

Методологија за димензионисање станице за наплату путарине – пример наплатне станице „Катрга”

Марина Миленковић, Саобраћајни факултет, Београд,
marina.milenkovic@sf.bg.ac.rs

Немања Степановић, Саобраћајни факултет, Београд, n.stepanovic@sf.bg.ac.rs

Драженко Главић, Саобраћајни факултет, Београд, drazen@sf.bg.ac.rs

Владан Тубић, Саобраћајни факултет, Београд, vladan@sf.bg.ac.rs

Резиме: У Србији не постоји адекватан правилник који дефинише неопходну анализу за димензионисање потребног броја и распореда трака на станицама за наплату путарине. С обзиром на наведено, циљ овог рада је сажети приказ иновативног поступка анализе одређивања потребног броја наплатних трака планиране чеоне наплатне станице на деоници „петља Мрчајевци – петља Катрга”, примењеног на Генералном пројекту разматраног пута од Крагујевца до везе са државним путем IА-A5 у Мрчајевцима. На основу иностраних истраживања и мерења времена опслуге и осталих карактеристика саобраћајног тока у реалним условима, дефинисан је капацитет наплатних трака одређених система наплате и меродавног саобраћајног оптерећења. Уз помоћ наведеног, препоручен је одговарајући број и расподела трака по системима наплате на предметној раскрсници „Катрга”, и дати су правци будућих истраживања.

Кључне речи: станица за наплату путарине, капацитет, меродавни проток

1 УВОД

Приликом пројектовања нових путева који подлежу режиму наплате путарине – пре свега ауто-путевима и вишетрачним путевима, пред пројектанте се поставља нимало лак задатак одређивања оптималног броја трака за наплату путарине. Такође, с обзиром на постојање више система за наплату, као што су мануелни систем (MS) или систем за електронску наплату путарине са баријерама (ETC), неопходно је одређени број трака оптимално расподелити са циљем максималног нивоа услуге наплатне станице.

С обзиром да у Републици Србији не постоји адекватан правилник који дефинише спровођење неопходних анализа и корака за димензионисање наплатних станица, пројектанти се углавном ослањају на сопствена искуства и резултате појединих иностраних истраживања. Како би се утврдио потребан број трака одређеног система за наплату путарине, неопходно је испитати капацитете наплатних трака одређених система наплате, као и интензитет саобраћаја.

Капацитет наплатне траке пре свега зависи од начина наплате, односно примењене технологије. Међутим, постоје бројни фактори који доводе до значајних варијација у интензитету опслуге истих врста наплатних трака, као нпр. информи-

саност односно упознатост возача са системом наплате, могући начини плаћања и износ накнаде, разлике у профилима возача (свакодневни корисници у односу на рекреативне кориснике), адекватност и концизност информација и кодираних ознака које помажу корисницима да донесу одговарајуће одлуке, став и ефикасност особља за наплату, геометрија утицајне зоне наплатне станице, распоред и конфигурација наплатних трака различитих врста итд.

Капацитет наплатне станице директно је повезан са временима опслуге возила на свакој наплатној траци. Важно је истаћи да време опслуге представља само време трансакције накнаде (без времена чекања у реду). Време опслуге зависи од низа оперативних фактора као што су интензитет и структура тока, вредност накнаде и начини плаћања [1]. McDonald Junior & Stammer Junior сматрају да је геометрија наплатне станице важан фактор који утиче на време опслуге [2]. Zarrillo је дошао до налаза да време опслуге зависи од начинима плаћања (мануелни, електронски, аутоматски или мешовити систем) [3]. У студијама које су спровели Woo & Hoel [4] и Klodzinski & Al-Deek [5] утврђено је да на време опслуге најјачи утицај има начин плаћања, вредност накнаде и удео возача који имају тачан износ накнаде односно оних који не морају да размене новац. Такође је доказано да време опслуге зависи од врсте возила, јер тешка возила имају тенденцију споријег убрзавања приликом напуштања наплатне станице [3].

Други фактори који могу имати утицај на време опслуге јесу искуство и темпо рада оператора. Учинак особља које спроводи наплату може у великој мери да зависи од дужине реда. Када је особље под великим притиском због пораста броја возила у реду, они имају тенденцију да трансакције обрађују брже [4]. Ово се може објаснити чињеницом да оператори под притиском раде брже и чињеницом да возачи у реду имају више времена да потраже новац пре него што се зауставе да плате накнаду.

Резултати показују да наплатне станице које наплаћују веће износе путарине и оне које захтевају од возача да плаћају износе који захтевају повраћај новца имају већа времена опслуге. Време опслуге по возилу у великој мери зависи од броја новчића (кованица) који морају да буду обрађени од стране онога ко спроводи наплату или машине за каванице (АСМ). Коначно, резултати показују да је време опслуге током поподневног вршног сата мање од јутарњег вршног сата [4]. Многа истраживања указују на значај анализе функционисања наплатне станице како би се обезбедио одговарајући ниво услуге [6].

С обзиром да капацитет наплатне траке зависи од бројних фактора који су карактеристични за одређену наплатну станицу (локалне услове), у литератури не постоје егзактно препоручене вредности. У Табели 1 приказане су вредности које су добијене у досадашњим студијама за различите врсте наплатних трака.

Табела 1: Вредности капацитета наплатних трака одређених врста у досадашњим истраживањима

Аутори	Мануелни систем (voz/h/tr)	Аутоматска машина за кованице (voz/h/tr)	ETC систем са баријерама (voz/h/tr)
NCHRP Synthesis [7]	350	500	1.200-1.800
Lennon (1994) [8]	450	-	1.000
Lam (1995) [9]	400	-	1.200-1.800
McDonald & Stammer [2]	350	550	1.200
Zarrillo et al. [3]	138-498	-	1.440-1.680
Padayhag & Sigua [10]	240	-	2.323
Klodzinski & Al-Deek [5]	376	503	1.708
Klodzinski & Al-Deek [11]	-	-	1,850
Oskarbski et al. [12]	133-165	-	-

Неколико аутора испитивало је и адекватне параметре за одређивање нивоа услуге наплатне станице, а као најзначајнији су издвојени густина, однос протока и капацитета, број возила у реду и време проведено у систему (Табела 2).

Табела 2: Ниво услуге на наплатним станицама

Аутори:	Woo & Hoel, 1991 [4]		Lin & Su, 1994 [13]		Klodzinski & Al-Deek, 2004 [5]
Ниво услуге	Густина (ра/ми/тр)	q/c	Број возила у реду	Време проведено у систему (s/voz)	Време проведено у систему (s/voz)
A	< 12	0,24	≤ 1	≤ 15	≤ 14
B	< 20	0,40	1 < L ≤ 2	15 < T ≤ 30	14 < T ≤ 28
C	< 30	0,57	2 < L ≤ 3	30 < T ≤ 45	28 < T ≤ 49
D	< 42	0,74	3 < L ≤ 6	45 < T ≤ 60	49 < T ≤ 77
E	< 67	1,00	6 < L ≤ 10	60 < T ≤ 80	77 < T ≤ 112
F	> 67	-	> 10	> 80	> 112

Woo & Hoel у свом раду наводе да је густина одговарајућа променљива за одређивање нивоа услуге на наплатним станицама јер је добар показатељ степена слободе који је на располагању возачима и експлоатационе брзине која се може постићи [4]. Woo & Hoel такође наводе да је просечна вредност густине најприкладнија, будући да возила нису равномерно распоређена у утицајној зони наплатне станице [4]. Lin & Su предлажу дефинисање нивоа услуге на основу два критеријума: броја возила у реду и времена проведеног у систему [13]. Просечан број возила у реду који је повезан са примарно стабилним стањем углавном је између три и шест, мада повремено могу постојати дуги редови. Просечна дужина реда око 10 возила повезана је са нестабилним стањем код ког је q/c близу или већи од 1,0. То такође значи да се просечна дужина реда већа од шест возила, али не већа од 10 возила може додели нивоу E. Klodzinski & Al-Deek су анализом различитих параметара дошли до налаза да је 85 перцентил кумулативних временских

губитака возила свеобухватна мера за оцену нивоу услуге на наплатној станици [5]. Они су истакли да је временски губитак параметар који највише утиче на возаче и који представља ниво неугодности возача – директан резултат услова у саобраћају на овом путном објекту. Временски губици на наплатним станицама укључују временске губитке приликом чекања у реду и приликом опслуге.

Имајући у виду да је максимум просечног време опслуге мануелног система на анализираним наплатним станицама износио 14 s, ова вредност је изабрана за горњу границу нивоа услуге А. Процентуално повећање за сваки праг је А-В, 100%; В-С, 75%; С-Д, 57%; Д-Е, 46%. Са вредношћу нивоа услуге А (14 s/voz) и процентуалним повећањем индивидуалних временских губитака возила према HCM 2000 (s/veh), одређени су опсези нивоа услуге приказаним у Табели 2 [14]. Они још наводе да временски губитак ефикасно представља ниво непријатности за возача и овај параметар ће показати утицаје (ефекте) интензитета коришћења ЕТС система, геометрије наплатне траке и загушења на LOS.

Узевши све претходно наведено, циљ овог рада је сажети приказ иновативног поступка анализе одређивање потребног броја наплатних трака планиране чеоне наплатне станице на деоници „петља Мрчајевци – петља Катрга“, примењеног на Генералном пројекту разматраног пута од Крагујевца до везе са државним путем IА-А5 у Мрчајевцима [15].

2 МЕРОДАВНИ ПРОТОК ВОЗИЛА РАЗЛИЧИТИХ СИСТЕМА НАПЛАТЕ ПУТАРИНЕ

Као улазни подаци у анализи су коришћене вредности саобраћајног оптерећења и карактеристике саобраћајног тока добијене у Генералном пројекту, као и подаци из годишњих извештаја наплате путарине ЈППС. С обзиром да је у оквиру димензионисања наплатне станице потребно утврдити максималан потребан број наплатних трака одређеног система наплате путарине, у оквиру анализе узет је у обзир интензитет саобраћаја у последњој години експлоатације разматране деонице (ПГДС 2045. године).

Имајући у виду потребу очувања нивоа услуге на аутопуту, неопходно је дефинисање потребног броја трака за најнеповољнији случај у погледу неравномерности тока по смеровима и временским неравномерности. Сходно томе, за прорачун меродавног протока возила коришћена је вредност колена дијаграма која одговара максималном часовном оптерећењу ($K=13\%$ ПГДС-а) и неравномерности по смеровима вожње од 70/30.

С обзиром да у Србији постоје два система (технологије) наплате путарине, да би се утврдио интензитет корисника по системима наплате неопходно је утврдити процентуално учешће корисника сваког од њих. У оквиру ове анализе коришћени су подаци ЈППС (Годишњи извештај наплате путарине, 2020). Због утицаја пандемије COVID-19 на учешће транзитних и сезонских токова у укупном броју реализованих кретања у овој студији разматрано је учешће ЕТС корисника за 2019. и 2020. годину. Наиме, транзитни токови иностраних држављана доминатно користе мануелни систем за наплату путарине, као и повремени корисници који нису реализовали своја кретања због уведених мера. Такође, потребно је имати у виду да по годишњим извештајима ЈППС број корисника ЕТС система стално расте, потребно је анализирати учешће ЕТС трансакција и за последњу годину за коју постоје званични подаци. Анализом односа укупног броја ЕТС трансакција и свих реализованих трансакција у току године, добијено је учешће ЕТС трансакција од 35% у 2019. и 40% у 2020. години.

3 КАПАЦИТЕТ НАПЛАТНИХ ТРАКА

Време опслуге корисника, брзина возила, као и интензитети убрзања и успорења, који се реализују у утицајној зони наплатне станице, значајно се разликују код разматраних система за наплату путарине. Оно што је још важно истаћи јесте чињеница да се ЕТС наплатне траке често користе и као мешовите наплатне траке (у даљем тексту МЅ) – наплатне траке намењене коришћењу како ЕТС корисника, тако и корисника MS система наплате. Сходно томе, у даљем тексту биће приказан прорачун капацитета за наведене врсте наплатних трака у локалним условима.

3.1 Капацитет мануелне наплатне траке

Анализом времена опслуге 694 возила MS система наплате путарине у Србији утврђено је да просечно време опслуге приликом уласка у систем (узимања картице) износи 4 s, а изласка из система (плаћања путарине) 20 s. Просечно време опслуге корисника измерено је штоперицом на каналима MS система за наплату путарине на наплатној станица Шимановци [16-18]. Имајући у виду да је приликом димензионисања наплатне станице потребно одредити максималан број потребних наплатних трака, неопходно је анализирати време опслуге, односно капацитет MS наплатне траке приликом изласка из система наплате (плаћања путарине). С обзиром да просечно (измерено) време опслуге возила приликом плаћања путарине износи 20 s, добија се да интензитет опслуге, односно капацитет мануелне наплатне траке на изласку из система наплате износи 180 voz/h/tr.

3.2 Капацитет ЕТС наплатне траке

ЕТС систем наплате путарине са друге стране не захтева потпуно заустављање возила већ успоравање на одређену брзину, којом је могућ пролазак зоне рампе читавањем тага. Стога су код ЕТС система заступљене фазе успоравања, убрзавања, као и вожње константном брзином приликом проласка кроз зону рампе. Просечна брзина проласка зоне рампе ЕТС система измерена је радаром на наплатној станици „Шимановци“. Истраживањем на узорку од 699 путничких возила добијена је просечна вредност брзине од 34 km/h. На исти начин је утврђена брзина проласка зоне рампе од стране комерцијалних возила. На узорку од 103 комерцијална возила измерена је брзина од 18 km/h.

Да би се утврдила просечна брзина проласка возила кроз зону рампе, било је неопходно утврдити учешће путничких возила (ПА) и комерцијалних возила (КВ) у случају ЕТС система за наплату путарине. На основу вредности датих у Табели 3 може се видети да не постоје значајније разлике у погледу учешћа наведених категорија у 2019. години у односу на 2020. годину.

Табела 3: Учешће наплатних категорија код ЕТС система за наплату путарине

Наплатне категорије	2019		2020	
	број	%	број	%
I (ПА)	12.152.492	62%	12.066.403	61%
II (ЛТВ)	1.304.686	7%	1.561.007	8%
III (СТВ+ТТВ+БУС)	1.981.890	10%	1.751.868	9%
IV (АВ)	4.292.985	22%	4.274.818	22%
КВ (ТВ+БУС+АВ)	7.579.561	38%	7.587.693	39%
УКУПНО	19.732.053	100%	19.654.096	100%

Узимајући у обзир претходно наведено процентуално учешће ПА (61%) и КВ (39%) у ЕТС наплатној траци, а с обзиром на измерене просечне вредности брзина за ПА (34 km/h) и КВ (18 km/h), утврђено је да просечна брзина проласка зоне рампе у ЕТС траци износи 28 km/h. Да би се утврдио капацитет ЕТС наплатне траке, било је неопходно дефинисати просечно растојање слеђења возила у ЕТС траци (Sh). Узимајући у обзир да минимално међурастојање за примењену ЕТС технологију износи 10 m (према спецификацији ЕТС технологије наплате), просечну дужину возила (ПА=5 m, КВ=15m) и процентуално учешће наведених категорија (ПА=61%, КВ=39%) у оквиру студије утврђено је да просечно растојање слеђења возила у ЕТС траци износи 19 m (Sh=19 m). Стога је за капацитет ЕТС наплатне траке коришћена вредност од 1.478 voz/h/tr.

3.3 Капацитет мешовите наплатне траке

За прорачун капацитета мешовите наплатне траке, коришћене су претходно утврђене вредности времена опслуге и капацитета MS и ЕТС наплатне траке. Истраживањем спроведеним на наплатној станици Шимановци утврђено је да однос учешћа корисника MS и ЕТС у оквиру мешовитих наплатних трака износи 85% према 15% корисника MS и ЕТС система респективно. Сходно претходно наведеном, добијен је капацитет мешовите наплатне траке од 208 voz/h/tr.

Добијене вредности капацитета наплатних трака по системима за наплату путарине приказане су у Табели 4.

Табела 4: Капацитет различитих врста наплатних трака

Систем наплате	Капацитет MS траке (voz/h/tr)	Капацитет ЕТС траке (voz/h/tr)	Капацитет МЅ траке (voz/h/tr)
Капацитет	180	1.478	207

4 ОДРЕЂИВАЊЕ ПОТРЕБНОГ БРОЈА НАПЛАТНИХ ТРАКА

Након дефинисања реалних вредности капацитета и меродавног протока возила сваког од система наплате путарине, потребан број наплатних трака утврђен њиховим односом.

Поред упоредне анализе за 2019. год. и 2020. год., спроведена је анализа без и са мешовитом наплатном траком. Најпре је спроведена анализа разматрајући само MS и ЕТС наплатне траке (без мешовите наплатне траке). Према подацима о учешћу ЕТС трансакција у укупном броју трансакција за 2019. год. и 2020. год. укупан потребан број наплатних трака износи пет, од којих би четири биле намењене корисницима мануелног система, а само једна корисницима ЕТС система наплате. Ови резултати су логични, имајући у виду капацитет и меродавни проток ЕТС система наплате. Међутим, с обзиром да се неретко догађају одређени проблеми у случају ЕТС трансакције (неисправан таг, недовољно новца на рачуну, итд.), као и због чињенице да број корисника ЕТС система током година расте, аутори ове студије су спровели још једну додатну анализу, која је укључила увођење једне мешовите (МЅ) уместо мануелне (MS) наплатне траке.

Табела 5: Потребан број наплатних трака по смеру

Деоница „Мрчајевци-Катрга“	PGDS ₂₀₄₅ (voz/dan)	q _{mer} (voz/h/smeru)	Потребан број трака
Укупно	12.055	1013	
ETC	4.182	351	0,24 (1)
MS	7.873	661	3,67 (4)
		УКУПНО	5

У Табели 6 приказан је потребан број наплатних трака када би се поред ETC и MS наплатних трака увела и мешовита (MŠ) наплатна трака, а с обзиром на претходно наведено. Добијени резултати показују да је потребан број трака по смеру пет, од којих би једна била ETC, једна мешовита, а три мануелне наплатне траке.

Табела 6.: Потребан број наплатних трака по смеру са MŠ наплатном траком

Деоница „Мрчајевци-Катрга“	PGDS ₂₀₄₅ (voz/dan)	q _{mer} (voz/h/smeru)	Потребан број трака
Укупно	12.055	1013	
ETC	4.182	316	0,21 (1)
MS	7.873	529	2,94 (3)
MŠ		167	0,81 (1)
		УКУПНО	5

5 ЗАКЉУЧАК

Сprovedена анализа потребног броја канала за наплату путарине планиране чеоне наплатне станице на деоници „петља Мрчајевци-петља Катрга“ за период експлоатације од 20 година (2026. год.-2045 год.), узела је у обзир најнеповољнији случај расподеле тока по смеровима и временске неравномерности саобраћајног тока, као и највеће прогнозирано саобраћајно оптерећење које се очекује у циљној години експлоатације. На основу примењене методологије и резултата досадашњих иностраних и домаћих истраживања, утврђено је да је за одржавање одговарајућег нивоа услуге на планираном аутопуту, потребно извести пет канала (наплатних трака) по смеру, односно укупно десет. Препорука је да се са аспекта технологија наплате путарине у почетку изведу три мануелне наплатне траке, једна ETC и једна мешовита наплатна трака по смеру. С обзиром на очекивани раст корисника ETC наплате и имајући у виду једноставну техничку могућност конверзије мануелне наплатне траке у електронску, потребно је анализирати могућност потенцијалног повећања ETC наплатних трака (увођењем ETC опреме на барем још једном каналу).

Наведена анализа може представљати полазни основ за развој приручника о димензионисању наплатних станица. Добијени резултати показују неопходност спровођења истраживања у локалним условима како би се добили аргументовани критеријуми за правилно димензионисање наплатних станица а тиме спречило нарушавање нивоа услуге ауто-путева и вишетрачних путева. Наравно, будућа истраживања морају узети у обзир и бочне наплатне станице, с обзиром на честа ограничења у погледу простора и геометрије самих објеката, попут недовољне дужине ETC наплатне траке итд.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] 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.
- [2] 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.
- [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] Zhang, H. (2017). Empirical analysis and modeling of manual turnpike tollbooths in China. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 87, 184-194.
- [7] 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.
- [8] 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.
- [9] 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.
- [10] 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.
- [11] Klodzinski, J., Gordin, E., & Al-Deek, H. M. (2007). Evaluation of impacts of open road tolling on main-line toll plaza. *Transportation Research Record*, 2012(1), 72-83.
- [12] Obelheiro, M., Cybis, H., & Ribeiro, J. (2011). Level of Service Method for Brazilian Toll Plazas. *Procedia – Social Behavior Science Elsevier*, 16, 120–130.
- [13] Lin, F. B., & Su, C. W. (1994). Level-of-service analysis of toll plazas on freeway main lines. *Journal of Transportation Engineering*, 120(2), 246-263.
- [14] HCM (2000). *Highway capacity manual* (4th ed.). Transportation Research Board, National Research Council. Washington DC.
- [15] Претходна студија оправданости са генералним пројектом изградње државног пута IА реда од Крагујевца до везе са државним путем IА -A5 (E-761) у Мрчајевцима
- [16] Milenković, M., Stepanović, N., Glavić, D., Tubić, V., Ivković, I., & Trifunović, A. (2020). Methodology for determining ecological benefits of advanced tolling systems. *Journal of environmental management*, 258, 110007. (IF2020=6.789).

- [17] Миленковић, М. (2020). Методолошки оквир за подршку одлучивању приликом избора система за наплату путарине. Универзитет у Београду, Саобраћајни факултет.
- [18] Главић, Д., Миленковић, М. (2021). Комерцијална експлоатација саобраћајне инфраструктуре, Универзитет у Београду, Саобраћајни факултет, Српско друштво за путеве "VIA VITA", ISBN 978-86-7395-441-7 (SF), COBISS.SR-ID 44493065.

SUMMARY

Methodology for determining toll plaza – example of toll plaza “Katrga”

Abstract: There are no official guidelines that defines the necessary analysis for determining the required number and layout of toll lanes at toll plaza in Serbia. Considering the above, the aim of this paper is to summarize the innovative analysis procedure for determining the required number of toll lanes at the planned frontal toll plaza on the “Mrčajevci-Katrga” section, applied to the Coceptual design of the considered road from Kragujevac to the connection with the state road IA-A5 in Mrčajevci. On the basis of the international research results and measurement of service time and other traffic flow characteristics, the toll lane capacities of the different tolling systems and the design volume were determined. In acordance of the above, the adequate number and distribution of toll lanes at the “Katrga” toll plaza was recommended, and the directions for future research were given.

Key words: toll plaza, lane capacity, design hourly volume