine na 60 km/h.

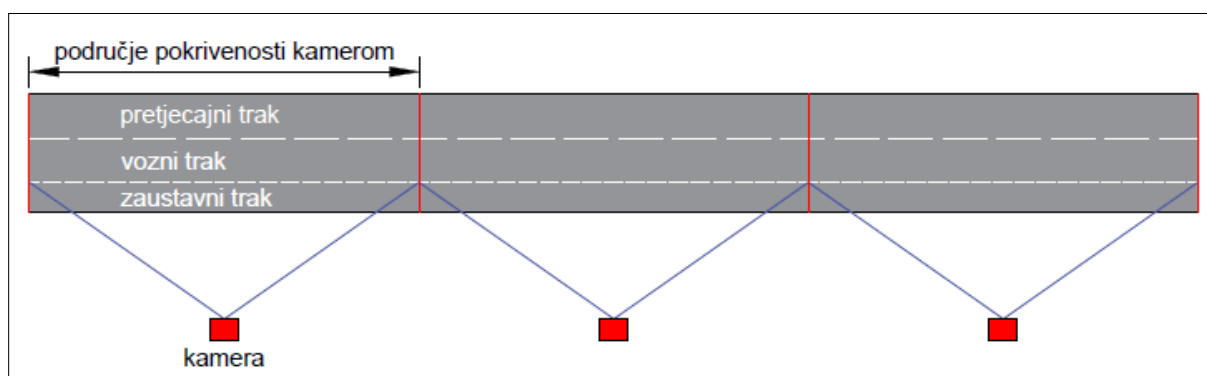
Osim podataka o prometu, prikupljaju se i podaci o vremenskim prilikama koje mogu negativno utjecati na odvijanje prometa. Ovakvi sustavi prikupljaju podatke poput brzine i smjera vjetrova, vidljivosti, relativne vlažnosti, intenziteta kiše i kumulativnoj količini oborina.

Također se nadziru podaci o stanju kolnika gdje senzori daju podatke o stanju površine kolnika (suh, mokar, sa snijegom, s poledicom, solju i sl.), a mogu se prikupljati i podaci o masi i kategoriji teških teretnih vozila [26] kako bi se procijenila sigurna brzina pri dužoj vožnji nizbrdicom.

S obzirom na važnost podataka, postoji nekoliko načina za prikupljanje je stvarnovremenskih podataka o prometnom toku:

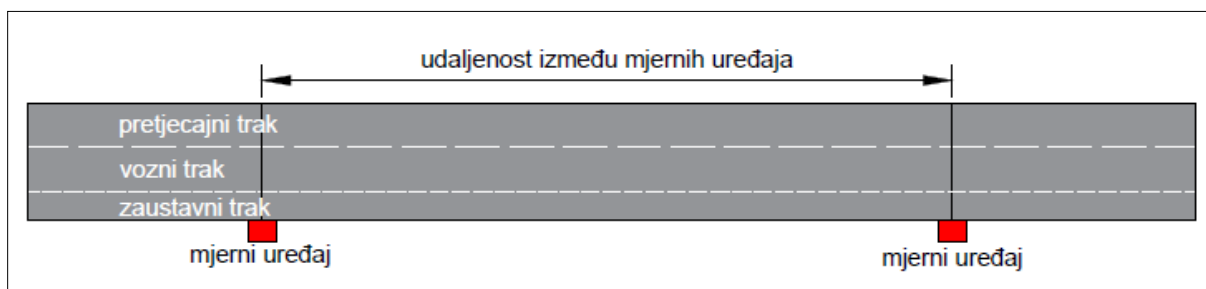
- Video nadzor
- Mjerenje prometa na dva presjeka
- Prethodna kalibracija dionice autoceste i mjerenja prometa na jednom presjeku

Najtočnije podatke daje video nadzor. Ova metoda daje precizne podatke o vozilima na određenoj dionici autoceste, njihovoj brzini, intervalu slijeđenja i slično. Međutim, očiti su nedostaci previsoki troškovi primjene ovakvog sustava jer zahtijeva velika ulaganja: veliki broj kamera da bi se pokrila određena duljina dionice autoceste; prilagođavanje mjesta za postavljanje nadzornih kamera, sustav obrade i pohrane podataka i slično. Načelni prikaz prikupljanja podataka o učestalosti pretjecanja video nadzorom nalazi se na slici 3.



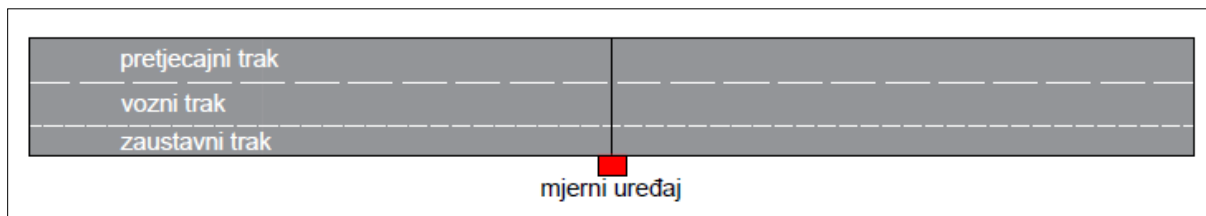
Slika 3. Skica mjerenja prometa na dionici autoceste video nadzorom, [38]

Za mjerenja prometa u praksi pogodna je metoda mjerenja prometa na dva presjeka autoceste koja ne zahtijeva velika ulaganja u nabavu opreme. Naravno, točnost ove metode nije potpuna kao kod video nadzora, ali može biti dovoljno točna, pa se mogu postići isti prihvatljivi rezultati upravljanja prometom kao i video nadzorom, samo uz niže troškove. Metoda se zasniva na postojanju dva mjerna uređaja koji se postavljaju na određenoj udaljenosti na autocesti. Uređaji mogu bilježiti duljine, brzine, klasu vozila, međusobni razmak, točno vrijeme detekcije vozila koje prolazi presjekom i slično. Skica načina mjerenja ovom metodom prikazana je na slici 4.



Slika 4. Skica mjerenja prometa na dva presjeka autoceste, [38]

Treća metoda (slika 5) mjeri promet na samo jednom presjeku autoceste. Naravno, točnost ove metode je lošija nego korištenjem mjerenja na dva presjeka, ali su i troškovi niži.



Slika 5. Skica mjerenja prometa na jednom presjeku autoceste, [38]

3.3.2. Mehanizmi obrade podataka

Razina sofisticiranosti vezana uz proračun ograničenja brzine znatno varira u različitim sustavima koji su danas u uporabi. Općenito, u centru za upravljanje prometom na računalu se izvodi algoritam za određivanje sigurne brzine ovisno o podacima o prometnom toku, vremenskim prilikama i stanju kolnika. Brzine se najčešće smanjuju za 20 km/h, dok, primjerice, u SAD-u za 5 ili 10 mph [26]. U Nizozemskoj se brzina navedena na promjenjivom prometnom znaku određuje iz algoritma nadzornog sustava, na temelju

jednominutnoga prosjeka brzine i prometnog opterećenja na svim prometnim trakovima. U Nevadi su ograničenja brzine zasnovana na korištenju logike 85-percentilne brzine, vidljivosti i stanju na kolniku. U Australiji je savjetodavna brzina izračunata na temelju podataka o vidljivosti i brzini vozila koja prethode. U Velikoj Britaniji brzinska ograničenja se mijenjaju ovisno o detektiranom prometnom opterećenju.

Prvi pokušaju razvoja fuzzy upravljačkog algoritma izveden je u Arizoni. Fuzzy logika promatra svaku varijablu kao postupno promjenjivu ljestvicu nasuprot uobičajene „da – ne“ odluke. Ova logika se poklapa s procesom donošenja odluka kod ljudi. Algoritam je izgrađivan pomoću različitih vremenskih podataka i podataka o brzini vozila na dionici autoceste.

3.3.3. Prikaz dinamičkog ograničenja brzine

Nakon obrade podataka i izračunatog ograničenja brzine, novo ograničenje brzine prikazuje se na promjenjivom prometnom znaku (PPZ-u). Neki sustavi pružaju mogućnost ručnog upravljanja. Takva osobina pruža dodatnu fleksibilnost za vrijeme izvedbe građevinskih radova ili zatvaranja trakova u nekim situacijama, te u slučaju kvara sustava.

Poruke o ograničenju brzine prikazuju se na promjenjivim prometnim znakovima prilazećim vozilima znatno ispred kolone vozila ili smetnji i neprilika na kolniku. Učestalost znakova s promjenjivim ograničenjem brzine varira, od dva po kilometru (Finska) do jednog PPZ-a postavljenih svaka dva kilometra (New Jersey, Washington, Njemačka). Najčešće su primjene s razmakom znakova na svakih jedan kilometar (Australija, Nizozemska, Velika Britanija) [26].

Tipični znakovi promjenjivih ograničenja brzine u Europi koriste tehnologiju optičkih vlakana sa svjetlećim diodama (LED). Ograničenje brzine se sastoji od crvenog kruga s bijelim brojem unutar njega. U Nizozemskoj je ograničenje brzine obavezno ako se nalazi unutar crvenog kruga, a savjetodavno ako je bez kruga. U Velikoj Britaniji trepćuća svjetla upozorenja se nalaze na gornjim kutovima znaka i aktiviraju se kada dođe do smanjenja ograničene brzine.

Ograničenja brzine se najčešće postavljaju iznad prometnih trakova. To omogućuje povećanu uočljivost PPZ-a u odnosu na statične prometne znakove koji se nalaze uz rub kolnika. Kada

nema potrebe za ograničenjem brzine, promjenjivi znakovi prikazuju uobičajeno ograničenje brzine ili preporučenu brzinu da bi posjetili vozače na održavanje sigurne putne brzine. [26]

U Republici Hrvatskoj, prema Pravilniku o prometnim znakovima, signalizaciji i opremi na cestama [39] promjenjivi prometni znakovi prema izvedbi mogu biti kontinuirani i nekontinuirani. Kontinuirani su znakovi oni znakovi koji su izgledom jednaki stalnim prometnim znakovima, a jedina je razlika da uporabom elektromehaničkih sredstava mogu prikazivati različite poruke. Nekontinuirani znakovi su oni znakovi kod kojih je moguća inverzija boja i pojednostavljen prikaz simbola u odnosu na stalne prometne znakove. Ti znakovi oblikuju poruke uporabom pojedinačnih elemenata koji mogu biti u jednome od dva stanja (ili više), čime mogu oblikovati različite poruke na istoj prednjoj površini znaka.

Nekontinuirani znakovi mogu se izvesti u tehnologiji:

- Optičkih vlakana (fiber – optics);
- Svjetlosnih polja, dodanih na obične znakove;
- Svjetlećih dioda (LED);
- Tekućih kristala (LCD).

Kad se svjetlosni prometni znakovi izvide u tehnologiji optičkih vlakana (fiber-optics), svjetlosnih polja, svjetlećih dioda (LED) i tekućih kristala (LCD) moraju zadovoljiti određene uvjete:

- značenje simbola mora biti jasno s udaljenosti najmanje 150 m;
- simbol mora biti u cijelosti čitljiv na udaljenosti manjoj od 150 m;
- svjetlosni intenzitet svjetlosnoga prometnog znaka mora se prilagoditi svjetlosnim uvjetima okoliša i mora biti omogućen noćni model rada.



Slika 6. Primjer promjenjive prometne signalizacije na autocesti, [40]

3.4. Oblikovanje upravljačkih algoritama za VSLC sustav

Oblikovanje upravljačkog algoritma sustava promjenjivih ograničenja brzine ovisi o definiranom cilju samog sustava. Obično su ciljevi algoritma povezani s povećanjem sigurnosti i učinkovitosti. U posljednje vrijeme pozornost se posvećuje i cilju smanjenja utjecaja na okoliš te se i taj čimbenik uračunava u algoritam. Cilj, dakako, može biti i kombinacija dvaju ili više navedenih ciljeva, ali ciljevi nekad mogu biti i kontradiktorni. Primjerice, ako je glavni cilj VSLC-a sigurnost, promjenjivi prometni znakovi će vjerojatno prikazivati znatnije ograničenje brzine, a smanjenje brzine će utjecati na produljenje vremena putovanja i na veće emisije štetnih plinova. Ako je, pak, učinkovitost glavni cilj, tada može doći do smanjenja sigurnosti.

Međutim, mnoge studije [18, 41] su pokazale da harmonizacija prometnog toka vodi ka boljim uvjetima u prometu, a to pozitivno utječe i na vrijeme putovanja, i na razine emisije te na sigurnost.

Dosad razvijeni algoritmi mogu se podijeliti na prediktivne (predviđajuće) i reaktivne [26]. Prediktivni algoritmi se često odnose na prediktivni model upravljanja. U ovom modelu buduće stanje prometa se predviđa na temelju dinamičkog procesnog modela, tj. evolucije prometnog toka, povijesti prethodnih upravljačkih radnji i funkcije optimizacije troškova. Na temelju izračuna, brzina proračunata na ovaj način se prikazuje na promjenjivim prometnim znakovima.

Reaktivni algoritmi izračunavaju ograničenje brzine prikazano na promjenjivim prometnim znakovima bez primjene modela za predviđanje budućih stanja prometa. Izračun se temelji jedino na podacima dobivenima iz detektora i graničnih vrijednosti. [29]

U stvarnim uvjetima, poželjan je brzi algoritam koji će gotovo istovremeno pokazivati ograničenje brzine nakon prikupljenih podataka. Izračuni moraju biti veoma brzi, a parametri i dizajn algoritma trebaju biti jednostavni za interpretaciju (što često nije slučaj s prediktivnim modelima).

3.5. Primjena stvarnovremenskih podataka o prometnom toku

Analiza nastanka prometnih nesreća na autocestama već dulje vremena je predmet istraživanja. Budući da su autoceste zatvoreni sustav s kontroliranim uvjetima vožnje, na karakteristike prometnog toka je moguće utjecati. Za definiranje karakteristika prometnog toka korišteni su podaci o prosječnom godišnjem dnevnom prometu (PGDP) i prosječnom ljetnom dnevnom prometu (PLDP) ili satnom opterećenju. Međutim, budući da se radi o statističkim podacima, nije bilo moguće povezati stvarnovremenske uvjete na autocesti s nastankom prometnih nesreća i razviti metode sprječavanja prometnih nesreća. Razvojem tehnologije i primjenom ITS-a na prometnicama, omogućeno je prikupljanje podataka o prometnom toku u stvarnom vremenu pomoću induktivnih petlji i sličnih senzora. To je pružilo temelj za mnogostruka istraživanja u području primjene stvarnovremenskih podataka o prometnom toku i njihovog povezivanja s nastankom prometnih nesreća [8].

Neka od tih istraživanja [42, 43] zaključila su kako promjene prometnog toka tijekom dana imaju znatno veću važnost u analizi sigurnosti prometnog toka od statističkih podataka o prometnom toku, a promjena (devijacija) brzina je najbolji indikator mogućnosti nastanka prometne nesreće. Daljnja istraživanja su se uglavnom usmjeravala na te mjerljive podatke kako bi se izbjegli teško mjerljivi čimbenici koji utječu na prometni tok, poput ponašanja vozača, režima vožnje, karakteristika vožnje i slično [8].

Prepoznat je i potencijal sustava promjenjivih ograničenja brzine u sprječavanju nastanka prometnih nesreća na autocestama. Njime je u stvarnom vremenu moguće djelovati na harmonizaciju prometnog toka i izbjeći porast čimbenika koji dovode do nastanka nesreće, odnosno smanjiti vjerojatnost nastanka sudara. Ovaj sustav na temelju prikupljenih i obrađenih podataka vozače obavještava o ograničenju brzine, a ograničenje ostaje na snazi do trenutka kada se vjerojatnost nastanka sudara (prometne nesreće) spusti ispod određenog praga vrijednosti. Ova mjera vjerojatnosti nastanka sudara naziva se sudarni potencijal. Negdje se sudarni potencijal definira i korištenjem teorije rizika. Sudarni potencijal se izračunava za dane uvjete prometnog toka, stanje prometnice i meteorološke uvjete [44].

3.6. Sudarni potencijal

Za analizu sudara na autocestama dosad su korišteni statistički modeli. Ovi modeli pretpostavljaju da je broj sudara, ili stopa sudara, linearna funkcija nekoliko prometnih čimbenika, poput prometnog toka, vremena, geometrije ceste, uvjeta vožnje i slično. Prema tome, ovi modeli koriste linearnu regresiju za kalibriranje ovih ovisnosti. Međutim, linearna regresija pretpostavlja da je broj sudara normalno distribuiran, a to nije realno jer ne objašnjava slučajne i diskretne događaje na autocestama, te se ne može smatrati da je ovisnost linearna. Da bi se ove nerealne pretpostavke otklonile, razvijen je Poissonov regresijski model koji pretpostavlja da su sudari distribuirani po Poissonovoj raspodjeli s određenom očekivanom vrijednošću, a nastanci sudara su neovisni jedni o drugima.

U multiplikativnim modelima čimbenici su pretvoreni u logaritamske pojmove i ovisnost je izražena linearnom funkcijom nezavisnih varijabli. Ovaj tip modela se naziva i „**log-linearni**“ model [44].

Budući da su ovi modeli koristili statičke podatke o prometnom toku, poput prosječnog godišnjeg dnevnog prometa (PGDP), nisu se mogle analizirati kratkotrajne varijacije prometnog toka u svakodnevnom prometu. U tom smislu oni nisu bili prigodni za stvarnovremensko upravljanje sigurnošću na autocestama. Zbog toga je potaknuta uporaba stvarnovremenskih podataka o prometnom toku u analizi sudara. Ti stvarnovremenski podaci su učinkovito iskorišteni za kontrolu prometnog toka i smanjenje sudarnog potencijala. Podaci su obično dobiveni iz detektora induktivne petlje, koji ih prikupljaju u relativno kratkim vremenskim intervalima. Tako su istraživanja [42, 43] pokazala da su promjene u prometnom toku važnije od statičkih podataka, a varijacija brzina vozila je određena kao veoma važan čimbenik koji utječe na nastanak sudara. Također je zaključeno da su promjene u brzini najbolji pokazatelj prekida prometnog toka, uzrokovanog prometnim nesrećama, koji se može iskoristiti. Varijacija brzina se treba smanjiti da bi se potaknuo stabilan prometni tok [44].

Prema studiji [44] učestalost sudara je izražena kao funkcija nekoliko čimbenika prometa. Predloženi model predviđanja ima sljedeći općeniti oblik:

$$Učestalost\ sudara = f(var.\ brzina, gustoća, geom. kolnika, vrem. prilike, doba dana)$$

Prema razvijenom modelu [18], predviđanje vjerojatnosti nastanka prometne nesreće može se prikazati jednadžbom:

$$\ln(F) = \theta + \lambda_{CVS(i)} + \lambda_{Q(j)} + \lambda_{COVV(k)} + \lambda_{R(l)} + \lambda_{P(m)} + \beta \ln(EXP) \quad (1)$$

gdje je:

F – očekivani broj nesreća tijekom promatranog razdoblja

θ – konstanta

$\lambda_{CVS(i)}$ – koeficijent varijacije brzina (CVS – *Coefficient of Variation of Speed*)

$\lambda_{Q(j)}$ – razlika prosječne brzine između početka i kraja promatrane dionice (km/h)

$\lambda_{COVV(k)}$ – utjecaj promjene prometnog traka između ulaznog i izlaznog mjerenja (*Covariance of volume difference between the upstream and downstream of a specific location*)

$\lambda_{R(l)}$ – utjecaj geometrije prometnice (kontrolni čimbenik)

$\lambda_{P(m)}$ – utjecaj vršnog/izvan-vršnog prometnog opterećenja (kontrolni čimbenik)

β – parametar za izloženost (Exposure)

EXP – izloženost nastanku nesreće prema vozilo-kilometru (Exposure)

Prema jednadžbi može se vidjeti su autori početnog modela [18] odabrali tri glavna čimbenika za koje se ispostavilo da imaju najveće značenje za predviđanje nastanka prometnih nesreća:

1. **trenutna razlika brzine između pojedinih vozila na fiksnoj lokaciji (CVS);**
2. promjena brzine duž promatrane dionice (Q) – male promjene ukazuju na konstantnu brzinu te mala ubrzanja dok velike promjene ukazuju na nagla ubrzanja ili usporenja što ukazuje na opasnost od nastanka prometne nesreće;
3. učestalost promjene prometnog traka (COVV).

Navedeno istraživanje rezultiralo je, između ostalog, sljedećim zaključcima:

- s porastom varijacije brzina na odsječcima autoceste i uzduž prometnog traka, raste i vjerojatnost nastanka sudara
- vjerojatnost sudara raste s porastom gustoće prometa, što je samo po sebi logično
- veća je vjerojatnost nastanka sudara u vršnom periodu u odnosu na izvan-vršni
- na dionicama ceste s čestim promjenama prometnih trakova veća je vjerojatnost nastanka sudara u odnosu na dionice gdje nema tih promjena
- **ovaj model može poslužiti za predviđanje sudarnog potencijala na temelju trenutnih prometnih uvjeta.**

Ako su trenutni uvjeti prometa potencijalno opasni, model će predvidjeti visok sudarni potencijal i potom prikazati vozačima određeno ograničenje brzine primjenom VSLC sustava, budući da VSLC sustav ima utjecaj na smanjenje rizika od sudara [45].

Općeniti zaključak do sada provedenih istraživanja je da se ograničenjem brzine smanjuje devijacija (varijacije) brzine individualnih vozila. S obzirom da smanjenje brzine ima učinak tijekom određenog vremenskog razdoblja, razlika u brzinama između detektora u gornjim i donjim dijelovima prometnog toka će se, također, smanjiti. Smanjivanjem ograničenja brzine smanjit će se i varijacija u brzinama između prometnih trakova što će rezultirati smanjenjem promjena trakova izraženih pokazateljem promjene prometnih trakova (COVV). S ovim promjenama u sudarnim pokazateljima, smanjenje ograničenja brzine **smanjit će sudarni potencijal** [18].

Istraživanje [18] pokazuje da se najbolji učinak na smanjenje varijacije brzina u prometnom toku postiže 5-minutnim i 10-minutnim intervalima promjene ograničenja brzine.

U nastavku rada objasniti će se utjecaj varijacija brzine vozila na autocestama na sigurnost cestovnog prometa.

4. Utjecaj varijacija brzine na sigurnost cestovnog prometa

Varijacije brzina na autocestama okarakterizirane su usporenjima i ubrzanjima vozila. Ove oscilacije povećavaju potrošnju goriva, emisiju štetnih plinova i trošenje vozila. Također utječu na udobnost vožnje jer su vozači prisiljeni nanovo prilagođavati ubrzanje vozila [46].

Rezultati istraživanja su pokazala da varijacija brzina ima znatan utjecaj na nastanak prometnih nesreća te da te varijacije imaju znatniji učinak od prosječnog stanja prometa (npr. zagušenje). Ipak, vjerojatnost nastanka sudara raste i s povećanjem zagušenja.

Varijacije u brzinama opadaju kako raste prosječna brzina, a prosječna brzina ovisi o ograničenju brzine. Promjenom prosječne brzine samo djelomično raste razina sigurnosti prometa. Bolji učinak postiže se homogenijom raspodjelom brzina [47].

Varijacija brzina mjeri se koeficijentom varijacije brzine (*CVS – Coefficient of Variation of Speed*) računanim tijekom određenog vremenskog intervala na fiksnoj lokaciji. Različitost brzine na fiksnoj lokaciji ukazuje na nestabilnost brzine vozila u prometnom toku. Ovaj čimbenik je određen kao omjer standardne devijacije i prosječne brzine vozila za svaki prometni trak [44]:

$$CVS = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{(\sigma_s)_i}{\bar{s}_i} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left(\sqrt{\frac{\frac{\Delta t}{p} \sum_{t=t^*-\Delta t}^{t^*} (s_i(t))^2 - (\sum_{t=t^*-\Delta t}^{t^*} s_i(t))^2}{\frac{\Delta t}{p} (\frac{\Delta t}{p} - 1)}} \right) / \frac{\sum_{t=t^*-\Delta t}^{t^*} s_i(t)}{\frac{\Delta t}{p}} \quad (2)$$

gdje je:

CVS – koeficijent varijacije brzine

t^* – vrijeme nastanka prometne nesreće;

Δt – vrijeme promatranja (sekunde);

$(\sigma_s)_i$ – standardna devijacija brzine na prometnom traku i tijekom perioda Δt (km/h);

$\bar{s}_i$ – prosječna brzina na prometnom traku i tijekom perioda Δt (km/h);

t_p – trajanje vremenskog intervala promatranja brzine (sekunde);

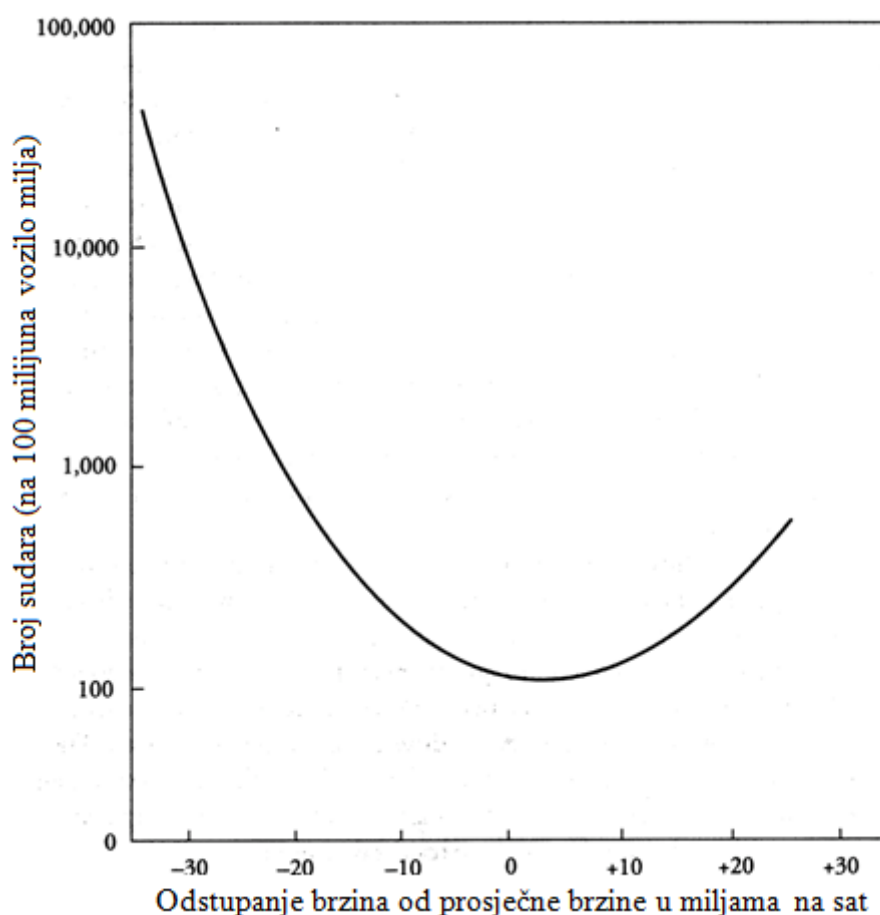
$s_i(t)$ – brzina na prometnom traku i u vremenu t (km/h);

n – ukupan broj prometnih trakova

Analizirajući navedenu jednadžbu dolazi se do zaključka da pri manjim promjenama brzine (standardne devijacije) prometni tok ostaje uravnotežen, odnosno brzina vozila u prometnom toku ostaje gotovo konstanta. Ako, pak, dođe do znatnijeg povećanja promjene brzine (standardne devijacije), određeni broj vozača će češće morati mijenjati brzinu kretanja pa će doći do nestabilnosti prometnog toka i veće vjerojatnosti od nastanka prometne nesreće [8].

Navedenu tvrdnju potkrijepio je još 1964. godine David Solomon svojim istraživanjem [48] u kojem je utvrdio da je veća vjerojatnost nastanka prometne nesreće pri većoj razlici u brzinama vozila u odnosu na prosječnu brzinu prometnog toka. Utvrđenu zavisnost između brzina vozila kod prometnih nesreća i prosječne brzine prometnog toka prikazao je krivuljom rizika sudara (tzv. Solomonovom krivuljom) prikazanoj na slici 7.

Vozila koja voze mnogo brže ili sporije od srednje brzine prometnog toka imaju veću vjerojatnost sudjelovati u incidentnim situacijama [49].



Slika 7. Solomonova krivulja, [48]

Krivulja prikazuje da se najveći broj prometnih nesreća događa pri brzinama koje se razlikuju od prosječne brzine prometnog toka te je **veći broj nesreća zastupljen kod vozila s brzinama koje su manje od prosječne.**

Solomonove tvrdnje potvrdila je i Julie Anna Cirillo koja je ustanovila da je za prometni tok najsigurnije stanje kada sva vozila voze približno istom brzinom, neovisno o ograničenju brzine. Smatra da je potrebno poduzeti korake za poticanje ovakvog ponašanja na prometnicama [50].

U jednadžbi uvrštenoj u istraživanje prilagođenosti ovog podmodela na hrvatske autoceste [8], može se vidjeti da je uvedena ovisnost koeficijenta varijacije brzine o prosječnoj brzini prometnog toka na promatranom prometnom traku. Vrijednost prosječne brzine toka postavljena je u nazivnik što pokazuje obrnuto proporcionalnu ovisnosti koeficijenta varijacije brzine i prosječne brzine prometnog toka. To je logično jer određena vrijednost devijacije brzine nema jednak značaj pri svim vrijednostima prosječne brzine, jer, primjerice, devijacija brzine od 5 km/h ima znatno izraženije efekte na sigurnost prometa pri prosječnoj brzini od 50 km/h, nego pri brzini od 130 km/h.

Može se zaključiti da je značajan faktor jednadžbe, dakle, brzina prometnog toka koja se obično izražava prosječnom brzinom. Dovodjenje brzine prometnog toka na primjerenu razinu od krucijalne je važnosti za sigurnost prometa.

Istraživanje [8] u proračun promjene brzine mjerene na fiksnoj lokaciji (CVS) nije ubrojilo brzine teretnih vozila, jer se one, zbog specifičnosti hrvatskih autocesta, prikazuju čimbenikom učestalosti pretjecanja vozila.

Radi pojednostavljenja, varijacija brzina na fiksnoj lokaciji u praksi, devijacija brzine se može promatrati na cjelokupnom presjeku kolničkog traka (vozni trak i pretjecajni trak u jednom smjeru mogu se smatrati jednim prometnim trakom). Prema tome, moguće je koristiti pojednostavljeni proračun **koeficijenta varijacije brzine** prema obrascu:

$$CVS = \frac{\sigma_s}{\bar{s}_i} \quad (3)$$

gdje je:

CVS – koeficijent varijacije brzine

σ_s – standardna devijacija brzina

$\bar{s}_i$ – prosječna brzina na prometnom traku

Ako se vrijednost čimbenika CVS smanji primjenom VSLC sustava, smanjit će se i vjerojatnost nastanka nesreće na autocesti.

Istraživanja [51, 52] pokazuju da smanjenjem prosječne brzine dolazi i do posljedičnog smanjenja varijacije brzina. Kroz strategije povećanja sigurnosti odvijanja prometa na cestama i autocestama potrebno je, uz prosječnu brzinu, naglasiti i pitanje varijacije brzina.

Međutim, prihvaćanjem činjenice da je poželjno smanjiti varijaciju brzina, pojavljuju se dva logična pristupa kako to učiniti: poticanje vozača koji voze na najsporijem dijelu distribucije brzina da voze brže (da povećaju brzinu), i/ili poticanje vozača na najbržem dijelu distribucije brzina da smanje brzinu kretanja.

Neki pristupi, poput poticanja sporijih vozača da ubrzaju, nemaju pozitivan utjecaj na sigurnost prometa. Ovaj pristup može, ustvari, povećati vjerojatnost nastanka prometne nesreće. Spori vozači izabiru putovati nižim brzinama jer se osjećaju udobnije nego da voze većim brzinama, što se može povezati s karakteristikama vozača i vozila. Tako, primjerice, stariji vozači mogu voziti sporije kako bi kompenzirali nedostatke zbog smanjene vidne sposobnosti i oštine vida te sporijih vremena reagiranja. Prema tome, poticanje sporijih vozača da ubrzaju iznad brzine pri kojoj osjećaju udobnost je u suprotnosti s ciljevima povećanja sigurnosti prometa na autocestama. Ne samo da ovaj pristup povećava vjerojatnost nastanka sudara, nego i povećava ozbiljnost povreda nastalih zbog sudara. Stoga, umjesto poticanja sporijih vozača da ubrzaju i izlože se većem riziku, znatno bolja mjera prometne sigurnosti je poticanje takvih vozača da stanu sa strane i propuste brža vozila.

Drugi pristup – poticanje brzih vozača da uspore – ima značajno veći utjecaj na povećanje razine sigurnosti prometa na autocestama [53]. Ovaj pristup ne generira povećanje nekih dodatnih rizika, kao što je to slučaj s prvim pristupom. Pristup stavlja naglasak na vozače koji voze znatno brže od brzine koja je ograničena na toj dionici, a manje na vozače koji voze blago iznad ograničenja brzine. Širom svijeta već se čine naponi koji ciljaju upravo ovu skupinu vozača – povećanjem kazni za prekomjerna kršenja ograničenja brzine, pri čemu vozači koji voze znatno iznad ograničenja brzine primaju i značajno veće kazne od onih koji to ograničenje krše blaže.

Krajnji cilj stavljanja naglaska na ovu skupinu vozača je smanjenje broja takvih vozača koji voze neprimjerenim brzinama. Ovaj cilj smanjuje prosječnu brzinu svih vozila, kao i varijacije od prosječne brzine.

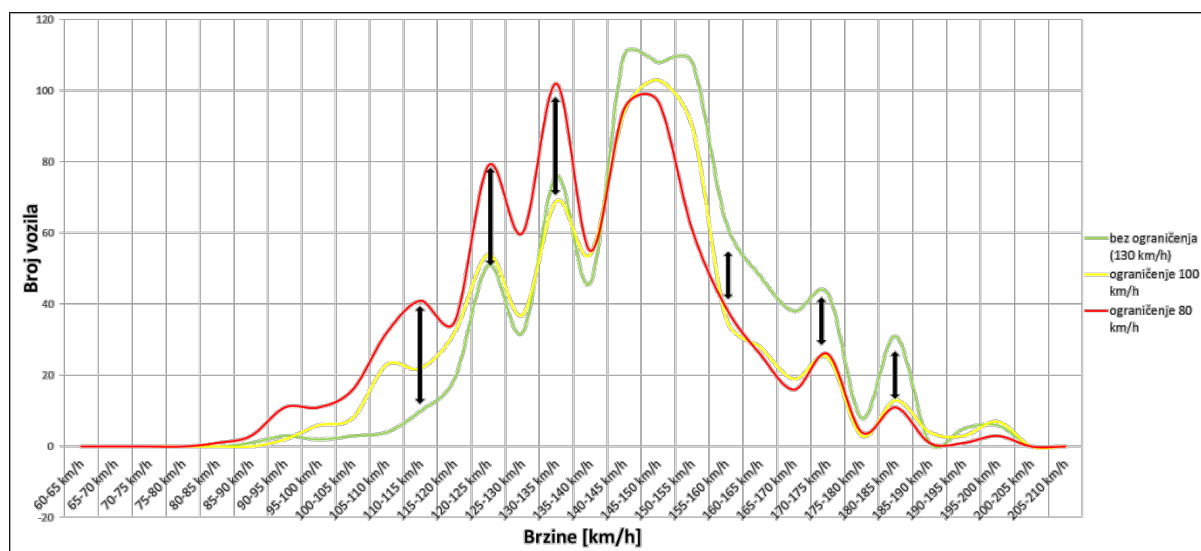
U sklopu znanstveno-istraživačkog projekta 7. okvirnog programa EU komisije „Intelligent Cooperative Sensing for Improved Traffic Efficiency“ 2012-2013., EC-FP7-317671 provedena je „Analiza poštivanja znakova ograničenja brzina na autocestama u Republici Hrvatskoj“ [54] gdje je izvršeno mjerenje brzina vozila na nekoliko lokacija. U analizi je mijenjano ograničenje brzine i mjerena je prosječna brzina vozila i standardna devijacija. Rezultati su prikazani u tablici 1.

Tablica 1. Prosječna brzina i standardna devijacija u provedenim mjerenjima

	Bez ograničenja	Ograničenje 100 km/h	Ograničenje 80 km/h
Artemitička sredina	147,299	141,867	136,586
Standardna devijacija	18,609	18,991	20,032

Izvor: [36]

Kada se analiziraju rezultati u tablici 1, može se uočiti da ograničenjem brzine dolazi do smanjenja prosječne brzine (pri tome je korišten sustav promjenjivog ograničenja brzine). Međutim, istodobno dolazi do povećanja standardne devijacije, odnosno raspršenost brzina se povećava prilikom znatnijeg ograničenja brzine. Istraživanje je zaključilo da do povećanja standardne devijacije dolazi uslijed javljanja dviju kategorija vozača – jedne koja poštuje ograničenje, i druge koja ga ne poštuje. Navedene dvije kategorije se jasnije mogu vidjeti na grafikonu 1 koji prikazuje broj vozila koja voze određenom brzinom ovisno o ograničenju brzine.



Grafikon 1. Prikaz broja vozila koja voze određenom brzinom ovisno o ograničenju brzine, [36]

Promatrajući grafikon 1 može se uočiti da se prije kao i poslije intervala brzina 135-140 km/h, ovisno o ograničenju, javljaju velike razlike u smanjenju odnosno u povećanju određenih intervala brzina što dovodi na zaključak o ponašanju dvije različite skupine vozača. Tako se javlja jedna skupina vozača na koju znatnije utječe promjena ograničenja te druga skupina vozača koja ne pokazuje prevelik utjecaj ograničenja na smanjenje vlastite brzine vožnje zbog čega dolazi do povećanja standardne devijacije, tj. raspršenosti brzina. Na grafikonu 1 jasno se može vidjeti da je porast broja smanjenja brzina za brzine koje su veće od intervala 135-140 km/h znatno manji u odnosu na porast broja povećanja brzina koje su manje od intervala 135-140 km/h što dovodi do zaključka da vozači koji voze znatno više od ograničenja (140 km/h i više) manje uvažavaju upozorenje ograničenja brzine promjenjivim prometnim znakom u odnosu na vozače koji voze u skladu s ograničenjem brzine (interval od 130 do 135 km/h).

4.1. Utjecaj promjenjivog ograničenja brzine na smanjenje varijacije brzina

U prethodnom dijelu utvrđeno je postojanje znatne varijacije brzina pojedinih vozila u prometnom toku. S obzirom na to da varijacija brzina ima negativan utjecaj na sigurnost odvijanja prometa na autocestama, potrebno je tu varijaciju smanjiti. Budući da promjenjivo ograničenje brzine i promjenjiva prometna signalizacija omogućuju stvarnovremensko obavješćavanje sudionika u prometnom toku o dozvoljenim brzinama kretanja i načinu ponašanja u prometnom toku, logična je pretpostavka da će se upravo taj sustav nastojati iskoristiti za povećanje sigurnosti i smanjenje varijacije brzina.

Način smanjenja varijacije brzina temelji se na istraživanju o modelu upravljanja sigurnošću prometa na autocestama [8]. U tom istraživanju je predložen algoritam koji obavještava sudionike u prometnom toku na autocesti ovisno o vrijednosti čimbenika opasnosti, a koji se, pak, izračunava složenim proračunom vrijednosti sudarnog potencijala, te na temelju vremenskih prilika, podatka o dnevnoj svjetlosti i sl.

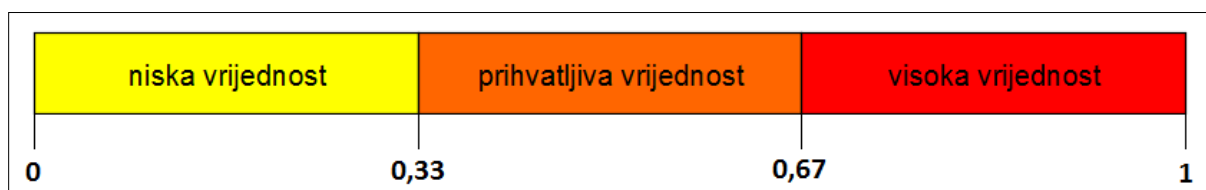
Algoritam za smanjenje varijacije brzina izračunavat će vrijednost koeficijenta varijacije brzine na temelju standardne devijacije brzine i prosječne brzine. Ako vrijednost koeficijenta prijeđe granicu visoke vrijednosti, sustavom svjetlosnih promjenjivih znakova ograničenja brzine i sustavom svjetlosnih tekstualnih znakova utjecat će se na prometni tok kako bi se varijacije brzina smanjile.

U ovom radu neće se izvoditi matematički izraz za izračunavanje vrijednosti sudarnog potencijala nego će se analizirati vrijednost njegove prve komponente, a to je koeficijent varijacije brzine. Uz to, dat će se teorijski opis algoritma koji će promjenjivim ograničenjem brzine i tekstualnim porukama vozačima smanjivati varijaciju brzina i time povećavati sigurnost prometa na autocestama.

Teorijska vrijednost koeficijenta varijacije brzina može biti od 0 do 1. Ona se može podijeliti na tri kategorije:

- niska
- prihvatljiva
- visoka

Granice između vrijednosti će biti određene proporcionalno zbog nepostojanja podataka pomoću kojih bi se odredile precizne granice kategorija. Granice su prikazane na slici 8.



Slika 8. Raspon vrijednosti čimbenika devijacije brzina

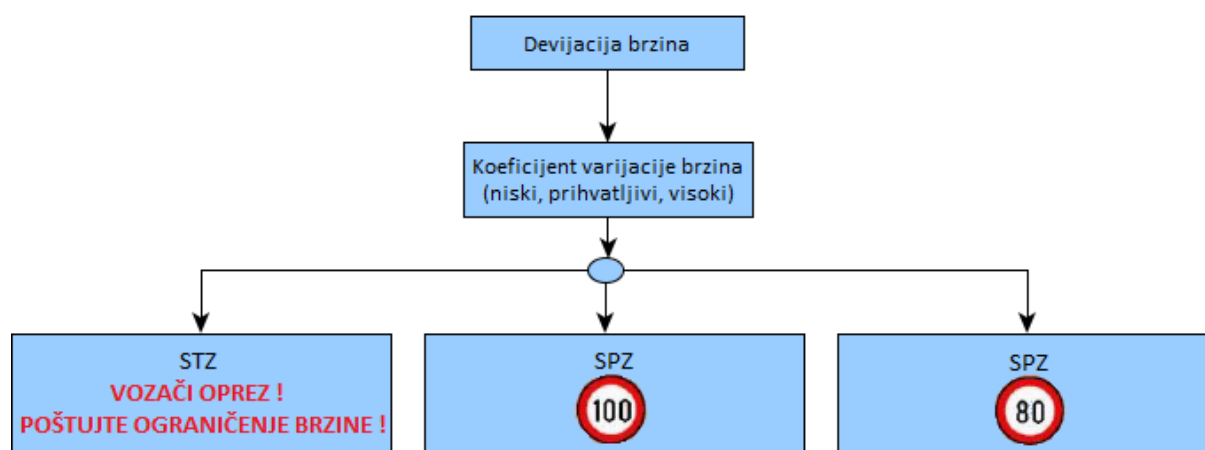
Izvor: [8]

Kad koeficijent varijacije brzina temeljen na varijaciji brzina (standardnoj devijaciji) prijeđe u područje visoke vrijednosti, algoritam će uključiti svjetlosni tekstualni znak s natpisom „**VOZAČI OPREZ ! POŠTUJTE OGRANIČENJE BRZINE !**“. Za pretpostaviti je da će se ovom porukom djelomično utjecati na vozače i da će se dio njih potaknuti na poštivanje brzine ograničenja. Ovim postupkom smanjit će se devijacija brzine, a time i vrijednost koeficijenta varijacije brzina.

Ako se koeficijent, odnosno devijacija brzina smanji na prihvatljivu vrijednost, zadržava se uključena tekstualna poruka. Ako vrijednost koeficijenta ostane u visokom području, aktivirat će se svjetlosni promjenjivi znak ograničenja brzine s vrijednošću **100 km/h**. Time se dodatno smanjuje prosječna brzina i devijacija brzina.

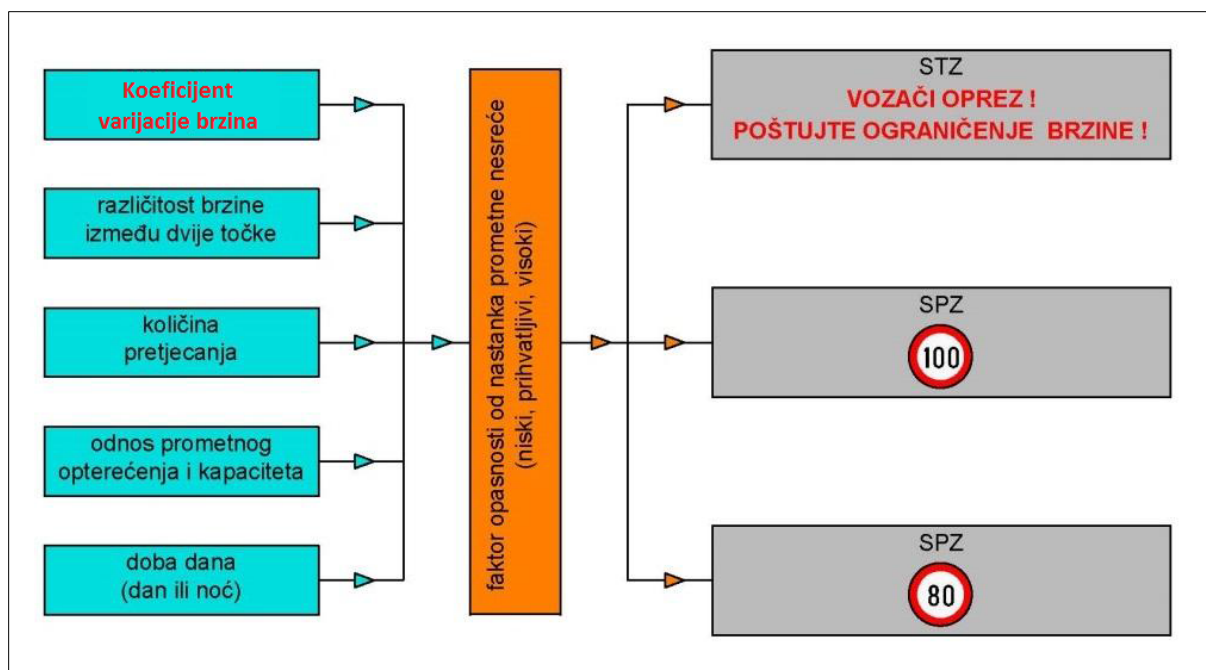
Ako u toj situaciji vrijednost koeficijenta varijacije brzina padne u prihvatljivo područje, zadržat će se postojeće ograničenje. Ako vrijednost koeficijenta i dalje ostane u visokom području, ograničenje brzine će se sniziti na **80 km/h**.

Normaliziranjem prometnog toka i padom vrijednosti koeficijenta u nisko područje, algoritam će povećavati vrijednost ograničenja brzine i gasiti tekstualnu poruku da se nepotrebno ne bi usporavao promet, ili davale lažne informacije vozačima jer nema opasnosti od nastanka prometne nesreće. Opisani algoritam prikazan je na slici 9.



Slika 9. Shematski prikaz za prikaz promjenjivog ograničenja ovisno o devijaciji brzine

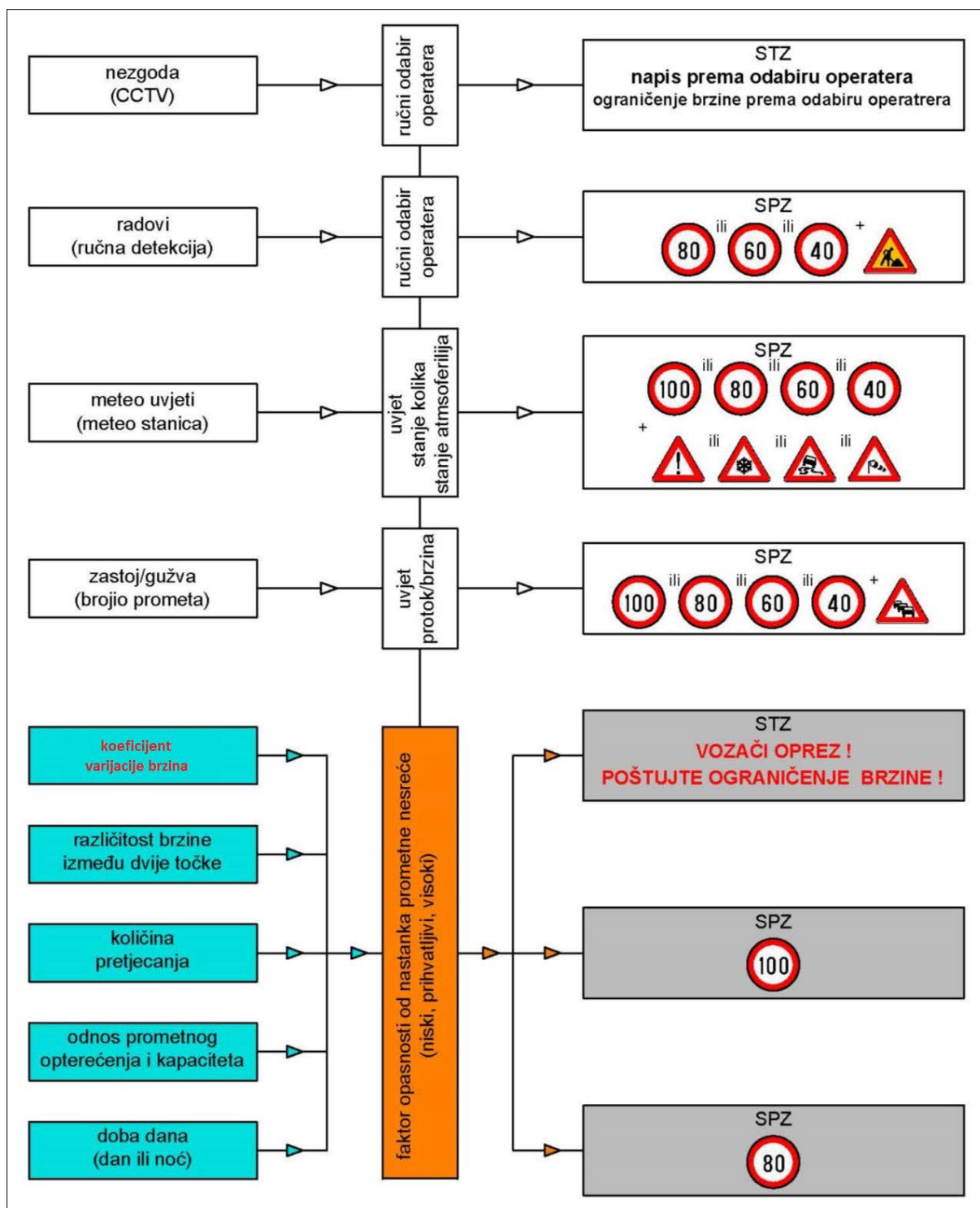
Prikazani algoritam moguće je integrirati u izračun čimbenika opasnosti od nastanka prometne nesreće, kako je prikazano na slici 10.



Slika 10. Shematski prikaz modela upravljanja sigurnošću izračunom čimbenika opasnosti od nastanka prometne nesreće

Izvor: [8]

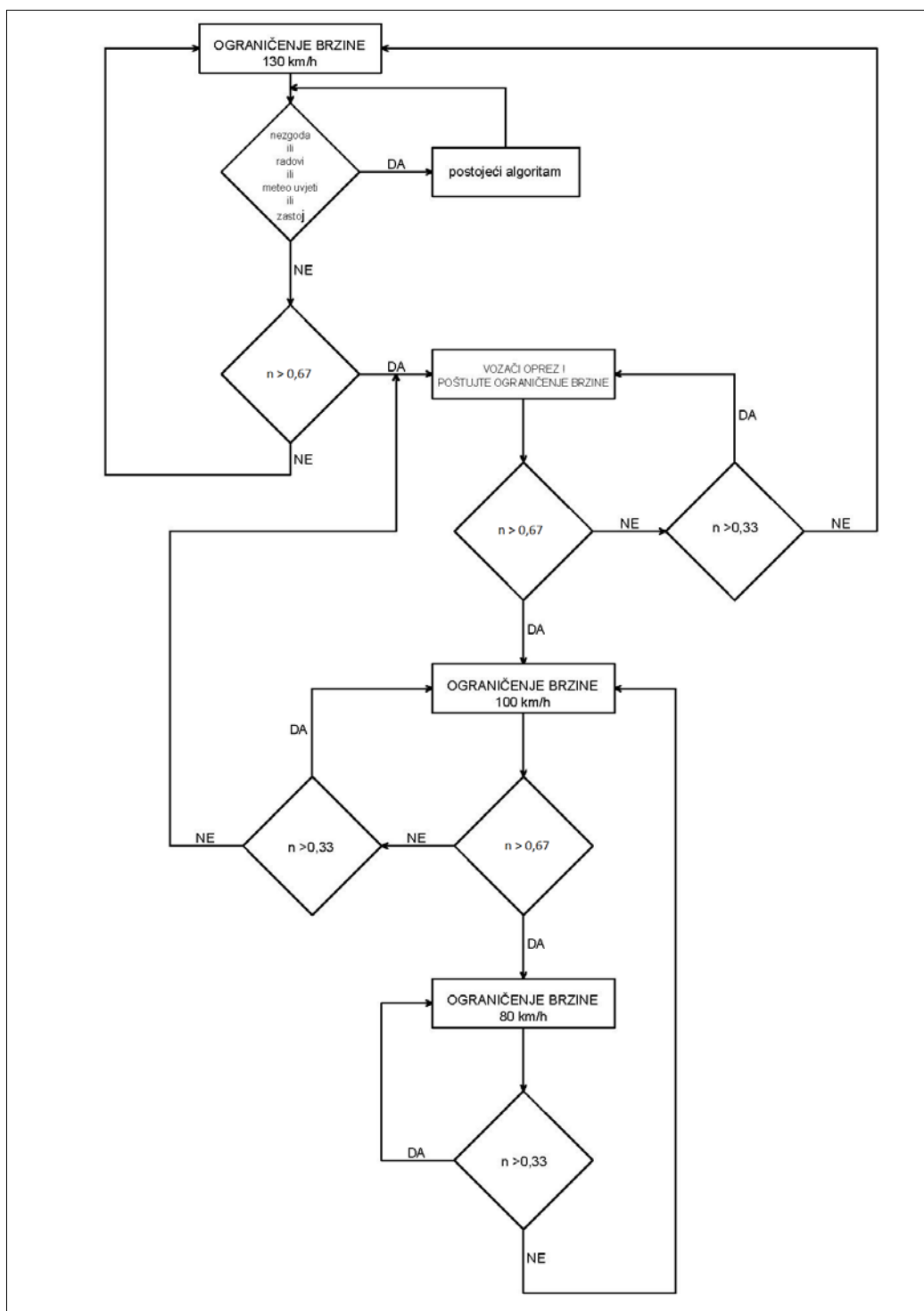
Algoritam izračuna čimbenika opasnosti od nastanka prometne nesreće se, pak, može integrirati zajedno s postojećim algoritmima za upravljanje prometom u jedinstveni algoritam za upravljanje sigurnošću prometa na autocestama, kao što je prikazano na slici 11.



Slika 11. Algoritam za upravljanje sigurnošću, integriran s postojećim algoritmima za upravljanje prometom

Izvor: [8]

Algoritam za upravljanje sigurnošću prometa na autocestama se može prikazati dijagramom toka na slici 12.



Slika 12. Dijagram toka algoritma za upravljanje sigurnošću prometa na autocestama

Izvor: [8]

Prikazani algoritam za upravljanje sigurnošću prometa ima utjecaj na povećanje razine sigurnosti prometa na dionici autoceste. S obzirom na to da je devijacija brzina (varijacija brzina) bitan čimbenik cijelog algoritma, potrebno ju je ciljano i učinkovito smanjiti. Pokazana je mogućnost utjecaja na prometni tok promjenjivim prometnim znakovima i promjenjivim ograničenjem brzine. U nastavku rada istražiti će se utjecaj ograničenja brzine prikazanog na promjenjivim prometnim znakovima, a proširiti će se eventualnim zapažanjem o utjecaju udaljenosti između promjenjivih prometnih znakova. S obzirom na činjenicu da se ovakva testiranja ne mogu izvršiti na dionici autoceste u realnim uvjetima, provest će se simulacija u simulacijskom programu Vissim 5.4, a dobiveni rezultati će se raspraviti i vrednovati.

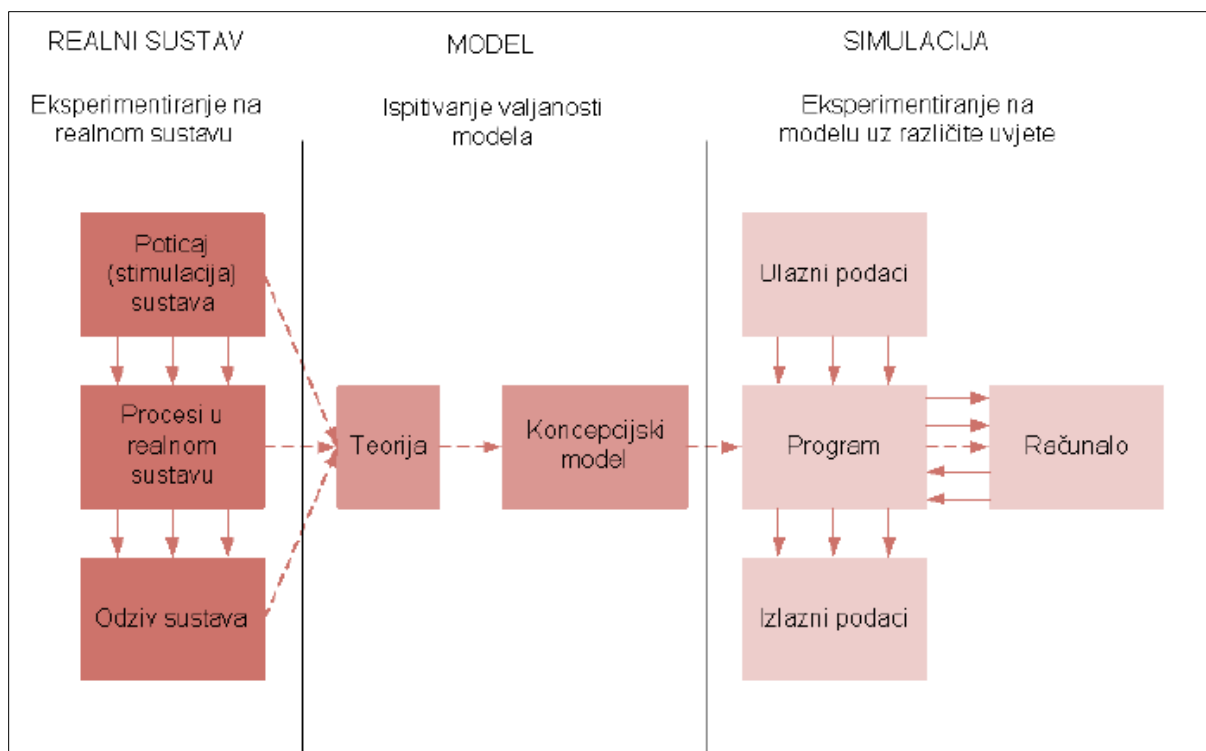
4.2. Značaj modeliranja i simuliranja u prometu

Svrha modeliranja i simuliranja je utvrđivanje karakteristika realnog sustava na jednostavniji, brži i jeftiniji način od eksperimentiranja sa sustavom u realnim uvjetima. Također, eksperimentiranje s realnim sustavom je često neizvedivo.

Simulacija označava eksperimentiranje s apstraktnim modelom realnog sustava u određenom vremenu, a u širem smislu obuhvaća i postupak izrade modela. Bez modela nema ni simulacije [55].

Model predstavlja pojednostavljenu reprezentaciju realnog svijeta, odnosno sustava koji predstavlja područje interesa, a fokusiran je na elemente koji su bitni modelaru za izradu analize od njegovog interesa. Model se radi na temelju neke teorije pa se može reći da je teorija ono što povezuje realni sustav i njegov model. Model je konkretniji od teorije i lakše se kontrolira jer je nastao uz određenu simplifikaciju nekih ključnih elemenata teorije. Ključni element postupka planiranja je sposobnost izbora odgovarajućeg modela i njegova prilagodba promatranom problemu.

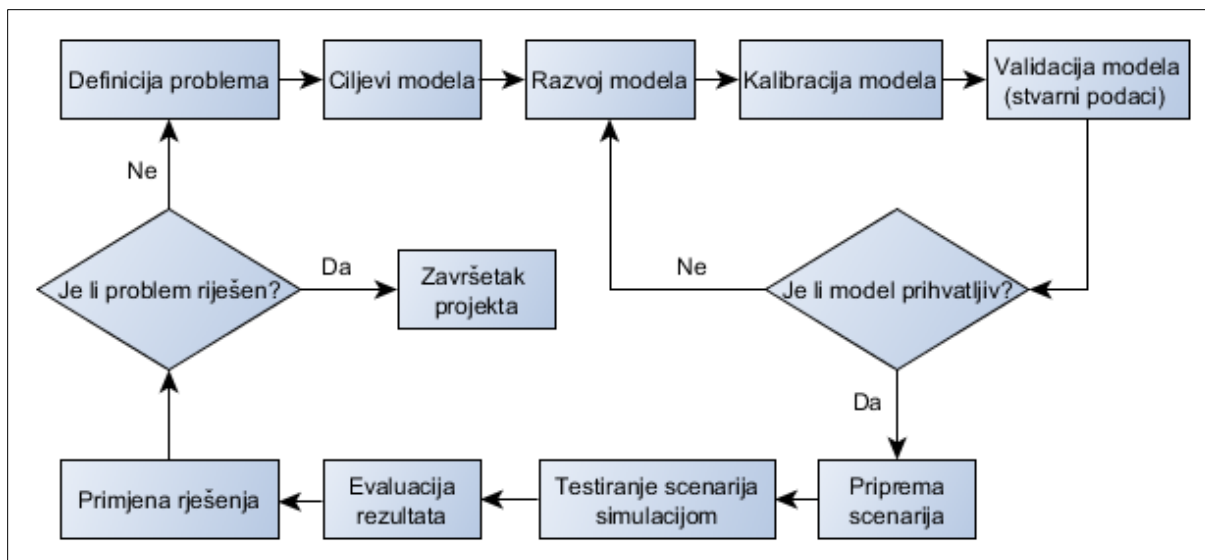
Odnos realnog sustava, modela i simulacije prikazan je na slici 13.



Slika 13. Odnos realnog sustava, modela i simulacije, [55]

Simulacija daje podatke o mogućem ponašanju stvarnog sustava u ovisnosti od nekih početnih uvjeta. S dobro planiranom i izvedenom simulacijom može se postići vrlo visoka točnost opisivanja procesa u realnom sustavu. U praksi se simulacije koriste za verifikaciju analitičkih modela, odnosno za ispitivanje ponašanja nekog sustava. Sama simulacija ne vrši optimizaciju, ali se može koristiti za izbor najpogodnije varijante [55].

Prometni sustav i njegove pojave čine visoko kompleksni dinamički problemi pri čemu pojednostavljeni matematički modeli nisu prikladni za njihovu analizu. Pojavila se potreba za naprednijim metodama i modelima da bi se omogućila analiza uzroka, povezivanja, povratnih petlji i kaotičnog ponašanja uključenih u problematične situacije prometnog sustava. Prometno modeliranje može omogućiti učinkovit dizajn i kontrolu današnjih složenih prometnih sustava. Matematički modeli ne mogu uvijek točno prikazati visoku složenost i dinamičnost prometnog sustava. Iz tog razloga razvijeni su računalni simulacijski modeli i prilagođeni za opisivanje karakteristika prometnog toka na danoj prometnoj mreži. Jednom kada se korištenjem stvarnih podataka razvije i vrednuje računalni simulacijski model, mogu se razviti i simulirati različiti scenariji i nove strategije upravljanja, te se evaluirati prije prijedloga za stvarnu primjenu [56]. Metoda prometnog planiranja prikazana je na slici 14.



Slika 14. Predložena metoda prometnog modeliranja i simulacije prema Papageorgiou-u

Izvor: [57]

Prema tome, simulacije su osobito pogodne za prometni sustav, gdje je zbog sigurnosnih, ali i praktičnih razloga, ponekad nemoguće ispitivati značajke uvođenja nekog novog sustava u prometni sustav u realnom okruženju. Stoga su simulacije u prometu sredstvo kojim se omogućava donošenje odluka o izboru najpogodnije varijante ovisno o rezultatima dobivenih simulacijom. Pritom je bitno da ulazni podaci simulacije što vjernije dočaravaju karakteristike prometnog toka, prometnica i odnosa unutar prometnog sustava, kako bi se što kvalitetnijom simulacijom moglo doći do bitnih podataka o ponašanju realnog sustava u slučaju primjene nekog rješenja u prometnom sustavu.

4.3. Modeliranje simulacije sustava upravljanja sigurnošću prometa na dionici autoceste

Za izradu simulacije potrebno je prvo definirati model. Za potrebe simulacije izrađen je računalni model autoceste u programskom paketu PTV Vissim. Model se sastoji od odsjeka autoceste duljine 2 km, pri čemu su na ulazu i izlazu iz dionice autoceste postavljeni detektori kojima se mjeri standardna devijacija brzina vozila.

Cilj simulacije je utvrditi vrijednosti koeficijenta varijacije brzina na autocesti u ovisnosti o ograničenju brzine prikazanome na promjenjivom prometnom znaku. Simulacijom će se

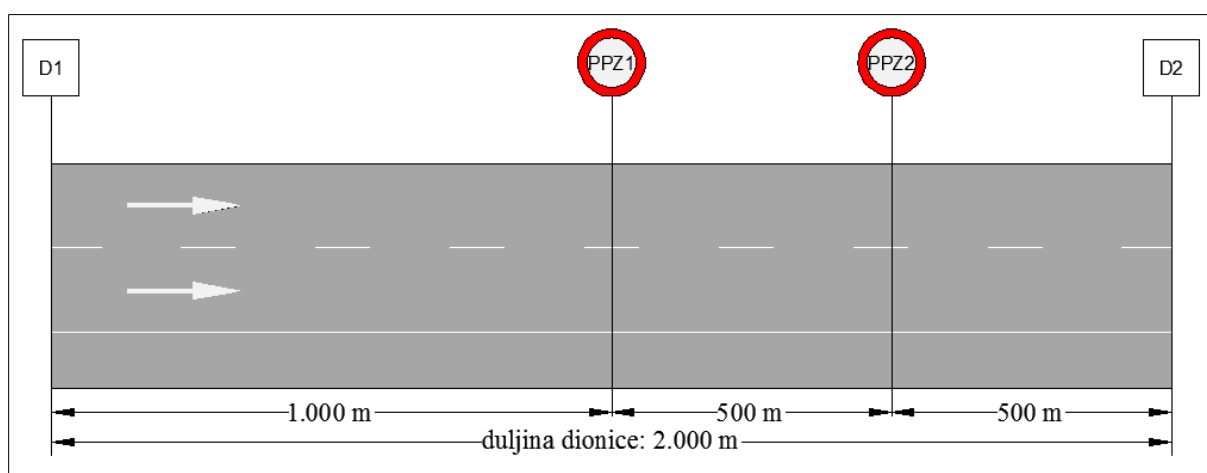
promatrati vrijednosti koeficijenta varijacije brzina kroz nekoliko scenarija te pri različitom ograničenju brzine promjenjivim prometnim znakom.

Za potrebe testiranja modela provedena je simulacija prometnog toka na dionici autoceste u duljini od 2 km. Simulacija je ograničena na jedan smjer prometovanja odnosno na jedan kolnik autoceste. Na kolniku su predviđene dvije prometne trake, i jedna zaustavna traka. Širina voznih traka iznosi 3,75 m, dok je širina zaustavne trake 2,50 m.

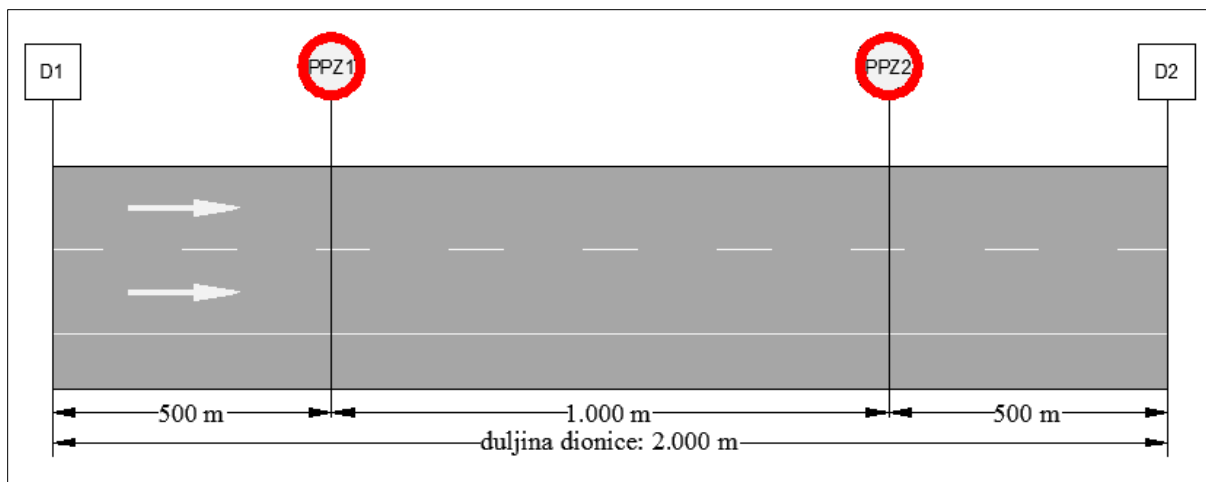
Dionica autoceste je u simulaciji opremljena svjetlosnim promjenjivim znakovima na kojima je moguće prikazivati promjenjive znakove ograničenja brzine. Osim toga dionica je opremljena i sensorima za mjerenje osnovnih karakteristika prometnog toka (D – detektori).

Na krajnjim rubovima odsječka autoceste postavljaju se dva detektora. Na udaljenosti 500 m ispred drugog detektora postavljen je promjenjivi prometni znak koji će prikazivati različito ograničenje brzine i tekstualnu poruku vozačima prema algoritmu upravljanja sigurnošću prometa na autocestama iznesenom u prethodnim poglavljima. Isto ograničenje prikazivat će promjenjivi prometni znak koji se postavlja ispred tog znaka, ali čija će udaljenost od redosljedno drugog znaka biti ispitana u dvije varijante: 500 m i 1.000 m.

Načelni prikaz rasporeda detektora i promjenjivih prometnih znakova prikazan je na slikama 14 i 15, u ovisnosti o testiranim scenarijima simulacije.



Slika 15. Shematski prikaz dionice autoceste s rasporedom znakova za prvi podscenarij simulacije



Slika 16. Shematski prikaz dionice autoceste s rasporedom znakova za drugi podscenarij simulacije

Scenariji su podijeljeni po intenzitetu prometa na autocesti te po broju vozila koja poštuju znak promjenjivog ograničenja brzine. Uz to je za svaki scenarij dodan i podscenarij s različitim razmakom između dva promjenjiva prometna znaka.

Prema kriteriju intenziteta prometa predviđena su tri osnovna scenarija:

1. nisko prometno opterećenje – 30% kapaciteta prometnice
2. srednje prometno opterećenje – 50% kapaciteta prometnice
3. visoko prometno opterećenje – 90% kapaciteta prometnice

Prema broju vozila koja poštuju ograničenje brzine predviđena su tri osnovna scenarija:

1. nisko poštivanje brzine – 30% vozila poštuje ograničenje brzine
2. srednje poštivanje brzine – 70% vozila poštuje ograničenje brzine
3. visoko poštivanje brzine – 90 % vozila poštuje ograničenje brzine.

Prema razmaku između dva promjenjiva prometna znaka, predviđena su dva podscenarija:

1. Razmak između dvaju prometnih znakova iznosi 500 m
2. Razmak između dvaju prometnih znakova iznosi 1.000 m

Prikaz scenarija i podscenarija simulacije prikazan je u tablicama 2 i 3:

Tablica 2. Prvi podscenarij simulacije

Razmak između dvaju prometnih znakova = 500 m			
Iskorištenost kapaciteta \ Poštivanje ograničenja	Nisko (30%)	Srednje (70%)	Visoko (90%)
Nizak (30%)	T1	T2	T3
Srednji (50%)	T4	T5	T6
Visok (90%)	T7	T8	T9

Tablica 3. Drugi podscenarij simulacije

Razmak između dvaju prometnih znakova = 1.000 m			
Iskorištenost kapaciteta \ Poštivanje ograničenja	Nisko (30%)	Srednje (70%)	Visoko (90%)
Niska (30%)	T10	T11	T12
Srednja (50%)	T13	T14	T15
Visoka (90%)	T16	T17	T18

Na temelju određenih kombinacija iskorištenosti kapaciteta i poštivanja ograničenja brzine od strane vozača izvodit će se 18 testova u simulacijskom programu Vissim 5.4.

U proračun će se ubrajati samo osobna vozila, s obzirom da pri proračunu vrijednosti sudarnog potencijala postoji zaseban čimbenik – učestalost pretjecanja – koji uključuje utjecaj brzina teretnih vozila, pa bi dvostrukim uključivanjem utjecaja teretnih vozila moglo doći do poremećaja proračuna vrijednosti sudarnog potencijala.

5. Simulacije, rezultati i rasprava

Na temelju modela prikazanog u prethodnom poglavlju provedene su simulacije prometnih tokova. Izračunavana je i uspoređivana vrijednost koeficijenta varijacije brzina u ovisnosti o ograničenjima brzine prikazanim na promjenjivim prometnim znakovima. Ovom scenariju nadodana su dva podscenarija u ovisnosti o razmaku između dvaju promjenjivih prometnih znakova. Provedeni su testovi za svaki od scenarija i podscenarija, a rezultati na drugom detektoru su prikazani tablično.

5.1. Kriteriji i rezultati simulacija

Test 1

Kriteriji prvog testa su:

- Prometno opterećenje: 30% kapaciteta
- Poštivanje ograničenja od strane vozača: 30%
- Ograničenje brzine: 120 km/h, 100 km/h, 80 km/h
- Podscenarij razmak između dvaju promjenjivih prometnih znakova: 500 m

Rezultati prvog testa prikazani su u tablici 4.

Tablica 4. Koeficijent varijacije brzine u ovisnosti o scenariju simulacije – Test 1

Test broj	Ograničenje	Prosječna brzina	Standardna devijacija	CVS
1	80	114,96	15,53	0,135
	100	120,30	10,72	0,089
	120	124,02	7,53	0,061

Test 2

Kriteriji testa su:

- Prometno opterećenje: 30% kapaciteta
- Poštivanje ograničenja od strane vozača: 70%
- Ograničenje brzine: 120 km/h, 100 km/h, 80 km/h
- Podscenarij razmak između dvaju promjenjivih prometnih znakova: 500 m

Rezultati drugog testa prikazani su u tablici 5.

Tablica 5. Koeficijent varijacije brzine u ovisnosti o scenariju simulacije – Test 2

Test broj	Ograničenje	Prosječna brzina	Standardna devijacija	CVS
2	80	113,98	16,13	0,142
	100	119,83	10,09	0,084
	120	123,99	6,14	0,049

Test 3

Kriteriji testa su:

- Prometno opterećenje: 30% kapaciteta
- Poštivanje ograničenja od strane vozača: 90%
- Ograničenje brzine: 120 km/h, 100 km/h, 80 km/h
- Podscenarij razmak između dvaju promjenjivih prometnih znakova: 500 m

Rezultati trećeg testa vidljivi su u tablici 6.

Tablica 6. Koeficijent varijacije brzine u ovisnosti o scenariju simulacije – Test 3

Test broj	Ograničenje	Prosječna brzina	Standardna devijacija	CVS
3	80	115,37	15,56	0,135
	100	120,25	10,04	0,083
	120	124,11	5,60	0,045

Budući da u prva tri testa na dionici autoceste vladaju uvjeti slobodnog prometnog toka, ograničavanjem brzine veoma neprimjetno se smanjio koeficijent varijacije brzina (iznimka je ograničenje od 80 km/h jer pri takvom intenzivnom ograničenju u uvjetima slobodnog prometnog toka vozači slabo korigiraju svoje brzine, pa je velika standardna devijacija brzina). Razlog neznatnom smanjenju CVS-a je velika standardna devijacija brzina jer dio vozača poštuje postavljeno ograničenje, a dio ne, pa se povećava razlika u brzinama. Dakle, pri vrlo malim opterećenjima prometnice ne može se znatno utjecati na smanjenje vrijednosti sudarnog potencijala korigiranjem koeficijenta varijacije brzina. Porastom stupnja poštivanja ograničenja brzine od strane vozača uočava se blago smanjenje koeficijenta varijacije u odnosu na test 1, što je vidljivo iz testa 2, te posebice u testu 3.

Test 4

Kriteriji testa su:

- Prometno opterećenje: 50% kapaciteta
- Poštivanje ograničenja od strane vozača: 30%
- Ograničenje brzine: 120 km/h, 100 km/h, 80 km/h
- Podscenarij razmak između dvaju promjenjivih prometnih znakova: 500 m

Rezultati 4. testa vidljivi su u tablici 7.

Tablica 7. Koeficijent varijacije brzine u ovisnosti o scenariju simulacije – Test 4

Test broj	Ograničenje	Prosječna brzina	Standardna devijacija	CVS
4	80	110,83	15,89	0,143
	100	117,58	9,79	0,083
	120	121,96	6,20	0,051

Test 5

Kriteriji testa su:

- Prometno opterećenje: 50% kapaciteta
- Poštivanje ograničenja od strane vozača: 70%
- Ograničenje brzine: 120 km/h, 100 km/h, 80 km/h
- Podscenarij razmak između dvaju promjenjivih prometnih znakova: 500 m

Rezultati testa 5 vidljivi su u tablici 8.

Tablica 8. Koeficijent varijacije brzine u ovisnosti o scenariju simulacije – Test 5

Test broj	Ograničenje	Prosječna brzina	Standardna devijacija	CVS
5	80	112,12	15,29	0,136
	100	118,24	9,69	0,082
	120	122,68	5,47	0,045

Test 6

Kriteriji testa su:

- Prometno opterećenje: 50% kapaciteta
- Poštivanje ograničenja od strane vozača: 90%
- Ograničenje brzine: 120 km/h, 100 km/h, 80 km/h
- Podscenarij razmak između dvaju promjenjivih prometnih znakova: 500 m

Rezultati testa 6 vidljivi su u tablici 9.

Tablica 9. Koeficijent varijacije brzine u ovisnosti o scenariju simulacije – Test 6

Test broj	Ograničenje	Prosječna brzina	Standardna devijacija	CVS
6	80	111,50	16,34	0,147
	100	118,76	9,66	0,081
	120	123,04	5,27	0,043

Usporedbom međusobnih rezultata iz testova 4, 5 i 6 zaključuje se da dolazi do blagog smanjenja vrijednosti koeficijenta varijacije brzina s povećanjem stupnja poštivanja ograničenja jer se smanjuje vrijednost standardne devijacije brzina.

Porastom iskorištenosti kapaciteta u odnosu na prva tri testa, malo je manja vrijednost CVS-a zbog blagog smanjenja prosječne brzine. Rezultat je logičan jer vozila više ne mogu voziti u uvjetima slobodnog prometnog toka, pa moraju blago smanjiti brzinu kretanja.

Test 7

Kriteriji testa su:

- Prometno opterećenje: 90% kapaciteta
- Poštivanje ograničenja od strane vozača: 30%
- Ograničenje brzine: 120 km/h, 100 km/h, 80 km/h
- Podscenarij razmak između dvaju promjenjivih prometnih znakova: 500 m

Rezultati testa 7 vidljivi su u tablici 10.

Tablica 10. Koeficijent varijacije brzine u ovisnosti o scenariju simulacije – Test 7

Test broj	Ograničenje	Prosječna brzina	Standardna devijacija	CVS
7	80	102,92	16,76	0,163
	100	113,59	9,99	0,088
	120	119,21	5,39	0,045

Test 8

Kriteriji testa su:

- Prometno opterećenje: 90% kapaciteta
- Poštivanje ograničenja od strane vozača: 70%
- Ograničenje brzine: 120 km/h, 100 km/h, 80 km/h
- Podscenarij razmak između dvaju promjenjivih prometnih znakova: 500 m

Rezultati testa 8 vidljivi su u tablici 11.

Tablica 11. Koeficijent varijacije brzine u ovisnosti o scenariju simulacije – Test 8

Test broj	Ograničenje	Prosječna brzina	Standardna devijacija	CVS
8	80	103,18	16,78	0,163
	100	114,66	10,04	0,088
	120	120,09	4,93	0,041

Test 9

Kriteriji testa su:

- Prometno opterećenje: 90% kapaciteta
- Poštivanje ograničenja od strane vozača: 90%
- Ograničenje brzine: 120 km/h, 100 km/h, 80 km/h
- Podscenarij razmak između dvaju promjenjivih prometnih znakova: 500 m

Rezultati testa 9 vidljivi su u tablici 12.

Tablica 12. Koeficijent varijacije brzine u ovisnosti o scenariju simulacije – Test 9

Test broj	Ograničenje	Prosječna brzina	Standardna devijacija	CVS
9	80	103,41	16,61	0,161
	100	114,35	10,37	0,091
	120	120,98	4,78	0,040

Promatrajući testove 7, 8 i 9 po horizontali (iskorištenje kapaciteta 90%), s porastom stupnja poštivanja ograničenja od strane vozača dolazi do blagog smanjenja vrijednosti CVS-a kod ograničenja brzine od 80 km/h i 120 km/h.

Pri znatnom iskorištenju kapaciteta autoceste i pri vrlo visokom stupnju poštivanja ograničenja brzine od strane vozača dolazi do blagog povećanja vrijednosti CVS-a u odnosu na nešto nižu iskorištenost kapaciteta i isti stupanj poštivanja ograničenja. Razlog leži u činjenici da veći broj vozila vozi blizu prosječne brzine (koja se smanjivala), pa ona vozila koja ne poštuju ograničenja utječu na povećanje standardne devijacije.

Promatrajući testove po vertikali (kad je poštivanje ograničenja jednako, a raste iskorištenje kapaciteta), ne mogu se uočiti neke bitne zakonitosti u promjeni odnosa vrijednosti CVS-a prije i poslije povećanja iskorištenosti kapaciteta, što je logično jer i dalje ostaje isti odnos vozača koji poštuju ograničenje i onih koji ne poštuju. Jedino se smanjila vrijednost prosječne brzine, pa su se vozila kretala brzinom koja je bliže ograničenju, te je niža, čime utječe na smanjenje težine ozljeda pri nastanku prometne nesreće.

Sljedeći testovi odnose se na drugi podscenarij u kojem je razmak između PPZ-ova 1 km.

Test 10

Kriteriji testa su:

- Prometno opterećenje: 30% kapaciteta
- Poštivanje ograničenja od strane vozača: 30%
- Ograničenje brzine: 120 km/h, 100 km/h, 80 km/h
- Podscenarij razmak između dvaju promjenjivih prometnih znakova: 1.000 m

Rezultati testa 10 prikazani su u tablici 13.

Tablica 13. Koeficijent varijacije brzine u ovisnosti o scenariju simulacije – Test 10

Test broj	Ograničenje	Prosječna brzina	Standardna devijacija	CVS
10	80	105,24	17,68	0,168
	100	122,00	4,37	0,036
	120	121,87	4,18	0,034

Test 11

Kriteriji testa su:

- Prometno opterećenje: 30% kapaciteta
- Poštivanje ograničenja od strane vozača: 70%
- Ograničenje brzine: 120 km/h, 100 km/h, 80 km/h
- Podscenarij razmak između dvaju promjenjivih prometnih znakova: 1.000 m

Rezultati testa 11 prikazani su u tablici 14.

Tablica 14. Koeficijent varijacije brzine u ovisnosti o scenariju simulacije – Test 11

Test broj	Ograničenje	Prosječna brzina	Standardna devijacija	CVS
11	80	104,89	17,48	0,167
	100	112,20	10,62	0,095
	120	122,05	4,33	0,035

Test 12

Kriteriji testa su:

- Prometno opterećenje: 30% kapaciteta
- Poštivanje ograničenja od strane vozača: 90%
- Ograničenje brzine: 120 km/h, 100 km/h, 80 km/h
- Podscenarij razmak između dvaju promjenjivih prometnih znakova: 1.000 m

Rezultati testa 12 prikazani su tablicom 15.

Tablica 15. Koeficijent varijacije brzine u ovisnosti o scenariju simulacije – Test 12

Test broj	Ograničenje	Prosječna brzina	Standardna devijacija	CVS
12	80	105,01	17,49	0,167
	100	112,60	10,87	0,097
	120	122,01	4,30	0,035

Pri slobodnom toku i razmaku promjenjivih prometnih znakova prema drugom podscenariju, ne može se utjecati na smanjenje koeficijenta varijacije brzine prema provedenoj simulaciji. Razlog leži u činjenici da vozači nakon nekog vremena, nakon uočavanja promjenjivog znaka, počinju ponovno voziti brzinom koju bi inače izabrali, pa ograničenje brzine nema velikog utjecaja, a uz to radi se o uvjetima slobodnog prometnog toka (pri takvim uvjetima nije se smanjio CVS ni sa smanjenim razmakom promjenjivih prometnih znakova). Simulacije daju nešto niže vrijednosti CVS-a za ograničenja brzine od 100 km/h i 120 km/h.

Test 13

Kriteriji testa su:

- Prometno opterećenje: 50% kapaciteta
- Poštivanje ograničenja od strane vozača: 30%
- Ograničenje brzine: 120 km/h, 100 km/h, 80 km/h
- Podscenarij razmak između dvaju promjenjivih prometnih znakova: 1.000 m

Rezultati 13. testa prikazani su u tablici 16.

Tablica 16. Koeficijent varijacije brzine u ovisnosti o scenariju simulacije – Test 13

Test broj	Ograničenje	Prosječna brzina	Standardna devijacija	CVS
13	80	102,56	17,38	0,169
	100	111,49	10,57	0,095
	120	120,94	4,30	0,036

Test 14

Kriteriji testa su:

- Prometno opterećenje: 50% kapaciteta
- Poštivanje ograničenja od strane vozača: 70%
- Ograničenje brzine: 120 km/h, 100 km/h, 80 km/h
- Podscenarij razmak između dvaju promjenjivih prometnih znakova: 1.000 m

Rezultati testa 14 prikazani su u tablici 17.

Tablica 17. Koeficijent varijacije brzine u ovisnosti o scenariju simulacije – Test 14

Test broj	Ograničenje	Prosječna brzina	Standardna devijacija	CVS
14	80	102,62	17,34	0,169
	100	111,70	10,59	0,095
	120	121,26	4,22	0,035

Test 15

Kriteriji testa su:

- Prometno opterećenje: 50% kapaciteta
- Poštivanje ograničenja od strane vozača: 90%
- Ograničenje brzine: 120 km/h, 100 km/h, 80 km/h
- Podscenarij razmak između dvaju promjenjivih prometnih znakova: 1.000 m

Rezultati testa 15 prikazani su u tablici 18.

Tablica 18. Koeficijent varijacije brzine u ovisnosti o scenariju simulacije – Test 15

Test broj	Ograničenje	Prosječna brzina	Standardna devijacija	CVS
15	80	102,93	17,22	0,167
	100	111,58	10,69	0,096
	120	121,19	4,25	0,035

Povećanjem stupnja iskorištenosti kapaciteta dionice autoceste na 50%, uz povećavanje stupnja poštivanja ograničenja brzine od strane vozača, smanjila je se prosječna brzina kretanja svih vozila, međutim došlo je do povećavanja standardne devijacije (osim u slučaju blagog ograničenja brzine od 120 km/h). Povećanjem stupnja poštivanja ograničenja nije donijelo primjetan trend smanjenja vrijednosti CVS-a.

Test 16

Kriteriji testa su:

- Prometno opterećenje: 90% kapaciteta
- Poštivanje ograničenja od strane vozača: 30%
- Ograničenje brzine: 120 km/h, 100 km/h, 80 km/h
- Podscenarij razmak između dvaju promjenjivih prometnih znakova: 1.000 m

Rezultati testa 16 prikazani su tablicom 19.

Tablica 19. Koeficijent varijacije brzine u ovisnosti o scenariju simulacije – Test 16

Test broj	Ograničenje	Prosječna brzina	Standardna devijacija	CVS
16	80	98,32	16,72	0,170
	100	109,89	10,66	0,097
	120	119,38	3,93	0,033

Test 17

Kriteriji testa su:

- Prometno opterećenje: 90% kapaciteta
- Poštivanje ograničenja od strane vozača: 70%
- Ograničenje brzine: 120 km/h, 100 km/h, 80 km/h
- Podscenarij razmak između dvaju promjenjivih prometnih znakova: 1.000 m

Rezultati testa 17 prikazani su tablicom 20.

Tablica 20. Koeficijent varijacije brzine u ovisnosti o scenariju simulacije – Test 17

Test broj	Ograničenje	Prosječna brzina	Standardna devijacija	CVS
17	80	97,56	16,27	0,167
	100	109,53	10,50	0,096
	120	119,52	3,85	0,032

Test 18

Kriteriji testa su:

- Prometno opterećenje: 90% kapaciteta
- Poštivanje ograničenja od strane vozača: 90%
- Ograničenje brzine: 120 km/h, 100 km/h, 80 km/h
- Podscenarij razmak između dvaju promjenjivih prometnih znakova: 1.000 m

Rezultati testa 18 prikazani su tablicom 21.

Tablica 21. Koeficijent varijacije brzine u ovisnosti o scenariju simulacije – Test 18

Test broj	Ograničenje	Prosječna brzina	Standardna devijacija	CVS
18	80	96,51	16,31	0,169
	100	109,55	10,49	0,096
	120	119,56	3,88	0,032

Povećanjem iskorištenosti kapaciteta na 90% te postupnim povećavanjem stupnja poštivanja ograničenja brzine od strane vozača, također nije zabilježen trend značajnog smanjenja vrijednosti koeficijenta varijacije brzine. Pri većem prometnom opterećenju prometnice dolazi do značajnijeg smanjenja prosječne brzine kretanja vozila koja se kreće blizu brzine prikazane na promjenjivom prometnom znaku.

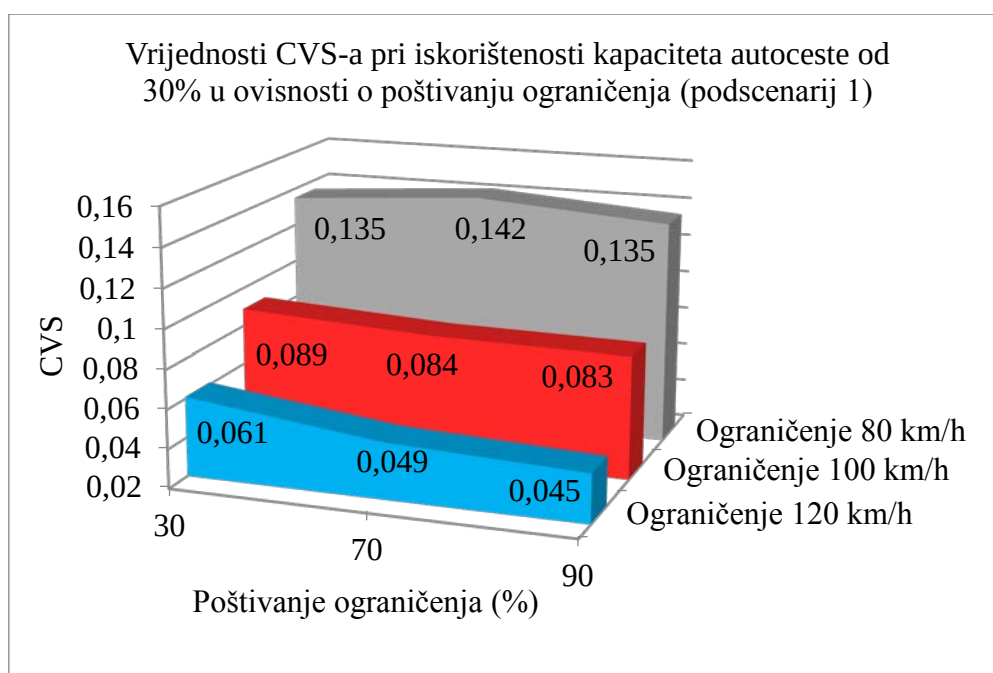
Promatrajući po vertikali (uz jednak stupanj poštivanja ograničenja, ali uz rast prometnog opterećenja prometnice), također ne dolazi do znatnijih zakonitosti u kretanju vrijednosti koeficijenta varijacije brzina. Primjetno je da dolazi do smanjenja prosječne brzine, te blagog smanjenja standardne devijacije, međutim vrijednosti dobivene simulacijom za standardnu devijaciju su nešto više nego kod razmaka znakova od 500 m, što za posljedicu ima veću vrijednost koeficijenta varijacije brzina.

5.2. Rasprava

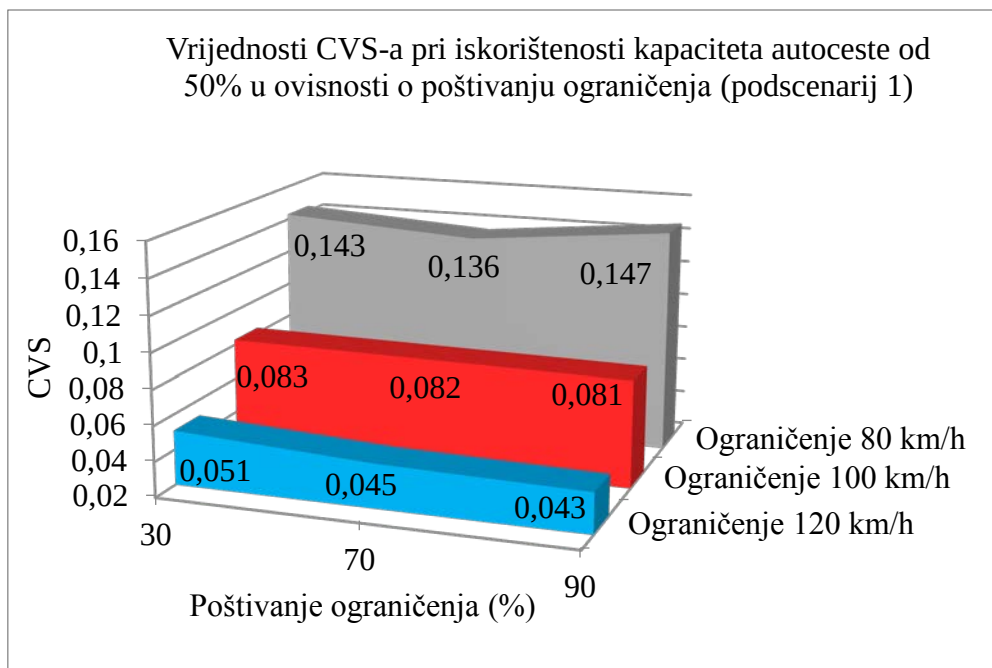
Na temelju provedenih simulacija dobiveni su rezultati koji su pokazali ovisnost koeficijenta varijacije brzine o stupnju iskorištenosti kapaciteta prometnice i o stupnju poštivanja ograničenja brzine prikazanog na promjenjivom prometnom znaku od strane vozača.

Važno je napomenuti da simulacije ne odražavaju stvarno stanje u prometnom toku, ali mogu ukazivati na neke zakonitosti prometnog toka u ovisnosti o promjeni određenih parametara, a koje bi u stvarnim uvjetima bilo teže izvesti. Također je važno napomenuti da su podaci prikazani u rezultatima simulacije u prethodnom poglavlju dobiveni, također, i na prvom detektoru. Na prvom detektoru se u ovisnosti o stupnju poštivanja zakonski ograničene brzine od 130 km/h od strane vozača, smanjivala i vrijednost standardne devijacije i koeficijenta varijacije brzine, kao što se moglo i očekivati. Međutim, rezultati koji su bitni očekivani su na drugom detektoru nakon dvostrukog prikaza PPZ-ova s različitim međusobnim razmakom i s različitim ograničenjima brzine.

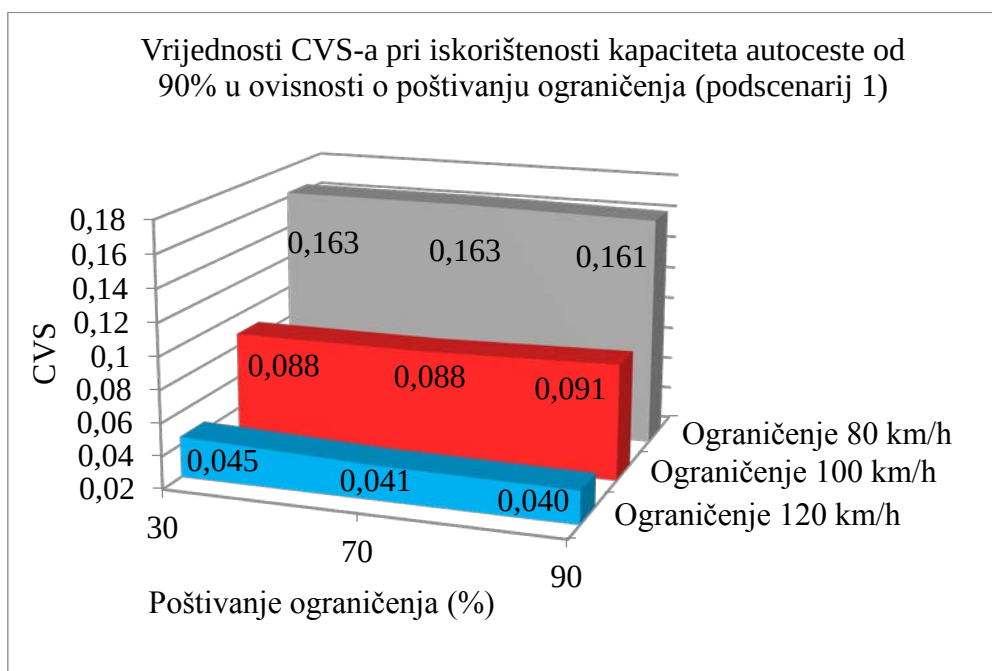
U prvom podscenariju i razmaku od 500 m između dvaju PPZ-ova, moguće je uočiti da s porastom stupnja poštivanja ograničenja brzine od strane vozača dolazi do blagog smanjenja prosječne brzine vožnje vozila, uz nešto niže vrijednosti standardne devijacije. S nižom standardnom devijacijom i vrijednost koeficijenta varijacije brzina postajala je niža (grafikoni 2, 3 i 4).



Grafikon 2. Prikaz vrijednosti CVS-a dobivenih testovima 1, 2 i 3



Grafikon 3. Prikaz vrijednosti CVS-a dobivenih testovima 4, 5 i 6



Grafikon 4. Prikaz vrijednosti CVS-a dobivenih testovima 7, 8 i 9

Iz prikazana tri grafikona zamjetno je da se vrijednost koeficijenta varijacije brzine smanjuje s povećanjem stupnja poštivanja ograničenja od strane vozača. Izuzetak je ograničenje od 80 km/h gdje se vrijednost CVS-a smanjila tek pri iskorištenosti kapaciteta od 90%. Smanjenje vrijednosti CVS-a s porastom stupnja poštivanja ograničenja od strane vozača ide u prilog tezi

da primjena promjenjivog ograničenja brzine prikazanog na PPZ-u uvelike ovisi o stupnju poštivanja tog ograničenja od strane vozača.

Promatrajući iskorištenost kapaciteta, ne mogu se lako uočiti zakonitosti kretanja vrijednosti CVS-a u ovisnosti o zauzetosti kapaciteta prometnice, pa u ovom području postoji potencijal za dodatna istraživanja kojima se računalnim simulacijama mogu zadati precizniji parametri.

Grafikoni su, također, pokazali da se vrijednost CVS-a smanjuje u slučaju nižeg stupnja ograničenja brzine prometnog toka pa će pri znatnijem ograničenju brzine (u odnosu na brzinu koju bi vozači inače odabrali) porasti i vrijednost CVS-a.

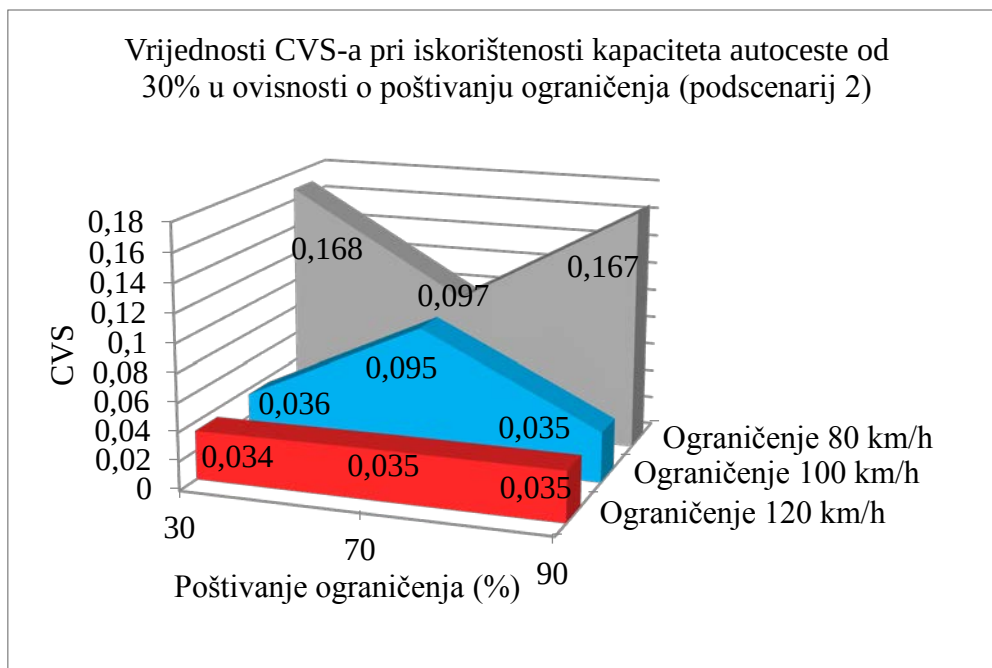
Time se pokazalo da je moguće primjenom promjenjivog ograničenja brzine, uz unaprjeđenje stupnja poštivanja ograničenja brzine od strane vozača, zaista djelovati na povećanje stupnja sigurnosti prometnog toka na autocesti.

Velika odstupanja u vrijednostima standardne devijacije i koeficijenta varijacije brzina pokazuju da u najvećoj mjeri sam sustav promjenjivog ograničenja brzine ovisi o stupnju poštivanja ograničenja brzine od strane vozača.

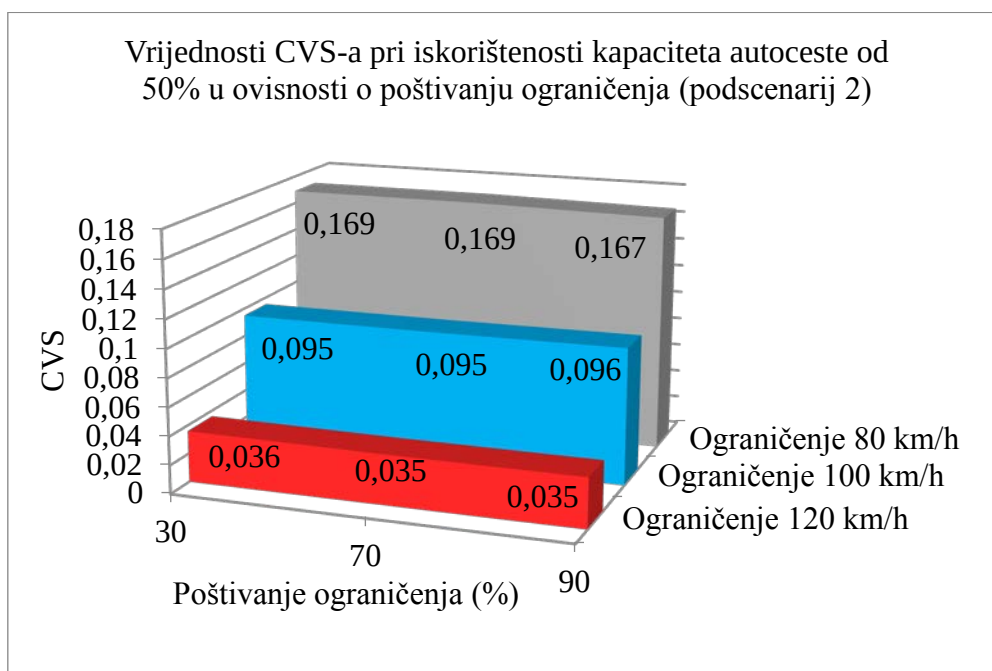
S povećanjem opterećenja prometnice, vozila su blago smanjila brzinu, te nije uočena zakonitost kretanja vrijednosti CVS-a (pri istom stupnju poštivanja ograničenja brzine). CVS se povećao za ograničenje brzine od 80 km/h, a smanjio za ograničenje brzine od 120 km/h, budući da je ta brzina bliža brzini koju bi vozači izabrali za vožnju da ograničenja nema.

Na temelju svega toga, može se reći da je simulacija, s obzirom na svoje scenarije i parametre, pokazala da vrijednost koeficijenta varijacije brzine u većoj mjeri ovisi o stupnju poštivanja ograničenja od strane vozača, nego o stupnju iskorištenja kapaciteta.

U drugom podscenariju, u kojem je razmak između dvaju PPZ-ova iznosio 1.000 m, nisu uočene zakonitosti u kretanju vrijednosti CVS-a.

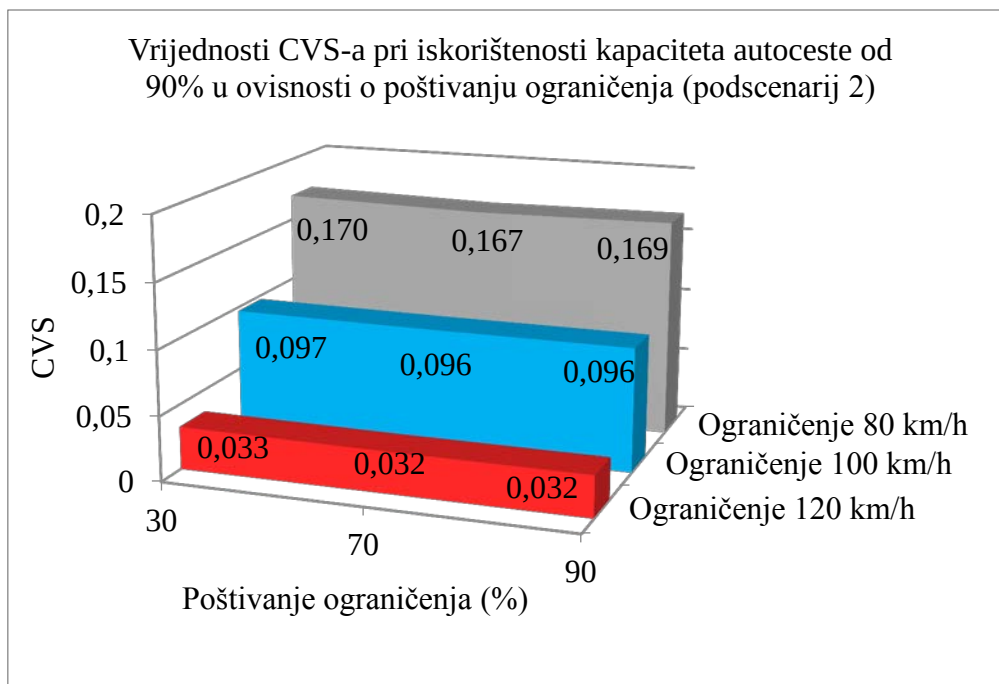


Grafikon 5. Prikaz vrijednosti CVS-a dobivenih testovima 10, 11 i 12



Grafikon 6. Prikaz vrijednosti CVS-a dobivenih testovima 13, 14 i 15

Grafikoni 5, 6 i 7 pokazuju da je došlo samo do blagog smanjenja CVS-a u ovisnosti o stupnju poštivanja ograničenja brzine od strane vozača. Dakle, potvrđuje se činjenica da vrijednost CVS-a ovisi o stupnju poštivanja ograničenja, ali u ovom podscenariju nije došlo do znatnog, nego blagog smanjenja.



Grafikon 7. Prikaz vrijednosti CVS-a dobivenih testovima 16, 17 i 18

Zakovitost u kretanju vrijednosti CVS-a u ovisnosti o iskorištenosti kapaciteta u drugom scenariju nije zabilježena, pa je moguće provesti dodatna istraživanja u ovom području kako bi se podesili parametri simulacije što bliži stvarnom stanju prometnog toka na autocesti.

Promatrajući drugi podscenarij, s jedne strane došlo je do smanjenja prosječne brzine, ali s druge strane standardna devijacija je porasla u odnosu na vrijednosti iz prvog podscenarija (osim pri ograničenju od 120 km/h gdje je simulacija dala veoma dobre rezultate i nisku vrijednost CVS-a). Razlog boljih rezultata u prvom podscenariju leži u činjenici da, nakon što uoče ograničenje brzine, nakon određenog vremena vozači ponovno povećavaju brzinu kretanja vozila. Stoga je potrebno češće vozačima ukazivati na ograničenje brzine, kako bi ga se oni ravnomjernije držali. Dio zasluga za bolje rezultate u prvom podscenariju može se pripisati i uvjetima i karakteristikama prometnog toka koji su zadani u simulacijskom alatu, s obzirom na to da se ručno zadaju vrijednosti parametara u programu Vissim 5.4. Da bi se dobili najtočniji rezultati, bilo bi potrebno detaljnije razraditi scenarije simulacije i provesti terenska ispitivanja. Terenska ispitivanja nije uvijek moguće provesti za sve scenarije simulacije bez odobrenja nadležnih organa vlasti, jer se takvom vrstom ispitivanja može utjecati na sigurnost realnog prometnog toka na autocesti. Stoga se simulacijama mogu, na siguran način, dobiti određene zakonitosti koje vrijede u stvarnim uvjetima na prometnicama, te olakšati evaluacija više ponuđenih varijanti rješenja.

5.3. Inteligentna prilagodba brzine

S obzirom da su dosadašnja istraživanja i iskustva pokazala da uspješnost primjene sustava promjenjivog ograničenja brzine uvelike ovisi o stupnju poštovanja ograničenja brzine od strane vozača, postoji nekoliko načina rješavanja ovog problema. Pristup prisile vozača, koji je objašnjen u jednom od prethodnih poglavlja, svakako nije jedini, a vjerojatno ni najbolji. S razvojem tehnologije sve se više govori o inteligentnoj prilagodbi brzine – Intelligent Speed Adaptation (ISA).

ISA je kooperativna tehnologija upravljanja brzinom vozila. Zahtjeva precizne informacije o poziciji vozila i ograničenju brzine, što se može postići kombinacijom globalnog pozicijskog sustava (GPS-a) i digitalnih cestovnih karata. Također, zahtjeva vezu s dijelovima vozila, poput ubrzavanja vozila, paljenja, dovoda goriva, mjenjača i brzina [11].

ISA je sustav ugrađen u vozilo koji potiče vozače na veće poštovanje ograničenja brzine. Ta ograničenja su uglavnom fiksna, ali ubrzanim razvojem ovog sustava prilagodba brzine omogućava se i promjenjivim ograničenjima brzine. ISA koristi informacije o poziciji vozila u prometnoj mreži i podatke o ograničenju brzine na toj dionici. ISA može poticati vozače da poštuju ograničenje brzine svuda u mreži. ISA je skupni naziv za nekoliko sustava [58]:

- Otvorena ISA upozorava vozača (zvučno ili vidno) da je prekršio ograničenje brzine. Vozač samostalno odlučuje hoće li usporiti ili ne. Ovo je informativni ili savjetodavni sustav.
- Polu-otvorena ISA povećava pritisak na papučici akceleratora („papučica gasa“) kad se vozi iznad ograničenja brzine. Održavanje iste brzine kretanja je moguće, ali manje udobno zbog protu-pritiska.
- Zatvorena ISA ograničava brzinu automatski pri prekoračenju ograničene brzine i nije moguće voziti preko ograničenja. Ovaj sustav može biti obvezujući ili dobrovoljni. U obvezujućem vozilo preuzima kontrolu nad brzinom svaki put, a u dobrovoljnom vozač odlučuje hoće li ovaj sustav uključiti ili isključiti. Sustav funkcionira tako da ISA preuzima kontrolu nad dovodom goriva.

Unatoč velikom potencijalu ISA sustava za povećanje stupnja poštivanja ograničenja od strane vozača na prometnicama, postoji nekoliko problema, primjerice:

- Kompenzacijsko ponašanje – postoje indicije da će vozači vrijeme izgubljeno zbog ograničenja brzine nastojati nadoknaditi bržom vožnjom na dionicama gdje ISA nije aktivan
- Smanjena pozornost – ISA može smanjiti pozornost na situacije na cesti i u prometnom toku tijekom neaktivnosti sustava. To može značiti zaboravljanje usporavanja pri ulasku u zonu smirenog prometa ili ubrzavanje na izlasku iz takvih zona.
- Pretjerano povjerenje – uporaba ISA-e može rezultirati time da se vozači u potpunosti oslanjaju na sustav te nedovoljno promatraju okolnosti u realnom vremenu.
- Osjećaj frustriranosti – ograničenje brzine ISA-om može proizvesti frustraciju vozača.

ISA bi mogla otežati pretjecanje i spriječiti ubrzavanje kako bi se spriječile opasne situacije. Moguće je i da vozači jednostavno zaborave isključiti sustav prilikom pretjecanja. Također, potencijalni problemi se mogu pojaviti ako dođe do promjene ograničenja brzine na nižu vrijednost prilikom manevra pretjecanja [59]. Nekima bi ovakav sustav mogao predstavljati ekstreman primjer automatizacije koji oduzima čovjeku pravo na odlučivanje. Međutim, pozitivna je činjenica da će vozači moći obratiti više pozornosti na prometnicu i okolinu, budući da više ne trebaju neprestano pratiti brzinometer i konstantno prilagođavati brzinu.

Očito pred ISA sustavom stoje još brojni problemi koje je potrebno riješiti, no nedvojbeno je da se ovim sustavom mogu ostvariti brojne koristi u području sigurnosti cestovnog prometa. Korištenjem ISA-e i budućom prilagodbom na autoceste i promjenjivo ograničenje brzine, moguće je smanjiti prosječnu brzinu vozila i varijaciju brzina, čime se postiže harmonizacija prometnog toka, a ujedno se rješava problem nepoštivanja ograničenja brzine od strane vozača. Bolji rezultati mogu se postići u ovisnosti o stupnju penetracije ISA sustava na tržište. Intenzivnijom uporabom sustava, gdje veći udio vozila koristi prednosti ovog sustava, moguće je zaista ostvariti znatan napredak u cestovnoj sigurnosti, a precizan učinak ostavlja se za buduća istraživanja u ovom području.

6. Zaključak

Jedan od najvažnijih aspekata prometa je njegova sigurnost. Upravo je sigurnost prometa veliki izazov suvremenog društva, a upravljanje sigurnošću prometa složen zadatak. S obzirom na njegovu utkanost u svakodnevni život, cestovni promet predstavlja područje u kojem je potrebno poduzeti dodatne napore s ciljem zaštite svih sudionika. Stoga se sigurnost cestovnog prometa može definirati kao skup mjera i metoda primijenjenih u svrhu zaštite svih sudionika u cestovnom prometu uz smanjenje rizika od njihovog stradavanja, budući da svaka prometna nesreća, osim osobne tragedije, predstavlja i gubitak za društvo s ekonomskog gledišta.

Suvremeno društvo omogućava primjenu brojnih mjera iz područja inteligentnih transportnih sustava u cilju ostvarivanja cilja povećanja razine sigurnosti cestovnog prometa. Kroz sustave vezane uz vozila, infrastrukturu i sustave zasnovane na kooperaciji, ITS je dobra nadgradnja cestovnog prometnog sustava, a koja se može korisno iskoristiti u povećanju sigurnosti.

Jedna od takvih primjena ITS-a je sustav promjenjivog ograničenja brzine na autocestama prikazanog na promjenjivim prometnim znakovima. Kako su autoceste zatvoreni sustav, upravo su one pogodne za ovakvo upravljanje. Radi se o mjeri koja u ovisnosti o uvjetima koji vladaju na autocesti mijenja ograničenje brzine koje je prikazano na promjenjivom prometnom znaku. Promjenom ograničenja brzine nastoji se djelovati na prometni tok kako bi se smanjile varijacije u brzinama vozila jer pri velikim varijacijama postoji velika mogućnost nastanka sudara.

Najveći problem u razvoju sustava upravljanja promjenjivim ograničenjem brzine (VSLC – Variable Speed Limit Control) je nizak stupanj poštivanja prikazanog ograničenja brzine od strane vozača. Vozači općenito voze blizu brzine ograničene zakonom i malo vode računa o uvjetima na kolniku. Ako to ograničenje brzine preko VSLC-a znatno odstupa od brzine koju bi inače odabrali, poštuju ga još manje. Ipak, postoji dio vozača koji poštuje prikazano ograničenje brzine, pa VSLC ima potencijal na smanjenje brzine vožnje na autocesti, a što je još važnije, na smanjenje varijacije brzina. Varijacija brzina, računana kroz koeficijent varijacije brzine, samo je jedan od elemenata funkcije sudarnog potencijala, koja definira opasnost od nastanka prometne nesreće. S obzirom da se pokazalo da se promjenjivim ograničenjem brzine ipak može djelovati na prometni tok, VSLC ima dobar potencijal u smanjenju vrijednosti sudarnog potencijala.

Funkciju sudarnog potencijala potrebno je uključiti u algoritam upravljanja sigurnošću koji izračunava opasnost od nastanka prometne nesreće te prikazom ograničenja brzine vozačima na promjenjivim prometnim znakovima, nastoji djelovati na prometni tok preventivno. Prevencija incidentnih situacija uz stvarnovremensko prikupljanje podataka, njihovu obradu i prikaz informacija sudionicima u prometu, predstavlja najbolji put u ostvarivanju cilja povećanja sigurnosti na autocestama.

Kroz rad su provedene određene simulacije prometnih tokova u kojima se ispitivao utjecaj ograničenja brzine prikazanog na promjenjivom prometnom znaku. Iako simulacije u cijelosti ne mogu preslikati realni sustav i podložne su promjenjivim rezultatima u ovisnosti o uključenim parametrima, ipak mogu ukazivati na određene zakonitosti koje postoje u stvarnom prometnom sustavu na autocesti. Tako su simulacije pokazale da je moguće primjenom promjenjivog ograničenja brzine prikazanog na promjenjivim prometnim znakovima, utjecati na smanjenje varijacije brzina, koja je računana kroz koeficijent varijacije brzina. Koeficijent varijacije brzina je, pak, važan čimbenik funkcije sudarnog potencijala, pa se tako smanjenjem njegove vrijednosti izravno utjecalo i na povećanje razine sigurnosti.

Kako bi se smanjile varijacije brzina prikazom ograničenja brzine na PPZ-u, moguće je prikazati tekstualne poruke vozačima poput „**VOZAČI OPREZ ! POŠTUJTE OGRANIČENJE BRZINE !**“, kako bi oni u dodatnoj mjeri bili svjesni ograničenja brzine. Razlog je taj što su simulacije pokazale da se s porastom stupnja poštivanja ograničenja brzine od strane vozača, smanjuje koeficijent varijacije brzine. Uz takvu mjeru, potrebno je poduzeti i određene mjere prisile vozačima na poštivanje ograničenja brzine, poput agresivnijih zakonskih rješenja kažnjavanja vozača koji krše propise, primjenom nadzornih kamera, dodatnim objašnjenjima vozačima o potrebi ograničenja brzine, te inovativnim rješenjima poput inteligentne prilagodbe brzine i drugih mjera iz područja inteligentnih transportnih sustava.

Simulacijama se dodatno pokušalo utvrditi i u kojoj mjeri razmak između PPZ-ova utječe na varijacije brzina, te se moglo uočiti da razmak uistinu ima određeni utjecaj. Simulacije su pokazale da se time može utjecati i na smanjenje prosječne brzine, ali se ipak treba voditi računa i o učincima na harmonizaciju prometnog toka. Dakako, za dobivanje točnih rezultata ipak je potrebno provesti temeljita terenska ispitivanja u realnim uvjetima, u onim scenarijima u kojima je to moguće, pa je ova tematika zanimljiva za obavljanje određenih terenskih istraživanja u budućnosti.

Literatura

- [1] Cerovac, V.: Tehnika i sigurnost prometa, Fakultet prometnih znanosti Sveučilišta u Zagrebu, Zagreb, 1997.
- [2] www.mup.hr, Ministarstvo unutarnjih poslova Republike Hrvatske, dostupno na internet stranici: <http://www.mup.hr/main.aspx?id=96991>, posjećeno 20. ožujka 2015.
- [3] Boodman, D. M.: Safety and Systems Analysis, With Applications to Traffic Safety, 33 Law and Contemporary Problems pp. 488-511, 1968.
- [4] Bošnjak, I.: Inteligentni transportni sustavi 1, Fakultet prometnih znanosti Sveučilišta u Zagrebu, Zagreb, 2006.
- [5] Sršen, M.: Inteligentni transportni sustavi u upravljanju cestovnom mrežom, *Hrvatsko znanstveno društvo za promet*, p. p. 141, siječanj/travanj 2008., Vol 28, Br. 1-2.
- [6] Ezell, S.: Explaining International IT Application Leadership: Intelligent Transportation Systems, The Information Technology & Innovation Foundation, 2010.
- [7] Direktiva Europske unije 2010/40/EC.
- [8] Huzjan, B.: Model upravljanja sigurnošću prometa na autocestama, doktorski rad, Fakultet prometnih znanosti Sveučilišta u Zagrebu, Zagreb, 2014.
- [9] Chen, X., Qu, D.: Application of Intelligent Transport Systems to improve road traffic safety in China, *2011 International Conference on Multimedia Technology (ICMT)*, Hangzhou, 2011.
- [10] Bošnjak, I., Mandžuka, S., Šimunović, Lj.: Mogućnosti inteligentnih transportnih sustava u poboljšanju stanja sigurnosti u prometu, Znanstveni skup: Nezgode i nesreće u prometu i mjere za njihovo sprječavanje, HAZU, Zagreb, 2007.
- [11] Road Safety - Impact of New Technologies, Organisation for Economic Co-Operation and Development, Paris, 2003.
- [12] Williams, B.: Intelligent Transport Systems Standards, Artech House Inc., Boston, 2008.
- [13] McKeever, B. B.: Working Paper: Estimating the Potential Safety Benefits of Intelligent Transportation Systems, Mitretek Systems, Washington D.C., 1998.
- [14] Mandžuka, S., Bošnjak, I.: Inteligentni transportni sustav - ITS Temelj učinkovitosti i sigurnosti prometa, Zagreb, 2007., dostupno na internet stranici:

<https://sadkom.wordpress.com/2008/10/>, posjećeno 25. travnja 2015.

- [15] Nacionalni program za razvoj i uvođenje inteligentnih transportnih sustava u cestovnom prometu za razdoblje od 2014. do 2018. godine, Narodne novine br. 82/2014.
- [16] Happ, Z.: Modeliranje sustava sigurnosti cestovnog prometa, doktorska disertacija, Fakultet prometnih znanosti Sveučilišta u Zagrebu, Zagreb, 2008.
- [17] Ivanjko, E., Gregurić, M., Kovačić, K., Mandžuka, S., Gold, H.: Computer Vision and Intelligent Systems in Road Traffic Control, *International Conference: Problematic of Urban Transport and Sustainable Urban Mobility in Algeria: Challenges and Solutions*, University of Batna, Batna, 2014.
- [18] Lee, C., Hellinga, B., Saccomanno, F.: Assessing Safety Benefits of Variable Speed Limits, Transportation Research Record, Waterloo, Canada, 2004.
- [19] Hegyi, A., De Schutter, B., Hellendoorn, J.: Optimal coordination of variable speed limits to suppress shock waves, Delft, The Netherlands: IEEE Transactions on Intelligent Transportation System, 2005.
- [20] Hegyi, A., Hoogendoorn, S., Schreuder, M., Stoelhorst, M.: SPECIALIST: A dynamic speed limit control algorithm based on shock wave theory, *Conference on Intelligent Transportation Systems*, Beijing, 2008.
- [21] Nissan, A.: Evaluation of Variable Speed Limits: Empirical Evidence and Simulation Analysis of Stockholms, doktorska disertacija, Stockholm, 2010.
- [22] U. S. Department of Transportation: Traffic Detector Handbook: Third Edition - Volume I, Federal Highway Administration, Publication Number: FHWA-HRT-06-108, May 2006.
- [23] Van den Hoogen, E., Smulders, S.: Control by variable speed signs: results of the Dutch experiment, *Road traffic monitoring and control, Conference Publication 391*, London, 1994.
- [24] Lee, C., Hellinga, B., Saccomanno, F.: Real-Time Crash Prediction Model for the Application to Crash Prevention in Freeway Traffic, Transportation Research Board, 82nd Annual Meeting, Washington D.C., 2003.
- [25] Katz, B., O'Donnel, C., Donoughe, K., Atkinson, J., Finley, M., Balke, K., Kuhn, B., Warren, D.: Guidelines for the use of Variable Speed Limit System in wet weather, Federal Highway Administration, Office of Safety, Washington D.C., 2012.

- [26] Sisiopiku, V. P.: Variable Speed Control: Technologies and Practice, *Proceedings of the 11th Annual Meeting of ITS America*, Michigan, 2001.
- [27] Tafti, M. F.: An Investigation on the Approaches and Methods used for Variable Speed Limit Control, *8th Transportation and Traffic Engineering Conference of Iran*, Teheran, 2009.
- [28] Talebpour, A., Mahmassani, H. S., Hamdar, S. H.: Speed Harmonization: Effectiveness Evaluation under Congested Conditions, Evanston, UK, Northwestern University, 2012.
- [29] Grumert, E.: Cooperative Variable Speed Limit Systems, Norrköping, Linköping University Institute of Technology, 2014.
- [30] Vujić, M.: Inteligentno upravljanje prometnih tokova regulacijom ograničenja brzine; sažeci s predavanja, Zagreb, 2014.
- [31] Povey, L. J., Frith, W. J., Keall, M. D.: An investigation of the relationship between speed enforcement, vehicle speeds and injury crashes in New Zealand, *Land Transport Safety Authority*, June 2002.
- [32] Ulfarsson, G. F., Shankar, V. N., Vu, P.: In-Vehicle Signing and Variable Speed Limit Evaluation, Washington State Transportation Center, Washington D.C., 2001.
- [33] Zackor, H.: Self-sufficient control of speed on freeways, *International Symposium on Traffic Control Systems*, vol. 2A, Berkeley, California University, 1979.
- [34] Kwon, E., Brannan, D., Shouman, K., Isackson, C., Arseneau, B.: Development and Field Evaluation of Variable Advisory Speed Limit System for Work Zones, *Transportation Research Board*, pp. 12-18, 2007.
- [35] Hellinga B., Mandelzys, M.: Impact of Driver Compliance on the Safety and Operational Impacts of Freeway Variable Speed Limit Systems, *ASCE Journal of Transportation*, pp. 16-17, 2010.
- [36] Huzjan B., Šoštarić, M., Madžuka, S.: Analiza poštivanja znakova ograničenja brzina na autocestama u Republici Hrvatskoj, Znanstveno-istraživački projekt 7. okvirnog programa EU komisije "Intelligent Cooperative Sensing for Improved Traffic Efficiency" 2012-2013, EC-FP7-317671, Zagreb, 2013.
- [37] Tasmanian Government: Variable Speed Limit System - Tasman Highway, Department of Infrastructure, Energy and Resources, dostupno na internet stranici: http://www.transport.tas.gov.au/roadsafety/speed/variable_speed_limit_system_-_tasman_highway, posjećeno 15. ožujka 2015.

- [38] Katava, D., Ćosić, M.: Modeliranje utjecaja pretjecanja vozila u sustavu upravljanja sigurnošću prometa na dionici autoceste primjenom funkcije sudarnog potencijala, Fakultet prometnih znanosti Sveučilišta u Zagrebu, rad predan na Natječaj za Rektorovu nagradu, Zagreb, 2015.
- [39] Pravilnik o prometnim znakovima, signalizaciji i opremi na cestama, Narodne novine br. 64/2005.
- [40] www.prometna-signalizacija.com, Prometna signalizacija, dostupno na internet stranici: <http://www.prometna-signalizacija.com/vertikalna-signalizacija/promjenjiva-signalizacija/>, posjećeno 18. ožujka 2015.
- [41] Smulders, S., Helleman, D.: Variable speed control: State-of-the-art and synthesis, Variable speed control, 9th International Conference on Road Transport Information and Control, London, 1998.
- [42] Hughes, R., Council, F.: On Establishing the Relationship(s) between Freeway Safety and Peak Period Operations: Performance Measurement and Methodological Considerations, 78th Annual Meeting of Transportation Research Board, Washington D.C., 1999.
- [43] Corby, M. J., Saccomanno, F.: Analysis of Freeway Accident Detection, Transportation Research Record 1603, TRB, National Research Council pp.80-89, Washington D.C., 1998.
- [44] Lee, C., Saccomanno, F., Hellinga, B.: Analysis of Crash Precursors on Instrumented Freeways, Transportation Research Record, Waterloo, Canada, 2002.
- [45] Abdel-Aty, M., Pande, A., Uddin, N., Dillmore, J., Pemmanaboina, R.: Relating Crash Occurrence to Freeway Loop Detectors Data, Weather Conditions and Geometric Factors, Department of Civil & Environmental Engineering, University of Central Florida, Orlando, 2005.
- [46] Zhenga, Z., Ahna, S., Mo, C. M.: Impact of Traffic Oscillations on Freeway Crash Occurrences, *Accident - Analysis and Prevention*, March 2010.
- [47] Garber, N. J., Ehrhartt, A. A.: The Effect of Speed, Flow and Geometric Characteristics on Crash Rates for Different Types of Virginia Highways, Transportation Research Council, Charlottesville, Virginia, 2010.
- [48] Solomon, D.: Accidents on main rural highways related to speed, driver, and vehicle, U.S. Department of Commerce, Washington D.C., 1964.

- [49] Hauer, E.: Accidents, Overtaking and Speed Control, Technion, Israel Institute of Technology, Haifa, 1970.
- [50] Cirillo, J. A.: Testimony of Julie Anna Cirillo Before the Senate Highways and Transportation Committee, Washington D.C., 2003.
- [51] Frith, W. J., Toomath, J. B.: The New Zealand open road speed limit, *Accident Analysis and Prevention* 14, 1982.
- [52] Keall, M. D., Frith, W. J.: Roadside speed surveys: design and estimation, Paper presented in the Tehcnical programme of the IPENZ Annual Conference, Wellington, 1997.
- [53] Frith, W. J., Patterson, T. L.: Speed variation, absolute speed and their contribution to safety with special reference to the work of Solomon, *IPENZ Transportation Group Technical Conference*, Wellington, 2001.
- [54] Huzjan, B., Šoštarić, M., Mandžuka, S.: Analiza poštivanja znakova ograničenja brzina na autocestama u Republici Hrvatskoj, Znanstveno-istraživački projekt 7. okvirnog programa EU komisije „Intelligent Cooperative Sensing for Improved Traffic Efficiency“ 2012-2013., EC-FP7-317671, Zagreb, 2013.
- [55] Čavar, I.: Materijali s predavanja iz kolegija Simulacije u prometu, Fakultet prometnih znanosti Sveučilišta u Zagrebu, Zagreb, 2012.
- [56] Papageorgiou, G., Maimaris, A.: *Intelligent Transportation Systems* Edited by Ahmed Abdel-Rahim, InTech, Rijeka, 2012.
- [57] Papageorgiou, G., Damianou, P., Pitsillides, A., Aphas, T., Charalambous, D., Iannou, P.: *Modelling and Simulation of Transportation Systems: a Scenario Planning Approach*, 12th Symposium on Transportation Systems, September, 2009.
- [58] [www.ec.europa.eu, European Commission](http://ec.europa.eu/transport/road_safety/specialist/knowledge/speed/new_technologies_new_opportunities/intelligent_speed_adaptation_isa_en.htm), dostupno na internet stranici: http://ec.europa.eu/transport/road_safety/specialist/knowledge/speed/new_technologies_new_opportunities/intelligent_speed_adaptation_isa_en.htm, posjećeno 28. kolovoza 2015.
- [59] www.theaa.com, Automobile Association, dostupno na internet stranici: http://www.theaa.com/public_affairs/reports/intelligent-speed-adaptation.html, posjećeno 28. kolovoza 2015.

Popis slika

Slika 1. Shematski prikaz upravljanja sigurnošću.....	11
Slika 2. Osnovni princip rada VSLC sustava	20
Slika 3. Skica mjerenja prometa na dionici autoceste video nadzorom	21
Slika 4. Skica mjerenja prometa na dva presjeka autoceste	22
Slika 5. Skica mjerenja prometa na jednom presjeku autoceste	22
Slika 6. Primjer promjenjive prometne signalizacije na autocesti	24
Slika 7. Solomonova krivulja	31
Slika 8. Raspon vrijednosti čimbenika devijacije brzina	36
Slika 9. Shematski prikaz za prikaz promjenjivog ograničenja ovisno o devijaciji brzine.....	37
Slika 10. Shematski prikaz modela upravljanja sigurnošću izračunom čimbenika opasnosti od nastanka prometne nesreće.....	38
Slika 11. Algoritam za upravljanje sigurnošću, integriran s postojećim algoritmima za upravljanje prometom	39
Slika 12. Dijagram toka algoritma za upravljanje sigurnošću prometa na autocestama.....	40
Slika 13. Odnos realnog sustava, modela i simulacije	42
Slika 14. Predložena metoda prometnog modeliranja i simulacije prema Papageorgiou-u.....	43
Slika 15. Shematski prikaz dionice autoceste s rasporedom znakova za prvi podscenarij simulacije	44
Slika 16. Shematski prikaz dionice autoceste s rasporedom znakova za drugi podscenarij simulacije	45

Popis tablica

Tablica 1. Prosječna brzina i standardna devijacija u provedenim mjerenjima	34
Tablica 2. Prvi podscenarij simulacije	46
Tablica 3. Drugi podscenarij simulacije.....	46
Tablica 4. Koeficijent varijacije brzine u ovisnosti o scenariju simulacije – Test 1.....	47
Tablica 5. Koeficijent varijacije brzine u ovisnosti o scenariju simulacije – Test 2.....	48
Tablica 6. Koeficijent varijacije brzine u ovisnosti o scenariju simulacije – Test 3.....	48
Tablica 7. Koeficijent varijacije brzine u ovisnosti o scenariju simulacije – Test 4.....	49
Tablica 8. Koeficijent varijacije brzine u ovisnosti o scenariju simulacije – Test 5.....	49
Tablica 9. Koeficijent varijacije brzine u ovisnosti o scenariju simulacije – Test 6.....	50
Tablica 10. Koeficijent varijacije brzine u ovisnosti o scenariju simulacije – Test 7.....	51
Tablica 11. Koeficijent varijacije brzine u ovisnosti o scenariju simulacije – Test 8.....	51
Tablica 12. Koeficijent varijacije brzine u ovisnosti o scenariju simulacije – Test 9.....	52
Tablica 13. Koeficijent varijacije brzine u ovisnosti o scenariju simulacije – Test 10.....	53
Tablica 14. Koeficijent varijacije brzine u ovisnosti o scenariju simulacije – Test 11.....	53
Tablica 15. Koeficijent varijacije brzine u ovisnosti o scenariju simulacije – Test 12.....	54
Tablica 16. Koeficijent varijacije brzine u ovisnosti o scenariju simulacije – Test 13.....	55
Tablica 17. Koeficijent varijacije brzine u ovisnosti o scenariju simulacije – Test 14.....	55
Tablica 18. Koeficijent varijacije brzine u ovisnosti o scenariju simulacije – Test 15.....	56
Tablica 19. Koeficijent varijacije brzine u ovisnosti o scenariju simulacije – Test 16.....	57
Tablica 20. Koeficijent varijacije brzine u ovisnosti o scenariju simulacije – Test 17.....	57
Tablica 21. Koeficijent varijacije brzine u ovisnosti o scenariju simulacije – Test 18.....	58

Popis grafikona

Grafikon 1. Prikaz broja vozila koja voze određenom brzinom ovisno o ograničenju brzine .	34
Grafikon 2. Prikaz vrijednosti CVS-a dobivenih testovima 1, 2 i 3.....	59
Grafikon 3. Prikaz vrijednosti CVS-a dobivenih testovima 4, 5 i 6.....	60
Grafikon 4. Prikaz vrijednosti CVS-a dobivenih testovima 7, 8 i 9.....	60
Grafikon 5. Prikaz vrijednosti CVS-a dobivenih testovima 10, 11 i 12.....	62
Grafikon 6. Prikaz vrijednosti CVS-a dobivenih testovima 13, 14 i 15.....	62
Grafikon 7. Prikaz vrijednosti CVS-a dobivenih testovima 16, 17 i 18.....	63