Istraživanje vrednosti zasićenog saobraćajnog toka na udvojenim trakama za levo skretanje

ANICA M. KOCIĆ, Univerzitet u Beogradu,

Saobraćajni fakultet, Beograd

NIKOLA Đ. ČELAR, Univerzitet u Beogradu,

Saobraćajni fakultet, Beograd

JELENA N. KAJALIĆ, Univerzitet u Beogradu,

Saobraćajni fakultet, Beograd

STAMENKA R. STANKOVIĆ, Univerzitet u Beogradu,

Saobraćajni fakultet, Beograd

Stručni rad

UDC: 656.1.054:625.746.1

DOI: 10.5937/tehnika1802254K

Određivanje kapaciteta signalisane raskrsnice i proračun parametara rada svetlosnih signala neposredno su povezani sa terminom zasićen saobraćajni tok. Ovaj parametar je bio predmet brojnih istraživanja u kojima su analizirane i utvrđivane njegove bazne vrednosti, procenjivan uticaj raznih faktora na tu vrednost i formirani analitički modeli proračuna. Rad prikazuje istraživanje baznih vrednosti zasićenog saobraćajnog toka udvojenih traka za levo skretanje na uzorku od 4 raskrsnice u Beogradu sa udvojenim zaštićenim trakama za levo skretanje. Primenjena je metodologija snimanja intervala sledjenja, manuelnom tehnikom, pri čemu su merni uređaji bili mobilni telefoni opremljeni aplikacijom za tu namenu. Rezultati su pokazali da se veličina zasićenog saobraćajnog toka razlikuje po saobraćajnim trakama namenjenim levom skretanju, i da se može očekivati da će saobraćajna traka sa većim radijusom skretanja, spoljašnja, imati veću baznu vrednost zasićenog toka. Međutim, generalno posmatrano, nije dokazana zavisnost veličine zasićenog toka od radijusa trajektorije levog skretanja. Pokazano je da postoji jaka negativna korelativna zavisnost zasićenog toka i udela zelenog vremena u ciklusu. Takođe, u radu je izvršeno poređenje empirijskih vrednosti zasićenog toka i vrednosti dobijenih primenom analitičkih modela, te su izvedeni zaključci o tome koji model najpovoljnije opisuje domaće uslove.

Ključne reči: zasićen saobraćajni tok, udvojene trake, levo skretanje, signalisana raskrsnica, kapacitet

1. UVOD

Raskrsnice predstavljaju projektovano i planirano mesto konflikta saobraćajnih tokova različitih karaktera na putnoj ili uličnoj mreži, te su važan element saobraćajne mreže, i kao takve imaju značajan uticaj na efikasnost i bezbednost saobraćaja. Za proračun kapaciteta signalisane raskrsnice neophodna ulazna veličina jeste vrednost zasićenog saobraćajnog toka (ZST). ZST predstavlja maksimalan broj vozila koji se može opslužiti ukoliko bi, teorijski, zeleni signalni pojam trajao 1 čas, i ukoliko bi postojao konstantan saobraćajni zahtev. Drugim rečima, zasićeni saobraćajni tok predstavlja brzinu praznjenja reda tokom tra-

janja zelenog signalnog pojma.

Ova veličina je po svojoj prirodi složena, jer sa jedne strane predstavlja osnovnu ulaznu veličinu u postupku optimizacije rada svetlosnih signala, utvrđivanja kapaciteta raskrsnice, vremenskih gubitaka, odnosno nivoa usluge kao kvalitativnog pokazatelja uslova u saobraćajnom toku, a sa druge, jedan je od osnovnih pokazatelja efikasnosti saobraćajnog procesa. Drugim rečima, zasićeni saobraćajni tok predstavlja izlaznu veličinu procesa realizacije saobraćajnog zahteva i koristi se kao ulazna veličina u postupku optimizacije rada signala i utvrđivanja pokazatelja efikasnosti.

Proračun kapaciteta signalisane raskrsnice se bazi-
ra na korišćenju idealnog, maksimalnog protoka vozila - zasićenog saobraćajnog toka. Veličina zasićenog saobraćajnog toka u konkretnim okolnostima se može izračunati pomoću odgovarajućeg analitičkog modela ili utvrditi istraživanjima na terenu u realnim uslovima. Vrednost ZST od koje se polazi pri proračunu

Adresa autora: Anica Kocić, Univerzitet u Beogradu,
Saobraćajni fakultet, Beograd, Vojvode Stepe 305

e-mail: nana.anica.kocic@gmail.com

Rad primljen: 26.02.2018.

Rad prihvaćen: 13.03.2018.

kapaciteta signalisane raskrsnice predstavlja baznu vrednost, koja u zavisnosti od modela može biti definisana kao jedna ili više vrednosti koja se brojnim uticajnim faktorima modifikuje do vrednosti ZST koja odgovara realnim uslovima.

Definisanjem pojma zasićeni saobraćajni tok je postao predmet brojnih istraživanja. Pored analize i utvrđivanja baznih vrednosti zasićenog toka i definisanja uticaja raznih parametara na tu vrednost, teži se formiranju brojnih analitičkih modela za njegov proračun.

Predmet ovog rada jeste utvrđivanje baznih vrednosti zasićenog toka u slučaju postojanja dve saobraćajne trake za levo skretanje na teritoriji grada Beograda.

Ciljevi rada su da se utvrdi da li postoji razlika u vrednostima ZST unutrašnje i spoljašnje trake namenjene levom skretanju i da li postoji uticaj geometrije raskrsnice i parametara rada svetlosnih signala na veličinu zasićenog saobraćajnog toka. Takođe, cilj je ispitati koji od analiziranih analitičkih modela proračuna ZST najbolje opisuje domaće uslove.

Ograničenjem u izradi ovog rada se može smatrati relativno mali uzorak. Međutim, to je prouzrokovano nedovoljnim brojem raskrsnica na teritoriji grada sa dve trake sa zaštićenim levim skretanjem, pri tome i sa različitim geometrijskim karakteristikama i parametrima rada svetlosnih signala.

2. PREGLED LITERATURE

Zasićen saobraćajni tok bio je predmet brojnih istraživanja. Osnovu u ovoj oblasti predstavljaju istraživanja sprovedena u Velikoj Britaniji i Sjedinjenim Američkim Državama. To su bila prva istraživanja sa temom signalisane raskrsnice, njenog kapaciteta i uticajnih faktora na veličinu kapaciteta.

Činjenica da se do sada istraživači nisu konkretno bavili vrednostima zasićenog toka na udvojenim trakama za levo skretanje, doprinela je tome da nema raspoložive literature kojom bi se autori poslužili prilikom definisanja metodologije ili poređenja dobijenih rezultata. Pregled literature se zasniva na pregledu modela za utvrđivanje vrednosti zasićenog toka analitičkim putem koji posebno razmatraju vrednosti zasićenog toka na trakama za levo skretanje.

Vebster i Kobe [6] su 1960-tih godina definisali model za procenu vrednosti zasićenog toka, kao rezultat dugogodišnjih istraživanja. Prema ovim autorima, vrednost zasićenog toka trake za zaštićeno levo skretanje zavisi od radijusa skretanja, što je opisano jednačinom:

$$S = \frac{1800}{1+5/r} \quad (1)$$

gde su:

S - zasićen saobraćajni tok [PAJ/h],

r - radijus levog skretanja [ft].

HCM modelom [4], razvijenim u Sjedinjenim Američkim Državama, definisan je faktor redukcije bazne vrednosti zasićenog toka za ekskluzivnu traku namenjenu levom skretanju i njegova vrednost iznosi 0,95 u bilo kom slučaju levog skretanja. Ostali faktori redukcije iz jednačine 2 nisu razmatrani s obzirom da se radi o zaštićenom levom skretanju i ekskluzivnoj traci za levo skretanje.

$$S = S_0 * N * f_w * f_{HV} * f_g * f_p * f_{bb} * f_a * f_{LU} * f_{LT} * f_{RT} * f_{Lpb} * f_{Rpb} \quad (2)$$

gde su:

S - zasićen saobraćajni tok [voz/h],

S_0 - bazna vrednost ZST = 1900 PA/h,

N - broj saobraćajnih traka iste namene [-],

f_w - faktor uticaja širine saobraćajne trake [-],

f_{HV} - faktor uticaja strukture saobraćajnog toka [-],

f_g - faktor uticaja uzdužnog nagiba [-],

f_p - faktor uticaja parkiranja [-],

f_{bb} - faktor uticaja autobuskih stajališta [-],

f_a - faktor uticaja mikrolokacije raskrsnice [-],

f_{LU} - faktor uticaja korišćenja saobraćajne trake [-],

f_{LT} - faktor uticaja levih skretanja [-],

f_{RT} - faktor uticaja desnih skretanja [-],

f_{Lpb} - faktor uticaja pešaka na vozila u levom skr. [-],

f_{Rpb} - faktor uticaja pešaka na vozila u desnom skr. [-].

Nemačkim HBS modelom [2], takođe su definisani faktori redukcije bazne vrednosti ZST, ali u proračunu se uzimaju u obzir samo dva najuticajnija faktora. Vrednosti faktora redukcije bazne vrednosti ZST u slučaju levog skretanja definisane su za tri veličine radijusa skretanja. To znači da i u ovom modelu vrednost zasićenog toka trake za levo skretanje zavisi od radijusa levog skretanja. Jednačina modela ima sledeći oblik:

$$q_s = f_1 * f_2 * q_{st} \quad (3)$$

gde su:

q_s - operativna vrednost zasićenog saobraćajnog toka [voz/h],

f_1, f_2 - korekcione vrednosti dva najuticajnija faktora [-] od pet predloženih: uticaj uzdužnog nagiba, radijusa skretanja, širine saobraćajne trake, procenta teških vozila u toku i intenziteta konfliktnog pešačkog toka.

Domaćim modelom [3] definisane su bazne vrednosti zasićenog toka u zavisnosti od namene saobraćajnih traka, te u slučaju trake za levo skretanje bazna vrednost zasićenog toka iznosi 1500 voz/h koja se prema jednačini modela redukuje vrednostima četiri faktora:

$$S = S_{op} * N * f_1 * f_2 * f_3 * f_4 \quad (4)$$

gde su:

S - zasićen saobraćajni tok [voz/h],

S_{op} - operativna vrednost zasićenog toka [voz/h zelenog],

N - broj saobraćajnih traka iste namene,

f_1 - faktor uticaja intenziteta pešačkog toka na vozila u skretanju [-],

f_2 - faktor uticaja intenziteta konfliktnog toka [-],

f_3 - faktor uticaja strukture saobraćajnog toka [-],

f_4 - faktor uticaja veličine grada [-].

Pored definisanih modela i mogućnosti analitičkog utvrđivanja vrednosti zasićenog toka, u literaturi su definisane metodologije i tehnike za empirijsko utvrđivanje te veličine.

Metodologije su definisane u zavisnosti od jedinice posmatranja kao:

- metodologije koje se baziraju na evidentiranju broja vozila u definisanim periodima vremena tokom trajanja „zelene“ faze (jedinica posmatranja vozilo određene kategorije u prethodno definisanom vremenskom intervalu),
- metodologije bazirane na evidentiranju vremenskog intervala između prolaska vozila tokom trajanja „zelene“ faze (jedinica posmatranja interval sleđenja).

Tri su osnovne tehnike merenja vrednosti zasićenog saobraćajnog toka:

- manuelna tehnika
- tehnika snimanja video zapisa
- tehnika automatskog snimanja primenom savremene merne opreme.

3. METODOLOGIJA ISTRAŽIVANJA

Činjenica da se istraživanje bavi utvrđivanjem baznih vrednosti zasićenog toka u slučaju postojanja dve trake za levo skretanje, uslovlila je da se lokacije istraživanja potraže među signalisanim raskrsnicama sa dve ekskluzivne trake za levo skretanje.

Takođe, preduslov je postojanje konstantnog saobraćajnog zahteva, bez ometanja pešaka ili prioritarnih tokova pravo i desno iz suprotnog smera, te su odabrane raskrsnice sa zaštićenim levim skretanjima. Makrolokacija 4 raskrsnice obuhvaćene istraživanjem prikazana je na slici 1, a te raskrsnice su:

- Terazije - Trg Nikole Pašića
- Bul. Mihajla Pupina - Milentija Popovića
- Jurija Gagarina - Gandijeva
- Bul. Milutina Milankovića - Omladinskih brigada.

Vreme istraživanja je bilo uslovljeno potrebom da se istraživanje sprovodi u periodu kada je saobraćajni

tok u stanju zasićenja, tako da su na ovim raskrsnicama istraživanja vršena u popodnevnom časovima u trajanju od 2 h.

Slika 1 - Makrolokacija predmetnih raskrsnica

Na svakoj lokaciji su bila potrebna dva istraživača, po jedan za svaku od saobraćajnih traka namenjenih levom skretanju, koji su bili pozicionirani u nivou zaustavne linije. Istraživači su intervale sleđenja beležili pomoću mobilnih telefona sa Android operativnim sistemom opremljenih aplikacijom za snimanje intervala sleđenja, koja je razvijena na Saobraćajnom fakultetu Univerziteta u Beogradu. Intervali sleđenja se beleže tako što se u trenutku prolaska zadnje osovine vozila određene kategorije preko zaustavne linije pritiska polje na ekranu telefona koje odgovara kategoriji tog vozila koje je prošlo. Na slici 2 prikazan je izgled i način beleženja intervala sleđenja.

Slika 2 - Izgled aplikacije i način beleženja podataka

Snimanje intervala sleđenja u svakom novom ciklusu je započinjalo istovremeno u obe trake u trenutku kada se na uređaju za davanje svetlosnih signala pojave crveni i žuti signalni pojam, kako bi se za beležili i gubici prvog vozila u redu. Za neko vozilo se smatralo da se nalazi u redu ukoliko je deo tog reda (stoji na nekoj poziciji u redu iza zaustavne linije), ili

se tokom trajanja zelene faze pridružilo redu, ukoliko se nije zaustavilo, ali se kretalo toliko sporo da je rastojanje sleđenja između posmatranog i poslednjeg vozila u redu reda veličine pola prosečne dužine vozila. Vozila koja su se naknadno priključila redu, ali se nisu zaustavila, ne ulaze u proračun vrednosti zasićenog toka.

Izlazni rezultat snimanja je baza podataka u MS Excel-u. Raspoloživi su podaci o rednom broju ciklusa, rednom broju vozila u tom ciklusu, kategoriji vozila, datumu snimanja i vremenu početka ciklusa, intervalu sleđenja i kumulanti (slika 3).

	A	B	C	D	E	F	G
1	id	Kategorija	Red_Br_Voz	Datum	Vreme	Interval	Kumulanta
2	1	CIKLUS 1	0	10/4/2017	15:00:10	0	0
3	2	PA	1			1.21	1.21
4	3	PA	2			3.32	4.54
5	4	MOT	3			0.83	5.37
6	5	PA	4			0.94	6.31
7	6	PA	5			2.23	8.54
8	7	PA	6			1.92	10.46
9	8	PA	7			1.67	12.13
10	9	PA	8			2.28	14.41
11	10		0				
12	11	CIKLUS 2	0	10/4/2017	15:02:12	0	0
13	12	PA	1			2.94	2.94
14	13	PA	2			1.77	4.71
15	14	PA	3			1.61	6.32

Slika 3 - Primer formirane baze podataka (raskrsnica Bulevar Mihajla Pupina - Milentija Popovića, traka: spoljašnja)

4. OBRADA PODATAKA

Pre obrade podataka izvršena je logička provera snimljenih veličina, isključivanje nereprezentativnih uzoraka (ciklusi sa 4 i manje vozila) i eventualno pogrešno zabeleženih vrednosti. Sledeći korak je bio formiranje jedinstvene baze podataka i obrada podataka u programu MS Excel.

Iako su podaci prikupljeni po ciklusima u okviru vremenskog perioda od dva sata, za potrebe ovog rada posmatrani su svi ciklusi, tj. vremenska jedinica posmatranja je bio ceo period snimanja. Drugim rečima, u proračunu su obuhvaćeni intervali sleđenja bez obzira na to u kom ciklusu su realizovani.

U skladu sa ciljem rada, prostorna jedinica posmatranja je saobraćajna traka namenjena levom skretanju na prilazu raskrsnici, odvojeno unutrašnja i spoljašnja. Od dve posmatrane trake namenjene levom skretanju, unutrašnjom trakom se smatra traka uz levu ivicu kolovoza, dok je spoljašnja traka ona bliža desnoj ivici kolovoza.

U proračun su uključeni samo intervali sleđenja putničkih automobila, iz razloga što je, po definiciji, bazna vrednost zasićenog toka izražena u jedinicama putničkih automobila na sat zelenog.

Nakon utvrđenih prosečnih vrednosti intervala sleđenja putničkih automobila po saobraćajnim trakama

za svaku od raskrsnica t_h [s], proračunate su bazne vrednosti zasićenog saobraćajnog toka S [PAJ/h], primenom obrasca:

$$S = \frac{3600}{t_h} \quad (5)$$

Prilikom određivanja prosečne vrednosti gubitaka prvog vozila u redu, takođe su uzimane u obzir samo situacije kada je putnički automobil prvi u redu.

Radi poređenja dobijenih vrednosti zasićenog saobraćajnog toka sa analitičkim modelima, izračunate su vrednosti zasićenog saobraćajnog toka primenom ranije prikazanih modela. Upoređivanjem ovih vrednosti omogućava se izvođenje zaključka koji od modela najbolje opisuje domaće uslove.

5. REZULTATI ISTRAŽIVANJA

Rezultati istraživanja su razvrstani u tri grupe, u zavisnosti od konkretnog predmeta analize. Prva grupa rezultata odnosi se na utvrđene bazne vrednosti ZST na udvojenim trakama za levo skretanje i uticajne parametre na te vrednosti. Drugu grupu čine rezultati koji se odnose na poređenje vrednosti zasićenog toka utvrđenih istraživanjem i primenom analitičkih modela. Treća grupa rezultata obuhvata rezultate koji nisu direktna tema ovog istraživanja, a odnose se na gubitke prvog vozila u redu i uticajne parametre na njih. U daljem tekstu su dati rezultati svake od pomenutih grupa i diskusija o njima.

5.1. ZST i procena uticaja pojedinih parametara

Na osnovu izračunatih prosečnih intervala sleđenja za posmatrane saobraćajne trake na svakoj od raskrsnica iz uzorka dobijene su vrednosti zasićenog saobraćajnog toka za spoljašnju i unutrašnju traku namenjenu levom skretanju. Na slici 4 prikazane su te vrednosti ZST-a kao i radijusi trajektorija skretanja za obe trake na posmatranim raskrsnicama.

Analizom rezultata sa slike 4 možemo uočiti da se vrednosti ZST po trakama razlikuju, i da je razlika najveća na raskrsnici Jurija Gagarina - Gandijeva i iznosi 153 vozila, dok je najmanja na raskrsnici Terazije - Trg Nikole Pašića, 2 vozila.

Slika 4 - Vrednosti ZST na posmatranim raskrsnicama za svaku od saobraćajnih traka namenjenih levom skretanju

Ukoliko posmatramo vrednosti zasićenog saobraćajnog toka u zavisnosti od posmatranih saobraćajnih traka, uočavamo da na tri raskrsnice ova veličina ima veću vrednost na spoljašnjoj traci. Ova razlika u veličini ZST na spoljašnjoj i unutrašnjoj traci se objašnjava činjenicom da spoljašnje trake imaju veći radijus trajektorije levog skretanja (slika 4), što putanju čini približnijom kretanju pravo i vozačima je lakša za savladavanje.

Inverzan rezultat je dobijen na raskrsnici Bul. Milutina Milankovića - Omladinskih brigada, što znači da je veća vrednost zasićenog toka na unutrašnjoj traci. Međutim, na ovoj lokaciji na spoljašnjoj traci postoji značajno oštećenje kolovoza na udaljenosti od 5 metara od zaustavne linije, u dužini oko 5 metara, te se može pretpostaviti da je ovo uzrok većih intervala sleđenja, samim tim i manjih vrednosti ZST od očekivanih.

Slika 5 - Zavisnost vrednosti ZST od radijusa trajektorije skretanja

Na slici 5 je prikazana zavisnost bazne vrednosti zasićenog saobraćajnog toka od radijusa levog skretanja i ne može se uočiti postojanje trenda, a to se potvrđuje koeficijentom korelacije koji je jednak 0,09. Ovaj rezultat je suprotan očekivanjima da se sa povećanjem radijusa skretanja povećava i vrednost ZST. Na ovaj način se zaključuje da nije utvrđena zavisnost veličine ZST od radijusa levog skretanja koja se može primeniti na globalnom nivou, ali treba imati u vidu da su radijusi levog skretanja na posmatranim raskrsnicama veći od onih za koje literatura navodi da imaju uticaja na vrednost zasićenog toka [2]. Međutim, pokazano je da se na nivou pojedinačne raskrsnice može očekivati da će saobraćajna traka sa većim radijusom skretanja imati veću vrednost zasićenog toka.

Slika 6 - Zavisnost vrednosti ZST od udela zelenog u ciklusu

Zavisnost ukupnog zasićenog toka na obe saobraćajne trake od udela „zelenog“ vremena u ciklusu ($\lambda = Z/C$) prikazana je na slici 6.

Može se uočiti da vrednost ukupnog ZST zavisi od udela „zelenog“ u ciklusu, tako da sa povećanjem λ opada vrednost zasićenog saobraćajnog toka, što je u skladu sa pretpostavkama. Koeficijent korelacije kojim se potvrđuje ova činjenica jednak je -0,76. Opravdanje se ogleda u tome da su pri većim λ vozači svesni da imaju „dovoljno“ vremena da napuste raskrsnicu, te su manje agresivni i prave veće intervale sleđenja, dok u suprotnom slučaju, vozači čekaju duži vremenski period, postaju agresivniji i efikasnije koriste raspoloživo vreme. Značajno je istaći da u oblasti uobičajenih vrednosti λ za leva skretanja (0,1 - 0,2) vrednost zasićenog toka naglo opada, dok sa daljim porastom udela zelenog vremena u ciklusu ima približno konstantnu vrednost.

Utvrđena je i linearna zavisnost veličine zasićenog toka i udela zelenog vremena u ciklusu, sa $R^2 = 0,58$ što je posledica malog uzorka. Zavisnost se može prikazati narednom jednačinom:

$$S = -874,98 * \lambda + 3465,6 \quad (6)$$

5.2. Uporedna analiza vrednosti zasićenog toka utvrđenih istraživanjem i primenom analitičkih modela

Radi poređenja vrednosti ZST koje su dobijene istraživanjem i primenom analitičkih modela, ali i procene koji model najpribližnije opisuje domaće uslove, određene su veličine zasićenog toka primenom pomenutih modela.

Upotrebljene veličine pri proračunu zasićenog toka primenom analiziranih modela i dobijene vrednosti zasićenog toka prikazane su u tabeli 1, za sve modele.

Prilikom izračunavanja veličine zasićenog toka primenom Websterovog modela, korišćena je jednačina 1, uzimajući u obzir radijus skretanja koji odgovara svakoj traci, tako da se dobijaju različite vrednosti u zavisnosti od radijusa.

Za izračunavanje vrednosti ZST prema HCM-ovom modelu korišćena je jednačina 2, za baznu ZST 1900 PAJ/h, pri čemu su uzeti u obzir samo faktor koji se odnosi na uticaj vozila u levom skretanju i faktor uticaja širine saobraćajne trake. Faktor uticaja vozila u levom skretanju je za ekskluzivnu traku i zaštićeno levo skretanje jednak $f_{LT} = 0,95$. Faktor uticaja širine saobraćajne ima konstantnu vrednost za sve raskrsnice i saobraćajne trake, s obzirom da je širina traka jednaka na svim raskrsnicama, $w = 3m$.

Primenom jednačine 3 utvrđena je vrednost zasićenog saobraćajnog toka prema HBS-ovom modelu, uzimajući pri tom u obzir samo faktor uticaja radijusa

skretanja, čija je vrednost data za 3 veličine radijusa. Radijusi levih skretanja svih saobraćajnih traka su veće od granične vrednosti ispod koje radijus ima uticaja na veličinu zasićenog toka, te je $f = 1$. Bazna vrednost ZST se određuje u zavisnosti od dužine trajanja zelenog signalnog pojma.

Tabela 1. Vrednosti korišćenih faktora i ZST dobijene primenom prikazanih modela

Vebster				R [m]	SVEBSTER		
Terazije - Trg Nikole Pašića				30	1543		
				34	1569		
Bul. Mihajla Pupina - Milentija Popovića				23	1479		
27				1519			
Jurija Gagarina - Gandijeva				21	1454		
25				1500			
Bul. Milutina Milankovića - Omladinskih brigada				28	1527		
				31	1550		
HCM	S _b [PA/h]	w [m]	f _w [-]	f _L [-]	SHCM		
Terazije - Trg Nikole Pašića	1900	3	0.93	0.95	1685		
Bul. Mihajla Pupina - Milentija Popovića	1900	3	0.93	0.95	1685		
Jurija Gagarina - Gandijeva	1900	3	0.93	0.95	1685		
Bul. Milutina Milankovića - Omladinskih brigada	1900	3	0.93	0.95	1685		
HBS	Z [s]	S _b [PAJ/h]	R [m]	f [-]	S _{HBS}		
Terazije - Trg Nikole Pašića	>10	2000	30	1	2000		
			34	1	2000		
Bul. Mihajla Pupina - Milentija Popovića	>10	2000	23	1	2000		
			27	1	2000		
Jurija Gagarina - Gandijeva	>10	2000	21	1	2000		
			25	1	2000		
Bul. Milutina Milankovića - Omladinskih brigada	9	2550	28	1	2550		
			31	1	2550		
Domaći model							S _{Domaći}
					1500		

Domaći model daje samo jednu baznu vrednost za traku namenjenu levom skretanju - 1500 voz/h, i ta vrednost je usvojena.

Tabela 2. Vrednosti ZST dobijene istraživanjem i primenom prikazanih modela

Raskrsnica	S istraživanje [PAJ/h]	S po Websteru [PAJ/h]	S po HCM-u [PAJ/h]	S po HBS-u [PAJ/h]	S po domaćem modelu [PAJ/h]
Terazije - Trg Nikole Pašića	1529	1543	1685	2000	1500
	1531	1569			
Bul. Mihajla Pupina - Milentija Popovića	1658	1479		2000	
	1746	1519			
Jurija Gagarina - Gandijeva	1480	1454		2000	
	1633	1500			
Bul. Milutina Milankovića - Omladinskih brigada	1765	1527		2550	
	1732	1550			

* Potencijalno nepouzdan podatak zbog prethodno opisanog problema na konkretnoj lokaciji

Radi poređenja i bolje preglednosti, u tabeli 2 su prikazane vrednosti utvrđene istraživanjem i pomenutim modelima.

Britanski model uzima u obzir radijuse levih skretanja, dajući pri tom veće vrednosti zasićenog toka na spoljašnjim trakama, kao što je utvrđeno i istraživanjem. Ovaj model daje slične rezultate onima utvrđenim istraživanjem na raskrsnici Terazije - Trg Nikole Pašića, zato se može zaključiti da ovaj model odgovara opisivanju uslova na raskrsnicama u centralnim zonama grada i sa većim udelom zelenog vremena u ciklusu. U ostalim slučajevima, na raskrsnicama u obodnim zonama i sa manjim udelom zelenog signalnog pojma u ciklusu, Websterov model potcenjuje veličinu zasićenog toka.

HCM daje samo jednu vrednost koja zavisi od širine trake i faktora redukcije za leva skretanja. Može se reći da je ova vrednost slična prosečnoj vrednosti koja je utvrđena istraživanjem, tako da se ovim modelom mogu približno opisati domaći uslovi. Međutim, ovaj model ne uzima u obzir pojedinosti koje vladaju na konkretnim lokacijama.

Po HBS-u se dobijaju značajno veće vrednosti, s obzirom da su radijusi veći od granične vrednosti propisane modelom ispod koje radijus levog skretanja ima uticaja na smanjenje ZST, i jedina uticajna veličina je dužina zelenog signalnog pojma. Može se zaključiti da ovaj model nije odgovarajući za opisivanje domaćih uslova.

Primećuje se da domaći model daje samo jednu vrednost za trake namenjene levom skretanju, i da ta vrednost ne opisuje realno stanje, već potcenjuje veličinu zasićenog toka koja se utvrđuje istraživanjem na terenu.

5.3. Vremenski gubici prvog vozila u redu i procena uticaja pojedinih parametara

Pored veličine ZST na raskrsnicama su snimani i gubici prvog vozila u redu, osim na raskrsnici Terazije - Trg Nikole Pašića. Rezultati su za svaku saobraćajnu traku po raskrsnicama prikazani na slici 7 i primećuje se da se veličina prosečnih vremenskih gubitaka prvog vozila u redu kreće u granicama od 2,28 do 2,93 s, a prosečna vrednost iznosi 2,58 s.

Slika 7 - Prosečni vremenski gubici prvog vozila u redu po saobraćajnim trakama na posmatranim raskrsnicama

Posmatranjem prosečnih vremenskih gubitaka prvog vozila u redu po saobraćajnim trakama, predstavljenih na slici 7, uočava se trend da su vremenski gubici veći na spoljašnjoj traci, i to važi za sve raskrsnice na kojima je snimanje ove veličine sprovedeno. Razlog se može potražiti u tome da je uređaj za davanje svetlosnih signala bliži vozačima koji se nalaze u unutrašnjoj traci, i vozač prvog vozila u redu unutrašnje trake ima bolju preglednost uređaja za davanje svetlosnih signala, nego vozač prvog vozila u redu u spoljašnjoj traci.

6. ZAKLJUČAK

Ovo istraživanje je prvo u Srbiji koje se bavi konkretno baznim vrednostima zasićenog toka na udvojenim trakama za levo skretanje.

Na osnovu empirijskih istraživanja zaključeno je da se veličina ZST razlikuje po saobraćajnim trakama namenjenim levom skretanju, i da se može očekivati da će ona saobraćajna traka sa većim radijusom skretanja, spoljašnja, imati veću baznu vrednost zasićenog toka. Ovaj zaključak je u skladu sa onim što je propisano britanskim [6] i nemačkim [2] priručnikom, da traka namenjena skretanju levo sa većim radijusom skretanja ima veći zasićeni tok.

Prethodni zaključak važi prilikom poređenja dve saobraćajne trake na istoj raskrsnici, dok na globalnom nivou nije pokazana zavisnost veličine zasićenog toka i radijusa skretanja. Međutim, postoje brojni parametri koji utiču na veličinu ZST, a koji su u ovom istraživanju bili različiti među raskrsnicama, pod tim se najpre podrazumevaju parametri rada svetlosnih signala. Iz tog razloga, za dalja istraživanja zavisnosti veličine zasićenog toka i radijusa levog skretanja, predlaže se odabir uzorka u kome će se naći raskrsnice sa različitim geometrijskim karakteristikama, ali istim ili bar sličnim parametrima rada svetlosnih signala i karakterom saobraćajnih tokova.

Analizom rezultata zaključeno je da postoji negativna korelativna zavisnost ukupnog zasićenog toka na obe trake i udela zelenog vremena u ciklusu. Ovakav zaključak je opravdan ponašanjem vozača pri različitim veličinama udela zelenog vremena u ciklusu. Pri većem λ vozači čekaju kraći vremenski period i svesni su da imaju „dovoljno“ vremena da napuste raskrsnicu, manje su agresivni i prave veće intervale sleđenja, dok u suprotnom slučaju, vozači čekaju duži vremenski period, postaju agresivniji i efikasnije koriste raspoloživo vreme. Za dalja istraživanja ove zavisnosti, predlaže se uzorak raskrsnica sa raznovrsnijim parametrima rada svetlosnih signala.

Poređenjem vrednosti ZST utvrđenih empirijskim istraživanjem i primenom analiziranih analitičkih modela, izvedeno je nekoliko zaključaka u vezi sa tim

modelima. Zaključeno je da HCM model, iako daje jedinstvenu vrednost zasićenog toka, ne uzimajući u obzir ni jedan od analiziranih uticajnih faktora - radijus ili udeo „zelenog“ u ciklusu, najpribližnije opisuje domaće uslove. Dalje, domaći model za izračunavanje veličine zasićenog toka predlaže baznu vrednost zasićenog toka trake za levo skretanje koja značajno potcenjuje realne vrednosti zasićenog toka koje se utvrđene istraživanjem. Websterov model potvrđuje zaključke da spoljašnja traka ima veću vrednost zasićenog toka, kao što je pomenuto, ali daje vrednosti koje potcenjuju realne veličine zasićenog toka. Međutim, zaključeno je i da ovaj model dobro opisuje uslove na raskrsnicama u centralnim zonama grada i sa većim udelom zelenog u ciklusu. U daljim istraživanjima predlaže se prilagođavanje domaćeg modela ispitivanjem uticaja većeg broja faktora i preispitivanje baznih vrednosti zasićenog toka, obzirom da se primećuje tendencija njihovog porasta, što se pominje i u relevantnoj literaturi [1]. Takođe, potrebno je ispitati i mogućnost primene inostranih modela u domaćim uslovima.

Analizom prosečnih vremenskih gubitaka prvog vozila u redu, zaključeno je da su oni veći za spoljašnju traku iz razloga što vozači u unutrašnjoj traci imaju bolju preglednost uređaja za davanje svetlosnih signala, u odnosu na one u spoljašnjoj traci.

Obzirom na to da je ovo istraživanje malog obima, u narednim istraživanjima, pored pomenutih predloga, potrebno je obuhvatiti veći broj raskrsnica u dužem vremenskom periodu. Na taj način će se postići veća preciznost rezultata.

Iako je ovim istraživanjem tek načeta tema baznih vrednosti zasićenog toka na udvojenim trakama za levo skretanje, rezultati i zaključci su u skladu sa rezultatima inostranih istraživanja i otvorena su pitanja kojima se buduća istraživanja mogu baviti.

LITERATURA

- [1] Čelar N, *Prilog istraživanju merodavnih vrednosti zasićenog toka na signalisanim raskrsnicama: magistrski rad*, Saobraćajni fakultet, Beograd, Republika Srbija, 2007.
- [2] Forschungsgesellschaft für Straßen und Verkehrswesen, *Handbuch für die Bemessung von Straßenverkehrsanlagen (HBS 2001)*, FGSV Verlag GmbH, Köln, Bundesrepublik Deutschland, 2001.
- [3] Stanić B, *Istraživanja efekata signalnog plana pri zasićenom toku: doktorska disertacija*, Saobraćajni fakultet, Beograd, SFR Jugoslavija, 1991.
- [4] Transport Research Board - TRB, *Highway Capacity Manual (HCM 2010)*, National Research Council, Washington, D.C., United States of America, 2010.

- [5] Vukanović S, *Upravljanje saobraćajem* (peto izdanje), Saobraćajni fakultet, Beograd, Republika Srbija, 2011.
- [6] Webster F. V, Cobbe B. M, *Traffic signals*, Her Majesty's Stationery Office, London, United Kingdom, 1966.

SUMMARY

ESTIMATION OF SATURATION FLOW RATES ON DUAL LEFT-TURN LANES

Signalized intersection capacity estimation and signal timing parameters optimization are directly related to the term "saturation flow". This parameter was the subject of numerous studies in which base saturation flow rates and its impact factors were estimated and analyzed. Also, analytical models for saturation flow estimation were developed. This paper presents an effort to investigate the base saturation flow rate on dual left-turn lanes. Data was collected on four intersections in Belgrade with protected dual left-turn lanes. Queue discharge rate research methodology was used and time headway data was collected via smartphones equipped with an application for that purpose. Results analysis showed that the saturation flow rates differ among left-turn lanes and a higher value is to be expected for the "outer" lane, i.e. lane with bigger turning radius. However, a correlation between saturation flow rate and turning radius has not been demonstrated. Results showed that there was strong negative correlation between total saturation flow on both lanes and green time ratio. The paper also compares saturation flow rates obtained by field research and by models, and a model which is best suited for local conditions was identified.

Key words: saturation flow, dual lanes, left-turn, signalized intersection, capacity