Poređenje realnih i teorijskih vrednosti kapaciteta na signalisanim raskrsnicama

MILOŠ Z. STOJKOV, 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

ANICA M. KOCIĆ, Univerzitet u Beogradu

Saobraćajni fakultet, Beograd

Stručni rad

UDC: 625.739:519.872.6(497.11)

656.1.053:519.872.6(497.11)

DOI: 10.5937/tehnika1905704S

Upravljanje urbanom mrežom dominantno se oslanja na primenu svetlosnih signala. Svetlosnim signalima vrši se vremenska preraspodela raspoloživog kapaciteta raskrsnice po prilazima, odnosno saobraćajnim tokovima. Kapacitet, kao osnovni upravljački parametar, može se proceniti primenom analitičkih modela ili utvrditi istraživanjem. U radu je izvršeno poređenje realnih vrednosti kapaciteta u odnosu na one koje se dobijaju primenom modela. Pilot istraživanja su sprovedena za saobraćajne trake pravo na tri signalisane raskrsnice u Beogradu. Metodologija istraživanja zasniva se na utvrđivanju prosečne vrednosti intervala sleđenja u procesu pražnjenja reda. Rezultati istraživanja ukazuju da se procenjene vrednosti kapaciteta mogu razlikovati od realnih do 30%, u zavisnosti od primenjenog modela. Najveća odstupanja dobijena su korišćenjem domaćih preporuka, dok je najpreciznija procena kapaciteta dobijena primenom Websterovog i HCM modela.

Ključne reči: signalisana raskrsnica, kapacitet, zasićeni saobraćajni tok, efektivno zeleno

1. UVOD

Usled konstantnog povećanja transportnih zahteva, saobraćajne mreže gradova današnjice karakteriše hroničan nedostatak kapaciteta. Ovaj problem je najizraženiji na elementima mreže na kojima dolazi do ukrštanja saobraćajnih tokova, odnosno na raskrsnicama. Na urbanim mrežama, raskrsnice su dominantno regulisane svetlosnim signalima, bilo u fiksnom režimu rada ili poslednjih decenija sve češće nekim od adaptibilnih sistema upravljanja saobraćajem [1]. Međutim, bez obzira na tip upravljanja svetlosnim signalima, njihov osnovni cilj predstavlja raspodela raspoloživog kapaciteta raskrsnice prema merodavnoj vrednosti saobraćajnog opterećenja, po unapred definisanim kriterijumima i ograničenjima [2].

Osnovni parametri za utvrđivanje kapaciteta su zasićeni saobraćajni tok i efektivno zeleno vreme. Zasićeni saobraćajni tok predstavlja rezultat realizacije procesa pražnjenja reda na prilazu raskrsnici i osnovni ulazni parametar, dok je, s druge strane, efektivno zeleno vreme osnovni izlazni parametar procesa optimizacije rada signala.

Egzaktna procena raspoloživog kapaciteta na signalisanim raskrsnicama je ključna za donošenje adekvatnih inženjerskih odluka u procesu upravljanja saobraćajem [3]. Takođe, kapacitet predstavlja jedan od osnovnih ulaznih parametara za utvrđivanje primarnog pokazatelja efikasnosti rada svetlosnih signala, tj. vremenskih gubitaka, ukoliko se ima u vidu da se za njihovu estimaciju najčešće koriste analitički modeli [3]. Međutim, sa povećanjem dostupnost savremenih tehnologija (npr. pametnih telefona, GPS-a) vremenski gubici se mogu egzaktno utvrditi na terenu [4].

Istraživanja različitih parametara saobraćajnog toka, kao i pokazatelja efikasnosti u lokalnim uslovima, se često koriste kako bi se izvršio odabir

Adresa autora: Miloš Stojkov, Univerzitet u Beogradu, Saobraćajni fakultet, Beograd, Vojvode Stepe 305
e-mail: mili95stojkov@gmail.com

Rad prmljen: 20.09.2019.

Ra prihvaćen: 26.09.2019.

odgovarajućeg analitičkog modela [5], odnosno njegova kalibracija. Dosadašnja istraživanja vrednosti zasićenog saobraćajnog toka u lokalnim uslovima su pokazala da postoje značajna odstupanja realnih vrednosti zasićenog toka od vrednosti dobijenih primenom različitih analitičkih modela [6], [7], [8]. Takođe, istraživanja su pokazala da često korišćeni simulacioni modeli kao što je VISSIM zahtevaju detaljnu kalibraciju, kako bi omogućili pouzdanu procenu vrednosti kapaciteta na signalisanim raskrsnicama [9].

Cilj ovog rada predstavlja utvrđivanje stepena odstupanja vrednosti kapaciteta, koje se dobijaju primenom relevantnih analitičkih modela u odnosu na realne vrednosti dobijene terenskim istraživanjem. Takođe, cilj rada je da se na osnovu rezultata istraživanja daju preporuke za primenu odgovarajućeg analitičkog modela u domaćim uslovima.

2. KAPACITET I ZASIĆENI SAOBRAĆAJNI TOK

Kapacitet ili propusna moć predstavlja maksimalan broj saobraćajnih zahteva koji se mogu opslužiti u određenom periodu vremena (najčešće tokom sata vremena). Kapacitet saobraćajne trake na prilazu signalisanoj raskrsnici zavisi od pripadajuće vrednosti zasićenog saobraćajnog toka (ZST) i udela efektivnog zelenog vremena u ciklusu:

$$K = S \cdot \frac{Z_{ef}}{C} \quad (1)$$

gde je:

- K – kapacitet saobraćajne trake (voz/h),
- S – zasićeni saobraćajni tok trake (voz/h zelenog),
- Z_{ef} – efektivno zeleno vreme (s),
- C – dužina ciklusa (s).

Zasićeni saobraćajni tok saobraćajne trake predstavlja hipotetički maksimalnu realnu vrednost kapaciteta, odnosno, maksimalan broj vozila koja bi prošla raskrsnicu kada bi za njih tokom celog sata bilo obezbeđeno pravo prolaska (zeleni signalni pojam) i kada bi u posmatranoj traci postojao stalan saobraćajni zahtev. Vrednost zasićenog saobraćajnog toka može se utvrditi teorijski, primenom odgovarajućeg analitičkog modela, ili empirijski, saobraćajnim istraživanjem.

Analitički modeli predstavljaju uopštenu interpretaciju procesa praznjenja reda i zasnivaju se na analizi velikog uzorka realizacija pomenutog procesa u standardnim slučajevima. U narednom delu dat je opšti pregled najznačajnijih analitičkih modela za procenu vrednosti zasićenog saobraćajnog toka.

Vebsterov model

Vebsterov model [10] predstavlja prvi publikovani analitički model za utvrđivanje vrednosti zasićenog saobraćajnog toka. Zasićeni tok za saobraćajnu traku,

odnosno za grupu traka iste namene, utvrđuje se narednim izrazom:

$$S = S_0 N f_{HW} f_W f_g f_{LT} f_{RT} f_{pb} f_p f_a \quad (2)$$

gde je:

- S – zasićen saobraćajni tok (voz/h zelenog)
- S_0 – bazna vrednost ZST-a (voz/h zelenog)
- N – broj saobraćajnih traka iste namene (-)
- f_{HW} – faktor uticaja teških teretnih vozila (-)
- f_W – faktor uticaja širine saobraćajne trake (-)
- f_g – faktor uticaja uzdužnog nagiba (-)
- f_{LT} – faktor korekcije ZST-a za vozila u levom skretanju (-)
- f_{RT} – faktor korekcije ZST-a za vozila u desnom skretanju (-)
- f_{pb} – faktor uticaja intenziteta pešačkog toka (-)
- f_p – faktor uticaja parkiranih vozila (-)
- f_a – faktor uticaja okruženja raskrsnice (-).

HCM 2010 model

U okviru priručnika HCM 2010 [11] analitički model za procenu vrednosti zasićenog toka dat je u narednoj formi:

$$S = S_0 N f_w f_{HW} f_g f_p f_{bb} f_a f_{LU} f_{LT} f_{RT} f_{Lpb} f_{Rpb} \quad (3)$$

gde je:

- S – zasićeni saobraćajni tok (voz/h zelenog),
- S_0 – bazna vrednost zasićenog saobraćajnog toka (voz/h zelenog),
- N – broj saobraćajnih traka iste namene (-)
- f_w – faktor uticaja širine trake (-)
- f_{HW} – faktor uticaja teških teretnih vozila (-)
- 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 neravnomerne raspodele protoka po trakama (-)
- f_{LT} – faktor korekcije ZST-a za vozila u levom skretanju (-)
- f_{RT} – faktor korekcije ZST-a za vozila u desnom skretanju (-)
- f_{Lp}/f_{Rp} – faktor uticaja pešaka na vozila u levom, odnosno desnom skretanju (-).

HBS 2015 model

Utvrđivanje ZST-a u ovom modelu [12], bazira se na prosečnoj vrednosti intervala sleđenja u procesu praznjenja reda i data je narednim izrazom:

$$t_H = f_{TV} \cdot f_1 \cdot f_2 \cdot t_{H,0} \quad (4)$$

gde je:

t_H – operativna vrednost intervala sleđenja (s)

f_{TV} – faktor uticaja teretnih vozila (-)

$f_1 = \max(f_b, f_r, f_s)$

f_b – faktor uticaja širine saobraćajne trake (-)

f_r – faktor uticaja radijusa skretanja (-)

f_s – faktor uticaja uzdužnog nagiba (-)

$f_2 = \max(1, f_s)$

$t_{H,0}$ – bazna vrednost prosečnog intervala sleđenja (s).

U izrazu (4) faktor f_1 kvantifikuje uticaj jednog od tri navedena faktora (faktora koji ima najveći uticaj na interval sleđenja), dok faktor f_2 isključivo kvantifikuje uticaj uzdužnog nagiba. Operativna vrednost zasićenog toka S , utvrđuje se narednim izrazom:

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

Domaće preporuke

Prema domaćim preporukama bazna vrednost zasićenog saobraćajnog toka definiše se u odnosu na namenu saobraćajne trake. Operativna vrednost zasićenog toka dobija se narednim izrazom:

$$S = S_{op} \cdot N \cdot f_1 \cdot f_2 \cdot f_3 \cdot f_4 \quad (6)$$

gde je:

S – operativna vrednost zasićenog toka (voz/h zelenog)

S_0 – bazna vrednost zasićenog toka (voz/h zelenog)

f_1 – faktor uticaja pešačkog toka na vozila u skretanju (-)

f_2 – faktor uticaja konfliktnog vozačkog toka na vozila u levom skretanju (-)

f_3 – faktor uticaja strukture saobraćajnog toka (-)

f_4 – faktor uticaja veličine grada (-).

Primena modela omogućava praktičan i relativno jednostavan način procene vrednosti zasićenog toka. S druge strane, prikazani modeli se razlikuju po načinu definisanja bazne vrednosti, broju faktora i stepenu uticaja pojedinačnih faktora, što u praktičnoj primeni otežava izbor odgovarajućeg modela. Takođe, u određenim specifičnim situacijama primena analitičkih modela podrazumeva visok stepen aproksimacije vrednosti ZST-a. Imajući u vidu nedostatke analitičkih modela, preporuka je da se u svim situacijama kada je to moguće, vrednost ZST-a utvrdi istraživanjem [2].

3. METODOLOGIJA ISTRAŽIVANJA

Jedna od najčešće korišćenih metodologija istraživanja vrednosti zasićenog toka zasniva se na utvr-

đivanju prosečne vrednosti intervala sleđenja u procesu pražnjenja reda. Suština metodološkog pristupa data je narednom relacijom:

$$S = \frac{3600}{t_h} \quad (7)$$

gde je:

S – zasićeni saobraćajni toka (voz/h zelenog)

t_h – prosečna vrednost intervala sleđenja (s/voz).

Snimanje intervala sleđenja se vrši na nivou pojedinačnih ciklusa, od momenta početka zelenog do trenutka završetka procesa pražnjenja reda. U postupku istraživanja evidentiraju se trenuci prolaska zadnje osovine svih vozila iz inicijalnog reda preko linije zaustavljanja. Inicijalni red predstavlja red vozila koji je formiran tokom crvenog signalnog pojma. Takođe, vozilo predstavlja deo reda i ukoliko se istom priključilo tokom trajanja zelenog signalnog pojma, zaustavilo se ili se kretalo tako da je rastojanje između tog i poslednjeg vozila u redu manje od prosečne dužine vozila. Vozila koja se pojavljuju tokom trajanja zelenog signalnog pojma, a ne zadovoljavaju prethodni uslov, ne predstavljaju deo reda i isključuju se iz istraživanja.

U postupku obrade podataka, intervali sleđenja za prvih 3-5 vozila iz inicijalnog reda se eliminišu iz uzorka, jer njihove vrednosti nisu reprezent procesa napuštanja reda intenzitetom zasićenog saobraćajnog toka [2].

Pilot istraživanja po definisanoj metodologiji realizovana su na narednim raskrsnicama: Bulevar kralja Aleksandra – Ruzveltova; Omladinskih brigada – Bulevar Zorana Đinđića; Jurijsa Gagarina – Proleterskih solidarnosti.

Tabela 1. Lokacije i obim istraživanja

Raskrsnica	Bul. kralja Aleksandra – Ruzveltova	O. brigada – Bulevar Z, Đinđića	J. Gagarina – P. solidarnosti
Prilaz	Bul. K. Aleksandra	O. brigada	J. Gagarina
Smer	ka centru	ka opštini NBG	ka bloku 45
Dužina ciklusa (s)	95	119	120
Stvarno zeleno (s)	23	33	46
Broj snimljenih ciklusa	39	74	73
Ukupan broj vozila	259	524	556

Lokacije i period istraživanja izabrani su tako da na saobraćajnim trakama koje su predmet neposredne opservacije postoji red vozila takav, da nakon isteka zelenog najmanje jedno vozilo ostane neopsluženo, kao i da se tokom ciklusa realizuje neometan proces pražnjenja reda. Prikupljanje podataka je izvršeno manuelnom tehnikom, korišćenjem pametnog telefona sa namenski formiranim Android aplikacijom za snimanje intervala sleđenja prema definisanoj metodologiji. U narednoj tabeli (Tabela 1) dati su detaljni podaci o lokacijama istraživanja, parametrima rada signala tokom neposrednog snimanja i obimu sprovedenih istraživanja.

4. REZULTATI ISTRAŽIVANJA

U narednoj tabeli (Tabela 2) dat je uporedni prikaz vrednosti zasićenog toka, dobijenih istraživanjem i primenom referisanih analitičkih modela.

Tabela 2. Vrednosti zasićenog toka dobijene analitičkim modelima i istraživanjem na terenu

ZST (voz/h zel.)	Bul. kralja Aleksandra – Ruzveltova	O. brigada – Bulevar Z. Đinđića	J. Gagarina – P. solidarnosti
Istraživanje	1743	1688	1670
Vebster	1868	1814	1851
HCM2010	1827	1838	1870
HBS2015	1941	1928	1978
Domaće preporuke	2069	2074	2099

Na osnovu dobijenih vrednosti može se konstatovati da svi analitički modeli precenjuju vrednosti zasićenog saobraćajnog toka trake pravo. Najmanja odstupanja (<10%) dobijaju se primenom Vebsterovog i HCM-ovog modela, dok su odstupanja koja se dobijaju primenom domaćih preporuka preko 20%. Za saobraćajnu traku levo niže vrednosti zasićenog toka dobijaju se Vebsterovim modelom i domaćim preporukama za razliku od HCM i HBS modela. Odstupanja se kreću u granicama do $\pm 10\%$ izuzev HBS modela koji odstupa preko 20% od vrednosti dobijenih istraživanjem.

U cilju utvrđivanja razlike između teorijskih i realnih vrednosti kapaciteta neophodno je utvrditi vrednosti efektivnih zelenih vremena. Efektivno zeleno vreme predstavlja period vremena tokom koga može da se realizuje proces pražnjenja reda maksimalnim intenzitetom, odnosno intenzitetom zasićenog toka i utvrđuje se narednom relacijom:

$$Z_e = Z_{st} - a + b \quad (8)$$

Z_{st} – stvarnog zeleno vreme (s)

a – gubici na startu (s)

b – neiskoršeni deo žutog (s).

Vrednosti gubitaka na startu i iskorišćenog dela žutog po lokacijama istraživanja dobijene su detaljnom analizom snimljenih vrednosti intervala sleđenja vozila u procesu pražnjenja reda i prikazane su u narednoj tabeli (Tabela 3.).

Tabela 3. Stvarna i efektivna zelena vremena

Raskrsnica	Bul. kralja Aleksandra – Ruzveltova	O. brigada – Bulevar Z. Đinđića	J. Gagarina – P. solidarnosti
Stvarno zeleno, Z_{st} (s)	23	33	46
Vrednost gubitaka na startu, a (s)	2,64	2,31	1,67
Iskorišćeni deo žutog vremena, b (s)	0,73	0,80	1,01
Efektivno zeleno, Z_e (s)	21,09	31,49	45,34
Razlika, $Z_{st} - Z_e$ (s)	1,91	1,51	0,66

Na osnovu dobijenih rezultata može se videti da su vrednosti efektivnih zelenih vremena veće od pripadajućih stvarnih, pri čemu razlike variraju u rangu od 0,66-1,91, zavisno od lokacije istraživanja. U većini analitičkih modela postupak proračuna kapaciteta bazira se na pretpostavci da su ove dve vrednosti jednake, izuzev HBS-a, koji pretpostavlja da je efektivno zeleno za 1 sekundu veće u odnosu na stvarno zeleno vreme, $Z_e = Z_{st} + 1$. Vrednosti kapaciteta koje su prikazane u narednoj tabeli dobijene su primenom izraza (1), pri čemu način utvrđivanja efektivnog zelenog vremena odgovara svakom pojedinačnom modelu.

Tabela 4. Vrednosti kapaciteta dobijene analitičkim modelima i istraživanjem na terenu

K (voz/h)	Bul. kralja Aleksandra – Ruzveltova	O. brigada – Bulevar Z. Đinđića	J. Gagarina – P. solidarnosti
Istraživanje	387	447	631
Vebster	452	503	710
HCM2010	442	510	717
HBS2015	490	551	775
Domaće preporuke	501	575	805

Poređenjem realnih i vrednosti kapaciteta dobijene analitičkim putem, može se uočiti da analitički modeli precenjuju vrednost kapaciteta u rangu od 12-30%, u zavisnosti od primenjenog modela. Odstupanja u proceni vrednosti kapaciteta su veća od odstupanja dobijenih pri proceni zasićenog saobraćajnog toka, što je posledica načina definisanja efektivnog zelenog vremena.

Može se zaključiti da dominantan uticaj na odstupanja u proceni kapaciteta ima procenjena vrednost ZST-a. Takođe, način definisanja efektivnog vremena, odnosno korišćenje Z_{st} umesto realno utvrđenog Z_{ef} može dovesti do precenjivanja vrednosti kapaciteta u

granicama do 10% u zavisnosti od udela zelenog vremena u ciklusu.

5. ZAKLJUČAK

Kapacitet ili propusna moć saobraćajne trake na signalisanim raskrsnicama predstavlja osnovni upravljački parametar, koji zbog svog značaja u procesu optimizacije zahteva egzaktnu procenu. Procena vrednosti kapaciteta isključivo zavisi od dva parametra, zasićenog saobraćajnog toka i efektivnog zelenog vremena. Na osnovu sprovedenih pilot istraživanja kapaciteta saobraćajne trake pravo, može se zaključiti da se procenjene vrednosti kapaciteta mogu razlikovati od realnih i do 30%.

Dominantan uticaj na pomenutu razliku ima analitički procenjena vrednost zasićenog saobraćajnog toka, odnosno njegova modelski usvojena bazna vrednost. Najbolja procena vrednosti ZST-a dobija se primenom Websterovog i HCM modela. Način utvrđivanja efektivnog zelenog vremena ima manji uticaj na vrednost kapaciteta, i direktno zavisi od vrednosti gubitaka na startu i iskorišćenog dela žutog na konkretnoj raskrsnici, kao i od udela zelenog vremena u ciklusu. Preporuka je da se vrednost kapaciteta na postojećim raskrsnicama utvrđuje direktno eksperimentalnim istraživanjima prema prikazanoj metodologiji. S druge strane, obimnija istraživanja kapaciteta ulične mreže nužno nameću primenu analitičkih modela. U tom smislu, potrebno je sprovesti postupak revidiranja domaćih preporuka za utvrđivanje ZST-a, i/ili detaljnu kalibraciju ostalih modela ZST-a kako bi odgovarali lokalnim uslovima.

LITERATURA

- [1] Radivojević D, Stanković S, Čelar N, Vukanović S. Sistemi za adaptibilno upravljanje saobraćajem na gradskoj mreži, *Tehnika*, Vol. 72, No. 1, pp. 98-106, 2017.
- [2] Čelar N, Stanković S, Kajalić J. *Osnove upravljanja svetlosnim signalima*, Saobraćajni fakultet, Beograd, 2018.
- [3] Čelar N. *Prilog analizi saobraćajnog procesa na signalisanoj raskrsnici*: Doktorska disertacija, Saobraćajni fakultet, Beograd, 2013.
- [4] Čelar N, Stanković S, Kajalić J, Stepanović N. Methodology for Control Delay Estimation Using New Algorithm for Critical Points Identification, *Journal of Transportation Engineering, Part A: Systems*. Vol. 144, No. 2, pp. 2473-2907, 2018.
- [5] Kajalić J, Čelar N, Stanković S. Travel Time Estimation on Urban Street Segment, *Promet-Traffic & Transportation*. Vol. 30, No 1. pp. 115-120, 2018.
- [6] Čelar N. *Prilog istraživanju merodavnih vrednosti zasićenog toka na signalisanim raskrsnicama*: magistarski rad, Saobraćajni fakultet, Beograd, 2007.
- [7] Stanic B, Tubic V, Celar N. Straight Lane Saturation Flow and Its Rate in Serbian Cities, *Transport*, Vol. 26, No. 3, pp. 329-334, 2011.
- [8] Kocić A, Čelar N, Kajalić J, Stanković S. Istraživanje vrednosti zasićenog toka na udvojenim trakama za levo skretanje, *Tehnika*, Vol. 65, No. 2, pp. 254-261, 2018.
- [9] Kocić A, Čelar N, Stanković S, Kalibracija VISSIM-a za nezaštićeno levo skretanje na signalisanim raskrsnicama u Beogradu, *Put i saobraćaj*, Vol. 64, No. 4, pp. 49-53, 2018.
- [10] Webster F. V, Cobbe BM. *Traffic signals*, Her Majesty's Stationery Office, London, United Kingdom, 1966.
- [11] Transport Research Board - TRB, *Highway Capacity Manual (HCM 2010)*, National Research Council, Washington, D.C, United States of America, 2010.
- [12] Forschungsgesellschaft für Straßen und Verkehrswesen, *Handbuch für die Bemessung von Straßenverkehrsanlagen (HBS 2001)*, FGSV Verlag GmbH, Köln, Bundesrepublik Deutschland, 2001.

SUMMARY

COMPARISON OF REAL AND THEORETICAL CAPACITY AT SIGNALIZED INTERSECTIONS

Urban network management is dominantly based on traffic signals. Traffic signals perform a distribution of available intersection capacity to conflicting traffic flows, i.e. intersection approaches. As a basic traffic parameter, capacity can be estimated using analytical models or be determined in the field. The paper compares the real values of capacities with those obtained by analytical models. The survey was conducted for thought movement at three signalized intersections in Belgrade. The research methodology is based on the determination of average headway in the queue discharge process. The results indicate that the estimated capacity may differ from real up to 30%, depending on the applied model. The highest differences were achieved using domestic recommendations, while the most accurate capacity estimation was obtained using Webster and HCM2010 models.

Key words: signalized intersection, capacity, saturation flow, effective green time