

Procena PCE vrednosti na prilazima vangradske i gradske kružne raskrsnice²⁴

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

Miroslav Đerić, Ministarstvo komunikacija i transporta BiH,
miroslav.djeric@mkt.gov.ba

Anđela Tomašević, Saobraćajni fakultet Doboj, andjelatomasevic2001@gmail.com

Rezime: Na osnovu obimnih empirijskih istraživanja sprovedenih u slobodnom saobraćajnom toku u lokalnim uslovima kvantifikovan je nepovoljni uticaj strukture saobraćajnog toka na prilazima kružnih raskrsnica kroz vrednosti ekvivalenata teretnih vozila (PCE – Passenger car equivalent). Istraživanje je sprovedeno na dve kružne raskrsnice sa gradskim i prigradskim tokovima, gde se na osnovu vremenskih intervala sleđenja (Th) pristupilo izračunavanju PCE vrednosti. Dobijene vrednosti preporučene za lokalne uslove međusobno su upoređene komparativnom analizom, kao i sa preporučenim priručnikom za kapacitet puta za gradske i vangradske kružne raskrsnice. Takođe, uspostavljene su preporučene PCE vrednosti za lokalne uslove na kružnim raskrsnicama u Bosni i Hercegovini.

Ključne reči: efikasnost, vršno opterećenje, interval sleđenja, uslovi slobodnog toka

1 UVOD

Procena vrednosti PCE (ekvivalenata teretnih vozila) veoma je značajna za analizu kapaciteta i Nivoa Usluge (LOS-Level of Service) saobraćajnica, kao i za druge relevantne primene kao što su određivanje zasićenog toka, koordinacija svetlosnih signala, razvoj modela protoka saobraćaja i slično. Zbog česte primene ovih vrednosti, utvrđivanje tačnosti PCE pokazatelja predstavlja imperativ u analizi saobraćajnih tokova. U prethodnom periodu realizovano je mnogo istraživačkih poduhvata za procenu vrednosti PCE. Takođe, u mnogim zemljama razvijene su različite metode za procenu vrednosti PCE i njihovu primenu u lokalnim uslovima, iako ove metode nisu potpuno analogne za heterogeni saobraćajni tok, zbog prisustva različitih klasa vozila koja se pojavljuju, varijabilnosti vozila unutar klase i njihove manevarske sposobnosti.

Raskrsnice sa kružnim tokom su sve više aktuelne u primeni putnog inženjerstva, a pre svega zbog poboljšanja nivoa bezbednosti saobraćaja i optimalnog nivoa efikasnosti odvijanja saobraćaja. Funkcionalnost kružne raskrsnice zahteva ne samo pouzdan sistem proračuna za određivanje protoka na osnovu geometrijskih karakteristika kružne raskrsnice, već i značajne statističke podatke koji pokazuju uticaj parametara kao što su karakteristike ponašanja vozača i tip vozila. LTV (laka teretna vozila) i TTV (teška teretna vozila) i BUS (autobusi) imaju značajno veći uticaj na protočnost kružne raskrsnice od PA (putničkih automobila), pa se moraju uzeti u obzir prilikom planerskih, projektantskih i saobraćajnih analiza. Mali broj studija je proučavao uticaj TTV na protok kružnih

²⁴ CC-BY licenca

raskrsnica, tako da se pokazalo veoma značajnim kvantifikovanje vrednosti PCE na pristupnim kracima. U HCM-2016 [1] obrađene su kružne raskrsnice i predložen je PCE faktor koji iznosi 2,0 za sva teretna vozila (TV).

Osnovni cilj ovog istraživanja je proučavanje PCE pokazatelja na prilaznim kracima kružnih raskrsnica i utvrđivanje reprezentativnih lokalno preporučenih vrednosti. Hipotetička je pretpostavka da TV imaju veći uticaj na protočnost kružne raskrsnice, nego PA u urbanim i ruralnim područjima, ali je ipak očekivano da će uticaj TV na funkcionalnost kružne raskrsnice značajno varirati, što zavisi od nivoa opterećenja (vršnog i vanvršnog). Dodatni cilj ovog istraživanja je odrediti novu lokalno preporučenu ekvivalentnost TV za planiranje i projektovanje kružnih raskrsnica u Bosni i Hercegovini. Rezultati dobijeni u ovom istraživanju imaju za cilj da pruže pregled postojećih znanja o proceni vrednosti PCE na prilaznim kracima kružnih raskrsnica, a dodatno mogu predstavljati smernice za saobraćajne inženjere u planiranju, projektovanju i analizi kapaciteta kružnih raskrsnica u uslovima heterogenog saobraćaja.

2 LITERARNI PREGLED

Geometrijske karakteristike kružnih raskrsnica oslanjaju se na koncept prohodnost vozila, odnosno najvećeg gabarita vozila, kao korisnika putne mreže [2]. U realnom saobraćajnom toku, posebno značajan probleme je “zauzetost” prostora teških vozila u kružnim raskrsnicama koji mogu uticati na ponašanje vozača prilikom prihvatanja “vremenskih praznina” unutar mešovito toka, kao i na analizu kapaciteta [3]. HCM priručnici [1,4] koriste za procenu performansi kružnih raskrsnica prilagođavanje brzine saobraćajnog toka koji obuhvata i analizu strukture toka kroz PCE vrednosti.

Posebno je značajno istaći da je sprovedeno malo istraživanja o procesima ponašanja i fizičkim procesima kretanja vozila na ulazima u kružne raskrsnice u heterogenim uslovima odvijanja saobraćaja. Istraživanja se uglavnom baziraju na metodologiji i utvrđivanju preporučenih PCE vrednosti.

Na osnovu istraživanja sprovedenog na tri kružne raskrsnice u Vermontu, Ontariu i Vinskonsinu, pokazano je da PCE vrednosti za teška vozila iznose 1,5–2,5, a za laka vozila 1,0–1,5. PCE vrednosti za LTV su bile niža od HCM vrednosti koja se preporučuje i iznosi 2,0. [4,5] Uprkos značajnim ograničenjima, relevantne informacije o statističkim metodama i metodama zasnovanim na simulaciji saobraćajnih tokova za izračunavanje PCE vrednosti na pristupnim kracima kružnih raskrsnica, izvedene iz procesa prikupljanja podataka iz studija, navedene su u tabeli 1.

Tabela 1. Pregled značajnih istraživanja

Reference	Tip saobraćajnice	Klase vozila za određivanje PCE	Metoda/Model	Istraživački pristup	Ključni nalazi
Akçelik, R. [6]	Kružne raskrsnice	TV	Analitički model kapaciteta (prihvatanje vremenskih praznina)	Teorijski/analitički	Učešće TV smanjuje kapacitet
Raj, P. et al. [7]	Saobraćajnice	TV	Konceptualni geometrijski model	Teorijski	Geometrija raskrsnice značajno utiče na PCE
Giuffrè et al. [8]	Kružne raskrsnice	TV	Sinteza literature	Pregledni rad	PCE zavisi od više faktora
Mohan, M., & Chandra, S. [9]	Urbane arterije	PA i mešoviti saobraćajni tok	Metoda vremenskog razmaka	Empirijski	PCE varira u zavisnosti od karakteristika saobraćajnog toka
P. Lertworawanich [10]	Brze saobraćajnice	PA, TV	Metoda vremenskog razmaka	Empirijski	PCE varira sa gustinom saobraćajnog toka

Karlaftis, M., Golias, I. [11]	Vanurbani putevi	Mješoviti saobraćajni tok	Regresioni modeli	Empirijski	PCE zavisi od karakteristika puta i saobraćajnog toka
Al-Kaisy et al. [12]	Autoputevi	TV	Metoda utvrđivanja brzine slobodnog toka	Empirijski	PCE zavisi od brzine i strukture vozila u saobraćajnom toku
Kang, K.; Nakamura, H. [13]	Kružne raskrsnice	TV	Terenska mjerenja kapaciteta	Empirijski	Ulazni kapacitet se smanjuje u funkciji učešća TV
Macioszek, E. [14]	Turbo kružne raskrsnice	TV	Empirijsko terensko istraživanje	Empirijski	PCE ≈ 1.6–2.0
Keller, H.; Saklas, J. [15]	Urbane arterije	Heterogeni saobraćajni tok	Teorijski i empirijski pristup	Kombinovani	PCE zavisi od sastava i uslova saobraćajnog toka
Acosta, Y. M. C. [16]	Kružne raskrsnice	Mješovite klase vozila	Metoda vremenskog razmaka + regresija	Empirijsko/analitički	PCE zavisi od međusobne interakcije vozila
Al-Kaisy, A.; Hall, F.; Reisman, E. [17]	Autoputevi	TV	Analiza pražnjenja kolone + optimizacija	Empirijsko/analitički	PCE je veći u uslovima zagušenja
Yeung, J.S. et al. [18]	Urbane brze saobraćajnice	PA i TV	Višestruka linearna regresija	Empirijski	PCE značajno varira u zavisnosti od saobraćajnog toka
Pajecki et al. [19]	Kružne raskrsnice	Više tipova vozila	Mikrosimulacija (VISSIM)	Simulacioni	PCE zavisi od tipa vozila i uslova saobraćaja
Giuffrè, O.; Granà, A.; Marino, S. [20]	Jednobraćne kružne raskrsnice	TV	Kalibracija simulacionog modela	Simulacioni	Predložena metoda za procjenu PCE
Giuffrè et al. [21]	Turbo kružne raskrsnice	TV po saobraćajnim trakama	Mikrosimulacija po trakama	Simulacioni	PCE varira po saobraćajnim trakama
Granà et al. [22]	Dvobraćne i turbo kružne raskrsnice	TV po saobraćajnim trakama	Mikrosimulacija (AIMSUN)	Simulacioni	Preporučuje se određivanje PCE po saobraćajnim trakama

Analizom prethodno navedenih literarnih izvora može se zaključiti da interakcija između operativnih performansi TV i geometrijskih karakteristika kružnih raskrsnica može proizvesti značajan uticaj na putanje kretanja TV i sposobnosti manevrisanja zbog krivolinijske prirode dizajna kružne raskrsnice. Literatura predstavlja različite metode procene za dobijanje PCE vrijednosti za TV. Zbog toga se vrednosti PCE kvantitativno razlikuju.

3 MATERIJAL I METODE

Metod za utvrđivanje vrednosti PCE zasnovan je na odnosu srednje vrednosti intervala sleđenja kod posmatrane klase vozila i srednje vrednosti intervala sleđenja koje prave PA. Analitički, formulacija je data po poznatom Greenshiels-ovom modelu:

$$PCE = \frac{T_{hij}}{T_{hPA}} \quad (1)$$

gde je:

T_{hij} - srednja vrednost intervala sleđenja za posmatranu klasu vozila i, pod uslovima j,
 T_{hPA} - srednja vrednost intervala sleđenja putničkih automobila.

U aktuelnim inženjerskim priručnicima za proračun kapaciteta i Nivoa Usluge, za kvantifikovanje uticaja strukture saobraćajnog toka na veličinu zasićenog toka, koristi se tzv. „faktor uticaja komercijalnih vozila“ [23-24], koji je suštinski formiran na bazi vrednosti PCE definisanih kategorija vozila. Njegov odnos prikazan je u narednoj relaciji:

$$F_{KV} = \frac{I}{I + P_i \cdot (PCE_i - I) + P_j \cdot (PCE_j - 1) + \dots P_n \cdot (PCE_n - I)} \quad (2)$$

gde je:

F_{KV} - faktor uticaja komercijalnih vozila;

$P_{(i-n)}$ - procenat učešća pojedinačne kategorije vozila;

$PCE_{(i-n)}$ - PCE vrednost određene kategorije vozila.

Podatke o obimu saobraćaja za gradsku i vangradsku kružnu raskrslu potrebno je prikupljati tokom jutarnjih i popodnevnh vršnih perioda, kao i tokom podnevnh i večernih vanvršnih perioda, radi dobijanja relevantnih vrednosti za procenu faktora uticaja komercijalnih vozila. Pretpostavka je da su prosečni vremenski uslovi bez kiše, snega i magle, te da su vozači približnih psihofizičkih sposobnosti.

Tipično, empirijsko istraživanje intervala sleđenja na kružnim raskrsnicama se vrši u saobraćajnoj traci na prilazu raskrsnici, pri čemu posmatrač beleži interval sleđenja vozila koji prolaze tim presekom tokom određenog vremenskog perioda (vršnog ili vanvršnog). Istraživanje je potrebno sprovesti u uslovima slobodnog saobraćajnog toka. Nakon toga, primenom prethodno navedenih relacija, vrši se sinteza i analiza dobijenih podataka, koji se kvantifikuju kroz dobijanje PCE vrednosti. Preporučene PCE vrednosti prema HCM-u [1,4] za prilazni krak kružne raskrsnice iznose $PCE_{TV,BUS}=1,50$ i $PCE_{AV}=2,00$.

Istraživanje je sprovedeno na približno 20 m od zaustavne linije prilazih krakova kružnih raskrsnica, a interval sleđenja je beležen video zapisom. Navedene vrednosti su uporedive sa lokalno dobijenim vrednostima.

4 STUDIJA SLUČAJA KRUŽNIH RASKRSNICA U BRČKOM I DOBOJU

Istraživanje koje je predmet ovog rada je sprovedeno na dve trokrake kružne raskrsnice sa po jednom ulaznom saobraćajnom trakom na prilaznom toku, a na jednostranom kružnom kolovozu (slika 1). Jedan kružni tok nalazi se u urbanom području - gradska raskrsnica u Brčkom, dok je drugi vangradska kružna raskrsnica smeštena u Doboju. Ovakav izbor omogućava upoređivanje ponašanja vozača u različitim urbanim i vangradskim uslovima, uzimajući u obzir saobraćajne i infrastrukturne razlike.

Vremenski okvir istraživanja obuhvatio je dane u kojima su podaci prikupljeni u vršnim (08:00-09:00 i 15:00-17:00) i vanvršnim časovima (11:00-12:00 i 18:00-19:00). Terensko posmatranje i empirijsko merenje vršeno je u periodu od 24. do 28. aprila 2025. godine. Terensko posmatranje obavljeno je sa sigurne udaljenosti, bez ometanja saobraćajnog toka, u skladu sa etičkim principima istraživanja.



Slika 1. Lokacija trokrakih kružnih raskrsnica sa prilaznim kracima u Brčkom i Doboju

Ipak, pre nego što se pristupi analizi dobijenih vrednosti intervala sleđenja, utvrđena je struktura vozila u toku na prikazanim kružnim raskrsnicama za sva tri prilazna analizirana kraka. Izmerena vrednost izražena u procentima na raskrsnici u Brčkom iznosi

81,2% putničkih vozila i 18,8% komercijalnih vozila, dok je na raskrsnici u Doboju učešće komercijalnih vozila iznosilo 23,7% (76,3% putničkih automobila). U skladu sa dobijenim vrednostima, može se smatrati opravdanim izučavanje i analiza vrednosti intervala sleđenja, a time i PCE vrednosti, jer je utvrđen značajan uticaj komercijalnih vozila, a pre svega LTV na saobraćajni tok.

Primenom deskriptivne statistike u tabeli 2 i tabeli 3 prikazane su dobijene vrednosti intervala sleđenja gradske i vangradske kružne raskrsnice dobijene u vršnom i vanvršnom opterećenju prema navedenom uzorku.

Tabela 2. Statistički dobijene vrednosti intervala sleđenja u vršnom i vanvršnom opterećenju- Doboju

Vangradska kružna raskrsnica	Interval sleđenja (Th) PA na "INA Benzinska stanica" Doboju											
	Vršno časovno opterećenje						Vanvršno časovno opterećenje					
	K1		K2		K3		K1		K2		K3	
	08-09 h	15-16 h	08-09 h	15-16 h	08-09 h	15-16 h	11-12 h	18-19 h	11-12 h	18-19 h	11-12 h	18-19 h
Veličina uzorka	328	587	432	398	495	601	451	348	448	433	591	640
Isključeno iz uzorka	63	24	25	20	13	8	29	54	36	28	7	27
%isključeno	19,2%	4,1%	5,8%	5,0%	2,6%	1,3%	6,4%	15,5%	8,0%	6,5%	1,2%	4,2%
AS (Th)	5,806	5,456	4,946	5,181	3,637	3,726	6,321	6,552	4,740	4,851	3,702	3,996
Sd	2,600	2,689	3,167	3,096	2,344	2,207	2,663	3,166	2,967	3,280	2,276	2,481
Kv	0,448	0,493	0,640	0,598	0,645	0,592	0,421	0,483	0,626	0,676	0,615	0,621
Max	14,797	14,922	14,984	14,859	14,953	13,563	14,750	14,969	13,734	14,765	14,266	14,813
Min	1,469	1,750	0,156	1,188	0,531	0,890	1,828	1,750	0,344	0,672	0,984	0,843
Medijana	4,593	4,688	3,782	4,141	2,938	3,078	5,743	5,961	4,000	3,625	3,046	3,250

U tabeli 2 dobijene vrednosti intervala sleđenja na kružnoj raskrsnici u Doboju sintetizovani su za PA, na uzorku od 5752 izmerene vrednosti intervala sleđenja, od čega je iz uzorka isključeno 334 (5,8%) vrednosti. Dobijeni rezultati pokazuju vrednosti od 3,637 do 6,552 s, pa se može zaključiti da u vanvršnom opterećenju se dobijaju veće vrednosti intervala sleđenja PA, nego što je to slučaj u vršnom opterećenju. Takođe, pokazatelji standardnog odstupanja (Sd), prikazuju visoke vrednosti u odnosu na aritmetičku sredinu (As), što je prikazano kvantitativnim vrednostima koeficijenta korelacije (kv), a govori o velikom nivou rasipanja vrednosti intervala sleđenja za PA.

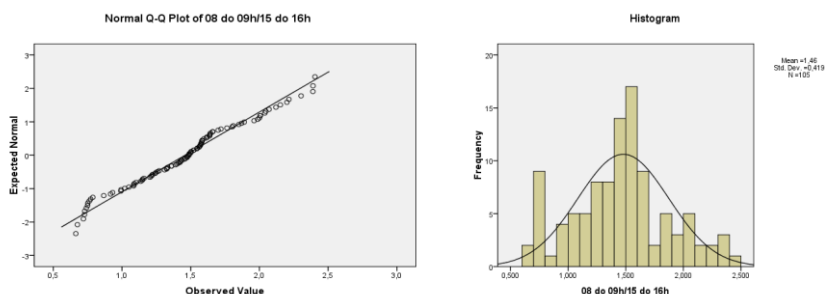
Tabela 3. Statistički dobijene vrednosti intervala sleđenja u vršnom i vanvršnom opterećenju- Brčko

Gradska kružna raskrsnica	Interval sleđenja (Th) PA na "Brčko gas" Brčko											
	Vršno časovno opterećenje						Vanvršno časovno opterećenje					
	K1		K2		K3		K1		K2		K3	
	08-09 h	15-16 h	08-09 h	15-16 h	08-09 h	15-16 h	11-12 h	18-19 h	11-12 h	18-19 h	11-12 h	18-19 h
Veličina uzorka	418	490	520	408	642	781	477	289	504	331	686	402
Isključeno iz uzorka	31	39	38	20	14	23	41	12	38	26	32	22
%isključeno	7,4%	8,0%	7,3%	4,9%	2,2%	2,9%	8,6%	4,2%	7,5%	7,9%	4,7%	5,5%
AS (Th)	5,875	5,407	5,862	5,755	4,764	4,516	5,768	6,135	5,548	6,863	4,639	5,737
Sd	3,396	3,037	3,187	3,229	2,783	2,514	3,095	3,702	3,017	3,807	2,641	3,335
Kv	0,578	0,562	0,544	0,561	0,584	0,557	0,537	0,603	0,544	0,555	0,569	0,581
Max	14,694	14,789	14,914	14,913	14,383	14,321	14,726	14,960	14,742	15,772	14,976	14,820
Min	1,732	0,171	1,466	1,170	1,341	1,388	0,250	0,140	1,467	1,030	1,451	1,373
Medijana	4,570	4,361	4,898	4,626	3,698	3,682	4,665	4,876	4,602	5,960	3,830	4,820

Na osnovu dobijenih vrednosti u tabeli 3, intervala sleđenja za PA na kružnoj raskrsnici u Brčkom, na uzorku od 5948 izmerenih vrednosti, iz uzorka je isključeno 336 (5,6%). Dobijeni rezultati pokazuju vrednosti od 4,516 do 6,863s. Može se zaključiti, da se dobijaju disperzivno različite vrednosti As u vanvršnom i vršnom opterećenju intervala sleđenja PA, i da se ne može govoriti o većim/manjim vrednostima intervala sleđenja u vanvršnom opterećenju kod gradske kružne raskrsnice. Takođe, pokazatelji standardnog odstupanja (Sd), prikazuju visoke vrednosti u odnosu na aritmetičku sredinu (As), što govori o velikom nivou rasipanja vrednosti intervala sleđenja za PA na trokrakoj gradskoj kružnoj raskrsnici u Brčko Distriktu.

Na osnovu utvrđenih vrednosti intervala sleđenja za PA, pristupilo se obradi intervala sleđenja za komercijalna vozila (LTV, TTV i BUS) u zavisnosti od njihovog prisustva u saobraćajnom toku. Dobijene vrednosti su pretvarane u PCE na osnovu Greenshields-ovog modela za utvrđivanje vrednosti ekvivalenata pomoću intervala sleđenja (Th). Dobijene vrednosti testirane su proverom (testom) normalnosti raspodele, što je prikazano za jedan uzorak LTV na kružnoj raskrsnici u Brčkom, KRAK 2 u periodu vršnog opterećenja (Slika 2).

Analizom dobijenih vrednosti PCE za prilazni krak, potvrđeno je 105 izmerenih vrednosti, čime je testom normalnosti pokazano na osnovu Kolmogorov-Smirnov-og testa da je granično prihvatljiva pretpostavka o normalnosti ($p=0,049 \approx 0.05$) za uzorak nešto veći od $N=100$. Na slici 2 prikazani su dijagram normalnosti sa histogramom.



Slika 2. Dijagram normalnosti raspodele sa histogramom frekvencija

Podaci o rastojanjima sleđenja LTV, TTV i BUS prikupljeni su i obrađeni na osnovu Greenshields-ovog modela za dobijanje PCE vrednosti, pri čemu je analizirano 1440 izmerenih vrednosti PCE na svim krakima gradske i vangradske kružne raskrsnice u vršnom i vanvršnom opterećenju. U tabeli 4 može se uočiti da su vrednosti PCE između 1,00 i 2,00 na vangradskoj kružnoj raskrsnici, dok se na osnovu tabele 5 može videti da PCE vrednosti za BUS i TTV nekada prelaze vrednost 2,00.

U tabeli 5, PCE vrednosti za BUS u vanvršnom opterećenju na kraku K2 iznose 2,56, ali na maloj vrednosti mernog uzorka (izmerenih 7 PCE vrednosti), dok je standardno odstupanje izuzetno visoko i iznosi 2,168, što se ne može prihvatiti kao relevantna vrednost. PCE vrednosti za vršno i vanvršno opterećenje za LTV teže ka $PCE=1,50$, dok se vrednosti kod vangradske kružne raskrsnice na prilaznim kracima iz tabele 4 za LTV kreću u rasponu od 1,00 do 1,50. Visoko dobijena vrednost PCE na gradskoj kružnoj raskrsnici (tabela 5) u vršnom opterećenju iznosi $PCE=2,107$ za TTV.

Tabela 4. Statistički pokazatelji dobijenih PCE vrednosti na prilaznim kracima vangradske kružne raskrsnice

INA-Doboj Vangradska kružna raskrsnica		K1- LTV		K2- LTV		K2- TTV		K2- BUS		K3- LTV		K3- TTV	
		Vršno opterećenje 08 - 09h 15-16h	Vanvršno opterećenje 11-12h 18-19h	Vršno opterećenje 08 - 09h 15-16h	Vanvršno opterećenje 11-12h 18-19h	Vršno opterećenje 08 - 09h 15-16h	Vanvršno opterećenje 11-12h 18-19h	Vršno opterećenje 08 - 09h 15-16h	Vanvršno opterećenje 11-12h 18-19h	Vršno opterećenje 08 - 09h 15-16h	Vanvršno opterećenje 11-12h 18-19h	Vršno opterećenje 08 - 09h 15-16h	Vanvršno opterećenje 11-12h 18-19h
N	Valid	37	34	110	102	107	128	11	10	120	81	118	111
	Missing	0	3	0	8	22	1	118	119	27	66	29	36
Mean		1,839	1,354	1,130	1,188	1,488	1,718	1,752	1,301	1,469	1,033	1,493	1,432
Median		1,713	1,219	1,128	1,131	1,42	1,675	1,728	1,229	1,441	,9850	1,470	1,355
Mode		,323a	1,216	,531a	,699a	1,212a	1,572a	,875a	,461a	1,33	,90a	1,00	,71a
Std. Deviation		1,075	,574811	,540685	,527276	,668320	,510324	,701084	,588734	,52956	,32562	,48623	,63797
Variance		1,156	,330	,292	,278	,447	,260	,492	,347	,280	,106	,236	,407
Skewness		,691	,693	,342	,724	,648	,532	,070	,862	,458	,362	,229	,580
Std. Error of Skewness		,388	,403	,230	,239	,234	,214	,661	,687	,221	,267	,223	,229
Kurtosis		-,043	,248	-,832	,321	,025	-,365	-1,582	1,112	-,542	-,558	-,872	-,356
Std. Error of Kurtosis		,759	,788	,457	,474	,463	,425	1,279	1,334	,438	,529	,442	,455
Range		4,344	2,371	2,136	2,337	3,127	2,073	1,889	2,067	2,19	1,32	2,06	2,71
Minimum		,323	,368	,199	,330	,234	,916	,875	,461	,58	,44	,62	,34
Maximum		4,667	2,739	2,335	2,667	3,361	2,989	2,764	2,528	2,78	1,76	2,68	3,05
	25	,91700	1,031	,65625	,76150	1,025	1,344	,97400	,92725	1,037	,7665	1,091	,9070
Percentiles	50	1,713	1,218	1,128	1,131	1,420	1,675	1,728	1,229	1,441	,9850	1,470	1,355
	75	2,619	1,792	1,595	1,499	1,891	2,006	2,451	1,675	1,808	1,279	1,847	1,840

a. Multiple modes exist. The smallest value is shown

Tabela 5. Statistički pokazatelji dobijenih PCE vrednosti na prilaznim kracima gradske kružne raskrsnice

Brčkogas-Brčko Gradska kružna raskrsnica		K1- LTV		K2- LTV		K2- TTV		K2- BUS		K3- LTV		K3- BUS	
		Vršno opterećenje 08 - 09h 15-16h	Vanvršno opterećenje 11-12h 18-19h	Vršno opterećenje 08 - 09h 15-16h	Vanvršno opterećenje 11-12h 18-19h	Vršno opterećenje 08 - 09h 15-16h	Vanvršno opterećenje 11-12h 18-19h	Vršno opterećenje 08 - 09h 15-16h	Vanvršno opterećenje 11-12h 18-19h	Vršno opterećenje 08 - 09h 15-16h	Vanvršno opterećenje 11-12h 18-19h	Vršno opterećenje 08 - 09h 15-16h	Vanvršno opterećenje 11-12h 18-19h
N	Valid	58	50	105	78	22	10	9	7	64	44	9	15
	Missing	47	55	0	27	83	95	96	98	41	61	96	90
Mean		1,487	1,586	1,459	1,356	2,107	1,907	1,893	2,560	1,450	1,360	1,651	1,679
Median		1,514	1,481	1,487	1,376	1,889	1,929	1,764	1,946	1,517	1,405	1,600	1,807
Mode		1,629	,865a	1,583	1,389a	1,889	,829a	,918a	,582a	,915a	,914a	1,152a	,888a
Std. Deviation		,375289	,378567	,418550	,442055	,875592	,744388	,673182	2,168392	,381845	,259885	,546427	,373549
Variance		,141	,143	,175	,195	,767	,554	,453	4,702	,146	,068	,299	,140
Skewness		,004	,449	,108	,410	,651	,009	,726	1,497	,029	-,161	,712	-1,006
Std. Error of Skewness		,314	,337	,236	,272	,491	,687	,794	,357	,299	,717	,580	,580
Kurtosis		-,718	-,104	-,289	-,151	-,284	-1,488	,390	2,199	-,775	-1,036	-1,067	,209
Std. Error of Kurtosis		,618	,662	,467	,538	,953	1,334	1,400	1,587	,590	,702	1,400	1,121
Range		1,351	1,645	1,740	2,014	3,052	2,155	2,217	6,242	1,492	,950	1,397	1,231
Minimum		,819	,865	,664	,624	1,006	,829	,918	,582	,802	,914	1,152	,888
Maximum		2,170	2,510	2,404	2,638	4,058	2,984	3,135	6,824	2,294	1,864	2,549	2,119
	25	1,169	1,368	1,182	,98000	1,268	1,206	1,487	,75400	1,097	1,116	1,170	1,437
Percentiles	50	1,514	1,481	1,487	1,376	1,889	1,929	1,764	1,946	1,517	1,405	1,600	1,807
	75	1,692	1,755	1,652	1,630	2,691	2,658	2,350	3,871	1,720	1,568	2,195	1,905

a. Multiple modes exist. The smallest value is shown

Na osnovu sinteze podataka utvrđenih PCE vrednosti pokazana je disperzija dobijenih vrednosti, tako da se može konstatovati da ove vrednosti nisu konstantne, već promenljive veličine i da one zavise od putnih i saobraćajnih uslova.

5 DISKUSIJA REZULTATA I ZAKLJUČCI

Kao osnovni cilj ovog rada, istraživanjem su dobijene PCE vrednosti, koje se mogu prihvatiti kao relevantne u lokalnim uslovima. Preporučene vrednosti utvrđene su za vršne i vanvršne periode na gradskim i vangradskim kružnim raskrsnicama. Dobijene vrednosti PCE utvrđene su na osnovu Greenshields-ovog modela i pokazuju značajan nivo disperzije. U okviru ovakvog istraživanja zaključeno je da se dobijene PCE vrednosti u znatnoj meri poklapaju sa HCM vrednostima [1,4] pri čemu se PCE vrednosti kreću od 1,00 do 2,00 u većini slučajeva za ispitivane klase vozila i kao takve se mogu preporučiti u inženjerskoj primeni. Takođe, nešto veće PCE vrednosti se dobijaju na prilaznim kracima kod gradskih, nego kod vangradskih kružnih raskrsnica, dok se ne može pronaći funkcionalno veća ili manja vrednost za PCE u vršnim, odnosno vanvršnim opterećenjima. Povećanje vrednosti PCE na gradskim raskrsnicama, rezultat je postavljanja brzine ograničenja, efekta defleksije kao i manje disharmonizacije u kretanju vozila u kome ravnopravno učestvuju izvorno-ciljni, lokalni i tranzitni tokovi. Najveće PCE vrednosti za BUS dobijene na gradskoj kružnoj raskrsnici u Brčkom ($PCE=2,56$), ali za manji uzorak ($n=7$), što se ne može prihvatiti kao reprezentativna vrednost. Osim toga, PCE vrednosti u vršnom opterećenju na vangradskoj raskrsnici su nešto veće od dobijenih vrednosti u vanvršnom opterećenju, dok su kod gradske raskrsnice ove vrednosti približne. Takođe, izmerene PCE vrednosti na prilaznim kracima kružnih trokrakih raskrsnica u uslovima slobodnog toka poređene su sa podacima dobijenim iz priručnika HCM [1,4]. Posebno je uočeno da su veće vrednosti intervala sleđenja dobijane za veće dužine reda vozila, dok su manje vrednosti bile za kraće redove vozila koja čekaju pražnjenje kolone. Utvrđivanje repernih vrednosti PCE primenljivih u lokalnim uslovima, od značaja je za analizu podataka fokusiranih na identifikovanju dodatnih faktora koji utiču teorijsku aproksimaciju prevođenja TV u PA, a naročito na faktore koji mogu imati uticaj na gustinu, zauzetost i zasićenje. Takođe, evidentna je tvrdnja mnogih istraživača da vozači održavaju duža rastojanja kada prate (lako) teretno vozilo, nego kada prate PA. LTV imaju neznatan uticaj u uslovima slobodnog toka, gde PCE date raskrsnice se kreće od niske vrednosti (1,033) do dijametralno visoke (2,107), što je u saglasnosti sa vrednostima dobijenim u HCM [1,4] (ako se zbog malog uzorka izuzmu PCE za BUS). Standardna odstupanja dobijenih vrednosti pokazuju da PCE odstupaju od slučaja do slučaja, da nisu fiksne veličine i da se njihovom kvantifikacijom vrednosti mogu predložiti ekvivalenti u lokalnim uslovima, primenljivi u inženjerskim disciplinama.

Preporuke za buduća istraživanja odnose se na mogućnost praćenja PCE vrednosti duž prilaznih krakova gradskih i vangradskih kružnih raskrsnica, u vršnom i vanvršnom opterećenju. Takođe bi bilo poželjno da buduće lokacije za prikupljanje podataka uključe i mogućnost sistematičnije klasifikacije vozila, selekcije vozila prema masi i osovinskim opterećenjima.

LITERATURA

- [1] Highway Capacity Manual (2016). 6th Edition: A Guide for Multimodal Mobility Analysis. Washington, DC: The National Academies Press.
- [2] Chevuri, P. K. (2018). Trucks at roundabouts: a synthesis study. *Journal of Transportation Technologies*, 8, 65-74.
- [3] Guerrieri, M., Mauro, R., & Tollazzi, T. (2019). Turbo-roundabout: Case study of driver behavior and kinematic parameters of light and heavy vehicles. *Journal of Transportation Engineering, Part A: Systems*, 145(6), 05019002.
- [4] Highway Capacity Manual (2022). 7th Edition: A Guide for Multimodal Mobility Analysis. Washington, DC: The National Academies Press.
- [5] Lee, C. (2015). Developing passenger-car equivalents for heavy vehicles in entry flow at roundabouts. *Journal of Transportation Engineering*, 141(8), 04015013.
- [6] Akçelik, R. (2005). Roundabout model calibration issues and a case study. In *TRB National Roundabout Conference*, Vail, Colorado, USA (Vol. 22, p. 25).
- [7] Raj, P., Sivagnanasundaram, K., Asaithambi, G., & Ravi Shankar, A. U. (2019). Review of methods for estimation of passenger car unit values of vehicles. *Journal of Transportation Engineering, Part A: Systems*, 145(6), 04019019.
- [8] Giuffrè, O., Granà, A., Giuffrè, T., Tumminello, M. L., & Acuto, F. (2019). Passenger car equivalents for heavy vehicles at roundabouts. A synthesis review. *Frontiers in Built Environment*, 5, 80.
- [9] Mohan, M., & Chandra, S. (2018). Three methods of PCU estimation at unsignalized intersections. *Transportation letters*, 10(2), 68-74.
- [10] Lertworawanich, P. (2024). How Passenger Car Equivalents (PCEs) Change with Densities?. In *2024 IEEE 27th International Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC)* (pp. 4270-4275). IEEE.
- [11] Karlaftis, M. G., & Golias, I. (2002). Effects of road geometry and traffic volumes on rural roadway accident rates. *Accident Analysis & Prevention*, 34(3), 357-365.
- [12] Al-Kaisy, A. (2019). Passenger Car Equivalents for Heavy Vehicles at Roundabouts. a Synthesis Review. *Frontiers in Built Environment*.
- [13] Kang, N., & Nakamura, H. (2016). An analysis of heavy vehicle impact on roundabout entry capacity in Japan. *Transportation research procedia*, 15, 308-318.
- [14] Macioszek, E. (2015). The road safety at turbo roundabouts in Poland. *Archives of Transport*, 33.
- [15] Keller, E. L., & Saklas, J. G. (1984). Passenger car equivalents from network simulation. *Journal of Transportation Engineering*, 110(4), 397-411.
- [16] Acosta, Y. M. C. (2022). Evaluation of Traffic Performance at Roundabouts (Master's thesis, Universidade do Minho (Portugal)).
- [17] Al-Kaisy, A. F., Hall, F. L., & Reisman, E. S. (2002). Developing passenger car equivalents for heavy vehicles on freeways during queue discharge flow. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 36(8), 725-742.
- [18] Yeung, J. S., Wong, Y. D., & Secadiningrat, J. R. (2015). Lane-harmonised passenger car equivalents for heterogeneous expressway traffic. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 78, 361-370.
- [19] Pajecki, R., Ahmed, F., Qu, X., Zheng, X., Yang, Y., & Easa, S. (2019). Estimating passenger car equivalent of heavy vehicles at roundabout entry using micro-traffic simulation. *Frontiers in Built Environment*, 5, 77.
- [20] Giuffrè, O., Grana, A., Tumminello, M. L., & Sferlazza, A. (2017). Estimation of Passenger Car Equivalents for single-lane roundabouts using a microsimulation-based procedure. *Expert Systems with Applications*, 79, 333-347.

- [21] Giuffrè, O., Grana, A., Marino, S., & Galatioto, F. (2016). Passenger car equivalent for heavy vehicles crossing turbo-roundabouts. *Transportation Research Procedia*, 14, 4190-4199.
- [22] Granà, A., Giuffrè, T., Macioszek, E., & Acuto, F. (2020). Estimation of passenger car equivalents for two-lane and turbo roundabouts using AIMSUN. *Frontiers in Built Environment*, 6, 86.
- [23] Čelar, N. (2007). Istraživanje vrednosti zasićenog saobraćajnog toka na osnovnoj uličnoj mrezi grada Beograda. *TEHNIKA-BEOGRAD*-, 62(6), F1.
- [24] Subotić, M., Tubić, V., & Anđelković, D. (2011). Research of the light duty vehicles equivalents at the mixed lanes of the signal crossroads at the central city zone. *Mechanics Transport Communications: 20th International Scientific*.

SUMMARY

Assessment of PCE values at approaches to suburban and urban roundabouts

Abstract: Based on extensive empirical research conducted under free-flow traffic conditions in local environments, the adverse impact of traffic flow composition at approaches of roundabouts was quantified using heavy vehicle passenger car equivalent values (PCE-Passenger Car Equivalent). The research was conducted at two roundabouts with urban and suburban traffic flows, where PCE values were determined based on headway time intervals (T_h). The obtained values, recommended for local conditions, were compared through a comparative analysis, as well as with the recommendations provided in the Highway Capacity Manual for urban and rural roundabouts. Furthermore, recommended PCE values for local conditions at roundabouts in Bosnia and Herzegovina were established PCE values for local conditions at roundabouts in Bosnia and Herzegovina were established.

Key words: Efficiency, peak traffic load, headway, free-flow traffic conditions