

Sveučilište u Zagrebu
Fakultet prometnih znanosti

Davor Katava
Mladenka Čosić

MODELIRANJE UTJECAJA PRETJECANJA VOZILA U SUSTAVU UPRAVLJANJA
SIGURNOSTI PROMETA NA DIONICI AUTOCESTE PRIMJENOM FUNKCIJE
SUDARNOG POTENCIJALA

Zagreb, 2015.

Ovaj rad izrađen je na Zavodu za inteligentne transportne sustave Fakulteta prometnih znanosti Sveučilišta u Zagrebu pod vodstvom izv. prof. dr. sc. Sadka Mandžuke, i predan je na natječaj za dodjelu Rektorove nagrade za akademsku godinu 2014./15.

Sadržaj rada

1. Uvod	1
2. Upravljanje sigurnošću prometa na dionici autoceste	3
2.1. Pristupi upravljanja sigurnošću prometa	3
2.2. Princip rada sustava promjenjivih ograničenja brzine	4
2.3. Primjena stvarnovremenskih podataka o prometnom toku	7
2.4. Sudarni potencijal.....	8
2.4.1. Varijacija brzina na fiksnoj lokaciji	11
2.4.2. Promjena srednje brzine između dvije točke mjerenja	14
2.4.3. Učestalost pretjecanja vozila.....	15
2.4.4. Odnos prometnog opterećenja i kapaciteta (V/C – Volume/Capacity).....	18
2.4.5. Utjecaj objekata.....	19
2.4.6. Meteorološki uvjeti	19
2.4.7. Doba dana.....	19
2.5. Opći i specifični cilj istraživanja.....	22
3. Algoritam procjene učestalosti pretjecanja vozila.....	23
3.1. Varijante algoritma.....	23
3.2. Algoritam za određivanje učestalosti pretjecanja vozila mjerenjem prometa na dva presjeka autoceste	25
3.3. Algoritam za određivanje učestalosti pretjecanja vozila mjerenjem prometa na jednom presjeku autoceste.....	33
4. Provedba mjerenja i rezultati.....	35
4.1. Opis postupka mjerenja i plan rada	35
4.2. Provedba mjerenja i obrada rezultata mjerenja	39
4.3. Rezultati i točnost algoritma	40

5. Rasprava	44
5.1. Prihvatljivost algoritma procjene učestalosti pretjecanja vozila	44
5.2. Prihvatljivost primjene mjerne opreme	45
5.3. Prihvatljivost algoritma u realnim sustavima upravljanja sigurnošću	46
6. Zaključci	47
7. Zahvale	49
Popis literature	50
SAŽETAK	53
SUMMARY	54
O AUTORIMA	55
POPIS SLIKA	56
POPIS TABLICA	56
POPIS GRAFIKONA	56
PRILOZI	57

1. Uvod

Prometne nesreće na cestovnim prometnicama s ekonomskog gledišta rezultiraju velikim gubicima za društvo u cjelini. Značaj sigurnosti u cestovnom prometu prepoznat je na međunarodnoj razini, pa su Ujedinjeni narodi 2010. godine pokrenuli program „Desetljeće akcije za sigurnost cestovnog prometa“ kojemu je cilj 50-postotno smanjenje broja žrtava u cestovnom prometu do 2020. godine. Na navedeni program oslanja se i Europska komisija svojim direktivama [1] te Republika Hrvatska svojim programima smanjenja broja nesreća i smrtnosti na cestovnim prometnicama. Vlada Republike Hrvatske je 2011. godine donijela Nacionalni program sigurnosti cestovnog prometa za razdoblje od 2011. do 2020. godine s ciljem da se broj poginulih prepolovi do 2020. godine (NN 59/2011). Značaj sigurnosti cestovnog prometa 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 zbog nemogućnosti doprinosa 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.

Moguće mjere u smjeru povećanja sigurnosti prometa na autocestama mogu se svrstati u pasivne i aktivne. U pasivne se mogu ubrojiti zakonska prisila (*law enforcement*) koja se ogleda u policijskom nadzoru, korištenju kamera za detekciju pretjecanja i brzina vozila i bilježenju registarskih oznaka, te klasična statična prometna signalizacija. Među aktivne mjere može se ubrojiti sustav promjenjivih ograničenja brzine (*Variable Speed Limit Control-VSLC*), koji kao mjera iz područja inteligentnih transportnih sustava (ITS), postaje sve popularnija u razvijenom dijelu svijeta. 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 [2]. Suštinu ITS-a čine sustavna upravljačka i informacijsko-komunikacijska rješenja ugrađena u prometnu infrastrukturu, vozila, upravljačke centre i različite komunikacijsko-računalske terminale. Sustav upravljanja prometnom na autocestama je dio

tehnološke cjeline ITS-a pod nazivom sustavi vezani uz infrastrukturu [3]. Navedene sustave moguće je iskoristiti s ciljem povećanja sigurnosti cestovnog prometa.

Sustav promjenjivih ograničenja brzine [4] omogućuje dinamičku promjenu postavljenog ograničenja brzine ovisno o uvjetima prometnog toka, uvjeta na prometnicama i vremenskim uvjetima. 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 zamišljen u svrhu smanjenja razlike u brzinama (disperzija brzina) na opasnim dionicama autocesta čime se postiže harmonizacija prometnog toka. To za posljedicu ima smanjenje naleta na prednje vozilo i smanjenje broja pretjecanja vozila, čime se izravno utječe na podizanje razine sigurnosti autoceste.

Širi cilj rada je izvršiti istraživanje u području upravljanja sigurnošću prometa na autocestama korištenjem sustava promjenjivih ograničenja brzine, a u smislu harmonizacije prometnog toka. Navedeni postupak zasnovan je na primjeni teorije sudarnog potencijala, kao mjere veličine rizika za nastupanje prometne nesreće. U tom smislu, izračun sudarnog potencijala je zasnovan na stvarnovremenskim podacima. Uži cilj rada je razvoj novog jednostavnog algoritam za procjenu učestalosti pretjecanja vozila, kao dijela izračuna ukupnog sudarnog potencijala.

U drugom poglavlju se najprije daje pregled problema i pristupa integralnog upravljanja sigurnošću prometa na autocestama. Daje se pregled dosadašnjih istraživanja u području teorije sudarnog potencijala, objašnjavaju se njegove temeljne značajke i značajke njegovih podmodela s posebnim naglaskom na podmodel pretjecanja vozila.

U trećem poglavlju opisuje se predloženi model pretjecanja vozila kao novi algoritam za procjenu učestalosti pretjecanja na autocestama zasnovan samo na mjerenje prometnog toka na ulaznom i izlaznom presjeku ispitne dionice autoceste.

U četvrtom poglavlju opisana su terenski provedena mjerenja, obrađeni njihovi rezultati te definirana točnost algoritma i rezultati njegove primjene.

U petom poglavlju daje se prikaz dobivenih rezultata te mogućnosti primjene u realnim situacijama kroz varijante rješenja. Provedena je i odgovarajuća rasprava u smislu analize prednosti i nedostataka predložene metode.

U šestom poglavlju provode se zaključna razmatranja te prijedlog budućih istraživanja u ovom području primjene inteligentnih transportnih sustava.

2. Upravljanje sigurnošću prometa na dionici autoceste

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 [5]. Koriste se različiti pristupi za upravljanje sigurnošću, a nove mogućnosti upravljanja omogućene su razvojem inteligentnih transportnih sustava.

2.1. Pristupi upravljanja sigurnošću prometa

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 [6]. 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. Razvojem informacijsko-komunikacijskih tehnologija prepoznat je potencijal inteligentnih transportnih sustava (ITS) u poboljšanju razine sigurnosti prometa na autocestama, kao i u prometnom sustavu općenito. ITS obuhvaća sve oblike transporta i promišlja sve elemente transportnog sustava – vozilo, infrastrukturu i vozača (ili korisnika) [2].

ITS je omogućio razvoj novog pristupa povećanju sigurnosti prometa na autocestama koji se može nazvati aktivnim. Najbolji primjer aktivnog pristupa jest sustav promjenjivih ograničenja brzine (*Vehicle Speed Limit*) koji se posljednjih desetljeća ubrzano razvija i ugrađuje na autoceste diljem svijeta.

2.2. Princip rada sustava promjenjivih ograničenja brzine

Istraživanja [7] 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 vozila 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 [8, 9]. 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 vjetrova ili snježnih nanosa) [10]. 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 [11].

Prema istraživanjima u Nizozemskoj [12] 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.

U svijetu se trenutno koristi nekoliko pristupa u primjeni VSLC-a, ovisno o željenom utjecaju VSLC-a na prometni tok. Ti pristupi [13] 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

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

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;
- nije došlo 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 brzinskih ograničenja 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 [13].

Uzevši u obzir oba pristupa u primjeni VSLC-a, može se zaključiti da su primarni ciljevi primjene VSLC-a [13, 14, 15]:

- harmoniziran prometni tok (što znači smanjenje varijacije brzina, a time i učestalosti pretjecanja vozila);
- smanjenje vremena putovanja i povećanje pouzdanosti vremena putovanja;
- povećanje iskorištenosti prometnih trakova;
- smanjenje učestalosti stani-kreni vožnje;
- povećanje sigurnost;
- smanjenje stresa u vožnji.

Pogrešno je mišljenje da se VSLC sustav treba primjenjivati samo u razdobljima velikog prometnog opterećenja. VSLC sustav se može koristiti i izvan razdoblja zagušenja i vršnog opterećenja prometnica i imati pozitivne učinke na prometni tok [16].

VSLC sustav se sastoji od promjenjivih znakova (PPZ) raspoređenih na autocestama i povezanih komunikacijskim sustavom u centar za upravljanje prometom [17]. PPZ imaju prednost u primjeni nad statičkim prometnim znakovima jer vozači bolje uočavaju ovakvu

vrstu prometne signalizacije. Međutim, činjenica koja još uvijek vrijedi je ta 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 [18].

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 [11].

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 [19] te vidljivost i tip prometnog znaka. Prema istraživanjima [20] 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 [21]. 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.

U posljednje vrijeme postaje sve značajnija primjena kooperativnog pristupa u upravljanju cestovnim prometom [22]. Ovaj pristup se zasniva na razmjeni informacija između raznih entiteta (vozila, infrastrukture, pješaka i dr.), a u svrhu optimizacije nekog integralnog kriterija u obavljanju zajedničke zadaće. Najpoznatiji predstavnik ovog pristupa u području upravljanja sigurnosti cestovnog prometa je inteligentna prilagodba brzine vozila (*Intelligent Speed Adaptation - ISA*).

2.3. 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 [23].

Neka od tih istraživanja [24, 25] 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 [23].

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 [26].

2.4. 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 ([26], p. 3).

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 [24, 25] 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 [26].

Prema studiji [26] učestalost sudara je izražena kao funkcija nekoliko čimbenika prometa. Predloženi model predviđanja ima sljedeći općeniti oblik:

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

Ovaj rad će se bazirati na modelu [23] koji je dijelom prilagođen hrvatskim autocestama, a koji je, pak, zasnovan na modelu razvijenom od autora Lee et al. [26] iz 2002. godine i koji je dodatno modificiran novim istraživanjima iz 2003. i 2004. godine od strane istih autora [7, 27]. Prema početnom modelu [7], 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 rasipanja 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 [7] 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 [28].

Općeniti zaključak 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** ([7], p. 13).

Kako je navedeno, postoje znatne razlike između autocesta na kojima je razvijan navedeni model i hrvatskih autocesta. Sva navedena istraživanja obavljena su na tzv. urbanim autocestama sa 6 do 12 prometnih trakova s induktivnim petljama svakih pola milje (≈ 0.8 km). Prema tome, predloženi modeli sprječavanja nastanka prometnih nesreća prilagođeni su tehničkim karakteristikama takvih prometnica. Stoga nijedan model nije moguće primijeniti na autoceste s jednim voznim i jednim pretjecajnim trakom te zaustavnim trakom u jednom smjeru. Shodno tome, modificiran je početni model prema karakteristikama hrvatskih autocesta [23].

Utvrđeni su čimbenici koji na hrvatskim autocestama najviše utječu na funkcioniranje modela sprječavanja nastanka prometnih nesreća u sklopu određivanja sudarnog potencijala [23]:

1. varijacija brzina na fiksnoj lokaciji
2. promjena srednje brzine između dvije točke
3. učestalost pretjecanja vozila
4. odnos prometnog opterećenja i kapaciteta
5. prisutnost objekata (tuneli, čvorišta)

6. vremenski uvjeti
7. doba dana (dan/noć)

U nastavku rada ukratko će se objasniti značajke svakog od podmodela te posebno izdvojiti problem učestalosti pretjecanja vozila i predložiti prilagođeni algoritam za njegov izračun, kako bi se cjelokupni model mogao primijeniti na hrvatskim autocestama.

2.4.1. Varijacija brzina na fiksnoj lokaciji

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 [26]:

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

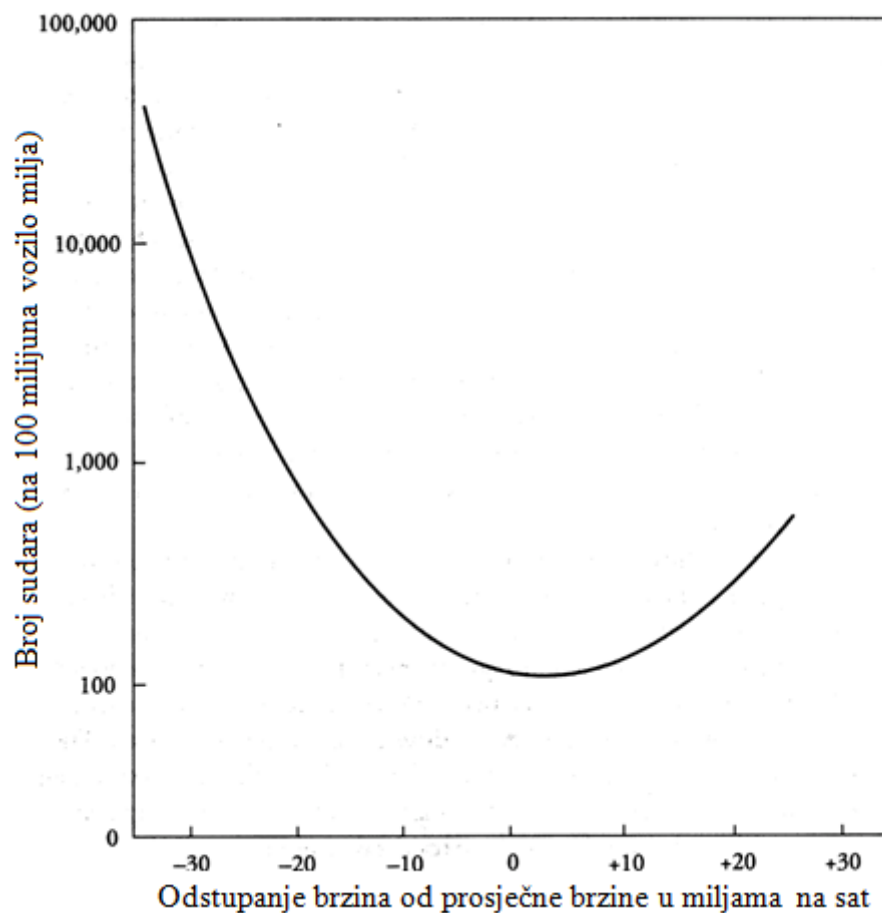
gdje je:

- 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 [23].

Navedenu tvrdnju potkrijepio je još 1964. godine David Solomon svojim istraživanjem [29] 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 1.

Vozila koja voze mnogo brže ili sporije od srednje brzine prometnog toka imaju veću vjerojatnost sudjelovati u incidentnim situacijama [30].



Slika 1. Solomonova krivulja [29]

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 [31].

U jednadžbi uvrštenoj u istraživanje prilagođenosti ovog podmodela na hrvatske autoceste ([23], p.108), 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.

Istraživanje [23] 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 i koji je znatno važniji za sigurnost odvijanja prometa.

Radi pojednostavljenja modela 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 smatrat će se jednim prometnim trakom). Prema tome, u istraživanju [23] je korišten pojednostavljeni proračun čimbenika prema obrascu:

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

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

2.4.2. Promjena srednje brzine između dvije točke mjerenja

Drugi čimbenik koji utječe na opasnost od nastanka prometne nesreće je promjena prosječne brzine kretanja prometnog toka između dvije točke na promatranoj dionici autoceste [23]. Promjenu prosječne brzine prometnog toka između dvije točke uzrokuje vrijednost promjene brzine na promatranoj dionici na temelju čega se može donijeti zaključak o ponašanju prometnog toka. Ako vrijednost čimbenika promjene prosječne brzine na promatranoj dionici poprimi značajniju promjenu, može se zaključiti da je iz nekih razloga došlo do znatnih ubrzanja ili usporenja. Manje promjene prosječne brzine znače da je brzina vozila gotovo konstantna, da zapravo nema znatnih ubrzanja ili usporenja. Jednadžba (4) se koristi za proračun promjene brzine na promatranoj dionici [27].

$$Q = \bar{s}_1 - \bar{s}_2 = \frac{t_p}{\Delta t} \sum_{t=t^*-\Delta t}^{t^*} \left(\frac{1}{n_1} \sum_{i=1}^{n_1} s_{1i}(t) \right) - \frac{t_p}{\Delta t} \sum_{t=t^*-\Delta t}^{t^*} \left(\frac{1}{n_2} \sum_{i=1}^{n_2} s_{2i}(t) \right) \quad (4)$$

gdje je:

- Q – prosječna razlika brzine između početka i kraja promatrane dionice (km/h);
- \bar{s}_1, \bar{s}_2 – prosječne brzine tijekom perioda Δt na krajnjim točkama promatrane dionice (km/h);
- t_p – trajanje vremenskog intervala promatranja brzine (sekunde);
- Δt – vrijeme promatranja (sekunde);
- t^* – vrijeme nastanka prometne nesreće;
- $s_{1i}(t)$ – brzina na prometnom traku i u vremenu t na kraju dionice (km/h);
- $s_{2i}(t)$ – brzina na prometnom traku i u vremenu t na kraju dionice (km/h);
- n_1, n_2 – broj prometnih traka na krajnjim točkama promatrane dionice.

Radi pojednostavljenja modela, razlika brzine između dvije točke promatrat će se na cjelokupnom presjeku kolničkog traka, odnosno cijeli presjek kolničkog traka smatrat će se jednim prometnim trakom. Pojednostavljen proračun čimbenika razlike brzine računat će se prema obrascu:

$$Q = \bar{s}_1 - \bar{s}_2 \quad (5)$$

Težinski čimbenik promjene brzine ovisan je o brzini pri kojoj se promjena događa, kao i čimbenik devijacije brzine, u proračun će se uvrstiti i ta ovisnost pa se modificirani proračun prikazuje kao:

$$Q = \frac{\bar{s}_1 - \bar{s}_2}{\bar{s}_1} \quad (6)$$

Budući da razlika brzine između dvije točke može biti pozitivna ili negativna, čimbenik Q računa se korištenjem apsolutne vrijednosti, kako je navedeno u istraživanju [23]:

$$Q = \left| \frac{\bar{s}_1 - \bar{s}_2}{\bar{s}_1} \right| \quad (7)$$

2.4.3. Učestalost pretjecanja vozila

Kako bi se prikazao utjecaj promjene prometnog traka zbog pretjecanja vozila na sudarni potencijal, bočne varijacije su uključene u cjelokupni model [7]. Ovaj pokazatelj predstavlja prosječnu međutračnu (između susjednih prometnih trakova) kovarijancu razlike opterećenja između gornjih i donjih dijelova prometnog toka na određenoj dionici autoceste (COVV). Dakle, izračunat je temeljem prosječne kovarijance razlike opterećenja pojedinog prometnog traka na promatranoj dionici autoceste. U podmodel je uključena kovarijanca jer predstavlja vrijednost koja pokazuje koliko se dvije varijable mijenjaju zajedno, za razliku od varijance koja opisuje promjene u vrijednosti samo jedne varijable.

Autori Lee et al. ([7], p. 4) izračunali su ovaj čimbenik prema izrazu:

$$COVV = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^{n-1} |cov(V_i, V_{i+1})| = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{t=t^*-\Delta t}^{t^*} [(\Delta v_i(t) - \Delta \bar{v}_i)(\Delta v_{i+1}(t) - \Delta \bar{v}_{i+1})] \quad (8)$$

gdje je:

- n – broj prometnih trakova
- V_i – vremenski niz $\Delta v_i(t)$ u periodu Δt
- t^* – stvarno vrijeme nastanka sudara
- Δt – vrijeme promatranja (sekunde)

$\Delta v_i(t)$ – razlika u opterećenju između gornjih i donjih dijelova toka lokacija na prometnom traku i u vremenskom periodu t

$\Delta \bar{v}_i$ – prosječna razlika u opterećenju na traku i u periodu Δt

Koeficijent učestalosti promjene prometnog traka prikazan gornjom jednadžbom (COVV) nije relevantan za tip autocesta kakve postoje u Republici Hrvatskoj jer pretjecajni trak služi samo za izvođenje radnje pretjecanja, a ne i za vožnju. Stoga ovaj način nije primjeren za određivanje učestalosti promjene prometnog traka (učestalosti pretjecanja vozila) na hrvatskim autocestama.

U prilagodbu čimbenika karakteristikama hrvatskih autocesta može se uračunati broj sporih vozila (teretna vozila). Teretna vozila, osim znatnog utjecaja na broj pretjecanja, djeluju i na nastanak šok-valova izazivajući prisilu kod osobnih vozila koja moraju brzinu smanjiti i prilagoditi brzini teretnih vozila. To se događa u situaciji kada jedno teretno vozilo pretječe drugo, pri čemu su razlike u njihovim brzinama male, pa je ovo još jedna potvrda podmodela 2 koji se odnosi na promjenu brzine između dvije točke.

Stoga se u ovom podmodelu trebaju razmatrati broj teretnih vozila koji utječu na promjenu prometnih trakova, te broj vozila koja voze ispod određene brzine (**granična brzina**), budući da i ona povećavaju broj pretjecanja vozila na dionici.

Istraživanje iz 2014. godine [23] na hrvatskim autocestama nije se dublje bavilo istraživanjem ovog podmodela, nego je dan aproksimativan izraz za proračun učestalosti pretjecanja vozila za autoceste s jednim voznim i jednim pretjecajnim trakom:

$$P = u(nT) + u(N_{V < \text{ograničenja}}) \quad (9)$$

gdje je:

P – učestalosti pretjecanja vozila;

$u(nT)$ – udio teških vozila u promatranom vremenu Δt ;

$N_{V < \text{ograničenja}}$ – broj vozila u periodu Δt koja voze sporije od postojećeg ograničenja.

Budući da istraživanje na testnoj dionici nije moglo utvrditi točne podatke o broju pretjecanja vozila, autor je učestalost pretjecanja prikazao pojednostavljeno kroz udio teretnih vozila (za koje je pretpostavio da će biti pretečena na određenoj dionici) te kroz udio osobnih vozila koja

voze znatno sporije od ograničenja, te za koje se također pretpostavlja da će biti pretečena na određenoj dionici. Pojednostavljena formula glasila je:

$$P = \frac{nT}{q} + \frac{nO_{v<ograničenje}}{q} \quad (10)$$

gdje je:

P – učestalost pretjecanja

nT – broj teretnih vozila

$nO_{v<ograničenje}$ – broj osobnih vozila koja voze brzinom ispod brzine ograničenja

q – ukupan broj vozila u promatranom periodu

Kako bi se kvantificirala dodatna opasnost pretjecanja teretnih vozila, udio teških vozila ponderiran je koeficijentom 2. U nedostatku egzaktnih podataka o povećanju opasnosti kod pretjecanja teretnih vozila, učestalost pretjecanja je prikazana kao

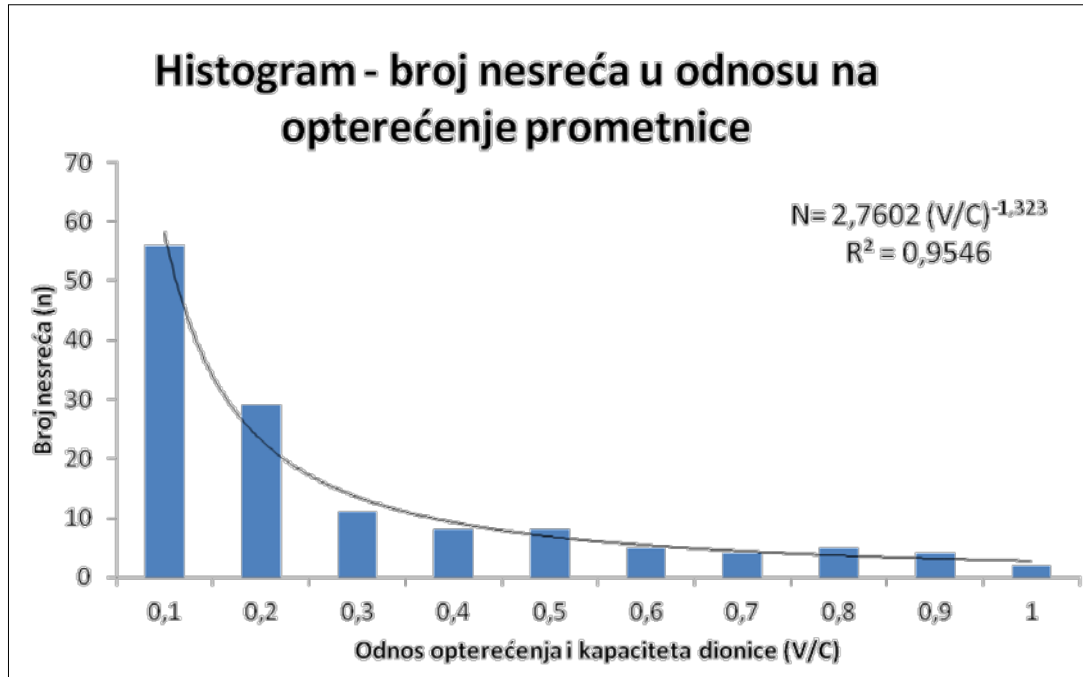
:

$$P = 2 * \frac{nT}{q} + \frac{nO_{v<ograničenje}}{q} \quad (11)$$

Kako se navedeno istraživanje nije dublje bavilo problemom praktičnog izračunavanja učestalosti pretjecanja, uži cilj ovog rada je dodatno istraživanje u tom području. Točniji podaci dobili bi se video nadzorom, koji precizno može izračunati broj pretjecanja. Međutim ovaj pristup je veoma zahtjevan i skup. Način predložen u ovom radu zasniva se na mjerenju prometa (na jednom ili dva presjeka) kojim se dobivaju manje točni podaci, ali ipak dovoljno točni za procjenu učestalosti pretjecanja čime se značajno smanjuju troškovi postupka.

2.4.4. Odnos prometnog opterećenja i kapaciteta (V/C – Volume/Capacity)

Prema istraživanju na hrvatskim autocestama [23] utvrđena je znatna ovisnost između broja prometnih nesreća i prometnog opterećenja.



Slika 2. Histogram odnosa broja nesreća u odnosu na opterećenje i kapacitet dionice [23]

Histogramom (slika 2) je prikazana vjerojatnost nastanka prometne nesreće koja je obrnuto proporcionalna opterećenju odnosno gustoći prometa na autocesti. Kod opterećenja dionice koje je iznosilo 20% kapaciteta prometnice dogodio se najveći broj nesreća i dokazana je čvrsta ovisnost vjerojatnosti nastanka nesreće o prometnom opterećenju.

U Republici Hrvatskoj za autoceste postoji model smanjivanja brzine sustavom svjetlosnih promjenjivih znakova (SPZ-a) u cilju povećanja propusne moći. Kada odnos V/C dostigne kritičnu vrijednost propusne moći za određenu brzinu, brzina će se prioritarno smanjivati postojećim algoritmom.

2.4.5. Utjecaj objekata

Autoceste u Republici Hrvatskoj sadrže veliki broj objekata kao što su tuneli, vijadukti, naplatne postaje, benzinske postaje, restorani i sl. Istraživanjem [32] je dokazan utjecaj objekata na nastanak prometnih nesreća na autocestama. Prema istraživanju izvršenom na hrvatskim autocestama [23] zaključeno je da je udio nesreća na objektima proporcionalan udjelu duljine objekta u ukupnoj duljini analizirane dionice te da objekti nemaju utjecaj na vrstu i tip nesreća koje se žele spriječiti primjenom modela. Iz tog razloga utjecaj objekata nije integriran u model upravljanja sigurnošću prometa na autocestama.

2.4.6. Meteorološki uvjeti

Dosadašnja istraživanja o utjecaju meteoroloških uvjeta [26, 28, 33] dokazala su da su vremenski uvjeti zaista važan čimbenik sigurnosti prometa na autocestama. Prema istraživanjima ovisnosti broja prometnih nesreća i vremenskih uvjeta, odnosno stanja kolnika za vrijeme nesreća (suh, mokar, pod snijegom) dobiven je podatak da se 71% nesreća događa u povoljnim meteorološkim uvjetima, odnosno u uvjetima suhog kolnika [23]. U Republici Hrvatskoj na nekim autocestama već postoje algoritmi uključivanja promjenjivih ograničenja brzine s obzirom na vremenske prilike, te je zaključeno da ti algoritmi imaju pozitivan utjecaj na sigurnost prometa [23]. U skladu s istraživanjem [26] vremenski uvjeti se dijele na normalne i loše. U slučaju loših vremenskih uvjeta prioritetno se uključuje postojeći algoritam svjetlosnih tekstualnih znakova (STZ-a) ili svjetlosnih promjenjivih znakova (SPZ-a) temeljem vremenskih prilika, a tek onda računa opasnost od nastanka prometne nesreće.

2.4.7. Doba dana

Čimbenik utjecaja doba dana također nije uziman u obzir pri određivanju vjerojatnosti nastanka prometne nesreće [34]. Uzet je tek u prethodnom modelu upravljanja sigurnošću prometa na autocestama iz 2014. godine [23]. Kao doba dana definirane su vrijednosti dan i noć. Udio prometnih nesreća koje su se dogodile tijekom noći moguće je definirati izrazom:

$$N = \frac{N_{PN(noć)}}{N_{PN(ukupno)}} \quad (12)$$

gdje je:

$N_{PN(noć)}$ – broj prometnih nesreća koje su se dogodile tijekom noći

$N_{PN(ukupno)}$ – ukupan broj prometnih nesreća

Istraživanje [23], nadalje, definira da je prometno opterećenje autoceste znatno manje u noćnim satima, pa je udio prometnih nesreća koji se dogodio tijekom noći potrebno dovesti u korelaciju s odnosom prometnog opterećenja u dnevnim i noćnim satima.

Prema tome je definirano da udio prometa u noćnim satima u ukupnom prometnom toku tijekom 24 sata iznosi:

$$N = \frac{q(noć)}{q(ukupno)} \quad (13)$$

gdje je:

$q(noć)$ – prometno opterećenje tijekom noćnih sati

$q(ukupno)$ – ukupno prometno opterećenje tijekom 24 sata

Korelaciju broja nesreća koje su se dogodile tijekom noćnih sati i intenzitet prometa u noćnom satima može se izraziti kao:

$$k = \frac{M}{N} \quad (14)$$

odnosno:

$$k = \frac{N_{PN(noć)}}{N_{PN(ukupno)}} * \frac{q(ukupno)}{q(noć)} \quad (15)$$

Vjerojatnost nastanka prometne nesreće tijekom noći moguće je prikazati kao:

$$p = 1 - k \quad (16)$$

Na kraju navedenog istraživanja [23], autor je zaključio da matematički izraz modela, koji se može koristiti za procjenu opasnosti nastanka prometne nesreće na tipu autoceste kakav postoji u Republici Hrvatskoj, ima sljedeći oblik:

$$n = [n(CVS) + n(Q) + n(P) + n(V)] * M \quad (17)$$

gdje je:

n – ukupna opasnost od nastanka prometne nesreće

$n(CVS)$ – opasnost od nastanka nesreće zbog rasipanja brzina na fiksnoj lokaciji

$n(Q)$ – opasnost od nastanka nesreće zbog promjene srednje brzine između dvije točke

$n(P)$ – opasnost od nastanka nesreće zbog pretjecanja vozila

$n(V)$ – opasnost od nastanka nesreće zbog količine prometa

M – opasnost od nastanka prometne nesreće zbog noći

Među definiranim čimbenicima utjecaj pretjecanja najgrublje je procijenjen korištenjem veoma jednostavnog izraza za učestalost pretjecanja. U nastavku rada će se prikazati algoritam za procjenu učestalosti pretjecanja razvijen tijekom ovog istraživanja.

2.5. Opći i specifični cilj istraživanja

Opći cilj rada je prikaz mogućnosti teorije sudarnog potencijala za potrebe upravljanja sigurnošću prometa na autocesti.

Specifični cilj rada, odnosno ovog istraživanja, je definirati postupak i razviti odgovarajući algoritam za procjenu **učestalosti pretjecanja** na određenoj dionici autoceste. Isti će na temelju stvarnovremenskih podataka o broju teretnih vozila u prometnom toku na autocesti te broju osobnih vozila, koja voze brzinom koja je niža od određene granične brzine, omogućiti utvrđivanje broja pretjecanja. Navedeni algoritam razvijat će se na temelju podataka o izmjerenim brzinama vozila i njihovom poretku utvrđenom na dva presjeka autoceste.

Novi algoritam potrebno je razviti radi određivanja čimbenika učestalosti pretjecanja vozila budući da se metode korištene za proračun ovog čimbenika u svijetu (s drugačijim značajkama autocesta) ne mogu primijeniti na autoceste kakve postoje u Republici Hrvatskoj gdje postoji uglavnom jedan vozni i jedan pretjecajni trak (i zaustavni trak) u jednom smjeru vožnje.

Ovo istraživanje treba potvrditi hipotezu da je stvarnovremensku učestalost pretjecanja vozila na određenoj dionici autoceste i u određenom vremenskom intervalu moguće dovoljno točno procijeniti primjenom mjerenja brzina vozila na dva presjeka autoceste.

Na temelju podatka o veličini sudarnog potencijala, odnosno izračunatoj vjerojatnosti nastanka prometne nesreće, primjenom sustava promjenjivih ograničenja brzine moguće je djelovati na prometni tok na autocesti s ciljem smanjenja varijacija brzine i postići harmoniziran prometni tok. Kako su pri harmoniziranom prometnom toku varijacije brzina pojedinih vozila manje, smanjit će se i učestalost pretjecanja vozila čime se smanjuje vjerojatnost nastanka prometne nesreće i postiže veća sigurnost odvijanja prometa na dionici autoceste.

3. Algoritam procjene učestalosti pretjecanja vozila

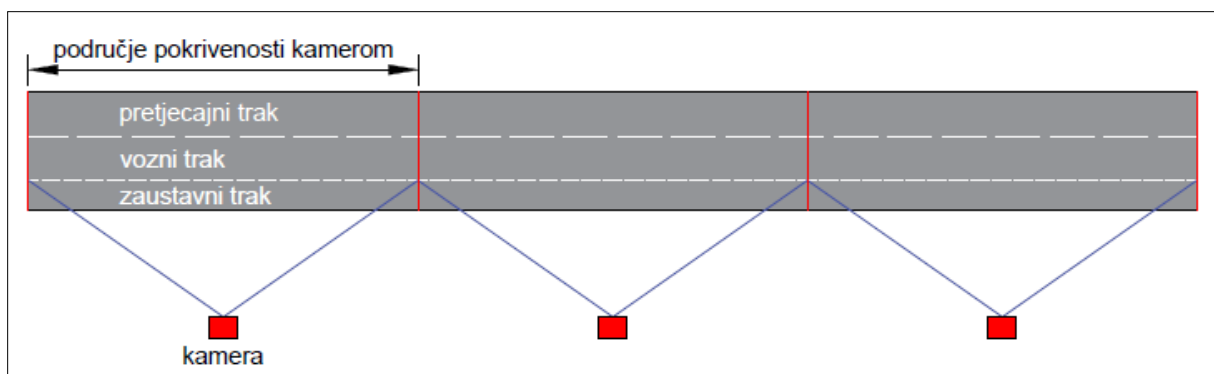
Na temelju prikupljenih stvarnovremenskih podataka o karakteristikama prometnog toka moguće je razviti algoritam određivanja učestalosti pretjecanja. Struktura i opis varijanti algoritma izloženi su u nastavku.

3.1. Varijante algoritma

Za određivanje učestalosti pretjecanja vozila potrebno je izvršiti određena mjerenja prometa na autocesti. Pri tome je podatke moguće prikupljati na nekoliko načina:

- video nadzorom
- mjerenjem prometa na dva presjeka
- prethodnom kalibracijom dionice autoceste i mjerenja prometa na jednom presjeku

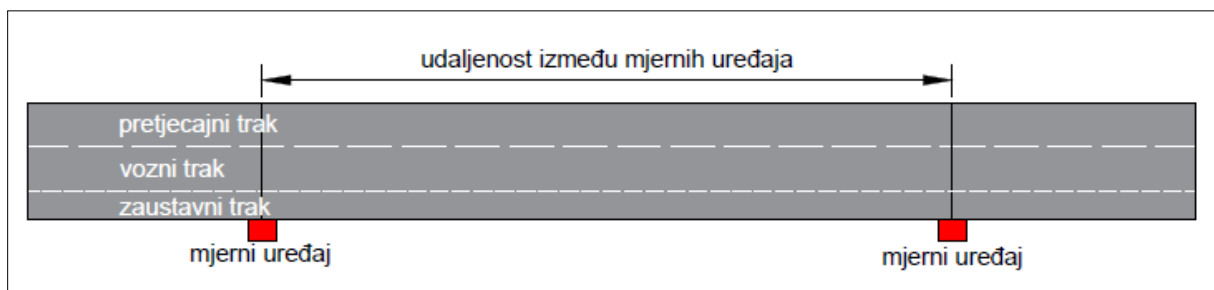
Najtočnije podatke o učestalosti pretjecanja vozila daje video nadzor. Ova metoda daje precizne podatke o vozilima na određenoj dionici autoceste, njihovoj brzini i broju pretjecanja. Međutim, očiti su nedostaci previsoki troškovi primjene ovakvog sustava jer zahtijeva velika ulaganja: veliki broj kamera 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:



Izvor: izrada autora

Slika 3. Skica mjerenja prometa na dionici autoceste video nadzorom

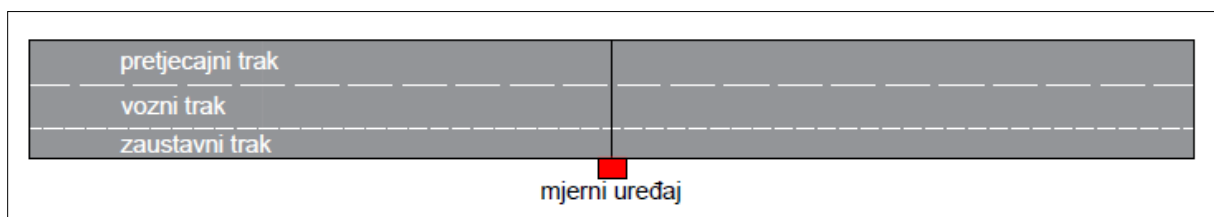
Za mjerenja prometa u praksi pogodna je metoda mjerenja prometa na dva presjeka autoceste koja ne zahtijeva velika ulaganja u nabavu opreme. Naravno, točnost ove metode nije potpuna kao kod video nadzora, ali može biti dovoljno točna, pa se mogu postići isti prihvatljivi rezultati upravljanja prometom 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. Na temelju prikupljenih podataka o vozilima tijekom određenog vremenskog intervala (obično 15 ili 30 minuta), algoritam je u mogućnosti izračunati učestalost pretjecanja vozila. U ovom radu istražena je upravo ova metoda.



Izvor: izrada autora

Slika 4. Skica mjerenja prometa na dva presjeka autoceste

Treća metoda (slika 5) mjeri promet na samo jednom presjeku autoceste. Na temelju primjene algoritma za računanje učestalosti pretjecanja na dva presjeka može se provesti odgovarajuća kalibracija dionice autoceste. Kalibracija se zasniva na određivanju empirijske funkcije učestalosti pretjecanja vozila ovisno o broju teretnih vozila i vozila koja voze ispod određene granične brzine. U tom slučaju moguće je procijeniti učestalost pretjecanja samo pomoću mjernog uređaja koji obavlja mjerenje prometa na ulaznom presjeku. Naravno, točnost ove metode je lošija nego korištenjem mjerenja na dva presjeka. U budućim istraživanjima će se ispitati prihvatljivost realne točnosti dobivene mjerenjima u naravi.



Izvor: izrada autora

Slika 5. Skica mjerenja prometa na jednom presjeku autoceste

3.2. Algoritam za određivanje učestalosti pretjecanja vozila mjerenjem prometa na dva presjeka autoceste

Kako je navedeno, potrebno je mjerenjem prometa na dvije lokacije (na dionici autoceste) razviti algoritam za određivanje učestalosti pretjecanja vozila. Algoritam zahtijeva podatke o redoslijedu vozila na obje lokacije, stoga su mjerni uređaji postavljeni na odgovarajuće lokacije, ovisno o željenoj duljini dionice koja se promatra. Na prvom presjeku vozila dobivaju oznaku redoslijeda po onom rednom broju pod kojim su detektirana, a na drugom presjeku redoslijed vozila će ovisiti o izvršenim pretjecanjima na dionici autoceste između mjernih uređaja. Njima će algoritam dodjeljivati one oznake redoslijeda kako su se ta vozila pojavljivala na prvom presjeku.

Uređajima se na oba presjeka prikupljaju podaci o brzini svakog vozila i njihova duljina na tom presjeku autoceste. Uređaji bilježe vozila na voznom i pretjecajnom traku tijekom 15-minutnog razdoblja. Na temelju duljina vozila koje su izmjerene na prvom presjeku, te brzina pojedinih vozila, omogućena je njihova približna identifikacija na drugom presjeku. Pozicija (vremenska) u slijedu vozila na drugom presjeku izračunava se na osnovu približnog vremena potrebnog da bi se duljina dionice prešla pri ako se vozilo nastavi gibati brzinom približno jednakoj kao na ulaznom presjeku. Na temelju inteligentne identifikacije vozila omogućena je izrada novog redoslijeda vozila na drugom presjeku. Usporedbom dvaju redoslijeda moguće je izračunati minimalan broj izvršenih pretjecanja, što predstavlja procjenu ukupnog broja pretjecanja. Na temelju izračunatog broja pretjecanja, lako je odrediti učestalost pretjecanja:

$$\omega = \frac{n_{\text{pretjecanja}}}{n_{UK}} \quad (18)$$

pri čemu je:

ω – učestalost pretjecanja vozila

$n_{\text{pretjecanja}}$ – broj pretjecanja

n_{UK} – ukupan broj vozila

Prvotni problem je utvrđivanje istovjetnosti vozila detektiranog na prvom i na drugom presjeku. Naime, sustav mjerenja na presjeku (radar) ima značajnu pogrešku u određivanju duljine vozila. Radi navedenog odstupanja u izmjerenoj duljini vozila, vozila će se podijeliti u 4 klase, kako je prikazano u tablici 1. Podjela vozila na klase se provodi kako bi se olakšala detekcija vozila na izlazu iz dionice (na drugom presjeku).

Tablica 1. Podjela detektiranih vozila na grupe

Oznaka	Značenje	Duljina vozila [m]
O	Osobno vozilo	0,50 - 6,00
PO	Pretežno osobno vozilo	6,01 - 8,00
PT	Pretežno teretno vozilo	8,01 - 12,00
T	Teretno vozilo	12,01 - 30,00

Sva vozila detektirana na prvom i drugom presjeku svrstana su u jednu od navedenih kategorija. Na temelju izmjerene brzine za svako vozilo (bez obzira na kategoriju) proračunava se vrijeme potrebno za prelazak dionice autoceste.

$$\Delta t_{0,i} = \frac{s}{v_i} \quad (19)$$

gdje je

$\Delta t_{0,i}$ – očekivano vrijeme potrebno vozilu i za prijelaz dionice duljine s pri brzini v_i

v_i – brzina vozila i na prvom presjeku

s – duljina dionice autoceste

Algoritam, zatim, određuje očekivano vrijeme dolaska vozila na drugi presjek:

$$t_{2,presj.i} = t_{1,presj.i} + \Delta t_{0,i} \quad (20)$$

gdje je:

$t_{1,presj.i}$ – vremenski trenutak detekcije vozila i na prvom presjeku

$t_{2,presj.i}$ – vremenski trenutak detekcije vozila i na drugom presjeku

Vozilu na drugom presjeku će biti dodijeljena oznaka redoslijeda vozila iz prvog presjeka ako se klase vozila poklapaju te ako na temelju brzine iz prvog presjeka vozilo prođe u očekivanom vremenu drugim presjekom.

Ako vozilo nije detektirano u očekivanom vremenu na drugom presjeku, algoritam će provjeriti postoji li vozilo koje je drugim presjekom prošlo unutar 10-postotnog odstupanja od očekivanog vremena, te će mu dodijeliti oznaku redoslijeda vozila s najmanjim vremenskim odstupanjem (opet pod uvjetom da se klase vozila poklapaju).

$$0,9 * \Delta t_{0,i} \leq \Delta t_i \leq 1,1 * \Delta t_{0,i} \quad (21)$$

$$t_{2.presj.i} = t_{1.presj.i} + \min(\Delta t_i) \quad (22)$$

gdje je:

Δt_i – vrijeme potrebno vozilu i za prijelaz dionice autoceste s dozvoljenim deset-postotnim odstupanjem

Uvjet:

$$K_{i,I.presj.} = K_{i,II.presj.} \quad (23)$$

gdje je:

$K_{i,I.presj.}$ – klasa vozila i detektirana na prvom presjeku

$K_{i,II.presj.}$ – klasa vozila i detektirana na drugom presjeku

Ako postoji više vozila unutar dozvoljenog odstupanja, uvjet je da je jednak odnos brzina na prvom i drugom presjeku:

$$\text{ako } V_{I.(i)} > V_{I.(i+1)} \text{ onda } V_{II.(i)} > V_{II.(i+1)} \quad (24)$$

$$\text{ili ako } V_{I.(i)} < V_{I.(i+1)} \text{ onda } V_{II.(i)} < V_{II.(i+1)} \quad (25)$$

gdje je:

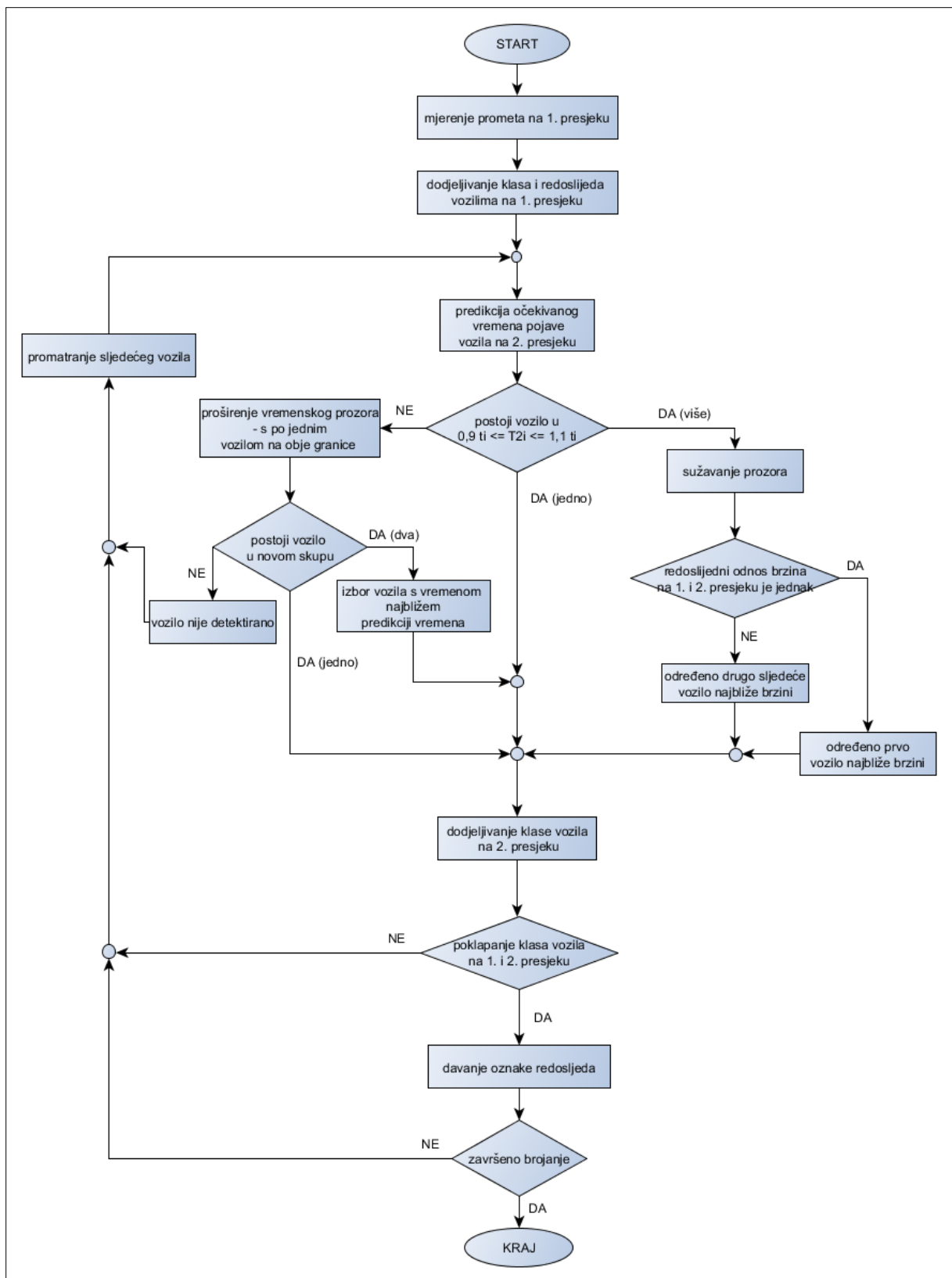
$V_{I,i}$ – brzina i -tog vozila na prvom presjeku

$V_{II,(i)}$ – brzina i -tog vozila na drugom presjeku

Ako je došlo do promjene odnosa brzina između tih dvaju vozila, algoritam će oznaku redoslijeda dodijeliti sljedećem vozilu s najmanjim vremenskim odstupanjem na drugom presjeku.

Ako ne postoji niti jedno vozilo unutar dozvoljenih odstupanja, proširuje se vremenski obuhvat s po jednim vozilom s obje strane granice i izabire se vozilo s vremenom najbližim predviđenom. Ako u ovom skupu nema vozila, algoritam neće detektirati vozilo, pa se provjerava sljedeće vozilo s prvog presjeka.

Načelni prikaz rada algoritma za dodjeljivanje oznake redoslijeda vozila mjerenjem prometa na dva presjeka autoceste prikazan je na slici 6.



Slika 6. Načelni prikaz rada algoritma za dodjeljivanje oznake redosljeda mjerenjem prometa na dva presjeka

Nakon detekcije vozila i dodjeljivanja oznake redoslijeda na oba presjeka tijekom 15-minutnog intervala, potrebno je izračunati broj pretjecanja. Redoslijed vozila na prvom presjeku je:

$$A = \begin{bmatrix} 1 \\ 2 \\ 3 \\ \vdots \\ n \end{bmatrix}$$

Na izlazu redoslijed vozila uslijed pretjecanja neće biti isti, pa će, primjerice, biti:

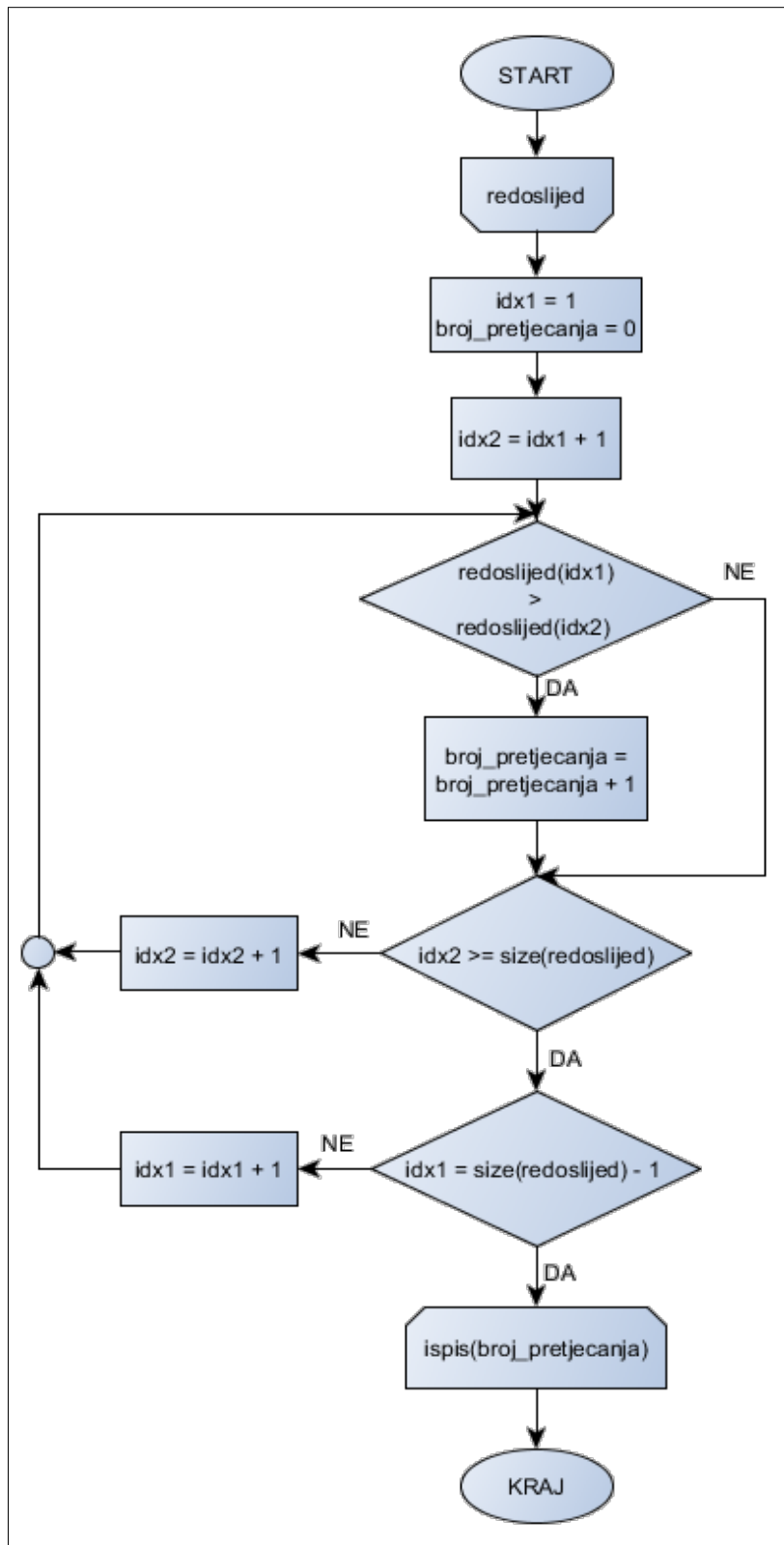
$$B = \begin{bmatrix} 1 \\ 3 \\ 5 \\ 2 \\ 4 \end{bmatrix} - \text{redoslijed vozila na izlazu (drugi presjek)}$$

Razlika u redoslijedu vozila može se rekonstruirati:

$$\begin{bmatrix} 1 \\ 2 \\ 3 \\ 4 \\ 5 \end{bmatrix} \rightarrow \begin{bmatrix} 1 \\ \mathbf{3} \\ 2 \\ 4 \\ 5 \end{bmatrix} (1 \text{ pretjecanje}) \rightarrow \begin{bmatrix} 1 \\ 3 \\ 2 \\ \mathbf{5} \\ 4 \end{bmatrix} (1 \text{ pretjecanje}) \rightarrow \begin{bmatrix} 1 \\ 3 \\ \mathbf{5} \\ 2 \\ 4 \end{bmatrix} (1 \text{ pretjecanje}) = 3 \text{ pretjecanja}$$

Na slici 7 prikazan je algoritam za računanje broja pretjecanja vozila na temelju postojanja podataka o redoslijedu vozila na drugom presjeku. Prikazani algoritam u obzir uzima da su vozila na prvom presjeku uvijek poredana po logici 1, 2, 3, 4, ..., n. Stoga algoritam na drugom presjeku uspoređuje redoslijed svakog vozila s redoslijedom vozila koje slijedi. Ako je oznaka redoslijeda na promatranom vozilu manja od oznake na sljedećem vozilu, zaključuje se da nije došlo do pretjecanja jer je redoslijedom to sljedeće vozilo u dionicu autoceste i ušlo i izišlo iza promatranog vozila. Ako je oznaka redoslijeda na promatranom vozilu veća od oznake na vozilu koje slijedi, algoritam će detektirati pretjecanje.

Nakon usporedbe promatranog vozila sa svim slijedećim vozilima, algoritam uzima u promatranje vozilo koje slijedi iza promatranog vozila i pravi istu usporedbu s njemu slijedećim vozilima. Na kraju ispisuje ukupan broj pretjecanja vozila.



Slika 7. Algoritam za izračun broja pretjecanja vozila

Problem kod utvrđivanja točnog broja pretjecanja je taj da na temelju podatka o redoslijedu vozila na dva presjeka nije moguće utvrditi je li bilo međusobnog višestrukog pretjecanja vozila. Primjerice, ako je postojala sljedeća situacija:

$$\begin{bmatrix} 1 \\ 2 \\ 3 \\ 4 \\ 5 \end{bmatrix} \rightarrow \begin{bmatrix} 1 \\ 3 \\ 2 \\ 4 \\ 5 \end{bmatrix} \text{ (realno 1 pretjecanje)} \rightarrow \begin{bmatrix} 1 \\ 2 \\ 3 \\ 4 \\ 5 \end{bmatrix} \text{ (realno još jedno pretjecanje)}$$

→ (na izlazu nije detektirano pretjecanje)

Međutim, ako se promatra dovoljno kratka dionica, može se pretpostaviti da je mala vjerojatnost ponovnog vraćanja redoslijeda vozila na stanje prije pretjecanja, pa će algoritam izračunavati dovoljno točan broj pretjecanja.

Nakon utvrđivanja broja pretjecanja vozila, moguće je odrediti učestalost pretjecanja iz izraza:

$$\omega = \frac{n_{\text{pretjecanja}}}{n_{UK}} \quad (26)$$

gdje je:

ω – čimbenik učestalosti pretjecanja

$n_{\text{pretjecanja}}$ – broj pretjecanja

n_{UK} – ukupan broj vozila

Procijenjena učestalost pretjecanja potom se uključuje u izraz za izračunavanje sudarnog potencijala. Kada vrijednost sudarnog potencijala prijeđe određeni prag vrijednosti, sustavom promjenjivog ograničenja brzine nastojat će se smanjiti varijacije brzina vozila postavljanjem ograničenja brzine na promjenjivim prometnim znakovima. Smanjenjem varijacija brzine smanjuje se i učestalost pretjecanja vozila pa će se harmonizirati prometni tok s ciljem povećanja razine sigurnosti prometa na autocesti.

S obzirom na tehničke karakteristike mjernih uređaja (radara) moguća su određena odstupanja u izmjerenim duljinama vozila i broju vozila na prvom i drugom presjeku. Problem različitih izmjerenih duljina riješen je podjelom vozila na klase i uporabom podatka o brzinama vozila za identifikaciju vozila. U slučaju da se broj detektiranih vozila na prvom i na drugom presjeku razlikuju, algoritam će vozila koja nisu detektirana na prvom presjeku isključiti iz daljnjeg proračuna, odnosno neće u broj pretjecanja uključiti ona vozila kojima nisu dodijeljene oznake redosljeda.

3.3. Algoritam za određivanje učestalosti pretjecanja vozila mjerenjem prometa na jednom presjeku autoceste

Određivanjem broja pretjecanja uporabom algoritma za procjenu učestalosti pretjecanja temeljem mjerenja prometa na dva presjeka moguće je provesti kalibraciju dionice autoceste. Na osnovu ove kalibracijske funkcije učestalosti pretjecanja (ovisne o broju teretnih vozila i vozila koja voze brzinom manjom od granične) i mjerenja samo na ulaznom presjeku moguće je jednostavnije procijeniti stvarnu učestalost pretjecanja. Iako ovaj algoritam neće davati toliko točne podatke poput algoritma s mjerenjem prometa na dva presjeka, njime se pojednostavljuje i pojeftinjuje sustav. Točnost algoritma ovisi o kvalitetnoj kalibraciji zasnovanoj na procjeni učestalosti pretjecanja mjerenjem prometa na dva presjeka.

Procijenjeni broj pretjecanja primjenom druge metode određuje se kao:

$$n_{\text{pretjecanja}} = f(n_T, n_{V < \text{gr.brzine}}) \quad (27)$$

gdje je:

- $n_{\text{pretjecanja}}$ – ukupan broj pretjecanja vozila
- n_T – broj teretnih vozila
- $n_{V < \text{gr.brzine}}$ – broj vozila koja voze ispod granične brzine (određen na ulaznom presjeku)
- f – kalibracijska funkcija učestalosti pretjecanja određene dionice

Nakon što je prethodni algoritam izračunao broj pretjecanja, moguće je klase detektiranih vozila svesti samo na dvije i to spajanjem klase osobnog i pretežno osobnog vozila u jednu klasu (u klasu osobno vozilo), a teretnog i pretežno teretnog vozila u klasu teretnih vozila. Nakon spajanja klasa, algoritam prebrojava teretna vozila te sva vozila koja voze ispod određene granične brzine.

Nakon određivanja broja pretjecanja, ukupnog broja vozila, broja teretnih vozila i broja vozila koja voze ispod određene granične brzine, moguće je pronaći određenu ovisnost broja pretjecanja o broju teretnih vozila te broja vozila koja voze ispod određene granične brzine. Navedena ovisnost vrijedi na dionici autoceste sa sličnim karakteristikama kolnika, uz jednake meteorološke prilike i doba dana (dan/noć).

4. Provedba mjerenja i rezultati

Da bi se pokazala učinkovitost izvedenog algoritma, izvršena su odgovarajuća terenska mjerenja. Mjerenje prometa izvršeno je tijekom 21-satnog perioda. Nakon mjerenja provedena je obrada podataka, izvedeni tablični i grafički prikaz rezultata mjerenja te provedena kalibracija algoritma za određivanje učestalosti pretjecanja vozila temeljem mjerenja prometa na dva presjeka autoceste.

4.1. Opis postupka mjerenja i plan rada

Mjerenje prometa izvršeno je na dionici autoceste A1 (Zagreb – Split – Dubrovnik) u smjeru od Zagreba prema Splitu, poslije izlaza Jastrebarsko. Duljina dionice je točno 4 km, a započinje na 23. kilometru i završava na 27. kilometru autoceste (slika 8). Na promatranoj dionici nema pratećih uslužnih objekata niti čvorova za ulazak ili izlazak vozila s autoceste.



Izvor: Google maps 22.4.2015.

Slika 8. Dionica autoceste A1 od 23. do 27. km

Mikrolokacije mjerenja prikazane su na slikama 9 i 10.



Izvor: Google maps street view 22.4.2015.

Slika 9. Početak dionice mjerenja



Izvor: Google maps street view 22.4.2015.

Slika 10. Završetak dionice mjerenja

Mjerenja su izvršena u uvjetima povoljnih meteoroloških prilika, a kao što je vidljivo na slikama, dionica autoceste se nalazi na ravnom terenu.

Mjerni uređaji korišteni u istraživanju su *Trans-Q Radar Traffic Classifier* (slika 11). Uređajima se mjere brzine vozila i njihove duljine na dva presjeka autoceste te prostorna udaljenost između vozila u metrima i vremenska udaljenost u sekundama. Postavljeni su na oznake stacionaže autoceste. Uređaji su bilježili vozila na voznom i pretjecajnom traku.



Izvor: izrada autora

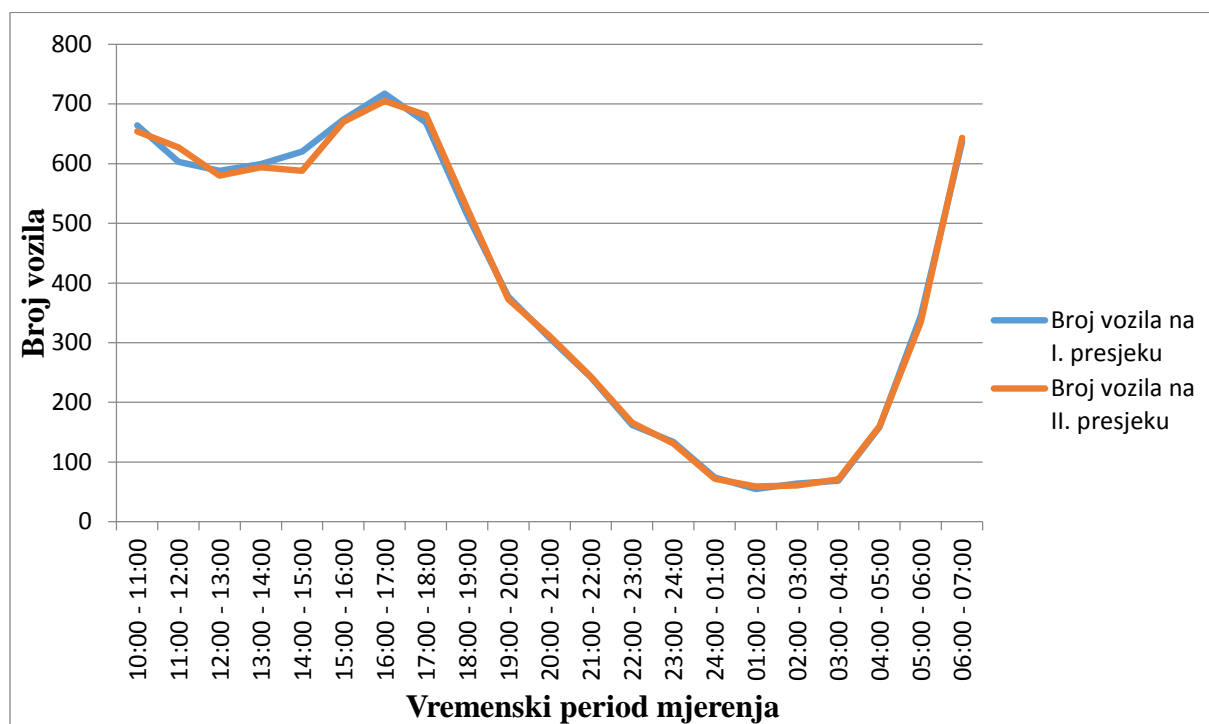
Slika 11. Mjerni uređaj *Trans-Q Radar Traffic Classifier* na autocesti A1

Podaci su prikupljeni tijekom 21 sata zbog ograničenosti mjernog uređaja. Prikupljeni podaci prikazani su tablično u tablici 2. Razlike u izmjerenom broju vozila po presjecima pripisuju se pogrešci radara jer u rijetkim situacijama, kad su vozila u potpunosti paralelna jedno s drugim (u voznom i pretjecajnom traku), radar zabilježi samo vozilo u jednom traku.

Plan rada je na temelju dobivenih podataka o prometu na autocesti odrediti vremenski period od 15 minuta koji će se uzeti kao temelj za primjenu algoritma za određivanje učestalosti pretjecanja vozila mjerenjem prometa na dva presjeka autoceste. S obzirom na variranje prometnog toka tijekom dana (prikaz na grafikonu 1), određeno je da će se 15-minutni period tražiti unutar vremena od 19:00 do 20:00 h. Upravo taj sat uzet je iz razloga što je u tom satu prošao srednji broj vozila tijekom tog dana. Razlog zašto nije uzet vršni sat je veliko prometno opterećenje voznog i pretjecajnog traka pa je velika i mogućnost pogreške korištenih mjernih uređaja pri detektiranju broja vozila i raspoznavanju njihove duljine. Broj pretjecanja vozila će se računati za period od 19:00 do 19:15 zbog srednjeg broja teretnih vozila koji se u tom periodu pojavljuje, a promatrano unutar cijelog sata. Doba dana može se ubrojiti pod „dan“.

Tablica 2. Izmjereni broj vozila tijekom perioda mjerenja

	Vrijeme	Broj vozila	Broj vozila
		na I. presjeku	na II. presjeku
21.4.2015	10:00 - 11:00	664	654
	11:00 - 12:00	603	627
	12:00 - 13:00	588	580
	13:00 - 14:00	599	594
	14:00 - 15:00	620	588
	15:00 - 16:00	674	670
	16:00 - 17:00	717	705
	17:00 - 18:00	669	681
	18:00 - 19:00	515	526
	19:00 - 20:00	377	373
	20:00 - 21:00	308	311
	21:00 - 22:00	242	243
	22:00 - 23:00	162	166
	23:00 - 24:00	134	131
22.4.2015	24:00 - 01:00	74	72
	01:00 - 02:00	55	59
	02:00 - 03:00	64	61
	03:00 - 04:00	69	71
	04:00 - 05:00	159	160
	05:00 - 06:00	345	335
	06:00 - 07:00	637	643
	Ukupno	8275	8250



Grafikon 1. Pregled izmjerenog broja vozila tijekom 21 h

4.2. Provedba mjerenja i obrada rezultata mjerenja

Tijekom razdoblja mjerenja uređaji su izbrojali 8.275, odnosno 8.250 vozila na oba traka, ovisno o presjeku (Grafikon 1). U oba presjeka kao prvo vozilo ubrojeno je ono koje je poslije 10:00 h (21.4.2015.) prošlo prvim presjekom autoceste, a popis je zaključen nakon što je zadnje vozilo, koje je u 06:59:59 h (22.4.2015.) prošlo prvim presjekom, detektirano na drugom presjeku (07:01:35).

Prosječna brzina vozila na prvom presjeku bila je 119 km/h, a na drugom 120 km/h, što pokazuje neznatno povećanje prosječne brzine vozila na dionici. Standardna devijacija brzina izmjerenih na oba prosjeka iznosi oko 25 km/h po čemu se zaključuje da su velike varijacije u brzinama pojedinih vozila u odnosu na prosječnu brzinu.

Uređaji su na prvom presjeku detektirali 1.933 teretna vozila (dulja od 8,00 m, uključujući pogrešku radara), a na drugom presjeku 1.939. Rezultati su prikazani u tablici 3.

Tablica 3. Prikaz rezultata mjerenja radarima

Datum: 21.4.-22.4.2015.

Vremenski period: 10 h do 7 h

Prvi presjek	
Broj vozila	8275
Prosječna brzina	119
Stand. devijacija	25
Broj teretnih vozila	1933
Broj sporih vozila	293

Drugi presjek	
Broj vozila	8250
Prosječna brzina	120
Stand. devijacija	25
Broj teretnih vozila	1939
Broj sporih vozila	249

U broj sporih vozila (odnosno vozila koja voze ispod određene granične brzine) uračunata su sva osobna vozila koja su vozila ispod brzine V_{gr} koja je definirana kao:

$$V_{gr} = \bar{V} - \sigma \quad (28)$$

pri čemu je:

\bar{V} – prosječna brzina vozila

σ – standardna devijacija prosječne brzine

Dakle:

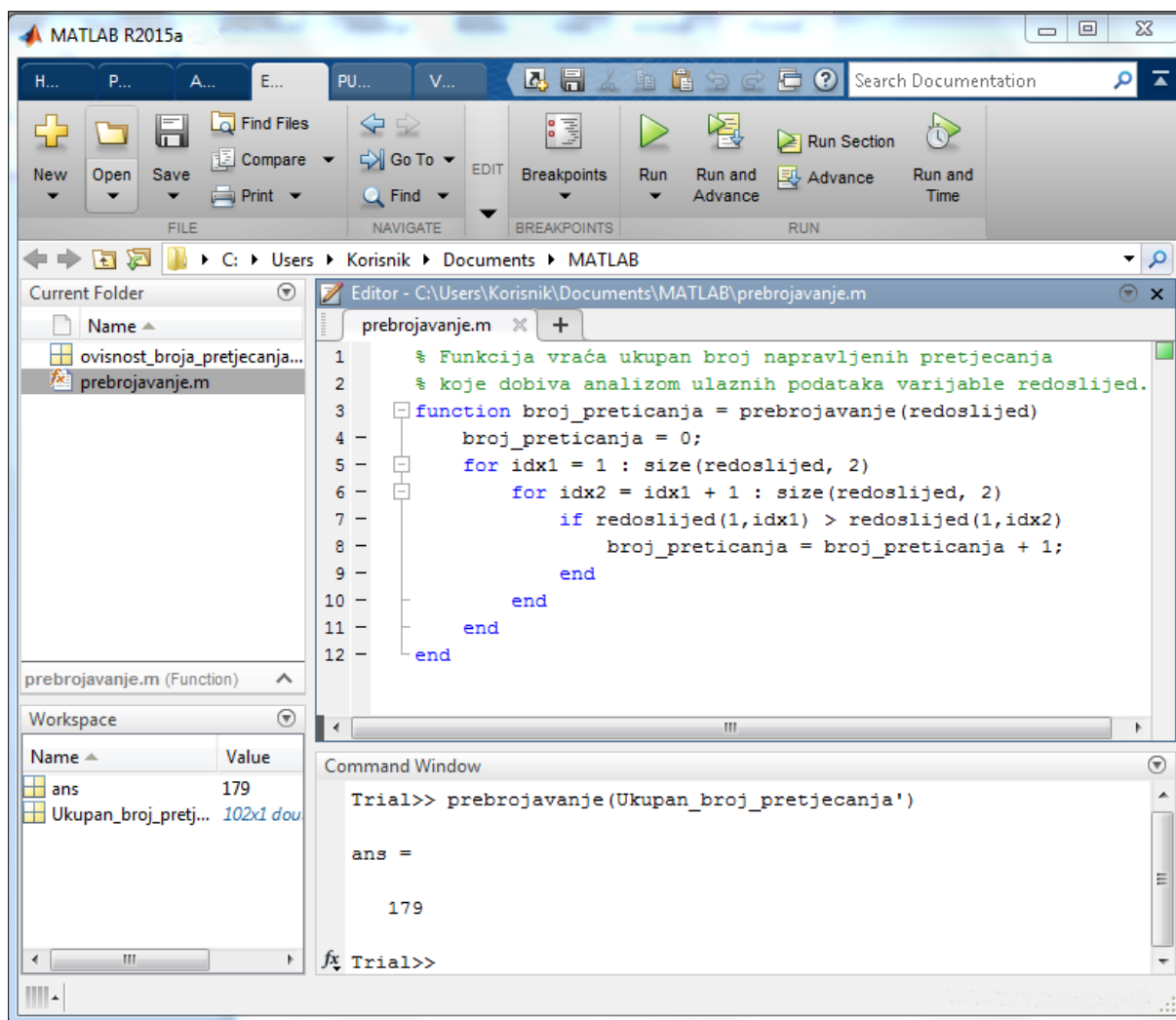
$$V_{gr} = 119 - 25 = 94 \approx 95 [km/h]$$

4.3. Rezultati i točnost algoritma

Za razvoj algoritma učestalosti pretjecanja vozila temeljem mjerenja prometa na dva presjeka uzet je navedeni 15-minutni vremenski interval. U tom razdoblju mjerni uređaj na prvom presjeku detektirao je 108 vozila. Od tog broja vozila, njih 6 se primjenom algoritma nije uspjelo detektirati na drugom presjeku te mu dodijeliti oznaku redoslijeda. Stoga je pogreška algoritma u detekciji vozila u ovom vremenskom intervalu iznosila 5,55 posto.

Algoritmom je identificirano 31 teretno vozilo od ukupno 102 detektirana, a nije detektirano nijedno osobno vozilo koje je vozilo ispod određene granične brzine.

Nakon što su na temelju redoslijeda vozila na prvom presjeku dodijeljene oznake redoslijeda na drugom presjeku, dobiven je redoslijed vozila na drugom presjeku. Na temelju tog redoslijeda izračunat je broj pretjecanja. Broj pretjecanja određen je primjenom algoritma prikazanog na slici 7. Algoritam je napisan u MATLAB okruženju. Rezultati algoritma (slika 12) pokazali su da je uz 102 točno identificirana vozila na prvom presjeku, utvrđeno 179 pretjecanja.



Slika 12. Prikaz algoritma izračuna broja pretjecanja vozila u MATLAB-u

Kad je utvrđen broj pretjecanja vozila, moguće je odrediti čimbenik učestalosti pretjecanja:

$$\omega = \frac{n_{\text{pretjecanja}}}{n_{UK}} = \frac{179}{102} = 1,755$$

Utvrđivanjem čimbenika učestalosti pretjecanja moguće je odrediti vrijednost sudarnog potencijala, uz poznavanje ostalih podataka koje izračun sudarnog potencijala zahtijeva. Izračunom učestalosti pretjecanja algoritam je omogućio izračun sudarnog potencijala temeljem mjerenja prometa na dva presjeka autoceste.

Kad je određen broj pretjecanja, moguće je utvrditi određenu zavisnost broja pretjecanja o broju teretnih vozila. Kalibracijom algoritma moguće je postići da se za autocestu sa sličnim

karakteristikama kolnika, jednakim vremenskim i meteorološkim prilikama te dobu dana izračunava čimbenik učestalosti pretjecanja vozila mjerenjem prometa na samo jednom presjeku.

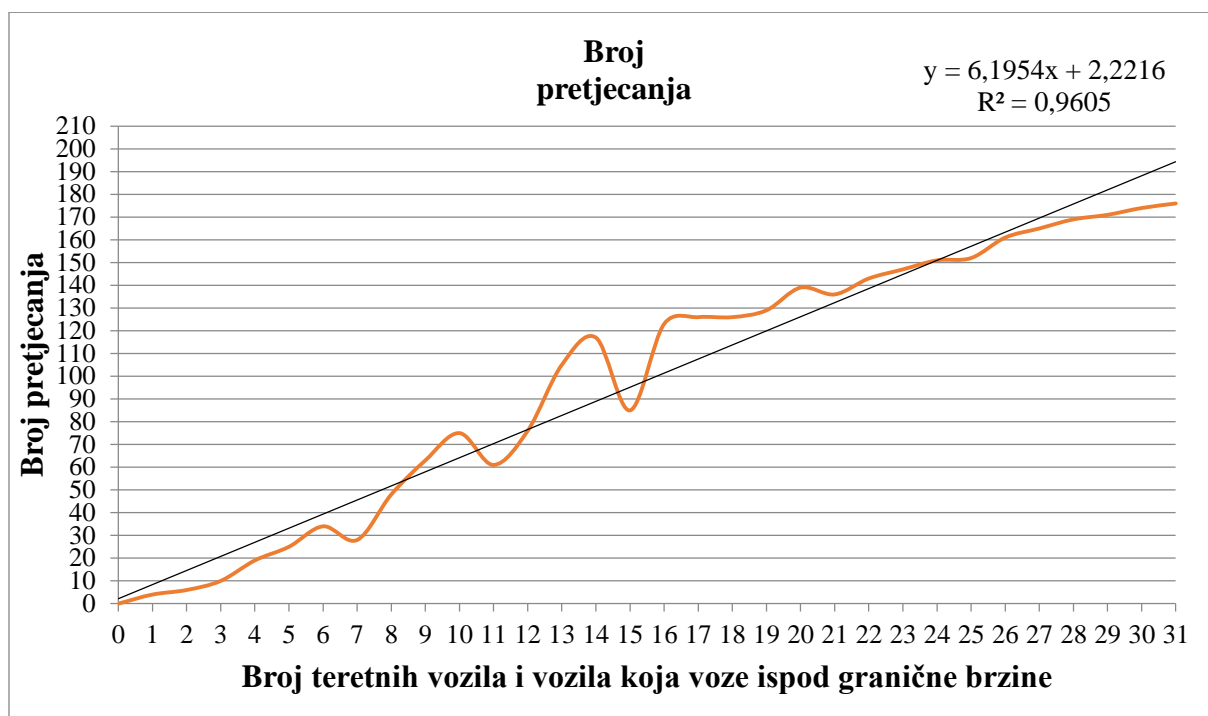
Međusobna ovisnost broja pretjecanja o broju teretnih vozila računata je unutar istog vremenskog intervala.

Kalibracija je izvršena na način da je algoritam detektirao vrijeme prolaska prvog teretnog vozila na prvom presjeku. Kada je to isto vozilo identificirano na drugom presjeku, prebrojan je broj pretjecanja izvršen nad tim teretnim vozilom i između svih osobnih vozila koja su ga pretekla. Dakle, u obzir su uzimana samo vozila koja su na prvom presjeku bila iza promatranog teretnog vozila, a drugim presjekom su prošla prije promatranog vozila.

Algoritam je zatim uzimao u obzir prva dva teretna vozila s prvog presjeka te računao broj pretjecanja na drugom presjeku do trenutka kad je drugo teretno vozilo prošlo drugim presjekom. Postupak je obuhvaćao sve veći broj teretnih vozila dok ih nije obuhvatio svih 31. Na kraju, pri postojanju 31 teretnog vozila izračunat ukupan broj pretjecanja 176.

Prikazani grafikon pokazuje da ako na ovoj dionici ne vozi ni jedno teretno vozilo, postojat će otprilike dva pretjecanja. S brojem teretnih vozila rastao je i broj pretjecanja, pa je utvrđena određena linearna zakonitost. Prikaz ovisnosti broja pretjecanja o broju teretnih vozila na promatranj dionici prikazan je na grafikonu 2.

Budući da se tijekom mjerenja u ovom 15-minutnom intervalu nije pojavilo niti jedno vozilo s brzinom ispod određene granične brzine, ovisnost je prikazana u odnosu na zbroj ovih i teretnih vozila jer se može pretpostaviti da će se sva spora vozila preteći.



Grafikon 2. Broj pretjecanja vozila u ovisnosti o broju teretnih vozila i vozila koja voze ispod granične brzine

Na temelju utvrđene ovisnosti broja pretjecanja o broju teretnih vozila i vozila koja voze ispod granične brzine (bitno je napomenuti da se ova ovisnost odnosi na promatrani interval mjerenja prometa i na dionicu autoceste s određenim karakteristikama, te dobu dana i meteorološkim uvjetima), moguće je zapisati:

$$n_{pretjecanja} = 6,1954 * (n_T + n_{V<gr}) + 2,2216 \quad (29)$$

gdje je:

$n_{pretjecanja}$ – broj pretjecanja vozila

n_T – broj teretnih vozila

$n_{V<gr}$ – broj vozila koja voze ispod određene granične brzine

Kako je na temelju izračuna broja pretjecanja moguće odrediti učestalost pretjecanja vozila, moguće je zapisati:

$$\omega = \frac{n_{pretjecanja}}{n_{UK}} = \frac{6,1954 * (n_T + n_{V<gr}) + 2,2216}{n_{UK}} \quad (30)$$

5. Rasprava

U poglavlju je opisana rasprava o prihvatljivosti primjene algoritma procjene učestalosti pretjecanja vozila u realnim sustavima upravljanja sigurnošću prometa te rasprava o mogućnosti primijene korištene opreme.

5.1. Prihvatljivost algoritma procjene učestalosti pretjecanja vozila

Algoritam procjene učestalosti pretjecanja vozila temeljem mjerenja prometa na dva presjeka autoceste omogućuje da se u stvarnom vremenu donose odluke o načinu upravljanja prometom na autocestama. S obzirom na važnost upravljanja prometom znatan je doprinos razvoju algoritma povećanju razine sigurnosti na autocesti.

Algoritam je zbog jednostavnosti potrebne instalirane opreme i brzog izračuna vrijednosti čimbenika učestalosti pretjecanja vozila moguće primijeniti na autocestama s karakteristikama poput hrvatskih. Budući da se na hrvatskim autocestama vozi voznim trakom, a pretjecajni služi samo za pretjecanja, moguće je na temelju različitih redosljeda vozila na prvom i drugom presjeku izračunati minimalan broj izvršenih pretjecanja vozila. Pretpostavka je da će se vozila iz pretjecajnog traka morati u određenom vremenu vratiti na vozni trak, što znači da su za pretjecanje morali izvršiti manevar promjene prometnog traka, a to se negativno odražava na razinu sigurnosti prometa. Algoritam nije uzimao u obzir samo broj promjene prometnih trakova nego konačan redosljed vozila na drugom presjeku, što znači da je računao svako prelaženje jednog vozila kao jedno pretjecanje iako se to moglo dogoditi kada jedno vozilo u pretjecajnom traku prestiže više njih na voznom traku. Ovaj se manevar prelaženja smije uključiti u izračun broja pretjecanja jer svako prelaženje (pretjecanje) vozila ima svoj učinak na prometni tok.

Praktičnost primjene algoritma dolazi do izražaja kad se uspoređuje s drugom mogućom varijantom izračuna broja pretjecanja – korištenjem video nadzora. Ova metoda je izrazito skupa i nije poželjna za primjenu u realnim sustavima, unatoč većoj točnosti u izračunu broja pretjecanja. Točnost razvijenog algoritma ovisi ponajprije o kvaliteti instalirane opreme i detaljnosti podataka o svakom detektiranom vozilu. Uz postojanje preciznih podataka moguća je bolja detekcija redosljeda vozila na drugom presjeku, što znači i točniji izračun broja pretjecanja vozila.

Kako je dokazano da se broj pretjecanja vozila može odrediti na temelju mjerenja prometa na dva presjeka autoceste, zaključeno je da se algoritam može kalibrirati i omogućiti procjena učestalosti pretjecanja temeljem mjerenja prometa na samo jednom presjeku. Rezultat je daljnje pojednostavljenje sustava, ali je smanjena preciznost određivanja broja pretjecanja vozila. Kalibracija algoritma odnosi se na dionicu autoceste sa sličnim karakteristikama kao autocesta na kojoj je promet mjeren na dva presjeka, uz jednake meteorološke uvjete i doba dana. U daljnjim istraživanjima moguće je cjelovitije kalibrirati ovaj algoritam i temeljem mjerenja prometa na jednom presjeku autoceste dobiti dovoljnu količinu stvarnovremenskih podataka za kvalitetno upravljanje sigurnošću prometa.

5.2. Prihvatljivost primjene mjerne opreme

Mjerne uređaje (radare) koji su korišteni u ovom istraživanju moguće je primijeniti u primjeni algoritma procjene učestalosti pretjecanja. Ipak, ovi mjerni uređaji su zbog svojih tehničkih karakteristika i pozicije postavljanja (oznake stacionaže kraj ruba prometnog traku) ograničeni u smislu preciznosti određivanja točne duljine svakog od detektiranih vozila. U istraživanju je postojalo i ograničenje mjernih uređaja koji nisu dobro funkcionirali pri vršnim opterećenjima jer su, u slučaju nailaska paralelnih vozila u voznom i pretjecajnom traku, oni bilježili samo jedno vozilo. Što su uređaji precizniji, algoritam će raspolagati točnijim podacima i omogućiti identifikaciju i davanje oznake redoslijeda većem broju vozila, pa će biti točniji i izračun broja pretjecanja.

Ipak, istraživanje je pokazalo da se i pri primjeni ovakvih, relativno jednostavnih mjernih uređaja, može dovoljno točno odrediti učestalost pretjecanja vozila i time utjecati na povećanje sigurnosti prometa na dionici autoceste. Unaprjeđenjem korištenih mjernih uređaja omogućit će se postizanje još boljih rezultata.

5.3. Prihvatljivost algoritma u realnim sustavima upravljanja sigurnošću

Prikupljanje stvarnovremenskih podataka o prometnom toku već se provodi na autocestama sa svrhom upravljanja prometom. Stoga je moguće algoritam za izračun učestalosti pretjecanja vozila ugraditi u algoritam za upravljanje sigurnošću prometa na autocestama promjenom vrijednosti ograničene brzine na promjenjivim prometnim znakovima. Prema modelu za upravljanje sigurnošću prometa na autocestama [23] algoritam upravljanja sigurnošću na temelju stvarnovremenskih podataka može uključivati poruke na svjetlosnim tekstualnim znakovima s pozivom vozačima na oprez i poštovanje ograničenja brzine. Ako se vrijednost čimbenika opasnosti od nastanka prometne nesreće spusti ispod određene razine, zadržat će se prikazana poruka. Ako vrijednost čimbenika i dalje ostane u visokom području, dalje se ograničava brzina dok se ne postigne niska vrijednost čimbenika. Upravo u reguliranju vrijednosti čimbenika opasnosti od nastanka prometne nesreće (sudarni potencijal) leži potencijal algoritma procjene učestalosti pretjecanja vozila. On je ovim istraživanjem potvrđen kao mogući način izračuna čimbenika učestalosti pretjecanja.

6. Zaključci

S obzirom na značaj sigurnosti i zaštite ljudskih života, sigurnost prometa ostaje u središtu suvremenog upravljanja prometom. Na međunarodnoj razini poduzimaju se brojne aktivnosti s ciljem povećanja sigurnosti cestovnog prometa općenito, a posebno na cestama najviše razine uslužnosti kao što su autoceste. U prilog tome svjedoče razni programi sigurnosti Ujedinjenih naroda, Europske unije i Republike Hrvatske.

Budući da su autoceste zatvoreni sustav s kontroliranim uvjetima vožnje, bez znatnog utjecaja vanjskih čimbenika, moguće je na njega učinkovito upravljački djelovati. U suvremenim sustavima upravljanja značajnu ulogu imaju tehnologije inteligentnog upravljanja. Primjenom inteligentnih transportnih sustava (ITS) omogućena je veća sigurnost, učinkovitost i pouzdanost prometnog sustava. ITS potiče primjenu aktivnog pristupa upravljanja sigurnošću na autocesti. To znači da se na temelju stvarnovremenskih podataka o karakteristikama prometnog toka nastoji utjecati na sam tok i djelovati preventivno na nastanak incidentnih situacija. U sklopu aktivnog pristupa prepoznat je potencijal sustava promjenjivih ograničenja brzine, koji omogućuje utjecaj na brzine vozila u prometnom toku kako bi se smanjila njihova disperzija (harmonizacija prometnog toka). Problem je kod ovakvog sustava može biti niska razina poštovanja ograničenja brzine od strane vozača. U dosadašnjim pristupima za definiranje karakteristika prometnog toka korišteni su statistički podaci (satna, dnevna, tjedna i godišnja usrednjavanja), ali je uočena potreba za uporabom stvarnovremenskih podataka, jer samo oni mogu prikazati trenutne uvjete koji vladaju na autocesti. Nastoji se utjecati na prometni tok u realnom vremenu prikupljajući podatke pomoću induktivnih petlji, radara i sličnih uređaja.

Zahvaljujući novim mogućnostima prikupljanja i obrade stvarnovremenskih podataka, razvijen je pojam sudarnog potencijala. Sudarni potencijal označava vjerojatnost nastanka prometne nesreće u ovisnosti o uvjetima koji vladaju na prometnici. U proračun vrijednosti sudarnog potencijala uključeni su mnogi čimbenici, poput varijacije brzina, odnosa prometnog opterećenja i kapaciteta prometnice, utjecaj objekata, meteorološki uvjeti, doba dana te čimbenik učestalosti pretjecanja vozila. Kada vrijednost sudarnog potencijala u stvarnom vremenu prijeđe određeni prag vrijednosti, primjenom sustava promjenjivih ograničenja brzine nastoji se utjecati na vozila u prometnom toku kako bi se vjerojatnost nastanka prometne nesreće ponovno smanjila.

Dosadašnja istraživanja čimbenika učestalosti pretjecanja vozila nisu bila korištena za hrvatske autoceste pa se pojavila potreba za prilagodbu izračuna čimbenika domaćim prilikama. Da bi se odredio čimbenik, potrebno je odrediti algoritam koji će na temelju mjerenja prometa na određenim lokacijama omogućiti izračun broja pretjecanja. U toma smislu, prepoznata je mogućnost razvoja algoritma procjene učestalosti pretjecanja vozila mjerenjem prometa na dva presjeka autoceste. Ovakav način mjerenja, iako manje precizan od video nadzora, ima prednost zbog jednostavnosti i manjih troškova primjene. Algoritam je omogućio određivanje broja pretjecanja vozila na temelju inteligentne rekonstrukcija redoslijeda vozila na promatranoj dionici na dva presjeka.

Algoritam daje dovoljno točne podatke o broju pretjecanja, ali se preciznost može unaprijediti korištenjem kvalitetnijih i preciznijih mjernih uređaja. Primjenom preciznijih uređaja olakšat će se detekcija vozila na svakom presjeku, a mogli bi se koristiti u bilo kojem stanju prometnog toka (vršno ili izvan-vršno razdoblje) i na temelju prikupljenih podataka u određenim kratkim intervalima (primjerice 15-minutnim) pružiti mogućnost preciznijih procjena učestalosti pretjecanja vozila.

U nastavku ovog rada je pokazano da je primjenom off-line kalibracije na osnovu prethodnog algoritma procjene učestalosti pretjecanja vozila na dva presjeka, moguće razviti algoritam koji će na temelju mjerenja na samo jednom presjeku omogućiti procjene učestalosti pretjecanja vozila, doduše s manjom preciznošću ali s jednostavnijim i troškovno prihvatljivijim rješenjem.

U budućim istraživanjima treba ispitati mogućnost kvalitetnijeg algoritma kalibracije, koji će na temelju prebrojavanja samo teretnih i vozila koja voze ispod granične brzine biti u stanju odrediti signifikantniji čimbenik učestalosti pretjecanja vozila.

7. Zahvale

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

Također, zahvaljujemo se Zavodu za prometno planiranje Fakulteta prometnih znanosti na podršci pri prikupljanju mjernih podataka.

Dio terenskih istraživanja na ovom projektu je financiran sredstvima projekta *Intelligent Cooperative Sensing for Improved traffic efficiency – ICSI* sedmog okvirnog programa Europske unije (FP7-317671).

Popis literature

- [1] Mandžuka, S., Žura, M., Horvat, B., Bičanić, D., Mitsakis, E.: Directives of the European Union on Intelligent Transport Systems and their impact on the Republic of Croatia, *Promet – Traffic&Transportation*, Vol. 25, No. 3, 2013., pp. 273. - 283.
- [2] Bošnjak, I.: *Inteligentni transportni sustavi*, Zagreb, Fakultet prometnih znanosti Sveučilišta u Zagrebu, 2006.
- [3] 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.
- [4] Gregurić, M., Ivanjko, E., Mandžuka, S.: *New Concepts for Urban Highway Control*, Proceedings of the 19th International Conference on Urban Planning, Regional Development and Information Society, 2014., pp. 423. - 432.
- [5] Happ, Z.: *Modeliranje sustava sigurnosti cestovnog prometa*, doktorska disertacija, Zagreb, Fakultet prometnih znanosti Sveučilišta u Zagrebu, 2008.
- [6] 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, Batna, University of Batna, 2014.
- [7] Lee, C., Hellinga, B., Saccomanno, F.: *Assessing Safety Benefits of Variable Speed Limits*, Transportation Research Record, Waterloo, Canada, 2004.
- [8] 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.
- [9] Hegyi, A., Hoogendoorn, S., Schreuder, M., Stoelhorst, H.: *The Expected Effectivity of the Dynamic Speed Limit Algorithm*, Proceedings of the European Control Conference, Budapest, 2009.
- [10] Nissan, A.: *Evulation od Variable Speed Limits: Empirical Evidence and Simulation Analysis of Stockholms*, doktorska disertacija, Stocckholm, 2010.
- [11] Sisiopiku, V. P.: *Variable Speed Control: Technologies and Practice*, Michigan State University, 2001.

- [12] 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.
- [13] 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.
- [14] Talebpour, A., Mahmassani, H. S., Hamdar, S. H.: Speed Harmonization: Effectiveness Evaluation under Congested Conditions, Evanston, UK, Northwestern University, 2012.
- [15] Grumert, E.: Cooperative Variable Speed Limit Systems, Norrköping, Linköping University Institute of Technology, 2014.
- [16] Abdel-Aty, M., Dilmore, J., Dhindsa, A.: Evaluation of variable speed limits for real-time freeway safety improvement, Elsevier, Accident Analysis & Prevention, 2006.
- [17] Hellinga, B., Mandelzys, M.: Impact of Driver Compliance on the Safety and Operational Impacts of Freeway Variable Speed Limit Systems, ASCE Journal of Transportation, February 2010.
- [18] Katz, B., O'Donnell, C., Donoughe, K., Atkinson, J., Finley, M., Balke, K., Kuhn, B., Warren, D.: Guidelines for the Use of the Variable Speed Limit System in Wet Weather, Federal Highway Administration, Office of Safety, Washington D.C., 2012.
- [19] 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.
- [20] Ulfarsson, G. F., Shankar, V. N., Vu, P.: In-Vehicle Signing and Variable Speed Limit Evaluation, Washington State Transportation Center, Washington, 2001.
- [21] Zackor, H.: Self-sufficient control of speed on freeways, International Symposium on Traffic Control Systems, Vol. 2A, Berkeley, California University, 1979.
- [22] XXX: D5.1.1. Rules, traffic models, travel strategies (a), FP7 ICSI - Intelligent Cooperative Sensing for Improved traffic efficiency (Grant Agreement Number: 317671), 2014.
- [23] Huzjan, B.: Model upravljanja sigurnošću prometa na autocestama, doktorski rad, Zagreb, Fakultet prometnih znanosti Sveučilišta u Zagrebu, 2014.

- [24] 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.
- [25] Corby, M. J., Saccomanno, F. F.: Analysis of Freeway Accident Detection, Transportation Research Record 1603, TRB, National Research Council, Washington D.C., 1998. pp. 80-89.
- [26] Lee, C., Saccomanno, F., Hellinga, B.: Analysis of Crash Precursors on Instrumented Freeways, Transportation Research Record, Waterloo, Canada, 2002.
- [27] 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.
- [28] Abdel-Aty, M., Pande, A., Uddin, N., Dilmore, 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.
- [29] Solomon, D.: Accidents on main rural highways related to speed, driver, and vehicle, U.S. Department of Commerce, Washington D.C., 1964.
- [30] Hauer, E.: Accidents, Overtaking and Speed Control, Technion, Israel Institute of Technology, Haifa, 1970.
- [31] Cirillo, J. A.: Testimony of Julie Anna Cirillo, Before the Senate Highways and Transportation Committee, 2003.
- [32] Chang, J., Oh, C., Chang, M.: Effects of Traffic Condition (v/c) on Safety at Freeway Facility Sections, Fourth International Symposium on Highway Capacity, Maui, Hawaii, 2000.
- [33] McLawhorn, N.: Variable Speed Limit Signs for Winter Weather, Wisconsin Department of Transportation, WisDOT RD&T Program, 2003.
- [34] Abdel-Aty, M., Uddin, N., Pande, A.: Split models for predicting multi-vehicle crashes during high speed and low speed operating conditions on freeways, Presented at the 84th Annual Meeting of the Transportation Research Board, Washington D.C., 2005.

SAŽETAK

Davor Katava

Mladenka Čosić

MODELIRANJE UTJECAJA PRETJECANJA VOZILA U SUSTAVU UPRAVLJANJA SIGURNOŠĆU PROMETA NA DIONICI AUTOCESTE PRIMJENOM FUNKCIJE SUDARNOG POTENCIJALA

U ovom istraživanju razvijen je algoritam za procjenu učestalosti pretjecanja vozila temeljem mjerenja prometa na dva presjeka autoceste. U radu je istaknut značaj i različiti pristupi upravljanja sigurnošću prometa na autocestama. Model utjecaja učestalosti pretjecanja vozila sastavni je dio funkcije sudarnog potencijala. U radu je objašnjena funkcija sudarnog potencijala sa svim čimbenicima koji utječu na njenu vrijednost s posebnim naglaskom na modelu utjecaja učestalosti pretjecanja vozila. Predložen je novi algoritam procjene vrijednosti učestalosti pretjecanja vozila te opisana njegova struktura. U nastavku je prikazana jedna napredna mogućnost procjene vrijednosti učestalosti pretjecanja vozila temeljem prethodne off-line kalibracije određene dionice autoceste i on-line mjerenja prometa na samo jednom presjeku. Na kraju su prikazana provedena odgovarajuća terenska mjerenja, dokazana učinkovitost algoritma i provedena rasprava o točnosti i prihvatljivosti algoritma u realnim sustavima upravljanja sigurnošću prometa.

Ključne riječi: inteligentni transportni sustavi, upravljanje sigurnošću prometa, sustav promjenjivih ograničenja brzine, sudarni potencijal, učestalost pretjecanja

SUMMARY

Davor Katava

Mladenka Čosić

MODELING THE IMPACT OF VEHICLES OVERTAKING WITHIN THE MOTORWAY SAFETY MANAGEMENT SYSTEM USING THE CRASH POTENTIAL FUNCTION

This research carries out the algorithm for the estimation of the vehicle overtaking frequency, based on the traffic measurement on motorway on two locations. The importance and various approaches for traffic safety management are described. The model of the impact of vehicles overtaking is an integral part of the crash potential function. The function of crash potential is explained with all her integral factors with special highlight on the vehicles overtaking frequency factor. The new algorithm for the estimation the vehicles overtaking frequency is shown and his structure is described. In addition the possibility of advanced vehicles overtaking frequency estimation based on traffic measurement on only one location is shown. This approach is based on the previous off-line calibration of specific motorway sections. Furthermore, appropriate field measurements are conducted that proved the algorithm efficiency. At the end, the discussion regarding the accuracy and acceptability of the algorithm in real condition of traffic safety management systems has been carried out.

Key words: intelligent transport system, traffic safety management, variable speed limit system, crash potential, vehicles overtaking frequency

O AUTORIMA

Davor Katava rođen je 1. kolovoza 1991. godine u Zenici, Bosna i Hercegovina. Godine 2010. završio je program Ekonomija i trgovina „A“ – ekonomist u Srednjoj školi „Busovača“ u Busovači. Nakon završene srednje škole, 2010. godine upisuje preddiplomski studij Promet na Fakultetu prometnih znanosti Sveučilišta u Zagrebu, smjer Cestovni promet. 2013. godine postaje sveučilišni prvostupnik inženjer prometa te iste godine upisuje diplomski studij Promet, također smjer Cestovni promet. Danas je absolvent diplomskog studija.

Mladenka Ćosić rođena je 23. veljače 1992. godine u Zenici, Bosna i Hercegovina. 2010. godine završila je program Ekonomija i trgovina „A“ – ekonomist u Srednjoj školi „Busovača“ u Busovači. Nakon završene srednje škole, 2010. godine upisuje preddiplomski studij Promet na Fakultetu prometnih znanosti, smjer Cestovni promet. 2013. godine postala je sveučilišna prvostupnica inženjerka prometa i iste godine upisala diplomski studij Promet, smjer Cestovni promet. Danas je absolventica diplomskog studija.

POPIS SLIKA

Slika 1. Solomonova krivulja	12
Slika 2. Histogram odnosa broja nesreća u odnosu na opterećenje i kapacitet dionice	18
Slika 3. Skica mjerenja prometa na dionici autoceste video nadzorom	23
Slika 4. Skica mjerenja prometa na dva presjeka autoceste	24
Slika 5. Skica mjerenja prometa na jednom presjeku autoceste	24
Slika 6. Načelni prikaz rada algoritma za dodjeljivanje oznake redoslijeda mjerenjem prometa na dva presjeka	29
Slika 7. Algoritam za izračun broja pretjecanja vozila	31
Slika 8. Dionica autoceste A1 od 23. do 27. km	35
Slika 9. Početak dionice mjerenja	36
Slika 10. Završetak dionice mjerenja	36
Slika 11. Mjerni uređaj Trans-Q Radar Traffic Classifier na autocesti A1	37
Slika 12. Prikaz algoritma izračuna broja pretjecanja vozila u MATLAB-u	41
Slika 14. Postavljanje mjernih uređaja na autocestu A1	60

POPIS TABLICA

Tablica 1. Podjela detektiranih vozila na grupe	26
Tablica 2. Izmjereni broj vozila tijekom perioda mjerenja	38
Tablica 3. Prikaz rezultata mjerenja radarima	39
Tablica 4. Vozila detektirana tijekom 15-minutnog perioda	57
Tablica 5. Ovisnost izračunatog broja pretjecanja o broju teretnih i sporih vozila	59

POPIS GRAFIKONA

Grafikon 1. Pregled izmjerenog broja vozila tijekom 21 h	38
Grafikon 2. Broj pretjecanja vozila u ovisnosti o broju teretnih vozila i vozila koja voze ispod granične brzine	43

PRILOZI

Tablica 4. Vozila detektirana tijekom 15-minutnog perioda

Prvi presjek			
Oznaka redoslijeda	Vrijeme detekcije	Brzina vozila	Duljina vozila
1	2015/04/21 19:00:20.00	114	4,57
2	2015/04/21 19:00:32.00	132	5,49
3	2015/04/21 19:00:40.00	132	4,57
4	2015/04/21 19:01:01.00	150	4,57
5	2015/04/21 19:01:04.00	121	4,88
6	2015/04/21 19:01:05.00	143	3,96
7	2015/04/21 19:01:16.00	146	3,96
8	2015/04/21 19:01:24.00	77	18,90
9	2015/04/21 19:01:28.00	124	3,96
10	2015/04/21 19:01:50.00	87	17,68
11	2015/04/21 19:01:54.00	108	4,88
12	2015/04/21 19:01:59.00	140	4,27
13	2015/04/21 19:02:13.00	87	15,85
14	2015/04/21 19:02:31.00	84	17,98
15	2015/04/21 19:02:53.00	109	5,18
16	2015/04/21 19:02:56.00	127	3,66
17	2015/04/21 19:02:59.00	80	16,46
18	2015/04/21 19:03:01.00	150	5,18
19	2015/04/21 19:03:11.00	124	5,49
20	2015/04/21 19:03:26.00	158	4,27
21	2015/04/21 19:03:42.00	84	15,54
22	2015/04/21 19:03:44.00	140	5,18
23	2015/04/21 19:03:47.00	130	3,96
24	2015/04/21 19:03:50.00	90	12,19
25	2015/04/21 19:03:53.00	114	5,79
26	2015/04/21 19:04:08.00	113	5,49
27	2015/04/21 19:04:32.00	111	4,88
28	2015/04/21 19:04:33.00	113	5,49
29	2015/04/21 19:04:51.00	163	4,57
30	2015/04/21 19:04:54.00	122	5,18
31	2015/04/21 19:05:06.00	76	17,37
32	2015/04/21 19:05:07.00	124	3,96
33	2015/04/21 19:05:20.00	87	17,98
34	2015/04/21 19:05:35.00	122	5,18
35	2015/04/21 19:05:38.00	76	13,41
36	2015/04/21 19:05:42.00	134	3,66
37	2015/04/21 19:05:44.00	87	17,68
38	2015/04/21 19:05:48.00	153	3,35
39	2015/04/21 19:05:58.00	150	5,79
40	2015/04/21 19:06:00.00	166	4,88
41	2015/04/21 19:06:11.00	124	5,79
42	2015/04/21 19:06:17.00	130	6,10
43	2015/04/21 19:06:30.00	87	18,59
44	2015/04/21 19:06:31.00	132	3,96
45	2015/04/21 19:06:37.00	108	6,40
46	2015/04/21 19:07:07.00	87	19,81
47	2015/04/21 19:07:08.00	80	17,98
48	2015/04/21 19:07:13.00	121	5,18
49	2015/04/21 19:07:18.00	103	7,92
50	2015/04/21 19:07:28.00	80	17,98
51	2015/04/21 19:07:34.00	154	5,18
52	2015/04/21 19:07:40.00	174	5,79
53	2015/04/21 19:07:49.00	158	4,27
54	2015/04/21 19:07:54.00	82	17,68
55	2015/04/21 19:08:01.00	121	5,18
56	2015/04/21 19:08:02.00	167	3,35
57	2015/04/21 19:08:03.00	126	5,18
58	2015/04/21 19:08:11.00	87	17,98
59	2015/04/21 19:08:15.00	148	4,27
60	2015/04/21 19:08:18.00	153	4,27

Drugi presjek			
Oznaka redoslijeda	Vrijeme detekcije	Brzina vozila	Duljina vozila
2	2015/04/21 19:02:19.00	140	5,79
1	2015/04/21 19:02:21.00	121	4,88
3	2015/04/21 19:02:27.00	134	5,18
4	2015/04/21 19:02:39.00	143	3,96
6	2015/04/21 19:02:45.00	143	4,27
7	2015/04/21 19:02:51.00	158	3,96
5	2015/04/21 19:02:56.00	127	3,96
9	2015/04/21 19:03:21.00	127	4,57
12	2015/04/21 19:04:00.00	142	3,66
11	2015/04/21 19:04:01.00	109	5,79
8	2015/04/21 19:04:27.00	76	18,59
10	2015/04/21 19:04:33.00	85	17,37
18	2015/04/21 19:04:40.00	138	4,57
16	2015/04/21 19:04:46.00	127	4,27
20	2015/04/21 19:04:53.00	158	4,57
13	2015/04/21 19:04:55.00	87	15,54
15	2015/04/21 19:05:01.00	111	5,79
19	2015/04/21 19:05:07.00	124	4,27
14	2015/04/21 19:05:16.00	84	17,37
22	2015/04/21 19:05:29.00	130	4,88
23	2015/04/21 19:05:30.00	140	4,57
25	2015/04/21 19:05:54.00	124	4,57
17	2015/04/21 19:05:58.00	79	15,85
26	2015/04/21 19:06:07.00	119	5,49
29	2015/04/21 19:06:16.00	153	5,18
24	2015/04/21 19:06:23.00	93	11,89
21	2015/04/21 19:06:27.00	84	14,93
28	2015/04/21 19:06:38.00	100	5,79
30	2015/04/21 19:06:43.00	130	5,79
27	2015/04/21 19:06:55.00	98	5,49
32	2015/04/21 19:07:23.00	105	4,27
38	2015/04/21 19:07:23.00	105	3,96
36	2015/04/21 19:07:26.00	132	3,66
34	2015/04/21 19:07:28.00	126	5,49
39	2015/04/21 19:07:38.00	137	5,18
40	2015/04/21 19:07:49.00	146	4,88
42	2015/04/21 19:07:49.00	154	3,96
31	2015/04/21 19:08:00.00	87	17,68
41	2015/04/21 19:08:03.00	130	4,27
33	2015/04/21 19:08:05.00	77	19,20
37	2015/04/21 19:08:22.00	87	18,29
35	2015/04/21 19:08:41.00	76	13,11
44	2015/04/21 19:08:44.00	113	5,79
45	2015/04/21 19:09:00.00	108	6,10
52	2015/04/21 19:09:07.00	171	4,27
51	2015/04/21 19:09:09.00	158	3,66
48	2015/04/21 19:09:09.00	121	4,57
43	2015/04/21 19:09:18.00	85	18,29
53	2015/04/21 19:09:22.00	158	4,27
56	2015/04/21 19:09:24.00	114	6,71
49	2015/04/21 19:09:32.00	146	3,96
61	2015/04/21 19:09:44.00	198	3,96
50	2015/04/21 19:09:46.00	85	19,20
55	2015/04/21 19:09:47.00	140	4,57
60	2015/04/21 19:09:53.00	158	3,66
59	2015/04/21 19:09:53.00	129	3,35
57	2015/04/21 19:09:56.00	140	4,88
46	2015/04/21 19:10:05.00	79	17,98
47	2015/04/21 19:10:17.00	84	17,98
54	2015/04/21 19:10:37.00	85	18,29

61	2015/04/21 19:08:26.00	183	3,96
62	2015/04/21 19:08:28.00	80	17,37
63	2015/04/21 19:08:37.00	79	17,37
64	2015/04/21 19:09:34.00	117	4,57
65	2015/04/21 19:09:35.00	127	5,18
66	2015/04/21 19:09:57.00	113	4,27
67	2015/04/21 19:10:21.00	158	4,88
68	2015/04/21 19:10:23.00	153	3,96
69	2015/04/21 19:10:24.00	105	5,49
70	2015/04/21 19:10:48.00	146	6,71
71	2015/04/21 19:10:50.00	117	5,49
72	2015/04/21 19:11:01.00	163	4,88
73	2015/04/21 19:11:03.00	82	16,15
74	2015/04/21 19:11:07.00	87	16,46
75	2015/04/21 19:11:35.00	143	5,49
76	2015/04/21 19:11:45.00	77	19,81
77	2015/04/21 19:11:47.00	79	19,51
78	2015/04/21 19:11:48.00	143	4,27
79	2015/04/21 19:11:53.00	114	3,35
80	2015/04/21 19:11:57.00	82	15,24
81	2015/04/21 19:12:17.00	137	5,79
82	2015/04/21 19:12:36.00	111	5,18
83	2015/04/21 19:12:43.00	154	3,96
84	2015/04/21 19:12:45.00	84	18,90
85	2015/04/21 19:12:46.00	84	4,88
86	2015/04/21 19:13:05.00	92	4,88
87	2015/04/21 19:13:05.00	122	3,35
88	2015/04/21 19:13:15.00	80	10,67
89	2015/04/21 19:13:27.00	108	7,01
90	2015/04/21 19:13:56.00	153	4,27
91	2015/04/21 19:13:57.00	80	16,76
92	2015/04/21 19:13:59.00	80	11,28
93	2015/04/21 19:14:05.00	134	4,57
94	2015/04/21 19:14:06.00	122	3,35
95	2015/04/21 19:14:17.00	84	18,59
96	2015/04/21 19:14:24.00	132	7,31
97	2015/04/21 19:14:29.00	124	3,35
98	2015/04/21 19:15:10.00	127	4,27
99	2015/04/21 19:15:24.00	77	17,68
100	2015/04/21 19:15:35.00	84	15,85
101	2015/04/21 19:15:36.00	116	4,27
102	2015/04/21 19:15:45.00	132	3,96

58	2015/04/21 19:10:50.00	87	17,98
62	2015/04/21 19:11:23.00	80	18,29
65	2015/04/21 19:11:30.00	134	3,96
64	2015/04/21 19:11:33.00	108	4,88
63	2015/04/21 19:11:36.00	80	16,15
67	2015/04/21 19:11:50.00	171	3,05
68	2015/04/21 19:11:59.00	124	3,05
66	2015/04/21 19:11:59.00	148	3,96
70	2015/04/21 19:12:26.00	143	4,88
72	2015/04/21 19:12:31.00	167	3,35
69	2015/04/21 19:12:42.00	103	5,49
71	2015/04/21 19:12:50.00	121	6,40
75	2015/04/21 19:13:18.00	134	3,05
78	2015/04/21 19:13:33.00	129	4,57
74	2015/04/21 19:13:46.00	89	16,46
73	2015/04/21 19:13:52.00	80	14,93
79	2015/04/21 19:13:56.00	117	4,88
81	2015/04/21 19:14:00.00	132	5,79
83	2015/04/21 19:14:15.00	154	2,44
76	2015/04/21 19:14:40.00	77	19,51
77	2015/04/21 19:14:42.00	84	20,42
82	2015/04/21 19:14:48.00	106	4,57
80	2015/04/21 19:14:57.00	116	4,27
87	2015/04/21 19:15:20.00	97	5,18
84	2015/04/21 19:15:27.00	87	18,90
90	2015/04/21 19:15:32.00	153	4,27
85	2015/04/21 19:15:35.00	119	5,79
86	2015/04/21 19:15:43.00	90	3,66
89	2015/04/21 19:15:49.00	140	3,66
93	2015/04/21 19:15:52.00	138	2,74
94	2015/04/21 19:15:59.00	132	5,79
88	2015/04/21 19:16:08.00	80	9,75
96	2015/04/21 19:16:17.00	127	6,40
97	2015/04/21 19:16:25.00	126	5,49
91	2015/04/21 19:16:51.00	80	15,85
92	2015/04/21 19:16:52.00	80	11,28
95	2015/04/21 19:16:59.00	87	18,29
98	2015/04/21 19:17:03.00	132	4,88
102	2015/04/21 19:17:35.00	116	5,18
101	2015/04/21 19:18:04.00	116	4,88
99	2015/04/21 19:18:13.00	92	15,54
100	2015/04/21 19:18:26.00	79	16,46

Tablica 5. Ovisnost izračunatog broja pretjecanja o broju teretnih i sporih vozila

Broj teretnih vozila i vozila koja voze ispod granične brzine	Broj pretjecanja vozila
0	2
1	4
2	6
3	10
4	19
5	25
6	34
7	28
8	48
9	63
10	75
11	61
12	76
13	105
14	117
15	85
16	123
17	126
18	126
19	129
20	139
21	136
22	143
23	147
24	151
25	152
26	161
27	165
28	169
29	171
30	174
31	176



Izvor: izrada autora

Slika 13. Postavljanje mjernih uređaja na autocestu A1