https://doi.org/10.37528/FTTE/9788673955223/TESi.2026.24

Uticaj učešća automatizovanih vozila u saobraćajnom toku na kapacitet autoputeva[25]

Miloš Tubić, Saobraćajni fakultet, Beograd, m.tubic@sf.bg.ac.rs
Dušan Mladenović, Saobraćajni fakultet, Beograd, d.mladenovic@sf.bg.ac.rs
Nemanja Stepanović, Saobraćajni fakultet, Beograd, n.stepanovic@sf.bg.ac.rs

Rezime: Razvoj automatizovanih vozila može značajno uticati na funkcionisanje saobraćajnih sistema i iskorišćenje postojeće putne infrastrukture. Posebno je značajan njihov potencijalni uticaj na kapacitet autoputeva, koji se može ostvariti smanjenjem vremenskih intervala sleđenja između uzastopnih vozila. U radu je analiziran uticaj različitog učešća automatizovanih putničkih automobila na kapacitet trake autoputa u uslovima mešovitog saobraćajnog toka. Formiran je analitički model zasnovan na vremenskim intervalima sleđenja između različitih scenarija učešća konvencionalnih i automatizovanih vozila. Analizirana su tri scenarija strukture saobraćajnog toka, dok je učešće automatizovanih putničkih automobila varirano od 0% do 100%. Rezultati pokazuju da povećanje njihovog učešća dovodi do povećanja kapaciteta u svim analiziranim scenarijima. U teorijskom toku bez komercijalnih vozila kapacitet se povećava za oko 111%, dok povećanje iznosi oko 52% pri prosečnom učešću komercijalnih vozila od 16,3% i oko 38% pri njihovom najvećem učešću u analiziranom uzorku od 23,3%. Rezultati ukazuju da prisustvo konvencionalnih komercijalnih vozila značajno ograničava potencijalno povećanje kapaciteta ostvareno automatizacijom putničkih automobila.

Ključne reči: automatizovana vozila, kapacitet autoputeva, mešoviti saobraćajni tok, penetracija automatizovanih vozila, vremenski interval sleđenja.

1 UVOD

Razvoj automatizovanih vozila predstavlja jednu od značajnijih tehnoloških promena u drumskom saobraćaju. Njihova primena može uticati na osnovne karakteristike saobraćajnog toka, uključujući kapacitet puteva, prvenstveno kroz smanjenje uticaja ljudskog faktora i vremena reakcije, zahvaljujući mogućnosti automatizovanih sistema da brže i preciznije reaguju na promene u saobraćajnom toku. Mogućnost precizнijeg upravljanja i ostvarivanja kraćih vremenskih intervala sleđenja posebno je značajna na autoputevima, gde se smanjenje intervala između uzastopnih vozila neposredno može odraziti na povećanje kapaciteta.

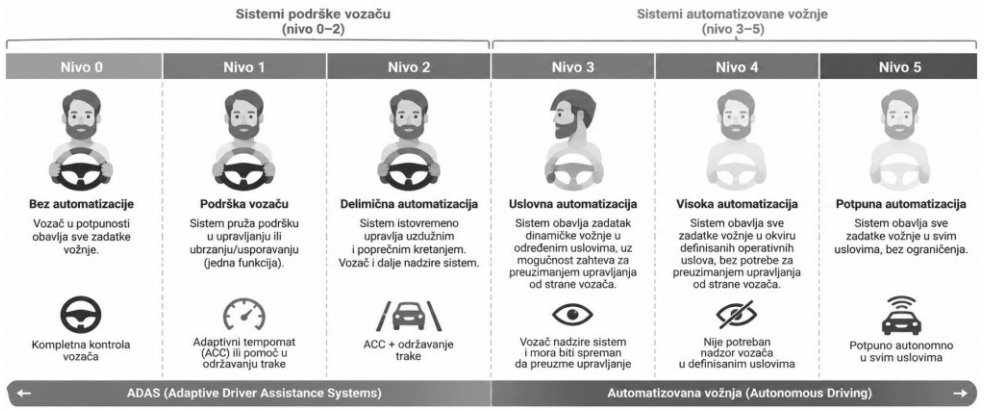
U prelaznom periodu očekuje se istovremeno prisustvo konvencionalnih i automatizovanih vozila, zbog čega efekti automatizacije zavise i od učešća automatizovanih vozila i strukture saobraćajnog toka. Dosadašnja istraživanja pokazuju da povećanje njihovog učešća može doprineti povećanju kapaciteta, pri čemu su značajni vremenski intervali sleđenja između različitih kombinacija konvencionalnih i automatizovanih vozila [1–3]. Prisustvo komercijalnih vozila dodatno je značajno zbog njihovih drugačijih dimenzija i karakteristika kretanja.

[25] CC-BY licenca

Cilj rada je analiza uticaja različitog učešća automatizovanih putničkih automobila na kapacitet autoputa, uz posebno razmatranje uticaja konvencionalnih komercijalnih vozila. Formiran je analitički model zasnovan na vremenskim intervalima sleđenja između različitih kombinacija uzastopnih vozila, a kapacitet je analiziran za različite nivoe penetracije automatizovanih putničkih automobila i različite strukture saobraćajnog toka.

2 AUTOMATIZOVANA VOZILA I UTICAJ NA KAPACITET AUTOPUTEVA

Automatizacija vozila obuhvata različite nivoe preuzimanja zadataka vožnje od strane sistema vozila. Prema klasifikaciji SAE J3016 razlikuje se šest nivoa automatizacije, od nivoa 0, bez automatizacije vožnje, do nivoa 5, koji predstavlja potpunu automatizaciju vožnje [4]. Nivoi 0–2 obuhvataju sisteme podrške vozaču, dok kod nivoa 3–5 sistem obavlja celokupan zadatak dinamičke vožnje u okviru odgovarajućih operativnih uslova. Karateristike svakog od nivoa automatizacije su prikazane na Slici 1.



Slika 1: Nivoi automatizacije prema SAE J3016 (prilagođeno prema [4])

Sa stanovišta kapaciteta autoputa, jedan od najznačajnijih efekata automatizacije odnosi se na mogućnost ostvarivanja kraćih vremenskih intervala sleđenja. Sistemi adaptivnog tempomata (*Adaptive Cruise Control – ACC*) automatski prilagođavaju brzinu vozila radi održavanja željenog odstojanja od vozila ispred, dok kooperativni sistemi (*Cooperative Adaptive Cruise Control – CACC*) koriste komunikaciju između vozila (V2V), omogućavajući koordinisanije reagovanje [5]. Povezana i kooperativna automatizovana vozila mogu ostvarivati kraće intervale sleđenja i formirati plotune vozila, čime se stvaraju uslovi za povećanje kapaciteta i stabilnije kretanje saobraćajnog toka.

Potencijalno povećanje kapaciteta zavisi od učešća automatizovanih vozila i njihovog raspoređivanja u saobraćajnom toku, što je posebno značajno u uslovima mešovitog toka. Ghiasi i ostali [1] razvili su analitički model u kojem se razlikuju vremenski intervali sleđenja u zavisnosti od tipa vodećeg i pratećeg vozila, pokazujući da na kapacitet utiču i učešće automatizovanih vozila i učestalost pojedinih kombinacija uzastopnih vozila. Li i ostali [2] takođe ukazuju na značaj karakteristika mešovitog toka za procenu efekata automatizacije na kapacitet.

Poseban značaj imaju vrednosti vremenskih intervala sleđenja između različitih tipova vozila. U prethodnim istraživanjima korišćen je širok raspon vrednosti, u zavisnosti od pretpostavljenih karakteristika sistema automatizovane vožnje [1]. Arnaout i Bowling [3] za CACC vozilo koje prati drugo CACC vozilo koriste interval od 0,5 s, dok se pri praćenju

konvencionalnog putničkog ili teretnog vozila koristi interval od 0,8–1,0 s. Najveće smanjenje intervala sleđenja stoga se može ostvariti između kompatibilnih kooperativnih vozila.

3 METODOLOGIJA ISTRAŽIVANJA

Metodologija istraživanja zasniva se na analizi strukture saobraćajnog toka i razvoju analitičkog modela za procenu kapaciteta autoputa pri različitom učešću automatizovanih putničkih automobila. U nastavku su prikazani način formiranja strukture mešovitog saobraćajnog toka, ulazni parametri i postupak proračuna kapaciteta.

3.1 Struktura saobraćajnog toka

Za definisanje realnih struktura saobraćajnog toka korišćeni su podaci sa automatskih brojača saobraćaja (ABS) na autoputevima u Republici Srbiji za 2025. godinu [6]. Analizirane su 42 deonice na kojima postoji ABS u 2025. godini. Na osnovu ovih podataka utvrđeno je prosečno učešće putničkih automobila od 83,7% i komercijalnih vozila od 16,3%. Kao dodatni scenario izdvojena je deonica Pirot istok - Dimitrovgrad (A4013/A4014), na kojoj je zabeleženo najveće učešće komercijalnih vozila u analiziranom uzorku, od 23,3% (Tabela 1).

Tabela 1: Analizirane strukture saobraćajnog toka [6]

Struktura toka	PA	BUS	LTV	STV	TTV	AV	Ukupno KV	Ukupno
Prosečna s.t.	**83,7%**	1,1%	1,9%	1,5%	1,0%	10,8%	**16,3%**	100%
A4013/A4014	**76,7%**	1,1%	1,1%	0,3%	0,2%	20,5%	**23,3%**	100%

U modelu su vozila grupisana u tri kategorije: konvencionalni putnički automobili (KPA), automatizovani putnički automobili (APA) i konvencionalna komercijalna vozila (KV). Pretpostavljeno je da se automatizacija odnosi isključivo na putničke automobile, dok komercijalna vozila ostaju konvencionalna. Analizirana su tri scenarija strukture toka: teorijski tok bez komercijalnih vozila, prosečna struktura sa 16,3% KV i struktura sa najvećim učešćem KV u analiziranom uzorku od 23,3%.

Ako je sa α označeno učešće putničkih automobila u ukupnom toku, a sa β učešće automatizovanih vozila u kategoriji putničkih automobila, učešća pojedinih kategorija određena su izrazima:

$$P_{KPA} = \alpha \cdot (1 - \beta) \quad (1)$$

$$P_{APA} = \alpha \cdot \beta \quad (2)$$

$$P_{KV} = 1 - \alpha \quad (3)$$

Na ovaj način promena vrednosti β menja odnos konvencionalnih i automatizovanih putničkih automobila, dok učešće komercijalnih vozila u okviru svakog analiziranog scenarija ostaje nepromenjeno. Vrednost β varira od 0 do 100% u koracima od po 10%.

3.2 Ulazni parametri modela

Proračun kapaciteta sproveden je za idealne saobraćajne i geometrijske uslove na autoputu. Pretpostavljena je deonica na ravničarskom terenu, sa standardnim širinama saobraćajnih traka i bočnim smetnjama, bez uticaja geometrijskih karakteristika puta na brzinu slobodnog toka. Na taj način omogućeno je izolovano sagledavanje uticaja strukture saobraćajnog toka i učešća automatizovanih vozila na kapacitet.

Za određivanje prosečnih dužina vozila korišćeni su podaci sa ABS 2001/2002 na deonici Stara Pazova - Inđija, prikupljeni 13. i 15. marta 2026. godine. Uzorak je obuhvatio ukupno 83.018 vozila (Tabela 2).

Tabela 2: Prosečna dužina vozila sa ABS 2001/2002 za 13.3 i 15.3. 2026. god. [6]

Kategorija	***PA***	***BUS***	***LTV***	***STV***	***TTV***	***AV***	***Ukupno***
Dužina *(m)*	***5,0***	***14,3***	***7,2***	***9,3***	***9,2***	***17,2***	-
Uzorak *(voz)*	*72.130*	*510*	*1.495*	*1.515*	*1.121*	*6.247*	***83.018***

Prosečna dužina putničkog automobila iznosila je 5,0 m, dok je prosečna dužina komercijalnog vozila određena ponderisanjem prosečnih dužina pojedinih kategorija prema njihovom učešću u saobraćajnom toku.

Za sve kategorije vozila usvojena je jedinstvena brzina saobraćajnog toka pri kapacitetu od 86 km/h (23,89 m/s). Ova vrednost odgovara približnoj brzini pri kapacitetu za bazni kapacitet od 2.400 PA/h/traci i gustinu pri kapacitetu od 45 PA/mi/traci prema HCM-u 2016 (*Highway Capacity Manual*) [7].

Vremenski interval sleđenja između dva uzastopna vozila određen je kao zbir neto vremenskog intervala sleđenja i vremena potrebnog da dužina vodećeg vozila prođe kroz posmatrani presek:

$$t_h = g + \frac{L}{V_c} \tag{4}$$

gde je t_h vremenski interval sleđenja [s], g neto vremenski interval sleđenja [s], L dužina vodećeg vozila [m], a V_C brzina pri kapacitetu [m/s].

Za konvencionalne putničke automobile usvojen je bazni kapacitet od 2.400 voz/h/traci, odnosno t_h od 1,50 s, na osnovu čega je određen neto vremenski interval sleđenja g_{KPA} = 1,29 s. Za komercijalna vozila usvojen je ekvivalent putničkog automobila E_T = 2,0 [7], na osnovu čega je određen neto vremenski interval sleđenja od 2,39 s.

Za automatizovane putničke automobile usvojeni su neto vremenski intervali sleđenja karakteristični za kooperativne sisteme. Kada APA prati konvencionalno vozilo usvojena je vrednost od 1,0 s, dok je za slučaj APA–APA usvojen neto vremenski interval sleđenja od 0,5 s, u skladu sa vrednostima korišćenim u prethodnim istraživanjima CACC sistema [3].

3.3 Model za proračun kapaciteta

Proračun kapaciteta zasnovan je na prosečnom vremenskom intervalu sleđenja vozila u mešovitom saobraćajnom toku. Sličan princip primenjen je u analitičkim modelima u kojima se kapacitet određuje na osnovu različitih vremenskih intervala sleđenja između parova konvencionalnih i automatizovanih vozila. Ghiasi i ostali [1] razlikuju intervale u zavisnosti od tipa vodećeg i pratećeg vozila i pokazuju da kapacitet zavisi od njihove zastupljenosti i rasporeda u saobraćajnom toku.

U ovom istraživanju usvojena je pretpostavka slučajnog raspoređivanja vozila u saobraćajnom toku, odnosno da je verovatnoća pojave određenog para vozila jednaka proizvodu njihovih pojedinačnih učešća:

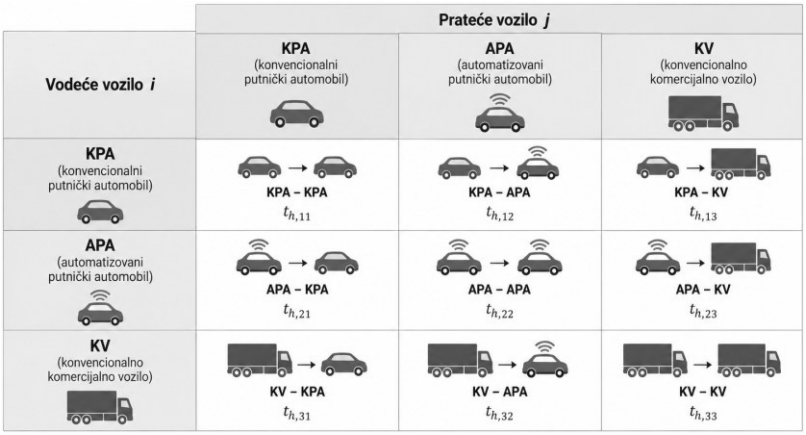
$$P_{ij} = P_i \cdot P_j \tag{5}$$

gde je i kategorija vodećeg, a j kategorija pratećeg vozila.

Za tri kategorije vozila (KPA, APA i KV) formirano je devet mogućih kombinacija uzastopnih vozila (Slika 2). Za svaku kombinaciju vremenski interval sleđenja određen je izrazom:

$$t_{h_{ij}} = g_{ij} + \frac{L_i}{V_c} \tag{6}$$

gde je g_{ij} neto vremenski interval sleđenja pratećeg vozila j u odnosu na vodeće vozilo i, dok je L_i dužina vodećeg vozila, a V_C brzina pri kapacitetu.



Slika 2: Kombinacije uzastopnih vozila u saobraćajnom toku

Prosečan vremenski interval sleđenja u mešovitom toku određen je ponderisanjem intervala pojedinih kombinacija njihovim verovatnoćama:

$$\overline{t_h} = \sum_i \sum_j P_i P_j t_{h_{ij}} \quad [s] \tag{7}$$

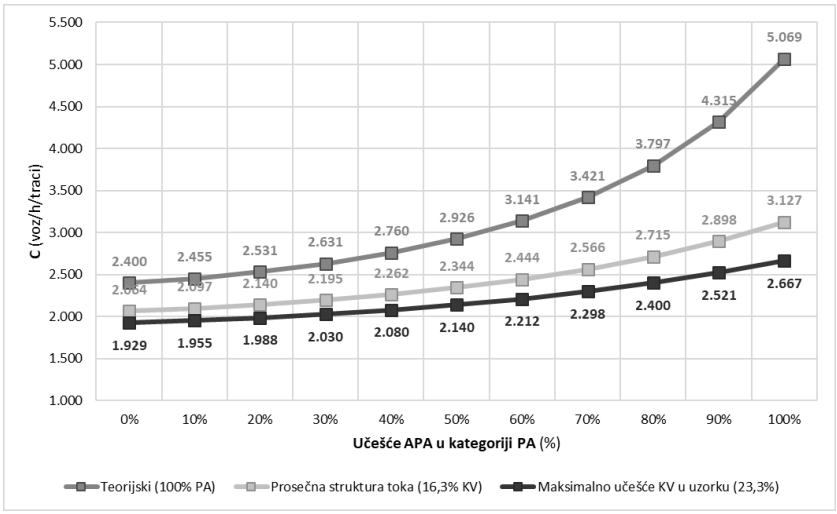
Kapacitet jedne saobraćajne trake zatim je određen izrazom:

$$C = \frac{3600}{\overline{t_h}} = \frac{3600}{\sum_i \sum_j P_i P_j t_{h_{ij}}} \quad [voz/h/traci] \tag{8}$$

4 REZULTATI I DISKUSIJA

Na osnovu definisanog modela izvršen je proračun kapaciteta za tri analizirana scenarija strukture saobraćajnog toka, pri čemu je učešće automatizovanih putničkih automobila u kategoriji PA varirano od 0% do 100% u koracima od po 10%. Dobijeni rezultati prikazani su na Grafiku 1.

Rezultati pokazuju da povećanje učešća APA dovodi do povećanja kapaciteta u sva tri analizirana scenarija, ali se veličina ovog efekta značajno razlikuje u zavisnosti od učešća komercijalnih vozila. U teorijskom scenariju bez KV kapacitet se povećava sa 2.400 voz/h/traci pri 0% APA na 5.069 voz/h/traci pri 100% APA, odnosno za približno 111%. Pri prosečnom učešću KV od 16,3% kapacitet raste sa 2.064 na 3.127 voz/h/traci, odnosno za oko 52%, dok pri najvećem učešću KV u analiziranom uzorku od 23,3% raste sa 1.929 na 2.667 voz/h/traci, odnosno za oko 38%.



Grafik 1: Uporedna analiza rezultata po scenarijima

Dobijeni rezultati ukazuju da konvencionalna komercijalna vozila značajno ograničavaju potencijalno povećanje kapaciteta ostvareno automatizacijom putničkih automobila. I pri 100% učešću APA u kategoriji putničkih automobila, prisustvo konvencionalnih KV zadržava veće vremenske intervale sleđenja za deo kombinacija uzastopnih vozila, zbog čega se prosečan interval sleđenja ne može smanjiti na vrednost karakterističnu za homogen tok APA.

Povećanje kapaciteta nije linearno sa povećanjem učešća APA. Pri većim vrednostima penetracije raste verovatnoća pojave uzastopnih parova APA-APA, za koje je usvojen najmanji neto vremenski interval sleđenja od 0,5 s. Zbog toga povećanje kapaciteta postaje izraženije pri većem učešću APA, što je naročito uočljivo u teorijskom scenariju bez komercijalnih vozila.

Radi provere pouzdanosti modela, rezultati za bazno stanje bez automatizovanih vozila upoređeni su sa vrednostima dobijenim primenom softverskog paketa HCS. Za prosečno učešće KV od 16,3% dobijena je praktično ista vrednost kapaciteta od 2.064 voz/h/traci, dok je za scenario sa 23,3% KV modelom dobijeno 1.929 voz/h/traci, a primenom HCS-a približno 1.946 voz/h/traci. Relativno odstupanje manje od 1% ukazuje na zadovoljavajuću saglasnost pojednostavljenog analitičkog modela sa HCS postupkom u baznom stanju bez automatizovanih vozila.

Dobijene vrednosti, naročito u teorijskom scenariju pri visokom učešću APA, treba posmatrati u okviru pretpostavki primenjenog modela. One predstavljaju potencijalni kapacitet u idealizovanim uslovima definisanim usvojenim neto vremenskim intervalima sleđenja, a ne prognozu kapaciteta konkretnog autoputa u realnim uslovima.

5 ZAKLJUČAK

U radu je analiziran uticaj različitog učešća automatizovanih putničkih automobila na kapacitet autoputa, uz posebno razmatranje uticaja konvencionalnih komercijalnih vozila u mešovitom saobraćajnom toku. Rezultati pokazuju da povećanje učešća APA dovodi do povećanja kapaciteta u svim analiziranim scenarijima. Pri povećanju učešća APA od 0% do 100% u kategoriji putničkih automobila, kapacitet se u teorijskom toku bez KV povećava

za oko 111%, dok povećanje iznosi oko 52% pri prosečnom učešću KV od 16,3% i oko 38% pri najvećem učešću KV u analiziranom uzorku od 23,3%.

Dobijeni rezultati ukazuju da struktura saobraćajnog toka značajno utiče na potencijalne efekte automatizacije. Prisustvo konvencionalnih komercijalnih vozila ograničava povećanje kapaciteta ostvareno automatizacijom putničkih automobila, dok nelinearan rast kapaciteta pri povećanju učešća APA proizlazi iz sve veće verovatnoće pojave parova APA-APA, za koje je usvojen najmanji neto vremenski interval sleđenja.

Rezultate treba posmatrati u okviru pretpostavki primenjenog modela, koji podrazumeva idealne saobraćajne i geometrijske uslove, slučajno raspoređivanje vozila i unapred definisane neto vremenske intervale sleđenja, dok automatizacija komercijalnih vozila nije razmatrana. Dalja istraživanja trebalo bi usmeriti na uključivanje automatizovanih komercijalnih vozila, razmatranje različitih obrazaca raspoređivanja vozila i kalibraciju neto vremenskog intervala sleđenja na osnovu empirijskih podataka.

LITERATURA

[1] Ghiasi, A., Hussain, O., Qian, Z. S., Li, X. (2017). A mixed traffic capacity analysis and lane management model for connected automated vehicles: A Markov chain method. Transportation Research Part B: Methodological, 106, 266–292.

[2] Li, Y., Zheng, J., Qin, L., Li, H. (2025). Highway capacity of mixed traffic flow with autonomous vehicles: A review. Physica A: Statistical Mechanics and its Applications, 671, 130653.

[3] Arnaout, G. M., Bowling, S. (2014). A Progressive Deployment Strategy for Cooperative Adaptive Cruise Control to Improve Traffic Dynamics. International Journal of Automation and Computing, 11(1), 10–18.

[4] SAE International. (2021). Taxonomy and Definitions for Terms Related to Driving Automation Systems for On-Road Motor Vehicles, SAE J3016_202104.

[5] Bu, F., Chan, C.-Y. (2012). Adaptive and Cooperative Cruise Control. In: Eskandarian, A. (Ed.), Handbook of Intelligent Vehicles. Springer.

[6] „Putevi Srbije" d.o.o (2025), Brojanje saobraćaja na državnim putevima IA reda Republike Srbije 2025. god.

[7] Transportation Research Board (2016). Highway Capacity Manual, Sixth Edition: A Guide for Multimodal Mobility Analysis. Transportation Research Board, Washington, D.C.

SUMMARY

Impact of Automated Vehicle Penetration on Freeway Capacity

Abstract: The development of automated vehicles may significantly affect transportation systems and the utilization of existing road infrastructure, particularly freeway capacity through reduced time headways. This paper analyzes the impact of automated passenger car penetration on freeway lane capacity under mixed traffic conditions. An analytical model based on time headways between different combinations of conventional and automated vehicles was developed. Three traffic composition scenarios were analyzed, with the share of automated passenger cars varying from 0% to 100%. The results show that capacity increases in all analyzed scenarios. In traffic flow without commercial vehicles, capacity increases by approximately 111%, compared with approximately 52% for an average commercial vehicle share of 16.3% and 38% for the highest observed share of 23.3%. The results indicate that conventional commercial vehicles significantly limit the potential capacity increase resulting from passenger car automation.

Key words: automated vehicles, freeway capacity, mixed traffic flow, automated vehicle penetration, time headway.