

# OBEZBEĐENJE SAOBRAĆAJNE BEZBEDNOSTI KORIŠTENJEM MIKROSIMULACIJE SAOBRAĆAJNIH TOKOVA U TUNELIMA NA AUTOPUTU

Stanko Laković, Matjaž Šraml, Tomaž Tollazzi

*Građevinski fakultet Univerziteta u Mariboru, Maribor, Slovenija, stanko.lakovic@uni-mb.si*

Iztok Potrč

*Mašinski fakultet Univerziteta u Mariboru, Maribor, Slovenija*

**Rezime:** U navedenom radu smo upotrebom diskretnih simulacija analizirali saobraćajni tok na širem području autoputne mreže A1 Slovenije, gde se nalaze četiri tunela jedan za drugim, a posebno je naglašen tunel Jasovnik (leva cev) i to kod različitih scenarija u primeru zastoja, kod kojih smo menjali neke parametre (broj vozila, brzinu, strukturu vozila, čas odazivanja sistema) te utvrđivali njihov uticaj. Pri izradi računarske simulacije prometnih tokova upotrebili smo realne ulazne podatke za levu tunelsku cev tunela Jasovnik (autocesta A1), realne podatke o trasi i računarski program Vissim 4.10. Namen članka je da se prikaže, kako korišćenje diskretnih simulacija doprinosi odlučivanju o donošenju različitih mera za popravljavanje stanja, diskretnu simulaciju saobraćajnih tokova se može upotrebiti i u fazi planiranja tunela te drugih objekata.

**Ključne reči:** Diskretne simulacije saobraćajnih tokova, tuneli na autoputevima, bezbednost u saobraćaju

## ASSURING TRAFFIC SAFETY USING MICROSIMULATION OF TRAFFIC FLOW IN HIGHWAY TUNELS

**Abstract:** In this paper we have analyzed traffic flow on wide area of highway A1 in Slovenia by using discrete simulation. There are four consecutive tunnels on A1. We emphasized tunnel Jasovnik (left tube) and used different scenarios simulating traffic congestion by changing different parameters (number of vehicles, speed, vehicle structure, system response) and noted their influence on the system. To perform computer simulation of traffic flow we used real data from the Jasovnik tunnel's left tube (highway A1), real route data and computer software Vissim 4.10. The purpose of this paper is to show how the use of discrete simulations can contribute to a decision making process for traffic condition improvement. Discrete simulation of traffic flow can be used during the planning phase of the tunnel and other objects.

**Key words:** Discrete simulation of traffic flow, highway tunnels, traffic safety

### 1. UVOD

U radu je predstavljena mikrosimulacijska analiza saobraćajnih tokova u autocestovnom tunelu i analiza mogućih zastoja, što predstavlja temelj za predlog mera za podizanje nivoa postojeće saobraćajne sigurnosti, uzimajući u obzir stručna postignuća na području osiguravanja saobraćajne sigurnosti u drumskim tunelima. Pri izradi računarske simulacije saobraćajnih tokova koristili smo realne ulazne podatke za levu tunelsku cev tunela Jasovnik (autocesta A1). Pred tunelom Jasovnik, gledano u smeru spomenute vožnje, je tunel Trojane kao najduži dvocevni tunel u slovenskoj autocestovnoj mreži. Za tunelom Jasovnik je tunel Ločica. Saobraćajni tok u tunelu Jasovnik može uticati na saobraćajne tokove u tunelu

Trojane i tunelu Ločica te na saobraćajne tokove na otvorenom delu autoceste između spomenutih tunela.

Mikroskopski modeli simulacije saobraćajnih tokova obuhvataju posebno svako individualno, lično i teretno vozilo te motor sa realnim karakteristikama (dimenzije, ubrzavanje, usporavanje, brzina kretanja...). Mikroskopski modeli omogućuju temeljitu analizu intervala zgušnjavanja i razređivanja saobraćaja i stoga omogućavaju precizniju analizu prirode drumskoga saobraćaja[1]. U određenim primerima možemo drumski saobraćaj označiti kao kaotičan i nelinearan. Takve primere najlakše modeliramo na mikroskopskom nivou s modeliranjem pojedinačnog vozila na autocesti u svakom časovnom koraku; vozila se kreću od početka do cilja – u realnom času.

## 2. METODOLOGIJA

Sa računarskom simulacijom smo analizirali saobraćajne tokove u auto-cestovnom tunelu i moguće zastoje, što je temelj za predlog mera za podizanje nivoa postojeće saobraćajne sigurnosti, uvažavajući stručna postignuća na području osiguravanja saobraćajne sigurnosti u drumskim tunelima [2,3,4,5].

U prošlosti te u novije vreme korišteni su različiti modeli praćenja vozila, koji mogu biti kategorizirani u sledeće grupe bazirane na konceptu, koji stoji iza modela (oni su prikazani u detalju u referenciji [10]): (i) *Model odgovora na stimulaciju* (Chandler model (1985), pojednostavljeni GM model (1961)); (ii) *Model sigurnosne udaljenosti* (Gipps model (1981), Krauss model (1997)); (iii) *Psihofizički model* (Leutzbach-Wiedemann model (1986)), (iv) *Model baziran na ćelijama* (cellular automata model (Nagel (1992))); (v) *Model optimalne brzine* (Bando et al (1995)); (vi) *Model baziran na putanjama* (Newell model (2002)). Između svih tih modela, mi smo upotreбили Leutzbach-Wiedemannov model. Taj se model može opisati sa sledećom jednačbom [7]

$$a_n(t+T) = \frac{dv(t)^2}{2[S - dx(t)]} + a_{n-1}(t) \quad (1)$$

Model uzima u obzir psihofizički aspekt ponašanja u vožnji (vidi sliku 2- definicija temeljnih psihofizičkih parametara u Vissim-u). Za prikazanu analizu korišten je Wiedemannov 74 [6, 11] model.

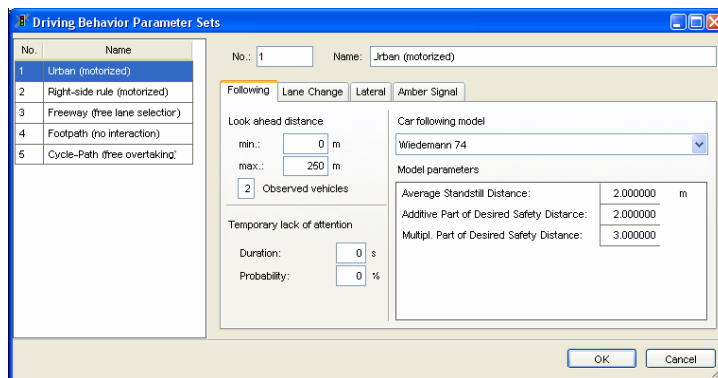
Taj model je vrlo dobro poznat pogotovo za simulacionu svrhu. Razlikuje se od ostalih modela šta uzima u obzir ubrzanje  $a_{n-1}(t)$  vozila ispred kao stimulans za vozilo koje prati a uz to i razliku trenutnog odstojanja i poželjnog odstojanja S. Parametri koje treba optimirati su vreme reagovanja T i poželjna udaljenost S, gde t je čas,  $dv(t)$  je derivacija brzine,  $dx(t)$  derivacija udaljenosti.

Vissim 4.10 [6] predstavlja model diskretne, vremenski orientisane mikroskopske simulacije. Za to se koristi robustan psihofizički model ponašanja (razvijen od strane Leutzbacha i Wiedemanna [7,8,9,11]) karakteristike vozila za longitudinalno kretanje i algoritmi bazirani na zakonima saobraćaja. Matematički model (Jednačba 1) baziran je na Letzbach-Wiedemann-ovoj teorije, koja pretpostavlja da se svaki vozač može zateći u jednoj od sledećih situacija:

- vožnja u slobodom toku prometa – bez utjecaja od drugih vozila.
- prilaženje – proces podešavanja brzine na vozilo ispred

- praćenje – vozač održava konstantan razmak između svojeg i vozila napred bez kočenja ili ubrzavanja
- kočenje – primenjuje se kad se pređe sigurnosni limit razmaka između vozila

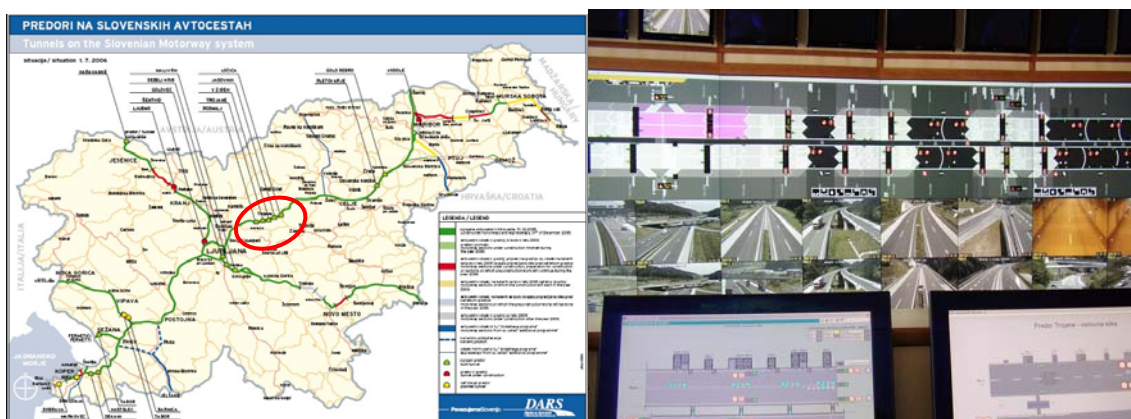
Kao što je gore navedeno, model koristi psihofizički model praćenja vozila sa linearnim pokretanjem vozila i direkcije za bočno kretanje. Model uzima u obzir tipove vozača (ženski vozač, muški vozač, star, mlad) i njihove individualne karakteristike – vidi sliku 1.



Slika 1: Definicija temeljnih psihofizičkih parametara u Vissim-u

### 3. OSNOVNA PROBLEMATIKA

Slovenija realizacijom Nacionalnoga programa izgradnje autocesta (NPIA) dobija novu, kvalitetno izgrađenu infrastrukturu, a time i veći broj auto-cestovnih tunela. Zajedno s postojećim auto-cestovnim tunelima tvore novi autocestovni tuneli mrežu tunela na slovenskom auto-cestovnom sistemu (slika 2), koja mora zadovoljiti uslove sigurnog, udobnog i nesmetanog protoka saobraćaja (odgovarajuća unutrašnja povezivanja države, povezanost na auto-cestovnu mrežu graničnih država, popravljane saobraćajne sigurnosti, konkurentnost slovenskih proizvoda, smanjenje negativnih saobraćajnih utecaja na okolinu...).



Slika 2: Tuneli na slovenskoj auto-cestovnoj mreži (u krugu su označena četiri tunela, među kojima je tunel Jasovnik, treći tunel gledano iz Ljubljane prema Mariboru), desno je nadzorni centar Vransko

Osnovna problematika koju smo izložili su zastoji u tunelima, koji nastaju na taj način da je zatvorena vozna traka ili da je zatvorena vozna i traka za preticanje. Pri zastoju, koje nastaje zatvaranjem vozne trase, a promet se nastavlja po traki za preticanje istražili smo utecaj smanjenja ograničenja brzine na dužinu zastoja, uzimajući u obzir i mogućnosti povećanja broja vozila.

Pre nego smo počeli sa izradom simulacijskoga modela, skupili smo podatke o procesima sistema. Podaci su skupljeni na DARS-u (Društvo za autoceste u Republici Sloveniji) i posebno na auto-cestovnoj bazi Vransko, koja pokriva navedeni deo auto-cestovne mreže (širi odcep tunela Jasovnik), kojega smo analizirali sa simulacijom. Skupljanje podataka predstavlja vrlo odgovorno područje u simulacionoj analizi, jer se može na temelju nepravilnih podataka poništi uloga simulacije. Pri skupljanju podataka smo si pomagali, tako da smo uspostavili kontakte sa inženjerima, operaterima, tehnolozima i analizom odgovarajuće postojeće dokumentacije. Cilj skupljanja podataka je bio odrediti parametre modela. Nakon snimanja podataka izradili smo simulacioni model postojećeg stanja.

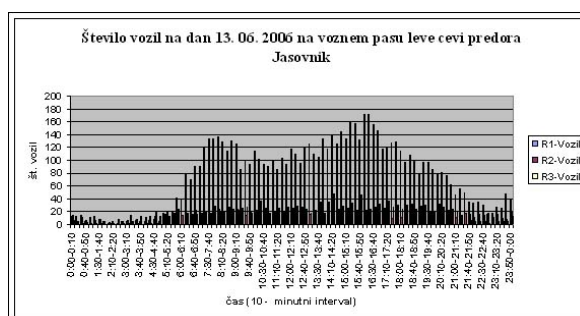
Model smo izradili upotrebom realnih podataka u području računarskog programa Vissim, gde smo pomoću linkova i konektora najpre nacrtali predmetno područje u merilu. Zatim smo uneli sve realne podatke u program i počeli sa simulacijom. Nakon izrade modela (morali smo utvrditi ispravnost rada modela), jer model nije u celoti pratio realno događanje, izvršili smo kalibraciju modela. Na kraju kalibracije, model se je ponašao slično kao realni sistem.

Simulaciona ispitivanja smo izvršili pomoću simulacionog programskog paketa VISSIM 4.10 odgovarajuće računarske opreme (PC lični računar). Izlazne podatke simulacionih ispitivanja koristili smo kao numeričku ocenu merenih veličina za svako postavljanje, alternativu sistema, koju kasnije međusobno uspoređujemo. Uz numerički ispis izradili smo i grafičke prikaze izlaznih podataka, koji su pregledniji od broječnih pokazatelja.

Preciznost dokumentiranja je vrlo važna. Simulacioni projekt smo zaključili s predstavljanjem rezultata i snimaka simulacija sa naglaskom na verodostojnosti rezultata.

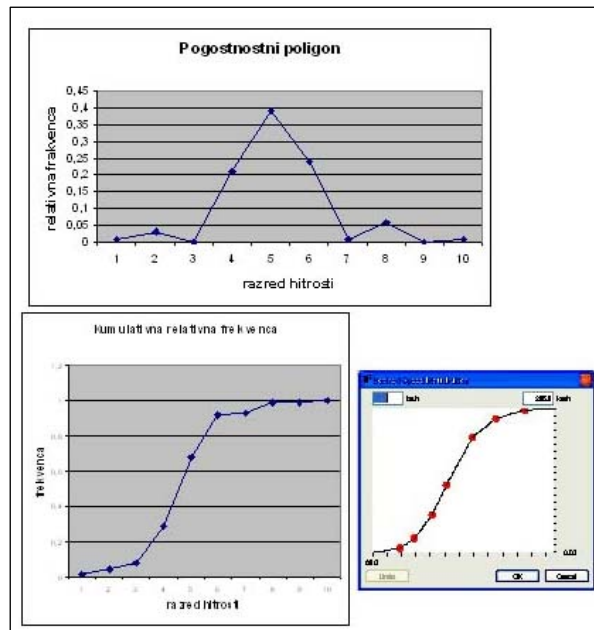
#### 4. IZRADA OSNOVNOG MODELA ZA SIMULACIJE

Za dan uzimanja podataka smo odredili 13.06.2006. (utorak), koji osigurava činjenične podatke, kojima možemo nastaviti sa simulacijom. Slika 3 prikazuje broj vozila na dan 13. 06. 2006. na voznom pasu leve cevi tunela Jasovnik. Na navedenoj slici se može videti da je saobraćaj slabije gustoće protoka (od 00:00 do 06:00 sati) ujutro, da se zatim saobraćaj povećava i postiže dva maksimuma (jednoga u približno 08:00 i drugoga u približno 16:00 sati) te se zatim pomalo umiruje do 22:00 sata, zatim je protok slabiji. Na slici 2 su prikazana vozila R1 (lična vozila), (kombi vozila) i R3 (teretna vozila). Oznake R1, R2 i R3 koriste na DARS-u za označavanje tipova vozila. Za svako pojedinačno vozilo, koje je stupilo u tunel smo sakupili sve potrebne parametre.



Slika 3: Brojni podaci za dan 13. 06. 2006 na voznoj traci leve cevi tunela Jasovnik

Model stvarnih brzina smo preuzeli iz obavljenih stvarnih merenja brzina za izabrani dan, koje smo dobili na nadzornoj stanici Vransko. Iz krivulje stvarnih brzina pojedinačnih vozila (slika 4), tvorili smo matematički model brzina sa programskim oruđem VISSIM i tako pokušali približiti stvarnim saobraćajnim navikama vozača na tom području.



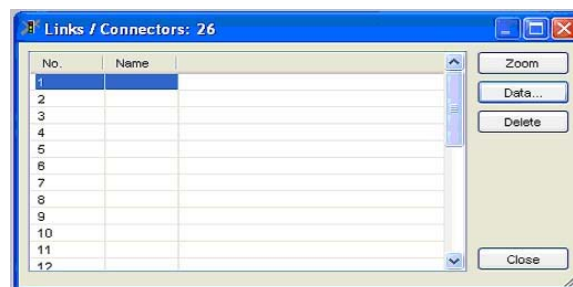
Slika 4: Prenošenje stvarnih brzina vozila u programski modul

Ulazni podaci:

- projektantsko-tehnički (pored ostalog digitalnih snimaka trase na kojem smo izradili matematički model),
- saobraćajno-tehnički (između ostalog stvarna ograničenja brzina i saobraćajna signalizacija, koja važi za pojedinačne deonice predmetnog područja),
- stvarna saobraćajna opterećenja i brzine dobivene automatskim brojenjem saobraćaja.

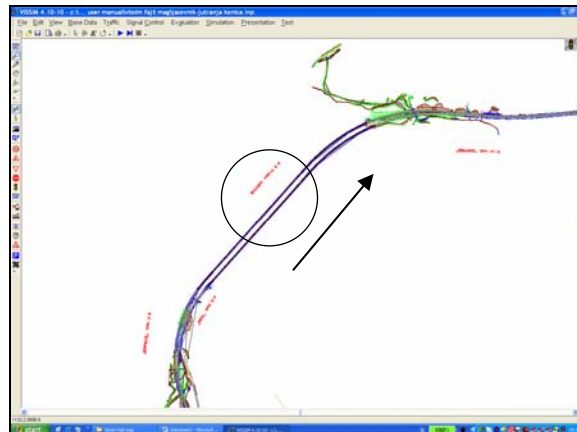
Nakon izrađenog matematičkog modela je na temelju ulaznih podataka i pretpostavki sledila kalibracija »real time« simulacije. Nakon kalibracije modela smo izvršili usporedbu modeliranih i merodavnih saobraćajnih opterećenja na pojedinačnim deonicama saobraćajne mreže, koja prikazuje pouzdanost celokupnog modela.

Pomoću linkova (delova puta) i konektora (povezanosti između delova puta) izradili smo celokupnu trasu puta (slika 5 i 6), a kao pozadinu smo dali nacrt puta iz konstrukcijske dokumentacije.



Slika 5: Linkovi i konektori, koji su korišteni u simulaciji.

Na slici 6 je prikazan model trase u programu Vissim u momentu kada je već ucrtan nacrt trase i dodana podloga te uneseni svi podaci koji omogućuju početak simulacije.



*Slika 6:* Model trase u programu Vissim (prikazana je trasa ispred i u tunelu Jasovnik, u krugu je označen dio tunela Jasovnik, sa stralicom je označen smer prometa u levoj cevi prema Mariboru)

Izrađeno je više simulacija zastoja sa različitim scenarijima. Nismo se bavili posebno sa požarima, razlivenom opasnom tekućinom ili saobraćajnim nezgodama niti sa saobraćajem po desnoj tunelskoj cevi.

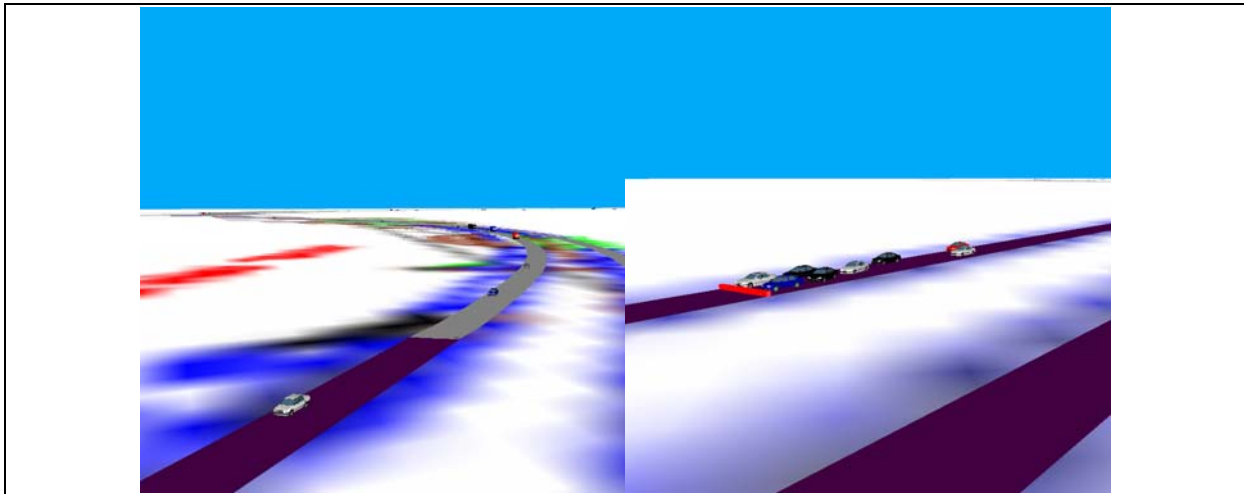
## 5. REZULTATI ANALIZE

Na slici 7 se vidi kolona vozila nastala nakon zastoja u tunelu Jasovnik i prije tunela. U tunelu Jasovnik (leva tunelska cev) je ostalo 197 vozila, šta je previše i predstavlja potencijalnu opasnost novih nezgoda. U primeru požara mogli bi očekivati veliku materijalnu štetu i potencijalno smrtne žrtve među obuhvaćenim vozačima i suvozačima.



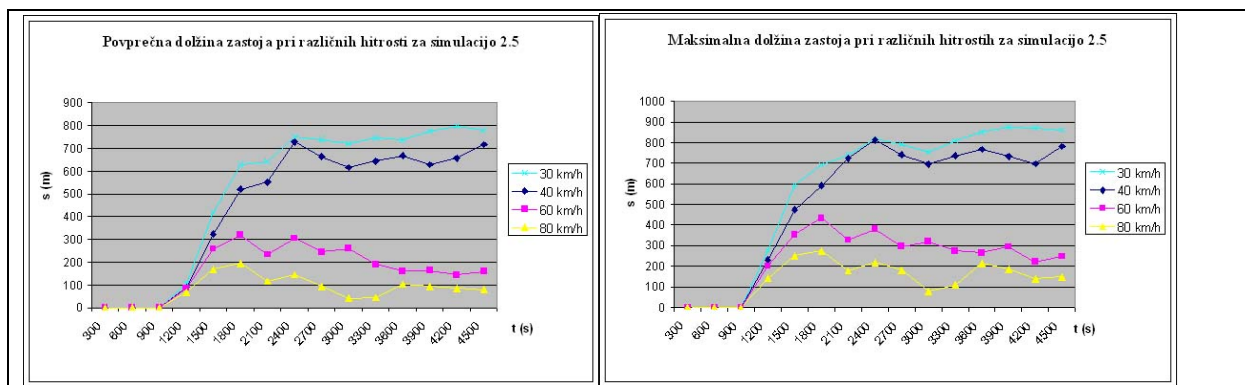
*Slika 7:* Zastoj u levoj tunelskoj cevi tunela Jasovnik, koji se nastavlja nazad po putu (svetlija boja je za put izvan tunela, tamnija za put u tunelu)

Na slici 8 je prikazana vožnja vozila u simulaciji i mesto ustavljanja vozila u tunelu (drum u tunelu je nacrtan tamnije nego drum izvan tunela) nakon zastoja.



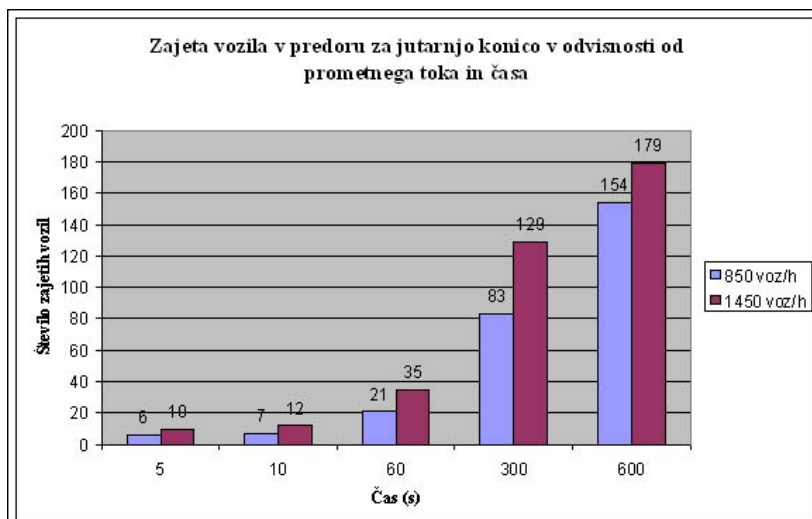
Slika 8: Levo vožnja vozila, desno mesto ustavljanja vozila u tunelu – zastoј

Na temelju obavljenih simulacija izradili smo zajedničku analizu za popodnevni kraj dana (slika 9), koja je pokazala da je ograničenje brzine 60 km/h i kod povećanog broja vozila odgovarajuća i preporučljiva u primeru da je vozna traka (zbog zaustavljena vozila) zatvorena za saobraćaj te se celokupni saobraćaj odvija po traci za preticanje u tunelu Jasovnik. Iz prikazanog dijagrama proizlazi da je brzina 80 km/h najmanja vrednost prosečne dužine zastoja i maksimalne dužine zastoja, iako je zbog veće brzine i rizik za saobraćajnu nezgodu veći.



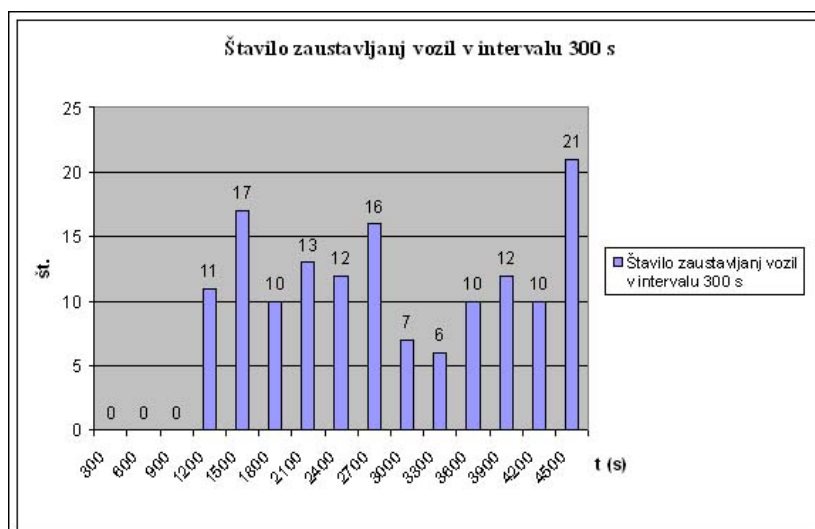
Slika 9: Rezultati analize utecaja brzina i broja vozila na sigurnost u tunelu, kada je zatvorena vozna traka zbog zaustavljanja vozila

Na slici 10 su prikazana kumulativno obuhvaćena vozila u tunelu u zavisnosti od saobraćajnog toka i vremena.



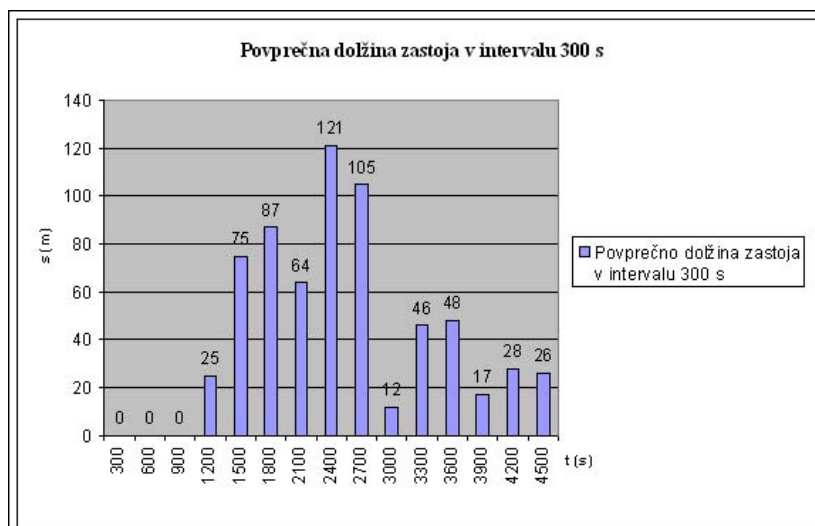
Slika 10: Obuhvačena vozila u tunelu ovisna od saobraćajnog toka i vremena (zastoj, u kojem su zatvorene vozna i preticajna traka)

Na slici 11 je vidan broj zaustavljanja koji su nakon zastoja između 6 i 21 u intervalu 300 s. Zastoj je nastao u 900 sekundi simulacije na 713 m tunela, tunel Jasovnik je dugačak 1612 m.



Slika 11: Broj zaustavljenih vozila u intervalu 300 s za simulaciju 1.4

Na slici 12 se vidi prosečna dužina zastoja za simulaciju 2.4, koja je nakon zastoja između 12 i 121 m u intervalu 300 s.



Slika 12: Prosečna dužina zastoja u intervalu 300 s za simulaciju 2.4

Na slici 13 se vidi broj zaustavljenih vozila u levoj cevi tunela Jasovnik, u simulaciji 2.1 je to 209 vozila, zatim se vozila zaustavljaju do tunela Trojane.



Slika 13: Broj zaustavljenih vozila u tunelu Jasovnik između tunela Jasovnik i Trojane za simulaciju 2.1

## 6. ZAKLJUČAK

Osnovne prednosti mikrosimulacija u saobraćaju, koje otvaraju perspektivu daljega razvoja toga pristupa u istraživanjima zakonitosti odvijanja saobraćaja u drumskoj mreži, pokazuje se kroz:

- istraživanje pojava u saobraćaju bez eksperimenata u prirodi;
- brzo rešavanje najzahtevnijih zadataka;
- omogućuje izvođenje zadataka koje se ne mogu rešiti analitičkim postupkom;
- mogućnost praćenja većeg opsega informacija;

- istraživanje verovatnosti određenih pojava u saobraćajnom toku;
- mogućnost ponavljanja željenih okolnosti, realno mogućih i hipotetičkih;
- mogućnost istraživanja kretanja saobraćajnih tokova u drumskoj mreži, a koja u stvarnosti nije moguća;
- mogućnost testiranja alternativnih sistema u vazi projektovanja sistema za identične zahteve budućeg saobraćaja.

Mikrosimulacioni model kojega smo koristili pri izradi zadatka, daje dobru poredbu s realnim odvijanjem saobraćaja. Komercijalni mikrosimulacioni program Vissim 4.10 omogućuje vrlo precizno kalibriranje modela i unošenje potrebnih promena te zamenu potrebnog broja ulaznih podataka. Pri izradi mikrosimulacije je vrlo važna faza obuhvatanja podataka, zato bi toj fazi bilo potrebno posvetiti posebnu pažnju.

U analizi moramo i dalje koristiti simulacione modele, koji omogućuju brzu i pouzdanu obradu okolnosti, koje se događaju ili se mogu dogoditi na auto-cestovnoj i ostaloj saobraćajnoj mreži u Republici Sloveniji (potrebno je preventivno razmišljanje).

## REFERENCE

- [1] S. Laković, I. Potrč, *Prometni tokovi s motrišta sigurnosti u tunelima na autocestama*, Suvremeni promet, 2006, vol 26, no. 3/4, str. 189-192.
- [2] S. Laković, *Računalniške simulacije prometnih tokov v avtocestnih predorih*, magistrsko delo. Maribor: [S. Laković], 2007. XI, 114 str., ilustr.
- [3] T. Okk Oketch, M. Delsey, D. Robertson, *Evaluation of performance of modern roundabout using Paramics micro-simulation model*, TAC Conference 2004.
- [4] R. Akçelik, *Roundabout Model Calibration Issues and a Case Study*, TRB National Roundabout Conference, Colorado, 2005.
- [5] R. Akçelik, M. Besley, *Mikrosimulation and analytical methods for modelling urban traffic*, Conference of Advanced Modeling Techniques and Quality of Service in HCA, truckee, California, USA, July 2001.
- [6] *Vissim - User manual 4.10*, PTV Planung Transport Verkehr, 2006.
- [7] W. Leutzbach, R. Wiedemann, *Development and application of traffic simulation models at the Karlsruhe Institute for Traffic*, *Traffic Engineering and Control* 27 (5), pp. 270-278, 1986.
- [8] R. Wiedemann, U. Reiter, *Microscopic Traffic Simulation: The Simulation System Mission*, Department of Automatics and Informatics, Torino, 1992.
- [9] G. Banihan, *Car following theory with lateral discomfort*, *Transportation Research Part B* 41, pp. 722-735, 2007.
- [10] P. Ranjitkar, T. Nakatsuji, A. Kawamura, *Car-following models: An experimental based benchmarking*, *Jour. Of the Eastern Asia Soc. For Transport Studies*, Vol. 6, pp. 1582-1596, 2005.
- [11] R. Wiedemann, *Modelling of RTI-Elements on multi-lane roads*, *Advanced Telematics in Road Transport* edited by the Commission of the European Community, DG XIII, Brussels, 1991.