

Uticaj komercijalnih vozila na saobraćajni tok vangradskih puteva – studija slučaja Republike Srpske

Marko Subotić, Saobraćajni fakultet, Doboj, marko.subotic@sf.ues.rs.ba

Vladan Tubić, Saobraćajni fakultet, Beograd, vladan@sf.bg.ac.rs

Željko Stević, Saobraćajni fakultet, Doboj, zeljko.stevic@sf.ues.rs.ba

Rezime: Komercijalna vozila zauzimaju veći prostor od putničkih automobila, a operativne vozno-dinamičke karakteristike su znatno nepovoljnije nego kod putničkih automobila. Takođe, komercijalna vozila nepovoljno utiču na protok vozila, pre svega svojim dimenzijama vozila i operativnim karakteristikama (ubrzanje, usporenje, manevrisanje i sl.). Glavni cilj ovog rada je da se na osnovu obimnih empirijskih istraživanja u lokalnim uslovima slobodnog toka kvantifikuje nepovoljni uticaj strukture toka kroz vrednosti Putnički Automobil Ekvivalenta (PCE – Passenger Car Equivalents) u funkciji uzdužnog nagiba (uspona/pada). Primenom kritike literarnih izvora i dobijenim empirijskim istraživanjima dokazano je da se sa povećanjem uspona, povećava i vrednost PCE za komercijalna vozila. Na osnovu izmerenih vrednosti dobijenih lokalnim merenjem razvijeni su modeli polinoma četvrtog stepena sa visokim koeficijentom korelacije za utvrđivanje reprezentativnih vrednosti PCE na padu i usponu dvotračnih puteva. Poređenjem dobijenog modela u slobodnom toku sa HCM-2016 priručnikom pokazano je da sopstveno istraživanje daje manju vrednost PCE za uspon veći od 3%. Takođe su razvijeni su i modeli polinoma četvrtog stepena PCE vrednosti za PCE15%, PCE50% i PCE85%.

Ključne reči: slobodan tok, PCE, uzdužan nagib, dvotračni put

1 UVOD

Teretna vozila troše znatno više kapaciteta na putu i imaju veći uticaj zauzetosti puta nego što je to slučaj sa putničkim automobilima. Heterogena ili mešovita struktura saobraćajnog toka izražava se udelom komercijalnih vozila u toku. Putnički automobil ekvivalent (PCE – eng. *Passenger Car Equivalents*) koristi se za transformaciju mešovitog saobraćajnog toka vozila u tok ekvivalentnih putničkih automobila, a primenjuje se za analizu kapaciteta i nivoa usluge puteva i raskrsnica. PCE je važan faktor koji se koristi za pretvaranje obima saobraćaja koji sadrže proporcije teretnih vozila u jedinstvenu meru koja sadrži samo jedinice putničkih automobila (PCU – eng. *Passenger Car Unit*). Takva konverzija je važna za proučavanje saobraćajnog toka, jer na opis saobraćajnih parametara kao što su kapacitet i brzina u velikoj meri utiču proporcije saobraćajnog opterećenja.

PCE vrednosti bi trebalo da variraju u zavisnosti od saobraćajnih i putnih uslova, tako da primena PCE vrednosti u nezasićenim uslovima saobraćaja mogu preceniti efekat teretnih vozila ili biti neosetljive vrednosti na nivo odvijanja saobraćaja. Faktor ekvivalenta teretnih vozila (PCE) je uobičajen i koristi se za procenu razlika između komercijalnih vozila (sva vozila koja se ne svrstavaju u putničke automobile) i putničkih automobila u smislu analize kapaciteta puta i zagašenja koje oni proizvode.

Predmet istraživanja u ovom radu je izučavanje uticaja karakteristika mešovitog toka (iskazan ekvivalentima teretnih vozila – PCE) u postupcima analize kapaciteta i *Nivoa Usluge* puteva sa ciljem unapređenja ovih metoda – postupaka. U našoj stručnoj javnosti ovom pitanju nije posvećivana dovoljna pažnja. U svetskoj literaturi prisutna su dva osnovna pristupa uključivanja uticaja mešovitog toka u analizu kapaciteta i *Nivoa Usluge* putne mreže.

U daljem toku rada u poglavlju 2. dat je literarni pregled rada gde su prikazani savremeni literarni izvori za utvrđivanje PCE vrednosti. Metodologija istraživanja i karakteristike PCE analizirani su u poglavlju 3. Razvoj modela i glavni rezultati istraživanja opisani su u poglavlju 4. Diskusija rezultata istraživanja i zaključci dati su u poglavlju 5, zajedno sa pravcima budućih istraživanja.

2 LITERARNI PREGLED

Vrednost ekvivalenata teretnih vozila (PCE) je u literarnim izvorima prikazana sa velikim odstupanjima u funkcionalnoj zavisnosti od putnih i saobraćajnih uslova. Takođe, često korišćen HCM (Highway Capacity Manual) priručnik [1], nekada daje i kontradiktorne vrednosti od predviđenih za određene lokalne uslove. Dobijene PCE vrednosti za autoputeve, brze puteve i magistralne putne pravce pokazuju da neke varijable, kao što je udeo (procentualno učešće) kamiona, nemaju uvek očekivani uticaj na dobijene PCE vrednosti, dok su druge varijable, kao što je tip vozila, ključne u dobijanju reprezentativnih PCE vrednosti. Generalno, velike razlike u vrednostima PCE su se javile za duže i strmije merne sekcije. Postojala su velika odstupanja u PCE vrednostima u funkciji odnosa masa/konjske snage kao i dužine vozila [2]. Istraživanje sprovedeno u Nebraskoj (SAD) pokazuje vrednosti PCE na I-80 putu za visoke procentualne vrednosti kamiona (25% do 60%), dok PCE vrednosti po HCM priručniku su osnovane za opterećenost do 25% kamiona, prosečna brzina kamiona je niža od putničkih automobila, što je nespojivo sa pretpostavkom HCM da je slobodna brzina svih tipova vozila ista na ravnom terenu [3]. U literaturi se često navodi da su saobraćajni tokovi bili smatrani ekvivalentnim, jer se kreću istom brzinom ili gustina [4,5]. Nekada su za heterogene uslove saobraćaja u Indiji preporučivane vrednosti PCE specifične za vozila koje dinamički variraju sa brzinom, protokom i strukturom toka, dok su nove vrednosti PCE procenjene na osnovu makroskopskih odnosa generiranih za osnovne heterogene saobraćajne tokove. Za definisanje nivoa usluge (eng. LOS-Level of Service) koristi se novo merilo performansi zasnovano na padu brzine i ustanovljeno je da daje relativno preciznije PCE vrednosti. Ukupne PCE vrednosti za određenu heterogenu strukturu saobraćaja variraju sa značajnim padom brzine pri nižim vrednostima protoka [6]. PCE vrednosti bi trebalo da variraju u zavisnosti od saobraćaja i uslova na putu, tako da u uslovima nezasićenih tokova saobraćaja ove vrednosti mogu preceniti efekat teretnih vozila. Takođe, postoji veliki broj statističkih metoda i studija simulacije saobraćaja zasnovanih na mikroskopskim pristupima koji se koriste za izračunavanje PCE za teretna vozila primenljivih na kružnim raskrsnicama [7]. Ova studija pokazuje da procenat teških vozila u saobraćaju, raspored kružnog toka i geometrijske karakteristike kružne raskrsnice utiču na promenu vrednosti PCE. Takođe, na osnovu istraživanja na ruralnim putevima u Indiji pokazano je da različite metode za ocenu primenljivosti u heterogenim saobraćajnim uslovima utiču na procenu PCE vrednosti. Pored velikog broja pokazatelja dobijenih iz pregleda literature, ova studija

pokazuje da najbolji metod za utvrđivanje uticaja nagiba na PCE vrednosti podrazumeva primenu simulacionog modela [8]. Takođe, Yeung et al. napominju da pouzdanost podataka dobijenih iz simulacionog modela zavisi od validnosti simulacionog modela. Simulacioni model bi trebao biti opsežno validan za različite saobraćajne i geometrijske uslove [9].

Istraživanjem sprovedenim na četvorotračnim auto-putevima na Tajlandu na 12 mernih sekcija, prikupljanje podataka vršeno je pomoću video detekcije od 06.00 do 18.00 časova za 13 klasa (tipova) vozila pomoću intervala sleđenja na 15-to minutnom intervalu. Studija je pokazala da je nagib auto-puta značajan faktor vezan za PCE vrednosti [10]. Primenom analitičkog modela za identifikaciju vrednosti PCE na uravnoteženim dvotračnim dvosmernim putevima koristeći algoritam za interval sleđenja pokazano je da PCE vrednosti rastu sa povećanjem obima saobraćaja po trakama. Ujedno, studija pokazuje da teretna vozila imaju mnogo veći uticaj na PCE vrednosti u neuravnoteženim uslovima, kada je vreme putovanja duže od jednog sata, a kada su obe trake zasićene, uticaj teretnih vozila na kapacitet se vremenom smanjuje, a vrijednosti PCE se približava 1,0 [11].

Primenom detektora na M25 i M42 osnovnih segmenata autoputa u Ujedinjenom Kraljevstvu procenjena je vrednost PCE koristeći metodu intervala sleđenja bliskog praćenja pri različitim rasponima brzina, pri čemu su razvijeni regresioni modeli. Rezultati istraživanja su pokazali da PCE vrednosti na istim lokacijama variraju u funkciji brzine saobraćajnog toka, a da takva varijacija PCE u funkciji brzine zavise od odnosa dužine teretnih vozila i putničkih automobila [12].

Na osnovu literarnog pregleda, može se konstatovati da PCE vrednosti zavise od velikog broja uticajnih faktora, da variranje njihovih vrednosti je u zavisnosti od funkcionalnih delova putne mreže, a kvantifikacija i validacija ovih vrednosti je moguća u različitim putnim i ambijentalnim okolnostima.

3 METODOLOGIJA ISTRAŽIVANJA I KARAKTERISTIKE PCE VREDNOSTI

U istraživanjima realizovanim na uzdužnim nagibima (uspon/pad) dvotračnih puteva dokazan je negativan uticaj komercijalnih vozila na uzdužnom nagibu kroz PCE vrednosti, gde sa povećanjem nagiba, dolazi do povećanja vrednosti PCE [13,14,15]. Ova tvrdnja odnosi se na sva komercijalna vozila koja ne pripadaju klasi putničkih automobila. Osnovni očekivani rezultati ovog istraživanja zasnovani su na pretpostavci da je vrednost PCE na usponu/padu dvotračnih puteva u složenoj funkcionalnoj zavisnosti od strukture saobraćajnog toka, vozno-dinamičkih karakteristika vozila, psiho-fizičkih karakteristika vozača, a posebno od tehničko-eksploatacionih karakteristika puta i putne mreže i da se podrazumevana kolebanja i promene PCE vrednosti mogu verifikovati u lokalnim uslovima. Vrednost PCE u dosadašnjoj naučno-stručnoj literaturi pokazuje promenljive vrednosti.

Metodologija istraživanja sadrži procedure izbora lokacije merenja, empirijskog istraživanja vremenskih intervala sleđenja, sinteze i analize prikupljenih podataka, kao i određivanje PCE vrednosti na datim presecima, što je detaljno prikazano u Tabeli 1.

Tabela 1. Sumarni prikaz metodoloških postavki primenjenih u istraživanju

<i>Primenjena metodologija</i>	<i>Osnovni metod relativnih odnosa intervala sleđenja, posmatranjem pet kategorija vozila (PA, TV, BUS, TTV i AV);</i>
<i>Tehnika snimanja</i>	<i>Poluautomatska, primenom posebne merne opreme;</i>
<i>Izbor lokacije</i>	<i>Fizički elementi: standardni dvotračni put (magistralni) sa dve saobraćajne trake širine min 3,00 m; postojanje konstantnih uzdužnih nagiba (uspon/pad) na prilazima ne kraćih od 1000 m sa dozvoljenim odstupanjem od ±0,5%; nema radova na putu u zoni merenja; zabranjeno je preticanje; zona je van naselja; ne postoje raskrsnice pre i posle merenja;</i>
	<i>Saobraćajni kriterijumi: relativno veliko saobraćajno optrećenje, veći procenat učešća komercijalnih vozila (15% i više), saobraćajna traka nema uticajnog faktora skretanja, nepostojanje uticaja parkiranja ili autobuskih stajališta, realizacija snimanja u vršnom i van vršnom periodu;</i>
<i>Obrada podataka</i>	<i>Na bazi prosečnih vrednosti pojedinačnih lokacija i sumarne prosečne vrednosti, u analizi se zanemaruje uticaj pozicije vozila u redu (što nije čest slučaj u svetskoj literaturi);</i>

Najčešće korišćen metod za utvrđivanje vrednosti PCE je metod relativnih odnosa intervala sleđenja u procesu pražnjenja reda vozila. Ovaj metod razijen je od strane Greenshields-a 1947.godine i u literaturi je poznat kao „bazni metod utvrđivanja intervala sleđenja”. Koncept ove metode baziran je na relaciji (1):

$$PCE_i = H_i / H_{PC} \quad (1)$$

gde su:

PCE_i – putnički automobil ekvivalent i-te klase vozila;

H_i – prosečna vrednost intervala sleđenja i-te klase vozila;

H_{PC} – prosečna vrednost intervala sleđenja za putnički automobil;

Definisanje izbora mernih lokacija utvrđen je na magistralnim putnim pravcima I reda, čiji preseki merenja su utvrđeni na 1000 m odstojanja od preseka aritmetičkom sredinom uzdužnog nagiba na datim presecima. Empirijsko merenje vrednosti sprovedeno je na mernim sekcijama na uzdužnom nagibu u pravcu i horizontali, ali se težilo da merna mesta budu na odsecima gde nije dozvoljeno preticanje. Vreme merenja je uzeto u prepodnevim i popodnevnim časovima, kada nema uticajnih faktora vršnih opterećenja, što podrazumeva „realan” saobraćajni tok.

Izmereni vremenski intervali sleđenja dobijeni empirijskim istraživanjem evidentirani su za pet klasa vozila u bazu podataka napravljenu u Microsoft Office Excel, gde je vršena dalja statistička obrada. Softver „PROTOK VOZILA” tokom snimanja vremenskih interval sleđenja selektuje izmerene vrednosti na 5 klasa vozila (PA-putnički automobil, BUS, LTV-lako teretno vozilo, TTV-teško teretno vozilo i AV-autovoz) i unosi ih u računar. Osnovni cilj bio je prikupiti više od 100 vremenskih interval sleđenja (a time i PCE) za komercijalna vozila što je i urađeno na svakoj mernoj sekciji posmatrane deonice puta. Zabeleženi broj izmerenih PCE vrednosti vozila sa prosečnim vremenskim intervalom sleđenja na deonicama dat je u Tabeli 2.

Tabela 2. Veličina izmerenih PCE vrednosti prema mernim sekcijama

R.br.	Deonica	Tehničko-eksploatacione karakteristike deonica				Veličina mernog uzorka (br. merenja)
		Oznaka deonice	Dužina merne sekcije	UN	Dužina deonice (km)	
1	Ivanjska-Šargovac	M-I-108	min 1000 m	-5,50%	14.967	1000
2	Vrhovi-Šešljije	M-I-103	min 1000 m	-5,00%	14.073	1000
3	Ivanjska-Šargovac	M-I-108	min 1000 m	-3,00%	14.967	1000
4	Ivanjska-Šargovac	M-I-108	min 1000 m	-2,00%	14.967	1000
5	Vrhovi-Šešljije	M-I-103	min 1000 m	-1,00%	14.073	1010
6	Rudanka-Doboj	M-I-105	min 1000 m	0%	7.405	1011
7	Klašnice 1 -Gornja Vijaka	M-I-106	min 1000 m	1,00%	38.553	912
8	Klupe-Teslić (Barići)	M-I-108	min 1000 m	2,00%	16.734	775
9	Klašnice 1 -Gornja Vijaka	M-I-106	min 1000 m	3,00%	38.553	908
10	Klašnice 1 -Gornja Vijaka	M-I-106	min 1000 m	4,00%	38.553	1007
11	Vrhovi-Šešljije	M-I-103	min 1000 m	5,00%	14.073	918
12	Obodnik-Klupe	M-I-108	min 1000 m	6,00%	20.134	736
13	Obodnik-Klupe	M-I-108	min 1000 m	7,00%	20.134	713
14	Obodnik-Klupe	M-I-108	min 1000 m	7,50%	20.134	811
<i>Ukupno</i>					111,866 km	12.801

Kao etalonska vrednost PCE u ovom istraživanju za sleđenje PC-PC, usvojena je vrednost 1. Kao ograničenje u ovom istraživanju, može se navesti da se nije uzimala u obzir vrednost PCE za različite kategorije putničkih automobila (PC). Vrednost vremenskog intervala sleđenja za putničke automobile računata je kao aritmetička sredina vremenskih intervala sleđenja izmerenih na preseccima. Za svaku mernu sekciju, izračunate su vrednosti PCE za svaku klasu vozila na osnovu snimljenih vremenskih intervala sleđenja pomoću Grinshields-ovog modela primenjenog na vangradskim putevima. Nakon toga, utvrđene su vrednosti relevantnih statističkih parametara koji uključuju aritmetičku sredinu (AS) i standardnu devijaciju (SD), a određen je i koeficijent varijacije (VC). Vozila u svakoj klasi (LTV, TTV, BUS, AV) su zatim svrstana u klasu komercijalnih vozila prema vrednostima PCE u klase širine 0.5 da bi se dobila distribucija PCE vrednosti. Ovako, tabelarno sređeni podaci iskorišćeni su za dalju analizu, određivanje zakonitosti distribucije i određivanje procentnih vrednosti ekvivalenata teretnih vozila PCE15%, PCE50% i PCE85%. U ove svrhe korišćen je program za analizu funkcija Table Curve 2D v5.01. Nakon izračunavanja AS, SD i koeficijenta varijacije, određeni su PCE modeli za predviđene kategorije vozila u funkciji od uzdužnog nagiba (uspona/pada). Modeli su prikazani u obliku polinoma četvrtog stepena izraženi kao u relaciji (2):

$$PCE = A \cdot UN^4 + B \cdot UN^3 + C \cdot UN^2 + D \cdot UN + E \quad (2)$$

gde je:

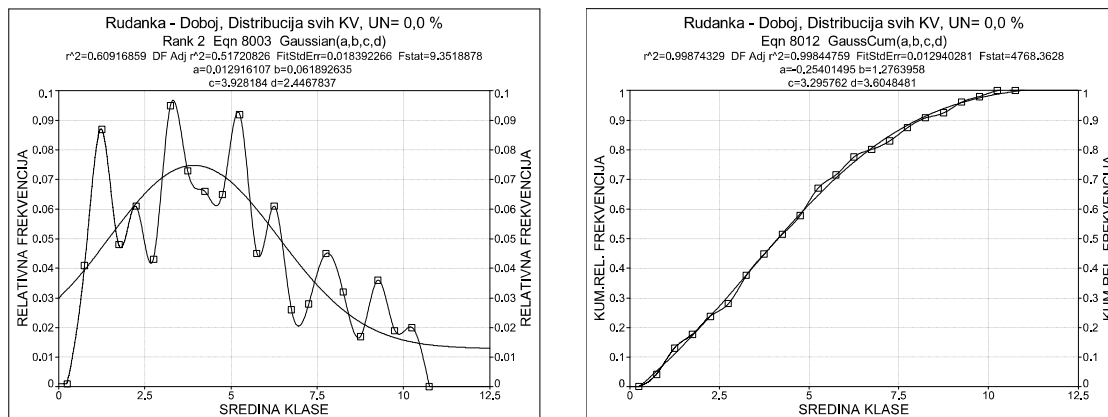
UN – uzdužni nagib;

PCE – ekvivalent teretnih vozila;

A, B, C, D i E – parametri dobijeni regresionom analizom;

Statistička analiza pokazala je prihvatljive vrednosti koeficijenta korelacije, posebno za PCE vrednosti na većem uzdužnom nagibu dvotračnih puteva. Pri utvrđivanju raspodele analizirane su samo zvonaste krive i to Gausova (normalna) i logaritamska normalna kriva. Od velike važnosti je bilo određivanje funkcije kumulativne raspodele, koja kako se

pokazalo, u svim slučajevima odgovara kumulativnoj normalnoj raspodeli. Podaci su grupisani u statističke klase, koje su korišćene za dalju analizu za određivanje odgovarajuće raspodele i određivanje procentualnih PCE_{15%}, PCE_{50%} i PCE_{85%} vrednosti. Za određivanje vrednosti je izabrana kumulativna funkcija za traženi koren rešenja za priraštaj od 0.01, što je prikazano na narednoj slici 1.



Slika 1. Empirijska raspodela analiziranih PCE vrednosti

Iz dobijenih vrednosti korena funkcije za inkrement 0.01, izdvojene su vrednosti korena funkcije UN (uzdužnog nagiba) za vrednosti PCE od 0.15, 0.50 i 0.85, koje u stvari predstavljaju te procentualne vrednosti za PCE.

4 REZULTATI ISTRAŽIVANJA

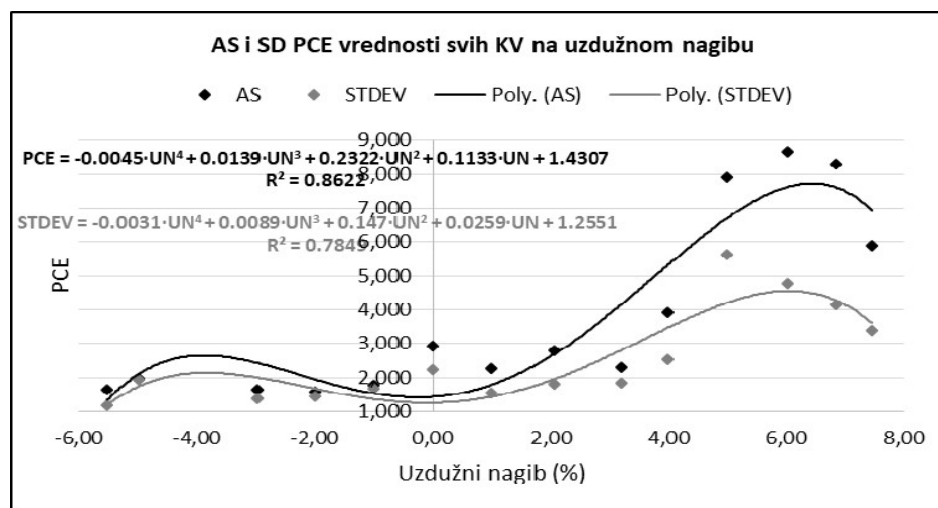
Analizom PCE vrednosti na uzdužnom nagibu (usponu/poadu) dvotračnih puteva, dobija se izuzetno visok koeficijent korelacije koji iznosi $R^2=0,8622$. Sprovedenim empirijskim istraživanjem dobija se pokazatelj velikog rasipanja vrednosti PCE za komercijalna vozila (KV), sa povećanjem UN. Odnosno, uticaj strukture saobraćajnog toka na uzdužnom nagibu dvotračnih puteva pokazao je da prisustvo komercijalnih vozila daje znatno rasipanje PCE vrednosti. Time se takođe može objasniti i veće rasipanje vremenskih intervala sleđenja kod KV na uzdužnom nagibu. Na ravnom terenu i padu se ovakvo rasipanje često tumači graničnim padom (čija je vrednost $UN \leq 3.00\%$), gde kod komercijalnih vozila dolazi do pojave kontinuiranog saobraćajnog toka. Takođe, najniže vrednosti PCE za komercijalna vozila dobijaju se na ravnom terenu ($UN=0.00\%$), dok sa povećanjem uspona, dolazi do povećanja PCE vrednosti. Kontinualni pad vrednosti PCE kreće se od ravnog terena do pada $UN=-3.00\%$, nakon čega dolazi do blagog rasta PCE vrednosti.

Na slici 2. dat je uporedni prikaz zavisnosti aritmetičkih sredina vrednosti PCE za KV u funkciji UN. Takođe, potrebno je napomenuti da kod dvotračnih puteva poslednja izmerena vrednost pada je $UN=-5.50\%$. Takođe, vrednost PCE za KV je značajno povećana na ravnom terenu, gde iznosi 3. Kalibracijom modela, ta vrednost je znatno niža. Takođe, pri najvećem padu od $UN=-5.50\%$, ova vrednost ne prelazi preko 2.

Od značaja je i činjenica da prilikom merenja na dvotračnim putevima na svim uzdužnim nagibima i na ravnom terenu nigde ne postoji traka za sporu vožnju u smeru na usponu, čime merenje PCE vrednosti nema ograničavajući faktor.

U području uspona UN= 5.00%, prikazanom vrednosti SD dato je najveće odstupanje vrednost PCE za KV. Takođe, vrednost odstupanja za PCE na osnovu SD, je najniže na ravnom terenu i padu, dok na usponu se beleži blagi rast odstupanja, na osnovu SD za KV.

Empirijskim istraživanjem, malo odstupanje PCE vrednosti po klasama vozila sa povećanjem pada može se opravdati kontinuiranim saobraćajnim tokom koji se javlja sa povećanjem pada, bez obzira na različite vozno-dinamičke sposobnosti vozila prema usvojenim klasama.



Slika 2. Empirijski dobijene vrednosti AS i SD na UN dvotračnih puteva

Kod analize dobijenih vrednosti ekvivalenata za PCE_{15%} primetno je manje povećanje vrednosti sa porastom uzdužnog nagiba. Takođe, sa porastom nagiba preko 5.00% vrednost PCE_{15%} kod KV-a vrednost PCE ostaje konstantna i iznosi 3.535, pa se ova vrednost može i usvojiti za velike nagibe.

Evidentno je da se veće vrednosti PCE mogu pripisati preopterećenim vozilima (vozilima čija se specifična snaga nalazi na graničnim vrednostima), pogotovu na padu, a manje vrednosti PCE, manje opterećenim vozilima. Takođe, veće razlike u dobijenim PCE vrednostima izraženije su kod manje opterećenih vozila.

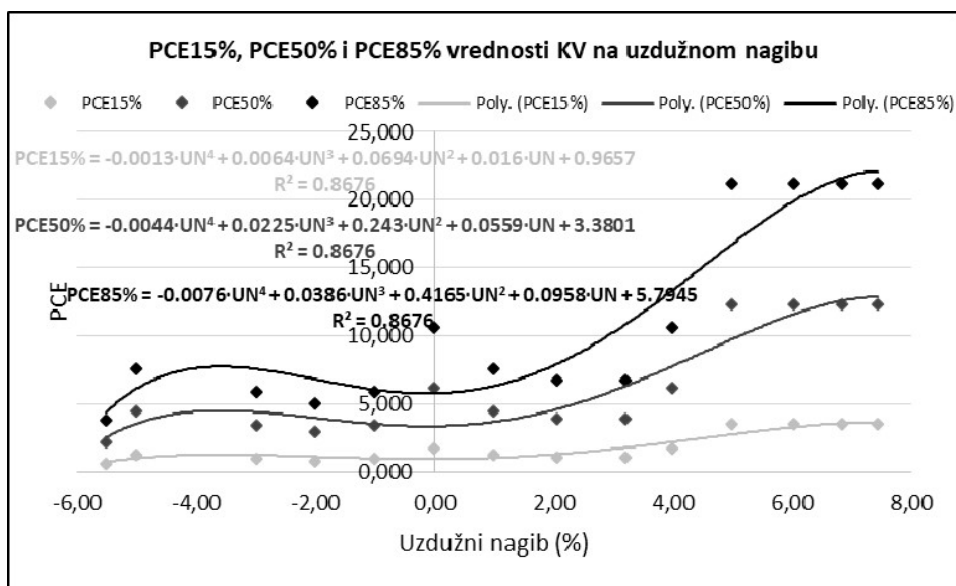
Analizom PCE_{50%}, što je i srednja vrednost za sva komercijalna vozila, utvrđeno je da se ova vrednosti kreću od PCE_{50%}=2.23÷12.37. Optimistična i pesimistična prognoza PCE vrednosti u funkciji UN se kreću u rasponu PCE_{15%}=0.64÷3.54, odnosno PCE_{85%}=3.82÷21.12, što je dato u tabeli 3.

Za vrednosti PCE_{15%}, PCE_{50%} i PCE_{85%} primetno je da se javlja kontinuirani rast PCE vrednosti sa povećanjem UN od pada prema usponu.

Na slici 3. uočava se veoma indikativan rezultat da za svaku vrednost uzdužnog pada razlika između PCE_{15%}, PCE_{50%} i PCE_{85%} je za približno 2 (dve) PCU jedinice, ako se posmatraju sva komercijalna vozila u realnom saobraćajnom toku. Sa povećanjem UN, ova razlika se znatno povećava. Takođe, pri vrednosti pada UN= -3.00%, dolazi do pojave granične vrednosti pada, gde od ravnog terena do ove granične vrednost PCE za komercijalna vozila raste, a nakon toga sa povećanjem pada opada ova vrednost za svaki od nivoa percentila.

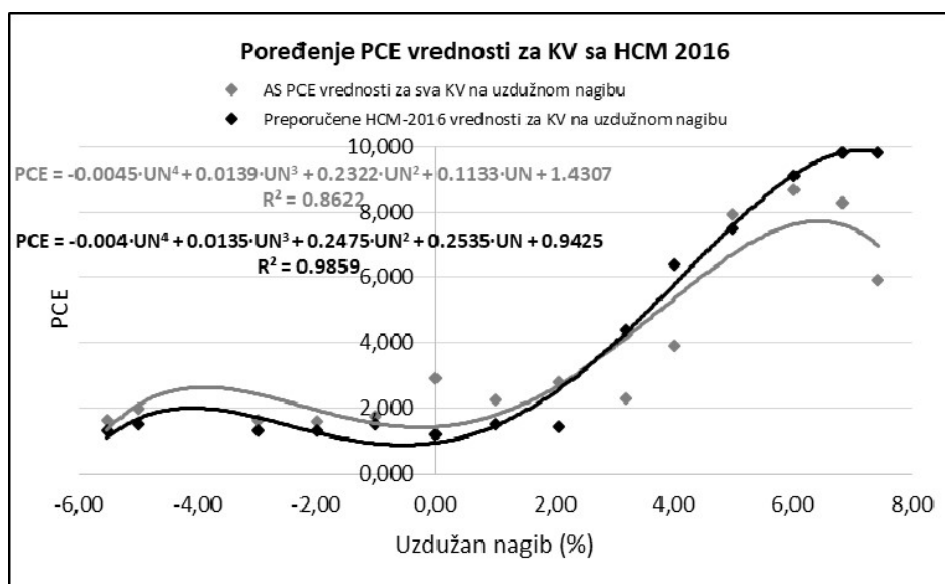
Tabela 3. Vrednosti $PCE_{15\%}$, $PCE_{50\%}$ i $PCE_{85\%}$ za sva KV u funkciji UN

Redni broj	Deonica	Kategorija i broj puta	UZDUŽNI NAGIB (%)	SVA KOMERCIJALNA VOZILA		
				PAE 15%	PAE 50%	PAE 85%
1	Ivanjska-Šargovac	M-I-108	-5,52	0,636	2,227	3,818
2	Vrhovi-Šešlije	M-I-103	-5,00	1,273	4,455	7,636
3	Ivanjska-Šargovac	M-I-108	-2,98	0,990	3,465	5,939
4	Ivanjska-Šargovac	M-I-108	-2,00	0,848	2,970	5,091
5	Vrhovi-Šešlije	M-I-103	-1,00	0,990	3,465	5,939
6	Rudanka-Doboj	M-I-105	0,00	1,768	6,187	10,606
7	Klašnice-Prnjavor	M-I-106	1,00	1,273	4,455	7,636
8	Klupe-Teslić	M-I-108	2,07	1,131	3,960	6,788
9	Klašnice-Prnjavor	M-I-106	3,20	1,131	3,960	6,788
10	Klašnice-Prnjavor	M-I-106	4,00	1,768	6,187	10,606
11	Vrhovi-Šešlije	M-I-103	5,00	3,535	12,374	21,212
12	Obodnik-Klupe	M-I-108	6,03	3,535	12,374	21,212
13	Obodnik-Klupe	M-I-108	6,84	3,535	12,374	21,212
14	Obodnik-Klupe	M-I-108	7,45	3,535	12,374	21,212



Slika 3. Model polinoma četvrtog stepena $PCE_{15\%}$, $PCE_{50\%}$ i $PCE_{85\%}$ u funkciji UN

Na slici 4. dato je poređenje empirijski dobijenih vrednosti PCE za komercijalna vozila u zavisnosti od uzdužnog nagiba sa HCM-2016. [1] Prema HCM-2016, preporučene PCE vrednosti u funkciji UN imaju izuzetno visok koeficijent korelacije zbog, bez obzira na rasipanja vrednosti koje su prikazane na dijagramu polinomom četvrtog stepena. Takođe, prema HCM-2016 preporučene vrednosti za date putne i saobraćajne uslove imaju izjednačene vrednosti (preklapaju se) za $UN=+3.00\%$ u odnosu na sopstveno istraživanje.



Slika 4. Upporedni prikaz PCE vrednosti polinoma četvrtog stepena sopstvenog istraživanja i preporučenih vrednosti prema HCM-2016

Ipak, može se uočiti da su PCE vrednosti sa povećanjem uzdužnog pada dobijene u sopstvenom terenskom istraživanju veće nego što je to preporučeno u HCM priručniku prema terenskim i saobraćajnim uslovima. To se posebno odnosi za pad od ravnog terena do $UN = -5.50\%$, što se može obrazložiti da su američke vrednosti uticaja komercijalnih vozila na padu znatno manje, nego u lokalnim uslovima. Takođe, evidentno je da ne postoji nikakva suštinska razlika u modelovanju PCE vrednosti za HCM priručnik [1].

Poređenjem vrednosti dobijenih sopstvenim istraživanjem sa vrednostima HCM za vrednosti uzdužnog nagiba $UN = +3.00\%$ dolazi do izjednačavanja HCM vrednosti sa sopstvenim istraživanjem. Takođe, uočljivo je da sa povećanjem uzdužnog nagiba, dolazi do rasta vrednosti PCE za komercijalna vozila prema HCM priručniku, ali ovaj rast ne prelazi vrednost ekvivalenta 10.00. Činjenica je da PCE vrednosti prema HCM-2016, a za uspon veći od $UN = +3.00\%$, dobijaju se veće PCE vrednosti prema HCM od PCE vrednosti dobijenih sopstvenim istraživanjem (slika 4.) za komercijalna vozila. Time se može izvesti konkluzija, da za uspon $UN \geq +3.00\%$, vrednost PCE dobijena sopstvenim istraživanjem je manja od vrednosti dobijene u američkom priručniku HCM-2016.

Takođe, može se uočiti da se vrednosti PCE na padu dvotračnih puteva povećavaju za uzdužni pad veći od $UN = -2.00\%$. Preporučena vrednost PCE na ravnom terenu za komercijalna vozila je nešto ispod 3.00, dok se generalno sa povećanjem pada ta vrednost smanjuje do ispod 2.00. Činjenica je da saobraćajni i putni uslovi nisu identični u SAD i lokalnim uslovima i da vrednosti u HCM nekompetentne. Ovo bi imalo za realnu posledicu da bi u postupcima proračuna kapaciteta, bez kalibrisanja modela na lokalne uslove bi se dobijale realno manje vrednosti od ostvarivih.

5 DISKUSIJA REZULTATA ISTRAŽIVANJA I ZAKLJUČCI

Na osnovu dobijenih rezultata zasnovanih na empirijskom istraživanju pokazano je da su PCE vrednosti na padu dvotračnih puteva u složenoj funkcionalnoj zavisnosti od strukture saobraćajnog toka, vozno-dinamičkih karakteristika vozila i vozača, a posebno od

tehničko-eksploatacionih karakteristika puta. Takođe, PCE vrednosti nisu fiksne veličine, već promenljive vrednosti i zavise pre svega od prethodno navedenih funkcionalno zavisnih pokazatelja. PCE vrednosti funkcionalno su zavisne od poboljšanja u performansama proizvodnje novih vozila, kao i od njihovih vozno dinamičkih karakteristika. Dobijeni podaci pokazuju prema modelu niže PCE vrednosti za KV dobijene empirijskim istraživanjem od preporučenih vrednosti iz HCM-2016 priručnika za uzdužni nagib $UN \geq 3.00\%$.

Aritmetičke sredine dobijenih vrednosti PCE su na ravnom terenu i padu dvotračnih puteva za komercijalna vozila manja od 3.00 ($PCE \leq 3.00$). Blagi rast vrednosti PCE je na padu od $UN = -4.00\%$, kada modelski kalibrisana vrednost ekvivalenta PCE je nešto veća od 2.00. Sa povećanjem uzdužnog nagiba na usponu, dolazi i do rasta vrednosti PCE. Najveća PCE vrednost dobijena je na deonici Obodnik-Klupe za $UN = 6.03\%$ i iznosi $PCE = 8,673$ za sva komercijalna vozila. Za sve kategorije vozila, vrednost PCE na padu dvotračnih puteva je znatno niža nego na usponu, što je prikazano sa pozitivnim koeficijentom korelacije od $R^2 = 0.8622$. Vrednost PCE na najveće izmerenom padu od $UN = -5.50\%$ se kreće od 1.00 do 2.00, za sve klase vozila. Na deonici Doboj-Rudanka u uslovima slobodnog saobraćajnog toka dobijaju se nešto više vrednosti PCE na ravnom terenu u odnosu na pad, gde je vrednost za komercijalna vozila $PCE = 2.927$ (≈ 3.00). Vrednosti PCE na padu od $UN = 0.00\%$ do $UN = 3.00\%$ za KV variraju u rasponu od 2.00 do 3.00.

Ako se uporede PCE vrednosti dobijene u ovom radu sa HCM modelima iz 2016. godine može se zaključiti da PCE vrednosti značajno variraju, a u slučaju povećanja pada od $UN = 0.00\%$ do $UN = -3.00\%$ sprovedenim istraživanjem dobijaju se znatno veće vrednosti PCE od preporučenih u HCM modelu za sva komercijalna vozila. Na osnovu modela datog na slici 2. dokazano je da od vrednosti $UN = -5.50\%$ do $UN = -4.0\%$, kriva PCE kontinualno raste, a tek sa daljim smanjenjem pada do $UN = 0.00\%$ ona postepeno beleži pad. Nakon toga, za sva KV, evidentan je rast PCE vrednosti. Koeficijent korelacije iznosi $R^2 = 0.8622$, što ukazuje na velika kolebanja aritmetičkih sredina vrednosti PCE, bez obzira na razvoj modela četvrtog stepena. Minimalne kalibrisane PCE vrednosti se dobijaju za ravan teren ($UN = 0.00\%$), što se ne bi moglo reći za dobijenu vrednost aritmetičke sredine na ovoj mernoj sekciji. Takođe razlika između PCE vrednosti je manja sa povećanjem pada za sve klase vozila, dok sa povećanjem uspona, odstupanja u PCE vrednostima su veća (SD). Jedno od ograničenja ovog rada je da je procena PCE vrednosti rađena isključivo za uslove slobodnog saobraćajnog toka.

Na osnovu dosadašnjih analiza, uočeno je da se na usponu odražava mnogo veći uticaj komercijalnih vozila, nego što je to slučaj na padu dvotračnih puteva u uslovima slobodnog saobraćajnog toka.

Dobijeni rezultati u ovom radu iniciraju potrebu za kontinuiranim istraživanjima PCE vrednosti za različite uslove saobraćajnog toka, čime bi se stvorili realni preduslovi za implementaciju istih vrednosti u lokalnom priručniku neophodnom za postupke analize praktičnog kapaciteta i Nivo Usluge dvotračnih puteva. Takođe, dobijeni rezultati ukazuju na potrebu za konstantnim praćenjem slobodnih saobraćajnih tokova, a takođe i PCE vrednosti u uslovima normalnog i zasićenog toka.

ZAHVALNICA

Ovaj rad je deo istraživanja urađenog u okviru projekta „Istraživanje intervala sleđenja u modelima analize efikasnosti i bezbednosti dvotračnih puteva” koji je podržalo Ministarstvo za naučnotehnološki razvoj i visoko obrazovanje Republike Srpske, broj 19.032/961-39/23.

LITERATURA

- [1] Highway Capacity Manual: A Guide for Multimodal Mobility Analysis 2016. 6th ed. Transportation Research Board, Washington, D.C.
- [2] Elefteriadou, L., Torbic, D., & Webster, N. (1997). Development of Passenger Car Equivalents for Freeways, Two-Lane Highways, and Arterials. *Transportation Research Record*, 1572(1), 51-58. doi.org/10.3141/1572-07
- [3] Zhou, J., Rilett, L., and Jones, E. (2017), Assessing Passenger Car Equivalency Factors for High Truck Percentages. NDOT Research Report SPR-P1(15) M023.
- [4] Roess, R. P., and Prassas, E. S. (2014). *The Highway Capacity Manual: A Conceptual and Research History*. Springer Tracts on Transportation and Traffic 5, Vol. 1. London: Springer. doi: 10.1007/978-3-319-05786-6
- [5] Giuffrè, O., Granà, A., Tumminello, M. L., and Sferlazza, A. (2017). Estimation of passenger car equivalents for single-lane roundabouts using a microsimulation-based procedure. *Expert System Appl.* 79, 333–347. doi: 10.1016/j.eswa.2017.03.003
- [6] Ballari, S. O., Kar, P., & Chunchu, M. (2018). *Passenger Car Equivalents for the Heterogeneous Traffic on Divided Rural Highways Based on Simulation Model*. *Transportation in Developing Economies*, 4(2). doi:10.1007/s40890-018-0067-z
- [7] Giuffrè, O., Granà, A., Giuffrè, T., Tumminello, M.L. & Acuto F. (2019). *Passenger Car Equivalents for Heavy Vehicles at Roundabouts. a Synthesis Review*. *Front. Built Environ.* 5:80. doi:10.3389/fbuil.2019.00080
- [8] Omar, B. S., Kar, P., & Chunchu, M. (2020). *Passenger Car Equivalent Estimation for Rural Highways: Methodological Review*. *Transportation Research Procedia*, 48, 801–816. doi:10.1016/j.trpro.2020.08.085
- [9] Yeung, J. S., Wong, Y. D., and Secadiningrat, J. R. (2015). Lane-harmonised passenger car equivalents for heterogeneous expressway traffic. *Transportation Research Part A*, 78, 361-370. doi:10.1016/j.tra.2015.06.001
- [10] Chaichannawatik B., Sathamnuwong, N & Petchan, P. (2018). *PASSENGER CAR EQUIVALENTS (PCE) OF HETEROGENEOUS VEHICLES ON FOUR-LANE HIGHWAYS IN THAILAND*, Kasem Bundit Engineering Journal Vol.8 No.2 May-August 2018.
- [11] Lu, P., Zheng, Z., Tolliver, D., & Pan, D. (2020). *Measuring Passenger Car Equivalents (PCE) for Heavy Vehicle on Two Lane Highway Segments Operating Under Various Traffic Conditions*. *Journal of Advanced Transportation*, 2020, 1–9. doi:10.1155/2020/6972958
- [12] Al-Obaedi, J. (2016) Estimation of Passenger Car Equivalents for Basic Freeway Sections at Different Traffic Conditions. *World Journal of Engineering and Technology*, 4, 153-159. doi: 10.4236/wjet.2016.42013.

- [13] Subotić, M., Tubić, V. (2017). Car Equivalents Dependence on the Longitudinal Road Gradient on Two lane Roads in Bosnia and Herzegovina, *Promet – Traffic & Transportation*, Vol. 29, No. 4, 401-409.
- [14] Sorensen, H. (1998) *Determining Passenger Car Equivalents for freeways*, TRB-Road Directorate Denmark „Proceedings of the Third International Symposium on Highway Capacity“ Copenhagen, Denmark.
- [15] „Highway Capacity Manual“, Transportation Research Board, National Research Council; Washington D.C. 2000.

SUMMARY

The Impact of Commercial Vehicles on Non-urban Roads – The Republic of Srpska Case Study

Abstract: Commercial vehicles take up more space than passenger cars and their operational driving-dynamic characteristics are significantly less favourable than those of passenger cars. Also, commercial vehicles have unfavourable impact on traffic flow due to their dimensions and operational characteristics (acceleration, deceleration, manoeuvring, etc.). The goal of this paper is to quantify the adverse influence of the flow structure through the values of Passenger Car Equivalents (PCE) as a function of longitudinal slope (rise/fall) based on extensive empirical research in local free flow conditions. By applying the linear sources critics and results of the empirical research it has been found that the PCE for commercial vehicles is being increased by increasing the slope. Based on the local measurements, fourth-degree polynomial models with a high correlation coefficient were developed to determine representative PCE values on the descent and ascent of two-lane roads. Comparing the model in free flow with the HCM-2016 Manual it has been showed that this research shows lower PCE value for ascent higher then 3%. Also, the fourth-degree polynomial models of the PCE values for PCE15%, PCE50% and PCE85% were developed.

Key words: free flow, PCE, longitudinal slope, two-lane road