

УТИЦАЈ СТАЊА САОБРАЋАЈНОГ ТОКА НА БРЗИНУ ВОЗИЛА У ЕНП КАНАЛИМА - СТУДИЈА СЛУЧАЈА НАПЛАТНЕ СТАНИЦЕ У СРБИЈИ

Милош Тубић¹

¹Универзитет у Београду – Саобраћајни факултет, m.tubic@sf.bg.ac.rs

Немања Степановић

Универзитет у Београду – Саобраћајни факултет, n.stepanovic@sf.bg.ac.rs

Резиме: ЕТС (Electronic Toll Collection) системи са баријерама омогућавају аутоматску наплату путарине, елиминишући потребу за заустављањем, што омогућава пролазак већим брзинама и повећава капацитет канала у односу на класични мануелни систем наплате путарине. У Србији је у последњих неколико година забележен значајан раст броја корисника ЕНП ТАГ уређаја, што наглашава важност унапређења и ефикасне примене система електронске наплате путарине (ЕНП). Рад анализира брзину возила у ЕНП каналима са баријерама у функцији категорије возила и стања саобраћајног тока. Емпијско истраживање спроведено је на чеоној наплатној станици Стара Пазова на аутопуту А1, при чему је брзина возила мерена у утицајној зони ЕНП канала. Циљ рада је испитивање постојања статистички значајних разлика у средњим брзинама између категорија возила и различитих стања тока, као и испитивање кредибилитета постављеног ограничења брзине у зони ЕНП канала. Резултати показују да стање тока има утицај на брзину проласка кроз ЕНП канал, док се разлике између категорија возила смањују са порастом степена засићења. Добијени резултати могу допринети бољем разумевању оперативних карактеристика ЕНП канала са баријерама и могу послужити као основа за унапређење процеса управљања и пројектних параметара наплатних станица, као и модела за прорачун капацитета у зонама наплатних станица.

Кључне речи: ЕНП са баријерама, аутопут, брзина, стање саобраћајног тока, капацитет ЕНП канала.

IMPACT OF TRAFFIC FLOW CONDITIONS ON VEHICLE SPEEDS IN ETC LANES - A CASE STUDY OF A TOLL PLAZA IN SERBIA

Miloš Tubić

University of Belgrade – Faculty of Transport and Traffic engineering, m.tubic@sf.bg.ac.rs

Nemanja Stepanović

University of Belgrade – Faculty of Transport and Traffic engineering, n.stepanovic@sf.bg.ac.rs

Abstract: Barrier-based ETC (Electronic Toll Collection) systems enable automated toll payment, eliminating the need for stopping, thereby allowing higher travel speeds and increasing lane capacity compared to conventional manual toll collection systems. In Serbia, a significant increase in the number of ETC tag users has been recorded in recent years, highlighting the importance of improving and efficiently implementing electronic toll collection systems. This paper analyzes vehicle speeds in barrier-based ETC lanes as a function of vehicle category and traffic flow conditions. An empirical study was conducted at the mainline toll plaza Stara Pazova on the A1 motorway, where vehicle speeds were measured within the influence area of ETC lanes. The objective of the study is to examine the existence of statistically significant differences in mean speeds between vehicle categories and different traffic flow conditions, as well as to evaluate the credibility of the posted speed limit within the ETC lane influence zone. The results indicate that traffic flow conditions have a significant impact on vehicle speeds when passing through ETC lanes, while differences between vehicle categories decrease with increasing levels of saturation. The findings contribute to a better understanding of the operational characteristics of barrier-based ETC lanes and may serve as a basis for improving toll plaza management, design parameters, and capacity estimation models in toll station areas.

Keywords: barrier-based ETC, motorway, speed, traffic flow conditions, ETC lane capacity.

1. УВОД

Са развојем саобраћајне инфраструктуре и порастом интензитета саобраћаја на аутопутевима, све већи значај добијају системи за ефикасну и брзу наплату путарине. Традиционални системи мануелне наплате карактеришу се задржавањем возила и формирањем колона, што негативно утиче на проточност, безбедност и ниво услуге. У том контексту, системи електронске наплате путарине, посебно они са баријерама, представљају значајно унапређење, јер омогућавају пролазак возила без заустављања и уз веће брзине кретања [1]. Приликом пројектовања путева са режимом наплате путарине, један од кључних изазова представља одређивање оптималног броја и структуре наплатних трака, у циљу обезбеђења адекватног нивоа услуге наплатне станице. Капацитет наплатних трака зависи од примењене технологије наплате, али и од низа оперативних фактора као што су структура саобраћајног тока, понашање возача и организација рада на наплатној станици.

¹ Милош Тубић: m.tubic@sf.bg.ac.rs

Поред технолошких карактеристика система наплате, значајан број истраживања бави се анализом фактора који утичу на капацитет и ниво услуге наплатних станица. Капацитет наплатне траке директно је повезан са временом опслуге возила, које зависи од начина наплате, вредности накнаде и структуре саобраћајног тока [2]. Истраживања показују да начин плаћања има доминантан утицај на време опслуге, при чему електронски системи омогућавају опслуживање за значајно краће време у односу на мануелну наплату [3], [4], [5]. Поред начина наплате, на време опслуге утичу и други фактори, као што су геометрија наплатне станице, карактеристике возила и понашање возача [3], [6]. Иако ЕНП системи доприносе повећању капацитета наплатних станица, услови у којима се возила крећу у зонама наплате значајно се разликују од услова на отвореној деоници аутопута, пре свега услед интеракције између возила и ограничења која намеће сама инфраструктура [7].

У Србији се у последњих неколико година бележи интензиван раст броја корисника система ЕНП, што указује на потребу за детаљнијим анализама његових оперативних карактеристика. Структура саобраћајног тока по категоријама за наплату путарине на наплатној станици Стара Пазова приказана је у Табели 1, за дане током којих су спроведена емпиријска истраживања (13.3. и 15.3. 2026. год.), а у смеру од Београда ка Новом Саду. Подаци са наплатне станице Стара Пазова су добијени из база Пuteва Србије. Из табеле се може уочити значајно учешће корисника ЕНП система (више од 60%) од укупног броја корисника.

Табела 1. Учешће ЕНП и мануелне наплате у структури саобраћајног тока
Извор: (Путеви Србије д.о.о.)

Наплатна станица Стара Пазова (смер: Београд-Нови Сад)					13.3. и 15.3.2026.
Наплатна категорија	Мануелна (воз)	%	ЕНП (воз)	%	Укупно (воз)
I (ПА)	11.964	43,5%	15.561	56,5%	27.525
II (ЛТВ)	938	40,2%	1.393	59,8%	2.331
III (СТВ+ТТВ+БУС)	290	23,9%	923	76,1%	1.213
IV (АВ)	239	7,0%	3.175	93,0%	3.414
Укупно	13.431	38,9%	21.052	61,1%	34.483

Један од кључних параметара који описује функционисање ЕНП канала јесте брзина кретања возила. Она зависи од више фактора, међу којима се издвајају категорија возила, понашање возача, као и стање саобраћајног тока (слободан, стабилан и засићен ток). Разумевање утицаја ових фактора је од посебног значаја за унапређење управљања наплатним станицама, дефинисање ограничења брзине и развој модела за процену капацитета [8].

Предмет овог рада је анализа брзина возила на проласку кроз ЕНП канале са баријерама у зависности од стања саобраћајног тока и категорије возила. Циљ истраживања је да се утврди да ли постоје статистички значајне разлике у брзинама у различитим условима саобраћаја, као и да се оцени усклађеност стварних брзина са прописаним ограничењем у зони наплатне станице. Добијени резултати могу допринети бољем разумевању оперативних карактеристика ЕНП канала са баријерама и могу послужити као основа за унапређење система управљања и пројектних параметара наплатних станица, као и модела за прорачун капацитета у зонама наплатних станица.

2. МЕТОДОЛОГИЈА ИСТРАЖИВАЊА

Предмет овог истраживања је анализа брзина возила на аутопуту, на проласку кроз ЕНП (Електронска Наплата Путарине) канале. Како би се спровело емпиријско истраживање и добили репрезентативни резултати, било је неопходно изабрати адекватну наплатну станицу, временски период истраживања, дефинисати одговарајућу методологију истраживања и репрезентативан узорак. У наредним тачкама дефинисани су кључни елементи овог истраживања.

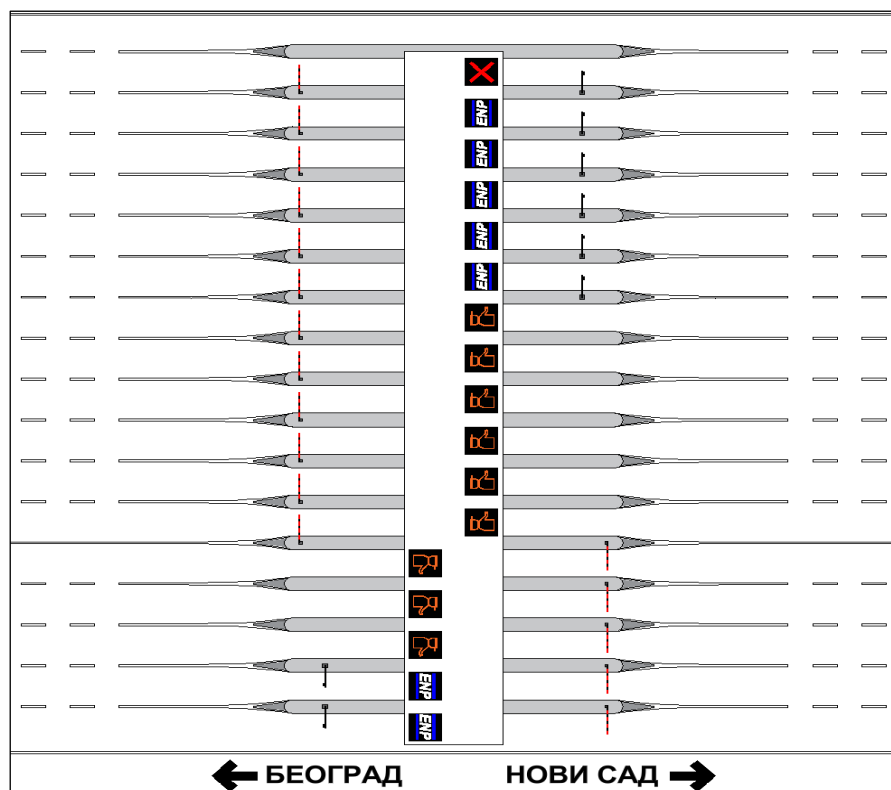
2.1. Простор и време истраживања

Главни критеријум за одабир наплатне станице било је очекивано саобраћајно оптерећење. Како би се омогућило мерење брзине возила у различитим стањима саобраћајног тока и обезбедио што већи узорак, неопходно је спровести саобраћајно истраживање на наплатној станици са очекиваним већим саобраћајним оптерећењем. Сходно претходно наведеном, за истраживање је одабрана **наплатна станица Стара Пазова** (Слика 1), која се налази на деоници петља Стара Пазова – петља Инђија (А1037/А1038), на потезу аутопута А1 од Београда до Новог Сада.



Слика 1. Наплатна станица Стара Пазова (смер Београд-Нови Сад)

Наплатна станица Стара Пазова је чеона наплатна станица са укупно 17 канала за наплату путарине. Посматрано у смеру од Београда ка Новом Саду (смер 1) постоји укупно 5 канала, од којих су 3 канала за мануелну (ручну) наплату путарине, а остала 2 канала су за ЕНП. У смеру од Новог Сада ка Београду (смер 2) постоји укупно 12 канала, од којих је 6 за мануелну наплату путарине, 5 за ЕНП и 1 канал није у функцији. Број и распоред канала евидентирани су приликом обилазка терена, које је спроведено 8.3.2026. године. Шематски приказ наплатне станице приказан је на Слици 2.



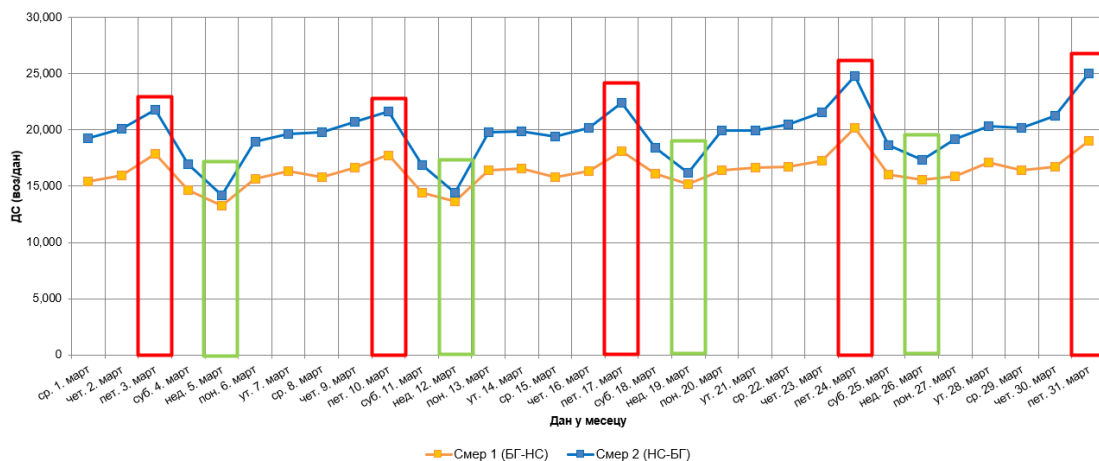
Слика 2. Шематски приказ наплатне станице Стара Пазова

Због броја и расподеле ЕНП канала по смеровима, одређено је да се истраживање ради у смеру 1 (Београд-Нови Сад) где постоје 2 ЕНП канала са десне стране. Избору смера у ком се истражује допринела је потреба за снимањем брзина и у стабилном и засићеном току због потенцијално веће вероватноће нагомилавања возила и формирања колоне. Други разлог се односи на чињеницу да је могуће поуздано бележити брзине у оба ЕНП канала.

2.2. Временски период истраживања

Анализом доступних историјских података о протоку на деоници петља Стара Пазова – петља Инђија у марту 2023. године (базе података Пuteва Србије), утврђено је да је петак дан са највећим, а недеља са најмањим саобраћајним оптерећењем, посматрано по данима у недељи (Слика 3). Сходно претходно наведеном, теренска истраживања су спроведена у два термина:

- Петак (13.3.2026. год.) у периоду од 14 до 18 часова,
- Недеља (15.3.2026. год.) у периоду од 10 до 14 часова.



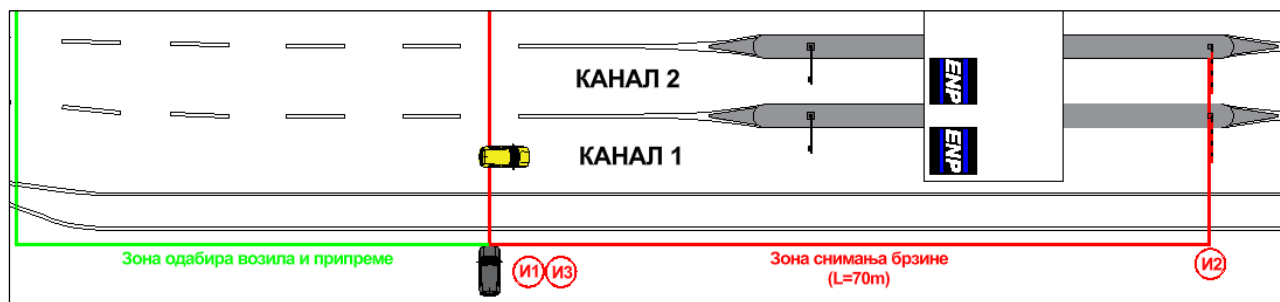
Слика 3. Дневни саобраћај на деоници Стара Пазова-Инђија у марту 2023. год. по смеровима
Извор: (Путеви Србије д.о.о.)

За истраживања су одабрани дани са очекиваним минималним и максималним саобраћајним оптерећењем, како би се измериле брзине возила у различитим стањима саобраћајног тока. Истраживање које је спроведено у недељу у ванвршном периоду доминантно је послужило за мерење брзина возила у условима слободног тока. Циљ истраживања у петак, током периода вршног оптерећења, био је да се у што већој мери забележе брзине возила у условима стабилног и засићеног саобраћајног тока. Како би се обезбедио репрезентативан узорак, истраживања су спроведена током дана, по сунчаном времену и у условима добре видљивости, да би се избегао утицај временских прилика на брзину кретања возила.

2.3. Примењена метода истраживања

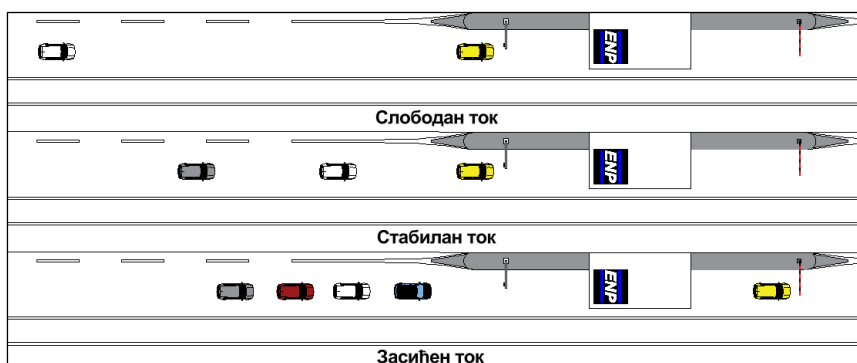
Основу примењене методе представља мерење **средње просторне брзине** на проласку кроз канал ЕНП (између два дефинисана попречна пресека), ручним мерењем времена (штоперица). Потез на ком је мерена брзина је дужине 70 m. Улазни попречни пресек дефинисан је непосредно након места где возило најкасније може да промени канал (траку). Репер за излазни попречни пресек је рампа, јер након проласка рампе возило напушта канал и интензивно убрзава. На основу података о дужини посматране зоне и времена за које је возило прошло кроз њу, у обради података је израчуната средња просторна брзина.

За потребе истраживања ангажована су 3 истраживача (И1, И2, И3). Током истраживања комуникација између истраживача вршила се путем телефонског разговора, а истраживачи су били позиционирани тако да се не угрожава њихова безбедност и да не ометају саобраћајни ток. Шематски приказ обухвата истраживања и примењене методе приказан је на Слици 4.



Слика 4. Обухват истраживања и примењена методологија снимања брзине

Услови у саобраћајном току у зони наплатне станице се значајно разликују у односу на основни одсек аутопута. Сходно томе, неопходно је посебно дефинисати карактеристике за одређивање стања саобраћајног тока на терену. На Слици 5 илустративно је приказан пример дефинисаних стања тока.



Слика 5. Илустрација анализираних стања саобраћајног тока

Слободан саобраћајни ток подразумева да се возач у зони наплатне станице креће без интеракције са другим возилима, као и да брзину кретања бира на основу сопствене перцепције безбедне брзине.

Стабилан саобраћајни ток је дефинисан као стање тока у ком постоји интеракција између возила, али уз и даље релативну слободу маневра возача. **Засићен саобраћајни ток** подразумева да возач није у могућности да се креће жељеном брзином, постоји значајна интеракција између возила и креће се у складу са остатком тока.

2.4. Прикупљени узорак

Током периода истраживања измерене су брзине за 955 возила, од чега су 692 путнички аутомобили (72,5%), а 263 комерцијална возила (27,5%). Поред путничких аутомобила, најзаступљеније категорије возила су аутовозови (15,2%) и лака теретна возила (6,7%). Остале категорије возила имају учешће у структури тока које је мање од 5% (Табела 2). За потребе тематски сличног истраживања, Миленковић и остали су на наплатној станици Шимановци измерили брзине за 699 (87,2%) путничких аутомобила и 103 комерцијална возила (12,8%) на проласку кроз ЕНП канале [9].

Како би се испитала ваљаност прикупљеног узорка, непосредно након теренских истраживања су на захтев од Пuteва Србије добијени подаци са наплатне станице Стара Пазова, за дане током којих су спроведена истраживања (13. и 15. март). Подаци са наплатне станице су у Табели 2 приказани по наплатним категоријама (I=ПА, II=ЛТВ, III=СТВ+ТТВ+БУС, IV=АВ). Упоредном анализом структуре тока добијеном на основу теренских истраживања и са наплатне станице, може се закључити да постоје мала одступања у учешћу различитих категорија возила. Сходно претходно наведеном, може се сматрати да је са аспекта структуре тока узорак репрезентативан.

Табела 2. Прикупљени узорак и подаци са наплатне станице Стара Пазова

Категорија возила	ПА	ЛТВ	СТВ	ТТВ	БУС	АВ	Укупно	КВ
Узорак (воз)	692	64	14	11	29	145	955	263
Узорак (%)	72,5%	6,7%	1,4%	1,2%	3,0%	15,2%	100%	27,5%
Подаци са НС	73,9%	6,6%	4,4%			15,1%	100%	26,1%

У Табели 3 приказан је узорак и структура саобраћајног тока по анализираним ЕНП каналима, на основу података прикупљених током истраживања.

Табела 3. Структура саобраћајног тока по каналима за, период истраживања

Канал		Категорија возила						Σ	КВ
		ПА	БУС	ЛТВ	СТВ	ТТВ	АВ		
Канал 1 (десни)	Воз.	263	16	31	10	2	108	430	167
	%	61,2%	3,7%	7,2%	2,3%	0,5%	25,1%	100%	38,8%
Канал 2 (леви)	Воз.	429	13	33	4	9	37	525	96
	%	81,7%	2,5%	6,3%	0,8%	1,7%	7,0%	100%	18,3%

У посматраном узорку, 45% возила је користило канал 1 (десни), док је 55% возила користило канал 2 (леви), што указује на релативно уједначену расподелу протока између два канала. Са аспекта структуре тока по каналима, може се уочити значајно веће учешће комерцијалних возила у каналу 1 (38,8%) у односу на канал 2 (18,3%).

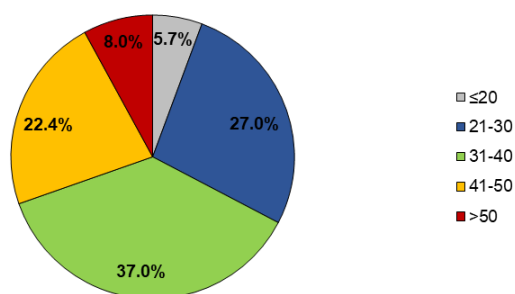
3. РЕЗУЛТАТИ ИСТРАЖИВАЊА

Обрадом података са истраживања прорачуната је средња просторна брзина, на основу измереног времена које је потребно за пролазак кроз утицајну зону канала ЕНП и дужине дефинисане зоне. У Табели 4 приказани су резултати анализе брзина возила за период истраживања.

Табела 4. Анализа измерених брзина за период истраживања

Узорак (воз)	V _{min} (km/h)	V _{sr} (km/h)	Med (km/h)	P ₈₅ (km/h)	V _{max} (km/h)	σ (km/h)
955	13	35	35	46	74	10,11

На узорку од 955 возила, просечна вредност брзине и медијана (35 km/h) указују на приближно симетричну расподелу. Стандардно одступање од око 10 km/h сугерише на умерену дисперзију брзина, док распон вредности (13-74 km/h) указује на присуство екстремних одступања у односу на ограничену брзину у посматраној зони (40 km/h). На Слици 6 приказана је расподела брзина по класама.



Слика 6. Расподела брзина по класама за период истраживања

Расподела брзина по класама показује да се највећи број возила креће брзином на интервалу 31-40 km/h (37%), затим у опсегу 21-30 km/h (27%) и 41-50 km/h (22,4%). Мањи део возила се креће брзинама испод 20 km/h (5,7%) и изнад 50 km/h (8%). Добијена расподела указује на највећу концентрацију брзина у зони ограничења од 40 km/h, уз поједина одступања ка екстремно ниским и високим вредностима брзине.

У наредним тачкама приказани су детаљни резултати анализе измерених брзина по категоријама возила, у различитим стањима саобраћајног тока, у односу на ограничену брзину и за анализиране ЕНП канале.

3.1. Брзине по категоријама возила

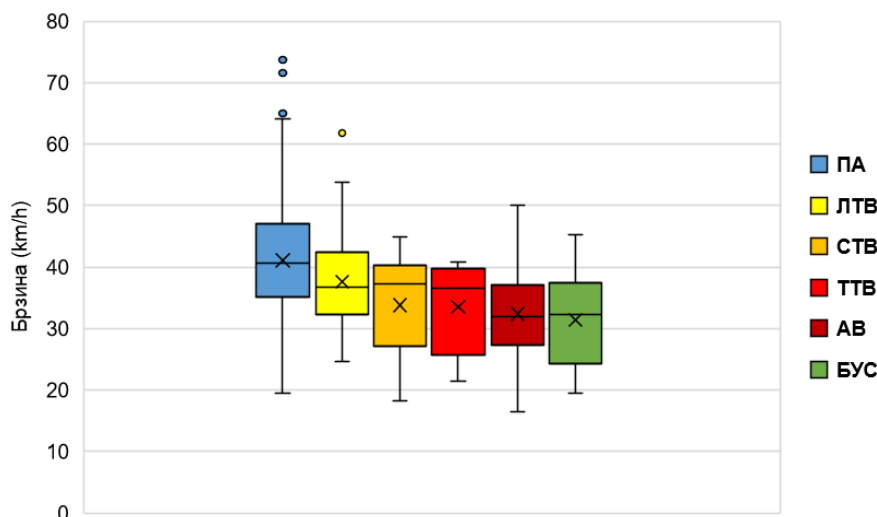
За потребе анализе брзина по категоријама возила у обзир су узети само резултати добијени у условима слободног саобраћајног тока. Циљ ове анализе је да се брзине по категоријама возила искључиво у зависности од карактеристика возила (максималне перформансе, маса и димензије) и карактеристика возача (стил вожње, искуство, перцепција ризика, поштовање ограничене брзине и познавање карактеристика система ЕНП). У Табели 5 приказани су резултати прорачуна брзина возила по категоријама у условима слободног тока.

Табела 5. Брзине по категоријама возила у условима слободног тока

Категорија возила	Узорак (воз)	V _{min} (km/h)	V _{sr} (km/h)	Med (km/h)	P ₈₅ (km/h)	V _{max} (km/h)
ПА	460	20	41	41	50	74
ЛТВ	38	25	38	37	44	62
СТВ	9	18	34	34	41	45
ТТВ	5	21	34	37	39	41
АВ	93	16	32	32	39	50
БУС	15	19	31	32	38	45
ТОК	620	16	38	38	49	74

Анализа брзина по категоријама возила показује да путнички аутомобили остварују највише вредности средње брзине (41 km/h), док су код аутовозова и аутобуса забележене најниже средње брзине (32 и 31 km/h, респективно). Код већине категорија возила средња вредност и медијана су

блиске, што указује на релативно симетричне расподеле брзина. Вредности 85. перцентила су највише код ПА и ЛТВ, што указује на присуство већих брзина у овим категоријама, док су код осталих категорија знатно ниже. Већи распон између минималних и максималних брзина код ПА и ЛТВ упућује на већу дисперзију брзина у односу на остале категорије возила. Важно је напоменути да вредности за СТВ, ТТВ и АВ треба узети са резервом с обзиром на нешто мањи узорак. На Слици 7 приказан је кутијаста дијаграм као графички приказ дистрибуције брзина по категоријама возила у условима слободног тока.



Слика 7. Дистрибуција брзина по категоријама возила (кутијаста дијаграм)

На основу претходно спроведене анализе брзина по категоријама возила у условима слободног тока, може се закључити да код ПА и ЛТВ највећи утицај на брзину имају карактеристике возача, конкретно поштовање ограничене брзине и познавање карактеристика система ЕНП. Сходно томе, код ових категорија возила долази до значајније дисперзије брзина. Код осталих категорија возила, поред карактеристика возача утицај на брзину имају и карактеристике возила, конкретно маса и димензије. Карактеристике возила су код возила из исте категорије сличне, па самим тим долази до мање дисперзије брзина.

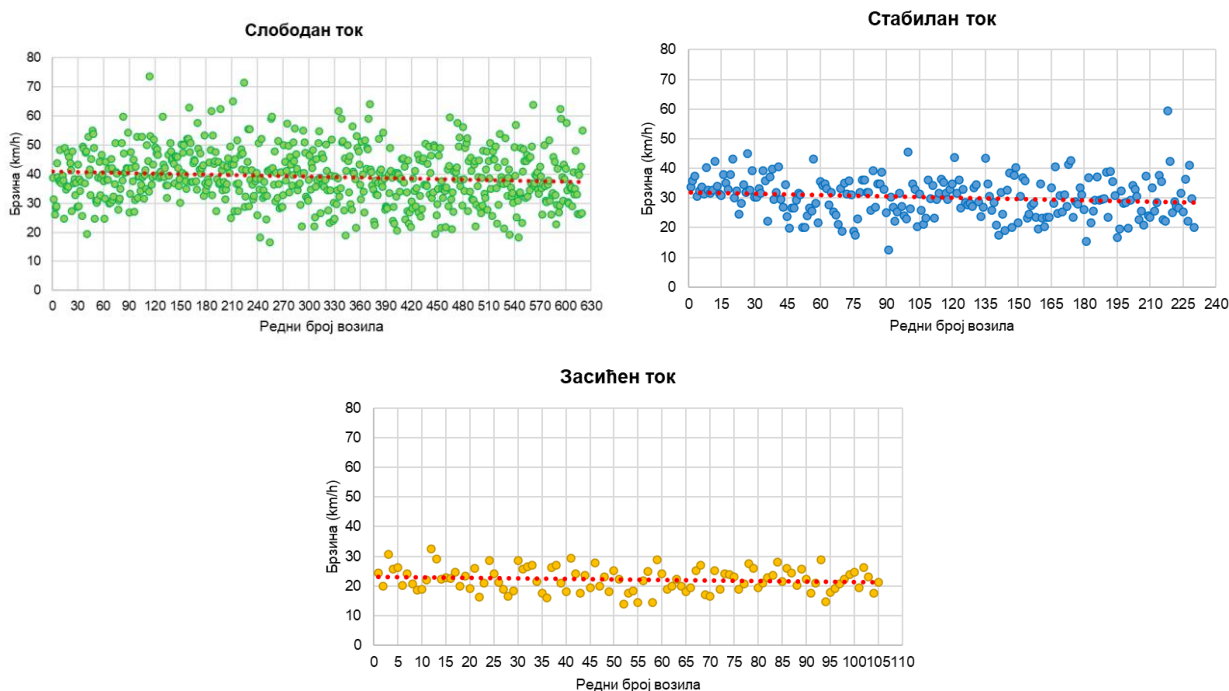
3.2. Брзине у различитим стањима саобраћајног тока

На основу спроведених теренских истраживања у различитим стањима саобраћајног тока и статистичке анализе, у Табели 6 приказани су основни параметри брзине кретања возила за различита стања саобраћајног тока.

Табела 6. Анализа измерених брзина за различита стања саобраћајног тока

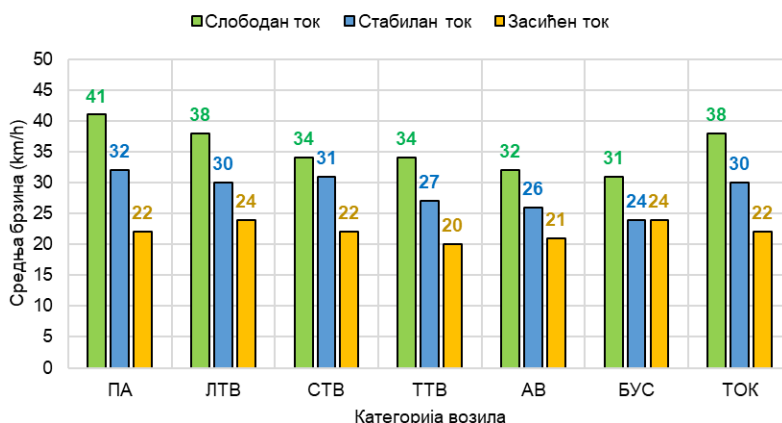
Стање тока	Узорак (воз)	V_{min} (km/h)	V_{sr} (km/h)	Med (km/h)	P_{85} (km/h)	V_{max} (km/h)	σ (km/h)
Слободан ток	620	16	38	38	49	74	9,19
Стабилан ток	230	13	30	30	36	59	6,63
Засићен ток	105	14	22	22	26	32	3,96

На основу резултата приказаних у претходној табели може се уочити јасна зависност брзине возила од стања саобраћајног тока. У условима слободног тока забележене су највеће вредности просечне ($V_{sr}=38$ km/h) и максималне брзине ($V_{max}=74$ km/h), као и највећа дисперзија брзина ($\sigma=9,19$ km/h), што указује на веће разлике у понашању возача када нису ограничени кретањем других возила. У условима стабилног тока долази до смањења просечне брзине ($V_{sr}=30$ km/h) и смањења дисперзије брзина ($\sigma=6,63$ km/h), што показује да се брзине уједначавају услед међусобне интеракције између возила. Код засићеног тока брзине су најниже ($V_{sr}=22$ km/h), а дисперзија најмања ($\sigma=3,96$ km/h). Ово указује на уједначено кретање возила и ограничену могућност избора брзине (вожња у колони). Ови закључци су додатно приказани на Слици 8 где се јасно види да је код слободног тока дисперзија брзина највећа, док се са повећањем интензитета саобраћајног тока дисперзија смањује, а брзине се групишу око нижих вредности.



Слика 8. Дисперзија измерених брзина у различитим стањима саобраћајног тока

На Слици 9 приказана је промена средње брзине по категоријама возила у различитим стањима саобраћајног тока, са циљем сагледавања утицаја интензитета саобраћајног тока на брзину кретања појединих категорија возила.



Слика 9. Средње брзине по категоријама возила у различитим стањима тока

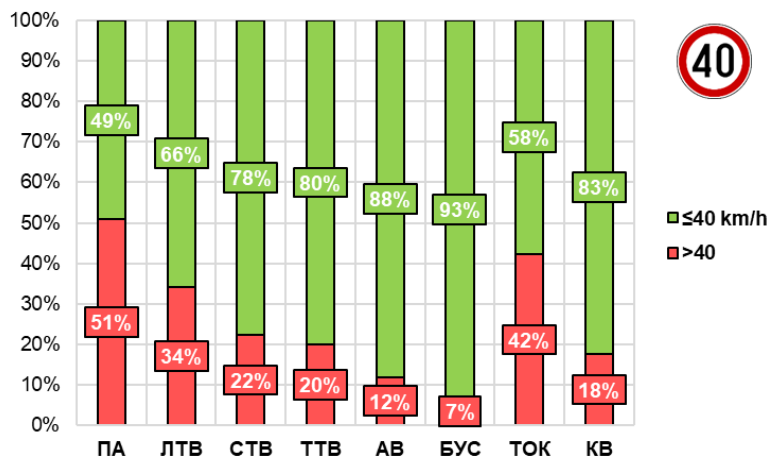
Може се уочити да су код свих категорија возила остварене највеће средње брзине у условима слободног саобраћајног тока, док се са преласком у стабилан, а затим у засићен ток брзине постепено смањују. Највеће вредности брзине у условима слободног тока су код путничких аутомобила и лаких теретних возила, док остала теретна возила и аутобуси остварују ниже вредности брзине, а то је директно последица карактеристика возила. У условима засићеног тока долази до хармонизације брзина између различитих категорија возила, што указује на ограничене могућности кретања и већу зависност од остатка тока него од карактеристика самог возила.

3.3. Прекорачење ограничене брзине

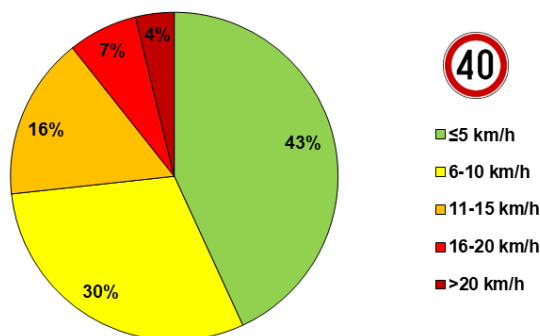
У зони наплатне станице Стара Пазова у смеру од Београда ка Новом Саду, конкретно у зони мануелних и ЕНП канала, вертикалном саобраћајном сигнализацијом дефинисано је ограничење брзине од 40 km/h. Као и код анализе средњих брзина по категоријама возила, основу за анализу прекорачења ограничене брзине представљаће измерене брзине у условима слободног тока. Циљ је да се утврди прекорачење брзине искључиво у односу на карактеристике возила и карактеристике возача, без утицаја других возила на избор брзине кретања од стране возача. Табела 7 и Слика 10 приказују прекорачење брзине по категоријама возила у условима слободног тока.

Табела 7. Прекорачење ограничене брзине у условима слободног тока

Стање тока	Категорија возила	ПА	ЛТВ	СТВ	ТТВ	АВ	БУС	ТОК	КВ
Слободан ток	Узорак (воз)	460	38	9	5	93	15	620	160
	У прекорачењу	234	13	2	1	11	1	262	28
	% прекорачења	51%	34%	22%	20%	12%	7%	42%	18%

**Слика 10. Прекорачење ограничене брзине у условима слободног тока**

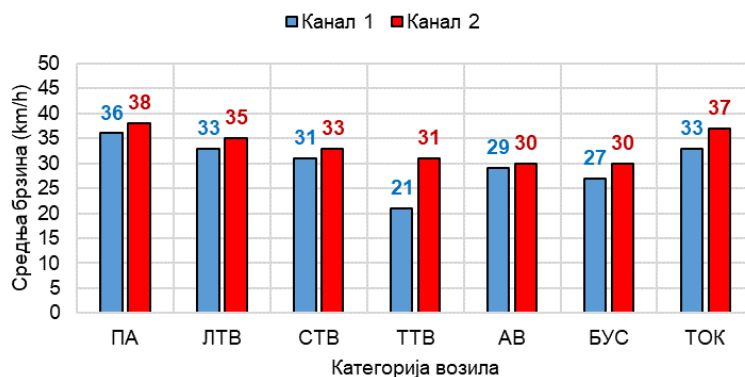
На основу резултата анализе прекорачења ограничене брзине, може се закључити да више од половине возача путничких аутомобила (51%) прекорачује ограничену брзину. Посматрајући збирно комерцијална возила, 18% возача је у прекорачењу, међу којима је највише возача лаких теретних возила. Анализа прекорачења брзине за цео ток показује да 42% возача прекорачује ограничену брзину. Добијени резултат упућује на то да постоји значајан број возача који прекорачују ограничену брзину, нарочито у категорији путничких аутомобила (51%) и лаких теретних возила (34%). Овај резултат се може објаснити чињеницом да значајан број возача познаје функционисање система и зна да може безбедно да прође већом брзином од ограничене. На Слици 11 приказана је расподела прекорачења по класама у условима слободног тока.

**Слика 11. Прекорачење ограничене брзине у условима слободног тока по класама**

Расподела прекорачења ограничене брзине по класама, у условима слободног тока, показује да највећи број возача прекорачује ограничену брзину до 5 km/h (43%), затим 6-10 km/h (30%) и 11-15 km/h (16%). Мањи део возача прекорачује брзину од 16 до 20 km/h, док се у класи екстремних прекорачења брзине (>20 km/h) налази 4% возача. Просечно прекорачење брзине у условима слободног тока износи 8 km/h.

3.4. Брзине по ЕНП каналима

На Слици 12 приказани су резултати анализе брзина возила по категоријама, у зависности од тога који канал су користили. Број, распоред и нумерација ЕНП канала који су били предмет овог истраживања су приказане на Слици 4, у тачки 2.3 овог рада.



Слика 12. Средње брзине категорија возила по ЕНП каналима

Упоредном анализом брзина са претходне слике, може се закључити да су код свих категорија возила измерене веће брзине на проласку кроз канал 2 (леви). Посматрајући целокупан саобраћајни ток, средња брзина у каналу 2 (37 km/h) је за 4 km/h већа у односу на средњу брзину у каналу 1 (33 km/h). Добијени резултат се може објаснити чињеницом да је учешће комерцијалних возила у каналу 1 (38,8%) значајно веће него у каналу 2 (18,3%) (Табела 3). Такође, возила која користе канал 1 (десни) имају већу корекцију у путањи у односу на она из канала 2, што може захтевати додатно успоравање.

4. ПРОРАЧУН КАПАЦИТЕТА ЕНП ТРАКЕ

Наплатне станице су функционални елемент аутопута и у пракси би требале би да буду димензионисане на начин да у што мањој мери утичу на услове у саобраћајном току који су заступљени на основном одсеку аутопута. Њихов утицај се у највећој мери огледа кроз број канала за опслужу и имплементирани систем наплате путарине.

ЕТС систем са баријерама не захтева заустављање возила већ успоравање на одређену брзину, којом је могућ пролазак зону рампе након читавања ТАГ уређаја. Код овог система су заступљене фазе успоравања, убрзавања, као и вожње континуалном брзином приликом проласка кроз зону рампе. Поред претходно наведеног, на време опслуге значајан утицај има време и растојање између возила које је неопходно за читавање ТАГ уређаја, као и време потребно за подизање рампе.

У циљу дефинисања репрезентативних вредности капацитета за даљи прорачун, извршен је преглед резултата досадашњих истраживања. Табела 8 приказује вредности капацитета ЕТС система са баријерама, преузете из релевантне литературе.

Табела 8. Вредности капацитета ЕТС наплатних трака у досадашњим истраживањима

Аутори	ЕТС систем са баријерама (воз/час/траци)
Zarrillo et al. [3]	1.440-1.680
Klodzinski & Al-Deek [5]	1.708
McDonald & Stammer [6]	1.200
Миленковић и др. [9]	1.478
NCHRP Synthesis [10]	1.200-1.800
Lennon [11]	1.000
Lam [12]	1.200-1.800
Padayhag & Sigua [13]	2.323
Klodzinski & Al-Deek [14]	1.850

Капацитет ЕТС наплатних трака са баријерама варира у релативно широком опсегу од око 1.000 до преко 2.300 воз/час/траци. Највећи број истраживања указује на вредности у распону од 1.200 до 1.800 воз/час/траци, што се може сматрати репрезентативним опсегом. Просечна вредност капацитета на основу приказаних података се налази у распону 1.500-1.700 воз/час/траци. Уочене разлике у вредностима капацитета последица су различитих услова експлоатације, времена потребног за читавање ТАГ уређаја, начина функционисања баријере, као и структуре саобраћајног тока.

У овом раду су за прорачун капацитета ЕНП траке коришћене измерене брзине кретања возила у условима засићеног саобраћајног тока, с обзиром на то да ови услови одражавају експлоатационе карактеристике наплатних трака при максималном оптерећењу. Истраживањем у условима засићеног саобраћајног тока прикупљен је узорак од укупно 105 возила, од чега је 70 путничких аутомобила и 35 комерцијалних возила. Добијена је просечна вредност брзине од 22 km/h, која репрезентује цео ток.

Да би се утврдила просечна брзина проласка возила кроз зону рампе, неопходно је утврдити учешће возила по категоријама у анализираним ЕНП каналима. Усвојени су подаци о структури тока забележени током периода истраживања (ПА=72,5%; ЛТВ=6,7%; СТВ=1,4%; ТТВ=1,2%; БУС=3,0% и АВ=15,2%), што је приказано у Табели 2. Такође, неопходно је дефинисати просечно растојање слеђења возила у ЕНП траци (Sh). Узимајући у обзир да минимално међурастојање за примењену ЕТС технологију износи 10 m према спецификацији ЕТС технологије наплате, просечну дужину возила по категоријама (ПА=4,8 m; ЛТВ=6,5 m; СТВ=9,0 m; ТТВ=11,0 m; БУС=12,0 m и АВ=16,0 m) и процентуално учешће наведених категорија возила, утврђено је да просечно растојање слеђења возила у ЕНП траци износи 17 m ($S_h=17$ m). За наведене улазне параметре добијен је капацитет ЕНП наплатне траке од **1.295 воз/час/траци**.

Добијена вредност капацитета се налази у оквиру вредности из релевантне литературе (1.000-2.300 воз/час/траци), при чему је ближа доњој граници овог опсега. Такође, резултат је у складу са репрезентативним опсегом капацитета од 1.200 до 1.800 воз/час/траци. Предност овог резултата је у томе што је заснован на истраживању у локалним условима (наплатна станица у Србији), уз коришћење реално измерених вредности у условима засићеног саобраћајног тока, чиме се боље одражавају специфичности понашања возача и стварни услови у саобраћајном току.

5. ЗАКЉУЧАК

Анализа рада ЕНП система у условима домаће путне мреже има посебан значај, имајући у виду да је на посматраној наплатној станици Стара Пазова у смеру Београд-Нови Сад више од 60% корисника користило ЕНП систем, при чему је учешће ЕНП изразито високо код тежих категорија возила и аутовозова. Овакав однос између ЕНП и мануелне наплате показује да електронска наплата више није споредни, већ доминантан начин опслуге значајног дела корисника, због чега је анализа њених оперативних карактеристика оправдана за потребе управљања и пројектовања наплатних станица.

Примењена методологија може се оценити као адекватна и успешно постављена за циљеве истраживања. Брзина је мерена као средња просторна брзина на дефинисаној деоници дужине 70 m, у реалним условима, при чему су истраживања спроведена у два термина тако да буду обухваћена различита стања тока. Узорак од 955 возила, као и упоредна провера структуре узорка са подацима са саме наплатне станице, указују да је истраживање дало репрезентативне и употребљиве резултате за даљу анализу.

Посматрано по категоријама возила, у условима слободног тока највеће средње брзине остварују путнички аутомобили, док најниже вредности имају аутовозови и аутобуси. Истовремено, код путничких аутомобила и лаких теретних возила уочена је већа дисперзија брзина, што упућује на већи утицај понашања возача и њиховог познавања ЕНП система, док су код тежих категорија брзине уједначеније услед доминантнијег утицаја карактеристика возила (маса и димензије).

Анализа у зависности од стања саобраћајног тока доводи до јасног закључка: са порастом саобраћајног оптерећења долази до смањења брзине и њене дисперзије. Просечна брзина опада са 38 km/h у слободном току на 30 km/h у стабилном и потом на 22 km/h у условима засићеног тока, што потврђује да услови у току имају снажнији утицај на брзину проласка кроз ЕНП канале него сама категорија возила. Истовремено, са порастом засићења смањују се и разлике између појединих категорија возила, јер се кретање све више усклађује са остатком тока.

Са аспекта прекорачења ограничене брзине, резултати показују да је прекорачење у условима слободног тока релативно честа појава. Ограничење прекорачује 42% возача у укупном току, при чему је то најизраженије код путничких аутомобила, где је у прекорачењу 51% возача, а код лаких теретних возила тај удео износи 34%. У највећој мери прекорачење је минимално, јер 43% возача прекорачује ограничење до 5 km/h, а просечно прекорачење износи 8 km/h, што указује да је постављено ограничење у великој мери близу стварног понашања возача, али не и у потпуности усаглашено са њим.

Анализа по каналима показала је да су код свих категорија возила забележене веће брзине у каналу 2 него у каналу 1. На нивоу целог тока, средња брзина у каналу 2 износи 37 km/h, што је за 4 km/h више у односу на канал 1, где је измерено 33 km/h. Ова разлика се може повезати са структуром тока, јер је у каналу 1 знатно веће учешће комерцијалних возила (38,8% према 18,3%), али и са неповољнијом путањом кретања, односно већом корекцијом правца у односу на канал 2.

Са аспекта прорачуна капацитета, добијени резултати потврђују да анализа брзине у ЕНП каналима може имати непосредну практичну примену. На основу локално измерених вредности у условима засићеног тока и просечне брзине од 22 km/h, прорачунат је капацитет ЕНП траке од 1.295 воз/час/траци. Та вредност је у складу са литературом, која за ЕТС траке са баријерама најчешће наводи распон од 1.200 до 1.800 воз/h/traci, али је ближа доњој граници, што додатно указује на значај локалних услова, структуре тока и понашања возача при одређивању реалног капацитета у Србији.

На основу добијених резултата, могу се издвојити смернице за даља истраживања:

- мерење на већем броју наплатних станица би омогућило генерализацију резултата, кроз стандардизацију вредности брзине и потенцијални развој модела за прорачун капацитета;
- истраживања у различитим условима саобраћајног тока са већим узорком, нарочито у условима засићеног тока;
- примена аутоматизованих система за мерење брзине (радар, лидар, камере и сл.) би омогућила прикупљање већег узорка и прецизнијих података;
- испитивање утицаја временских услова на брзину кретања (киша, снег, ноћ и сл.).

У целини посматрано, истраживање је потврдило да стање саобраћајног тока има значајан утицај на брзину возила у ЕНП каналима са баријерама, да се разлике између категорија возила смањују са порастом степена засићења, као и да се добијени резултати могу користити као поуздана основа за унапређење процеса управљања, дефинисање пројектних параметара и даљи развој модела за прорачун капацитета наплатних станица.

Литература

- [1] Ghazizadeh, M., Lee, J. D., & Boyle, L. N. (2012). Extending the Technology Acceptance Model to assess automation. *Cognition, Technology & Work*.
- [2] Liu, Y., Cao, J., Cao, X., & Zhang, Y. (2017). Optimization of design scheme for toll plaza based on M/M/C queuing theory and cellular automata simulation algorithm. *Modern Applied Science*, 11(7), 1.
- [3] Zarrillo, M. L. (2000). Capacity calculations for two toll facilities: two experiences in ETC implementation. In *Proceedings of the 79th Annual Meeting of the Transportation Research Board*. Washington: Transportation Research Board. Paper No. 00-1658.
- [4] Woo, T. H., and Hoel, L. A. (1991). Toll plaza capacity and level of service. *Transportation Research Record*, 1320, Washington, D.C., 119-127.
- [5] Klodzinski, J., & Al-Deek, H. M. (2004). Evaluation of toll plaza performance after addition of express toll lanes at mainline toll plaza. *Transportation Research Record*, 1867(1), 107-115.
- [6] McDonald Jr, D. R., & Stammer Jr, R. E. (2001). Contribution to the development of guidelines for toll plaza design. *Journal of Transportation Engineering*, 127(3), 215-222.
- [7] Transportation Research Board (TRB) (2016). *Highway Capacity Manual (6th Edition)*. Washington, D.C.
- [8] Elefteriadou, L. (2014). *An Introduction to Traffic Flow Theory*. Springer.
- [9] Миленковић, М., Степановић, Н., Главић, Д., и Тубић, В. (2024). Методологија за димензионисање станице за наплату путарине – пример наплатне станице „Катрга“. Зборник радова XIV конференције о техникама саобраћајног инжењерства (ТЕСИ). 217-225
- [10] NCHRP Synthesis 194. (1993). "Electronic toll collection and traffic management (ETTM) systems: a synthesis of highway practice." *Transp. Res. Board*, Washington, D.C., 1-26.
- [11] Lennon, L. (1994). "Tappan Zee Bridge E-Z Pass system traffic and environmental studies." *Compendium of Tech. Papers*, 64th Meeting of Inst. of Transp. Engrs., Inst. of Transp. Engrs., Washington, D.C., 456-459.
- [12] Lam, W. K. (1995). "Inter-urban road pricing and some technical characteristics in the application of automatic vehicle identification." *Proc., World Congr. on Applications of Transport Telematics and Intelligent Vehicle-Hwy. Sys. Towards an intelligent transport system*. Artech House, Boston, 6, 3189-3196.
- [13] Padayhag, G. U., & Sigua, R. G. (2003). Evaluation of Metro Manila's electronic toll collection (ETC) system. *Journal of the Eastern Asia Society for Transportation Studies*, 5, 1946-1961.
- [14] Klodzinski, J., Gordin, E., & Al-Deek, H. M. (2007). Evaluation of impacts of open road tolling on mainline toll plaza. *Transportation Research Record*, 2012(1), 72-83.