

Modeli za procenu kapaciteta kružnih raskrsnica

Dragan Stanimirović^a, Vuk Bogdanović^b

^a Javna ustanova Institut za urbanizam, građevinarstvo i ekologiju Republike Srpske, Banja Luka

^b Univerzitet u Novom Sadu, Fakultet tehničkih nauka

PODACI O RADU

DOI: 10.31075/PIS.65.03.01
Stručni rad
Priljubljen: 06/05/2019.
Prihvaćen: 01/09/2019
Koresponding autor:
draganstanimirovic@yahoo.com

Ključne reči:

Kružne raskrsnice
Modeli za određivanje kapaciteta
Prenosivost modela

REZIME

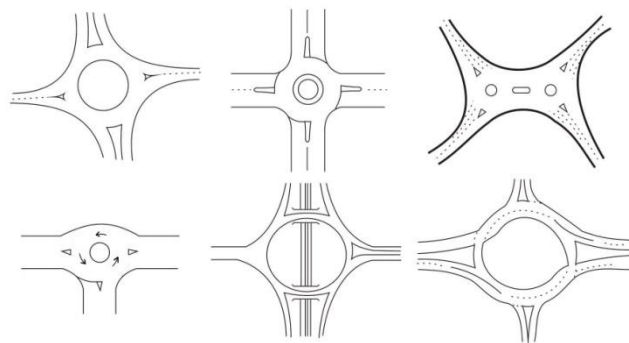
Kružne raskrsnice, kao poseban oblik nesignalisanih raskrsnica, su sve češće izborno rešenje projekatnata širom sveta. Usaglašavanje kapaciteta kružnih raskrsnica sa zahtevima za protokom su jedan od najvažnijih koraka u cilju zadovoljenja planiranih uslova odvijanja saobraćaja. Kapacitet kružnih raskrsnica može se utvrditi empirijskim metodama, prema metodologiji prihvatljivih intervala sleđenja i simulacijom. Svaka od ovih metodologija ima određena ograničenja, iz razloga što ni jedna od njih ne može samostalno i u potpunosti uzeti u obzir kompleksne procese ponašanja vozača, kao i kinematske procese koji se javljaju na ulaznim tokovima kružnih raskrsnica. Svi ovi modeli zahtevaju određene polu-empirijske ili potpuno empirijske parametre koji uzimaju u obzir lokalne uslove koji u najvećoj meri zavise od ponašanja vozača. Iako ovakva kalibracija omogućava primenjivost u sličnim uslovima odvijanja saobraćaja, često je ograničena dostupnošću podataka ili nepotpunim razumevanjem odnosa između parametara modela i kapaciteta.

1. Uvod

Kružne raskrsnice su veoma rasprostranjen oblik raskrsnica [1,2] gde vozila koja ulaze u raskrsnicu daju prednost onim vozilima koja cirkulišu jednosmerno oko centralnog ostrva (Slika 1). Efikasan dizajn kružnih raskrsnica zahteva detaljnu analizu maksimalnih kapaciteta prilaza i zone kruženja. Iz tog razloga je od 1970-ih širom sveta razvijen niz modela za izračunavanje ili procenu kapaciteta kružnih raskrsnica. Svi ovi modeli su se u najvećoj meri oslanjali na empirijske podatke zbog složenosti fizičkih procesa i procesa ponašanja koji utiču na kapacitete ulaza kružnih raskrsnica. Međutim, s obzirom na različita temeljna načela uticaj empirijskih podataka definisanih za određenu sredinu, važno je razumeti njihova ograničenja i njihovu primenjivost u svim uslovima.

U ovom radu će se razmatrati iskustva i rezultati istraživanja u svetu, kao i pregled najvažnijih modela za određivanje kapaciteta i njihovih osnovnih temeljnih metodologija, ograničenja i probleme koji nastaju prilikom njihove primene.

Na kapacitet kružnih raskrsnica utiču geometrijske karakteristike, odnosno dizajn kružnih raskrsnica.



Slika 1. Grafički pregled različitih tipova kružnih raskrsnica

2. Pregled modela

Kapacitet kružne raskrsnice se može razmatrati kao funkcija geometrije, zahteva saobraćajnih tokova i karakteristika vozača i vozila. Kao i kod ostalih delova putne i ulične mreže na kojima vladaju uslovi povremeno prekinutih saobraćajnih tokova, kapacitet kružne raskrsnice zavisi od učestanosti pojave i veličine vremenskih praznina u prioritetnom saobraćajnom toku koje su prihvatljive za vozače koji vrše sporedne manevre. Pretpostavlja se da veliki broj faktora, varijabli i mehanizama utiču na postupak prihvatanja vremenskih intervala u sporednom toku od strane vozača, samim tim i na kapacitet. Iz tog razloga

je veličina intervala sleđenja prihvatljivog za vozače iz sporednih tokova, je jedan od najvažnijih parametara koji je neophodan za utvrđivanje praktičnog kapaciteta kružnih raskrsnica. Međutim, praktična ograničenja i specifičnosti prilikom prikupljanja podataka za istraživanje, eksperimentalni dizajn i uzorkovanje daju prostor za razvoj nekoliko rešenja o modeliranju kapaciteta kružnih raskrsnica [3]. U skladu sa tim razvijeno je nekoliko održivih modela za određivanje kapaciteta kružnih raskrsnica širom sveta, koji se na osnovu svojih primarnih metodologija mogu svrstati u sledeće tri kategorije:

1. Empirijski modeli, zasnovani na odnosu geometrije i stvarnog izmerenog kapaciteta,
2. Modeli prihvatljivih intervala sleđenja, zasnovani na razumevanju ponašanja vozača i
3. Modeli mikroskopske simulacije, koji se zasnivaju na modeliranju kinematike vozila i interakcijama između njih.

Postupak projektovanja kružnih raskrsnica zahteva odabir između geometrijskog dizajna i analize kapaciteta. Geometrijski dizajn kružnih raskrsnica se obično uređuje standardima i smernicama kao što su: britanski *TD 16/07* [4], američka *AASHTO* Politika geometrijskog dizajna [5], *FHWA* smernice za kružne raskrsnice [6], australijske smernice [7], dok je ova materija u Srbiji regulisana putem priručnika iz 2012 [8]. Sve ove smernice, priručnici i standardi određuju kriterijume za geometriju, vidljivost i karakteristike poprečnog preseka kako bi se zadovoljili bezbednosni i operativni zahtevi. Geometrijski dizajn takođe mora zadovoljiti prostorna ograničenja koja mogu biti posebno zahtevna u gusto razvijenim područjima. Nakon toga sledi analiza kapaciteta pomoću jednog od modela opisanih u delu koji sledi, kako bi se proverilo da li geometrijski izgled zadovoljava kriterijume karakteristika saobraćaja. Ako se ustanovi da je kapacitet neadekvatan ili prevelik, geometrija se prilagođava i ponovo analizira radi utvrđivanja kapaciteta, a ciklus se ponavlja dok svi kriterijumi nisu zadovoljeni uz najniže ukupne troškove. Trenutno najsavremeniji alati kao što su *AutoTrack Junction* [9] i *TORUS* [10] ubrzavaju proces gotovo istovremenom analizom dizajna i kapaciteta, integrišući analizu obrasca putanje vozila i modele kapaciteta u softverima *ARCADY / Junctions 8* [11] ili *SIDRA* [12].

2.1. Empirijski modeli

Od tri temeljne metodologije za modeliranje kapaciteta kružne raskrsnice, empirijski modeli, koji se temelje na kalibraciji odnosa između geometrije i stvarnog izmerenog kapaciteta su najstariji. Empirijski regresioni modeli dobijaju se statističkim multivarijantnim regresionim analizama kako bi se prilagodili matematičkim odnosima između izmerenog ulaznog protoka (V_e), konfliktnih tokova (V_c) i ostalih nezavisnih promenljivih koje značajno utiču na kapacitet ulaza. Za odnos između V_e i V_c obično se pretpostavlja da je

linearan ($V_e = \alpha - \beta V_c$) ili eksponencijalan ($V_e = \alpha e^{-\beta V_c}$). Ulazni kapacitet može se direktno meriti iz posmatranih ulaznih tokova tokom kontinuiranog čekanja u redu na ulazu, uz beleženje konfliktnih tokova u određenim vremenskim intervalima.

2.1.1. Model linearne regresije *LR942*

Široko je prepoznato da je model *LR942* najbolji primer potpuno empirijskih modela za određivanje kapaciteta kružnih raskrsnica, a predstavlja standardni model u Engleskoj [13] i osnova softvera *ARCADY / Junctions 8* [11] i *RODEL* [14]. Dobijen je na osnovu opsežnih informacija sa terena prikupljenih 1970-ih godina, sa preko 11000 minuta podataka o kapacitetu koji su pokrivali više od 86 ulaznih tokova kružnih raskrsnica [15]. Model se zasniva na šest geometrijskih parametara: širina ulaza, ugao i poluprečnik, polovina širine prilaznog puta, spoljašnji radijus kružne raskrsnice i efektivna dužina proširenja. Geometrijska osetljivost modela *LR942* može se pripisati uključivanju rezultata eksperimenta u kojima se mogu kontrolisati geometrija i uslovi saobraćaja, omogućavajući detaljna ispitivanja uticaja geometrije proširenja na kapacitet [16]. Opsežna revizija ovog modela je sprovedena 1995. godine, kada je utvrđeno da su temeljni principi i oblik odnosa i dalje važeći [17].

2.1.2. Francuski model *Girabase*

U Francuskoj je bilo nekoliko ranih linearnih regresionih modela, uključujući modele tipa *SETRA* [18] i *CETUR* [19]. Mediteranski model *CETE* zasnovan je na *Siegloch*-ovom modelu prihvatanja vremenskih intervala između vozila [20] za kružne raskrsnice sa više traka, ali je imao ograničenu mogućnost provere [21]. Proizilazeći iz navedenog, model *Girabase* nastao od strane *CETE*, zasnovan je na podacima koji su dobijeni na osnovu 507 zasićenih intervala od pet do deset minuta na 45 kružnih raskrsnica [2]. Iako je zasnovan na *Siegloch*-ovom modelu prihvatanja vremenskih intervala između vozila, ovde je klasifikovan kao empirijski regresioni model pošto su za kalibriranje modela odabrani kritični intervali sleđenja i vremena sleđenja, a ne podaci dobijeni terenskim merenjima [21]. Putem statističke analize, kapacitet ulazne trake izražen u jedinici putnički automobili po času (PA/h) je prema [2]:

$$c_e = \left[\frac{3600}{t_f} \left(\frac{w_e}{3,5} \right)^{0,8} \right] e^{(-c_b Q_d)} \quad (1)$$

gde je:

c_e – kapacitet ulazne trake izražen u (PA/h),

t_f – vreme sleđenja (s),

w_e – širina ulaza (m),

c_b – faktor prilagođavanja za urbana/ruralna područja ,

Q_d – funkcija toka u kruženju (V_c), izlaznog toka (V_{ex}) na istom kraku kružne raskrsnice, i geometrijskih parametara.

2.1.3. Neuronske mreže

Statistički regresioni pristupi ograničavaju se potrebom za „*a priori*“ znanjem o obliku odnosa između nezavisnih i zavisnih promenljivih. Ovi se odnosi mogu teško utvrditi na osnovu analiza podataka istraživanja zbog širokog spektra izmerenih kapaciteta ulaznih tokova na kružnim raskrsnicama [22]. Veštačke neuronske mreže korištene su kao alternativa za složene i izrazito nelinearne odnose. One predstavljaju matematičke modele zasnovane na arhitekturi koja se sastoji od jednog ili više skrivenih slojeva s nekoliko veštačkih neuronskih ćelija s funkcijama aktiviranja. Koristeći veliki skup ulazno-izlaznih podataka, oni se obučavaju kroz algoritme učenja kako bi optimizirali težine i pristrasnosti. Pod uslovom da je strukturirana na odgovarajući način i da nije preterano obučena, neuronska mreža se može koristiti za kreiranje dobrih predviđanja na osnovu novih ulaznih podataka. Primer razvijen u Turskoj dao je bolje procenjene kapacitete na uzorku sastavljenom od kružnih raskrsnica u Turskoj u odnosu na modele prihvatljivih intervala sleđenja i regresione modele [23]. Međutim, uticaj pojedinačnih ulaza na kapacitet ne može se lako protumačiti iz optimiziranih težina i pristrasnosti, što može ograničiti upotrebu neuronskih mreža u projektantske svrhe, jer primena na bilo koje tipove dizajna koji nisu uključeni u izvorni skup podataka obuke može biti nepredvidiv [3].

2.1.4. Ograničenja empirijskih modela

Prema [3] empirijski modeli mapiraju odnos između ulaznih parametara i kapaciteta, ali ne dokazuju nužno uzročnost niti pružaju potpuno teorijsko razumevanje tih odnosa. Iako to ne ukida njihovu upotrebu kao predvidljivih alata, važno je razumeti temeljne principe jer mogu postojati atipični scenariji u kojima je potrebno inženjersko prosuđivanje za procenu valjanosti predviđenih kapaciteta. Ovaj problem se posebno odnosi na dizajn kružne raskrsnice, koji se treba uskladiti sa neuobičajenim ograničenjima samog mesta sa različitim veličinama ili orijentacijama krakova. Parametri uključeni u model treba da na odgovarajući način opišu sve ključne karakteristike kružne raskrsnice koje mogu uticati na kapacitet, jer bi izostavljanje bilo kojeg značajnog parametra moglo dovesti do lošijih predvidljivih performansi. Međutim, imajući u vidu da se troškovi prikupljanja podataka obično povećavaju s brojem parametara, izbor početnih parametara koji se istražuju uglavnom se zasniva na intuitivnom zaključivanju, prethodnim istraživanjima, pilot studijama i praktičnošću merenja. Konačni parametri u modelu se zatim zasnivaju na statističkoj značajnosti, što opet zavisi od eksperimentalnog dizajna i razmatranja uzorkovanja. Snažne korelacije između određenih parametara kružne raskrsnice (npr. širina ulaza i širina kružnog kolovoza) mogu uticati i na njihov statistički značaj.

Mnogi empirijski modeli su verovatno bili ograničeni veličinama uzorka korištenim za razvoj modela, koji su takođe bili ograničeni brojem dostupnih zagušenih ulaza kružne raskrsnice. Statistički značajne veze između kapaciteta i geometrijskih parametara je teško utvrditi zbog ograničenog raspona vrednosti parametara koji se mogu posmatrati. Na primer, uslovi zasićenog toka na ulazu u kružnu raskrsnicu obično odgovaraju ograničenom rasponu konfliktnih tokova tokom vršnih sati, a to je delom dovelo do nejasnoće oko odnosa V_e i V_c bili oni linearni ili nelinearni.

Prethodno navedeni problemi objašnjavaju zašto, uprkos ispitivanju niza geometrijskih parametara, nijedan drugi parametar osim parametra V_c nije utvrđen kao značajan kroz različite regresione modele koji se nalaze u objavljenoj literaturi [16,21,22,24,25]. Rezultati bilo kojeg empirijskog modela verovatno će biti pouzdani samo unutar raspona parametara u izvornoj bazi podataka koji su korišteni za njegovu izradu.

Primer je bio nesposobnost modela *LR942* da na zadovoljavajući način modelira ulaze sa jako neuravnoteženim korištenjem trake [26], koji je od tada ispravljen pomoću simulacionog modeliranja traka uz pomoć softvera *ARCADY / Junctions 8* [11]. Takođe, kapaciteti ulaza pri vrlo visokim konfliktnim tokovima verovatno uključuju ekstrapolaciju i zato mogu biti manje precizni, budući da su regresioni modeli najprikladniji za prosečne uslove u odnosu na izvorni skup podataka.

Pitanje ekstrapolacije takođe može uticati na prenosivost regresionih modela u druge zemlje zbog razlika u izgledu kružnih raskrsnica ili ponašanju vozača [22, 27,28]. Da bi se to kompenzovalo, mogla bi se koristiti kalibracija modela kroz promene koeficijentata kao što su nagibi i odsecci, ukoliko su dostupni podaci o stvarnim kapacitetima. Međutim, takva su prilagođavanja prihvatljiva samo u ograničenom obimu, jer bi velike promene izgleda raskrsnica uključivale i druge promene parametara modela koji se ne mogu jasno razumeti.

2.2. Modeli prihvatljivih intervala sleđenja

Prihvatanje vremenskih intervala između vozila je alternativni pristup modeliranju kapaciteta, zasnovan na teorijskim modelima razvijenim oko parametara dobijenih na osnovu merenja pojedinačnih intervala sleđenja između vozila u konfliktnom i ulaznom toku. Prikupljanje podataka za ovu metodu je stoga manje zavisno od izrazito zagušenih ulaza sa neprekidnim čekanjem u redu u odnosu na one za empirijske modele. Modeli prihvatanja vremenskih intervala između vozila oslanjaju se na tri varijable za određivanje ulaznog kapaciteta:

1. Kritični interval sleđenja (t_c) je minimalno vreme sleđenja između dva vozila u konfliktnom toku koje će prihvatiti vozač koji ulazi u raskrnicu. Kako se ovo vreme ne može direktno posmatrati, razvijene su mnoge metode za procenu posmatranih odbačenih i prihvaćenih vremenskih intervala između vozila, kao što su modeli koje su dali *Siegloch, Raff, Harders, Wu* i drugi [29,30];
2. Vreme sleđenja (t_f) predstavlja vreme između dva vozila koja iz reda čekanja jedno za drugim sa sporednog toka ulaze u isti vremenski interval između vozila u konfliktnom toku;
3. Raspodela vremenskih intervala između vozila u konfliktnom toku zasniva se na *Poissonovim* slučajnim dolascima ili grupisanim tokovima. *M3 distribucija* koju je dao *Cowan* 1975. godine [31] posebno ima široku primenu za modeliranje sleđenja vozila u konfliktnom toku kružnih raskrznica [32-34], ali njegovi parametri moraju biti ocenjeni na osnovu podataka dobijenih na terenu pošto se razlikuju od ponašanja vozača [35].

Na osnovu ovih varijabli može se izračunati ulazni kapacitet pomoću odgovarajućih modela, kao što su rani modeli koje su dali *Tanner* [36], *Armitage* i *McDonald* [37], te *Ashworth* i *Laurence* [38]. Međutim, *Siegloch*-ov model je najšire prihvaćen predstavljajući osnovu za *HCM*, rane nemačke modele, kao i francuski model *Girabase*. Zasniva se na negativnim eksponencijalnim sleđenjima, s kritičnim intervalom sleđenja i vremenom sleđenja dobijenim regresijom iz merenja u odgovarajućim uslovima:

$$c_e = \frac{3600}{t_f} e^{-V_c \left(t_c - \frac{t_f}{2} \right)} \quad (2)$$

gde je:

- c_e – kapacitet ulazne trake izražen u (PA/h),
- t_c – kritični interval sleđenja (s),
- t_f – vreme sleđenja (s) i
- V_c – intenzitet konfliktnog toka (PA/h).

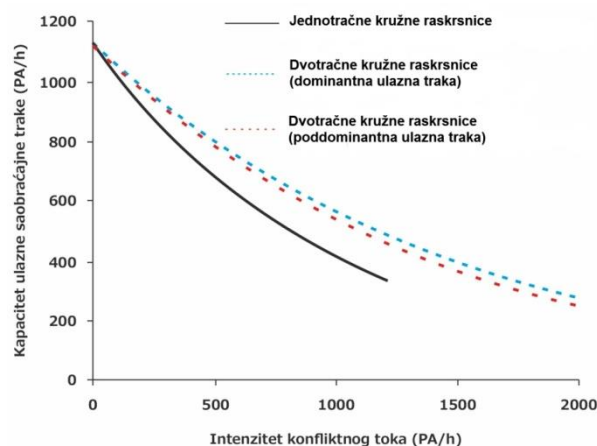
Raznolikost raspoloživih modela prihvatljivih intervala sleđenja predstavlja razliku u pretpostavljenim distribucijama sleđenja i formulacije relevantnih parametara kao što je udeo grupisanja vozila [32].

Pored toga, nekoliko modela kao što su *SIDRA*, *McDonald* i *Armitage* koriste analogiju saobraćajnih okolnosti uslovljenih zasićenjem tokova, neiskorištenim intervalima sleđenja, nasilnim oduzimanjem ili ustupanjem prvenstva prolaza [39].

Poređenja nekoliko ovih modela prihvatanja intervala sleđenja za određivanje kapaciteta koje je vršio *Akçelik* [32] pokazala su da je uglavnom postojala mala razlika u rezultatima modela, osim kod većih konfliktnih tokova gde je grupisanje vozila bilo značajnije.

2.2.1. *Highway Capacity Manual* (američki priručnik za proračun kapaciteta puteva i putnih objekata)

S obzirom na nedostatak zasićenih kružnih raskrznica u devedesetim godinama XX veka, modeliranje kapaciteta na kružnim raskrnicama u SAD-u se u početku temeljilo na modelu *LR942* sa zadanim geometrijskim parametrima iako je *Harders*-ov model prihvatljivih intervala sleđenja takođe usvojen 2000. godine. Priručnik za proračun kapaciteta puteva i putnih objekata (*Highway Capacity Manual - HCM*) se prema izdanju iz 2000. godine bazirao na zadatoj gornjoj i donjoj granici kritičnih sleđenja i vremena sleđenja [40]. Kasnija istraživanja utvrdila su ekvivalentnost između koeficijenata eksponencijalnog modela regresiranih iz podataka o kapacitetu iz 18 prilaza sa jednom trakom i 7 prilaza sa dve trake, i onih koji odgovaraju terenski izmerenom kritičnom intervalu sleđenja i vrednostima vremena sleđenja pomoću forme *Siegloch*-ovog modela [22]. Ovi nalazi su bili osnova modela datog u *HCM 2010* [41], prikazanog na Slici 2, koji se može kalibrirati s merenim parametrima prihvatanja vremenskih intervala između vozila. Međutim, neadekvatni dokazi o statistički značajnim vezama između parametara kapaciteta ili prihvatanja vremenskih intervala između vozila i drugih geometrijskih varijabli značili su da koeficijenti eksponencijalnog modela zavise samo od broja ulaznih traka i traka u kruženju, kao i od toga da li je ulazna traka leva ili desna.



Slika 2. Kapacitet kružnih raskrznica prema HCM 2010

Poslednje izdanje priručnika *HCM* iz 2016. godine [42] se u odnosu na *HCM 2010* razlikuje u pogledu preporučenih vrednosti parametara kritičnih intervala sleđenja i vremena sleđenja, dok su razlike u postavljenim modelima minimalne. Međutim, nijedno izdanje *HCM*-a u postupku proračuna kapaciteta kružnih raskrznica ne uzima u obzir uticaj nerezidentnih vozača, iako je sprovedenim merenjem u realnom saobraćajnom toku utvrđeno da sa povećanjem učešća nerezidentnih vozača dolazi do smanjenja kapaciteta kružnih raskrznica [43].

2.2.2. Nemačka istraživanja koja su sproveli *Brilon* i *Wu*

Rane studije kapaciteta kružnih raskrsnica u Nemačkoj u početku su se zasnivale na modelima prihvatljivih intervala sleđenja, ali su imale poteškoće poput definisanja glavnog toka na kružnim raskrsnicama sa više traka. Kasniji pristupi koristili su regresione analize sa ekspancijalnom formom ukupne veličine uzorka od 4898 jednodimenzionalnih intervala uzetih na kružnim raskrsnicama sa jednom i dve ulazne trake, dok je broj traka u kruženju bio od jedan do tri. To je kasnije izmenjeno u linearni oblik koji se bolje uklapa kada je veličina uzorka povećana na 7252 [44]. Međutim, linearni model je odbijen jer nije imao jasnu teorijsku osnovu, dok je postojala sumnja u njegovu valjanost u tokovima u kojima je bilo malo izmerenih vrednosti. Ovaj model je upotrebljen u Nemačkom priručniku za proračun kapaciteta iz 2001. godine, a izveden je iz principa prihvatanja vremenskih intervala između vozila i teorije redova čekanja – teorije masovnog opsluživanja. Bazira se na broju ulaznih traka (n_e) i broju saobraćajnih traka u kruženju (n_c):

$$c_e = 3600 \left(1 - \frac{\Delta V_c}{n_c 3600}\right)^{n_c} \frac{n_e}{t_f} e^{\frac{V_c}{3600} \left(t_c \frac{t_f}{2} \Delta\right)} \quad (3)$$

gde je:

- c_e – kapacitet ulazne trake izražen u (PA/h),
- V_c – intenzitet konfliktnog toka (PA/h),
- Δ – minimalni interval unutar grupe (s),
- n_c – broj traka u kruženju,
- n_e – broj ulaznih traka,
- t_c – kritični interval sleđenja (s) i
- t_f – vreme sleđenja (s).

Zadate vrednosti kritičnog intervala sleđenja (t_c), vremena sleđenja (t_f) i minimalnih intervala unutar grupe (Δ) prvobitno su dobijene na osnovu posmatranja na terenu. Prema istraživanju iz 2011. godine, za proračun kapaciteta kružnih raskrsnica je potrebno koristiti i parametar prečnika kružne raskrsnice [27], pri čemu veće kružne raskrsnice koriste ekspancijalne koeficijente modela koji se direktno regresiraju.

2.2.3. Model prihvatanja vremenskih intervala između vozila *SR45/SIDRA*

Najpoznatiji model prihvatljivih intervala sleđenja za kružne raskrsnice razvijen je u Australiji, prvobitno predstavljen u obliku modela *SR45* [34]. Koristeći podatke sa 55 ulaznih traka kružnih raskrsnica u Australiji, razvijene su regresione jednačine za kritične intervale sleđenja (t_c) i vremena sleđenja (t_f) dominantne (leva u Australiji) i pod-dominantne (desna u Australiji) ulazne trake. Dominantna traka u ulaznom toku sa više traka je definisana kao traka sa većim zahtevom za protokom i većim tokom skretanja.

Raspodela intervala sleđenja u konfliktnom toku je bila distribucija *Cowan M3*, gde se pretpostavlja da je udeo vozila (α) povezan sa fiksnim sleđenjem unutar grupe (Δ), dok su ostala vozila imala ekspancijalno raspoređena sleđenja. Smatra se da je sleđenje unutar grupe 1 sekunda za kružne kolovoze sa više traka i 2 sekunde za kružne kolovoze sa jednom trakom, dok je udeo grupisanih vozila izračunat na osnovu konfliktnog toka korišćenjem regresionih jednačina. Kapacitet ulaza za svaku traku je zatim izračunat na osnovu sledeće formule:

$$c_e = \frac{\alpha V_c e^{-\lambda(t_c - \Delta)}}{1 - e^{-\alpha t_f}} \quad (4)$$

gde je:

- c_e – kapacitet ulazne trake izražen u (PA/h),
- V_c – intenzitet konfliktnog toka (PA/h),
- Δ – minimalni interval unutar grupe (s),
- α – udeo grupisanih vozila (koeficijent izlaznog toka),
- λ – parametar skale ili stope smanjenja, a zavisi od Δ , α i V_c ,
- t_c – kritični interval sleđenja (s) i
- t_f – vreme sleđenja (s).

Model *SIDRA* [12] predstavlja dalji razvoj modela *SR45* [39], revidovane verzije empirijskog vremena sleđenja i jednačina kritičnih intervala sleđenja na osnovu *SR45*. Ostale revizije modela prihvatljivih intervala sleđenja vozila i kapaciteta uključuju dodatne faktore za podelu prioriteta, obrasce polazišno-odredišne tačke i čekanje u redu na prilazima u gornjem delu toka koji su kalibrirani (prilagođeni) iz studija zasnovanih na mikroskopskom simulatoru *Model/C*. Novije verzije *SIDRA* uključuju faktore prilagođavanja za ulazni radijus i ugao ulaska u kružni tok [45].

2.2.4. Ograničenja pristupa modela prihvatljivih intervala sleđenja

Deljenje prioriteta javlja se kada vozila u kružnom kolovozu usporavaju kako bi izbegla sudaranje sa vozilima koja sa sporednog toka prisilno ulaze u manje intervale između vozila. U ekstremnim slučajevima, poništavanje prioriteta događa se tamo gde se neka vozila u kružnom kolovozu privremeno zaustave usled pojave vozila koja sa sporednog toka prisilno ulaze u raskrsnicu ili usled pojave blokiranih izlaza. Ove pojave se javljaju u različitom obimu na mnogim kružnim raskrsnicama, posebno kada se vozila u kružnom kolovozu kreću relativno malim brzinama, sa manjim odstojanjem između vozila. Njihova pojava je u suprotnosti sa uobičajenom pretpostavkom da metode prihvatanja vremenskih intervala između vozila u distribucijama sleđenja vozila u toku u kruženju nisu pod uticajem vozila koja dolaze iz ulaznog (sporednog) toka, ali su napravljene modifikacije u distribuciji (raspodeli) sleđenja. Modeli prihvatljivih intervala sleđenja koji zavise od tokova vozila razvijeni su u cilju prevazilaženja ovog problema [34].

Jedna od kritika modela zasnovanih na prihvatljivim intervalima sleđenja je ta što oni ne određuju direktno opseg odnosa između geometrije (jedini faktor koji projektant kružne raskrsnice može kontrolisati) i kapaciteta. Umesto toga, oni zahtevaju formulisanje i kalibraciju posredničkog modela interakcije između vozila, koji se potom mora posebno povezati sa geometrijom i kapacitetom na ulazu. To je problem jer su modeli kapaciteta osetljivi na vrednosti kritičnog intervala sleđenja i vremena sleđenja, kao i na razlike u raspodeli vremena sleđenja na većim tokovima u kruženju [32]. Međutim, svojstvena varijabilnost ponašanja vozača dovodi do prilično slabih odnosa između ovih parametara i geometrije zbog uticaja drugih faktora. Uključivanjem samo geometrijskih parametara i parametara toka koji se mogu bolje pratiti, regresiona jednačina kritičnog intervala sleđenja u modelu *SR45* objasnila je manje od polovine posmatranih varijacija [34]. Za razliku od *SR45 / SIDRA*, kritični intervali sleđenja u većini drugih modela prihvatljivih intervala sleđenja uopšte nisu zavisni od geometrije kružne raskrsnice.

Takođe, postoje poteškoće u definisanju parametara na osnovu izvršenih merenja na terenu. Na primer, postoji mnogo metoda izračunavanja kritičnog intervala sleđenja, ali one ne daju kompaktne odgovore [29]. Slično tome, vreme sleđenja unutar grupe (Δ) i udeo vozila u grupi (α), koji se koriste u modelima sa grupnim vremenima sleđenja, ne mogu se direktno meriti, imajući u vidu da razlika između slobodnog kretanja vozila i vozila u koloni nije uvek jasna na osnovu njihovih vremena sleđenja. α se obično bazira na različitim funkcijama konfliktnog toka i Δ [32]. Kretanje vozila sa više traka u kruženju približno se određuje kao jedan tok, pri čemu je Δ fiksna vrednost koja zavisi od broja kružnih traka [34], ili u slučaju *SIDRA* funkcije tokova kružnih traka, obrazaca polazno-odredišne tačke i obrazaca čekanja u redu na prilazu. Ova približna određivanja opravdana su potrebom da se preciznije modeliraju veći vremenski intervali između vozila u poređenju sa manjim vremenskim intervalima, radi veće mogućnosti praćenja. Međutim, kalibriranje modela sa novim vrednostima izmerenim na terenu za drugačiji izgled raskrsnice ili okolnosti može biti bitno za proračun kapaciteta kružnih raskrsnica.

2.3. Modeli mikroskopske simulacije

Modeli mikroskopske simulacije se zasnivaju na modeliranju kretanja i interakcija pojedinačnih vozila u mreži koja se sastoji od veza i čvorova ili konektora. Kretanje vozila reguliše se prihvatanjem vremenskih intervala između vozila, praćenjem automobila, promenom vozne trake i drugim modelima, a obično se izračunavaju za svako vozilo u posebno određenom vremenskom trenutku.

Parametri ponašanja vozača kao što su kritični intervali sleđenja i procesi kao što su generisanje vozila su stohastički dodeljeni *Monte Carlo* metodama koristeći određene distribucije verovatnoće, tako da dobijena varijabilnost rezultata pokušava odražavati karakteristike saobraćaja u stvarnosti.

Na raspolaganju je nekoliko autorizovanih programa mikroskopske simulacije za modeliranje opštih saobraćajnih mreža, uključujući *S-Paramics*, *Aimsun*, *Vissim* i *SUMO*.

Jedna od prednosti modela mikroskopske simulacije jeste to što se za proučavanje parametara mogu kontrolisati zahtevi za protokom i izvođenje manevara.

Oni se tako koriste u istraživanjima kružnih raskrsnica koja zahtevaju modeliranje takvih uticaja [46], kao i za razvoj i potvrđivanje makroskopskih modela kao što je *SIDRA* [47].

Uloga simulacionih modela u modeliranju kapaciteta u kružnim raskrsnicama ilustrovana je razvojem švajcarskog modela za određivanje kapaciteta.

2.3.1. Švajcarski model Bovy-Tan

Švajcarski model za određivanje kapaciteta kružne raskrsnice zasnovan je na francuskom linearnom empirijskom modelu *CETUR* [18], sa regresionom jednačinom, sa nagibom i odsečkom kalibriranim prema podacima posmatranim na terenu u Švajcarskoj i simuliranim podacima [48]:

$$c_e = 1500 - \frac{8}{9}(\beta V_c + \alpha V_{ex}) \quad (5)$$

gde je:

c_e – kapacitet ulazne trake izražen u (PA/h),

V_c – intenzitet konfliktnog toka (PA/h),

V_{ex} – intenzitet izlaznog toka (PA/h),

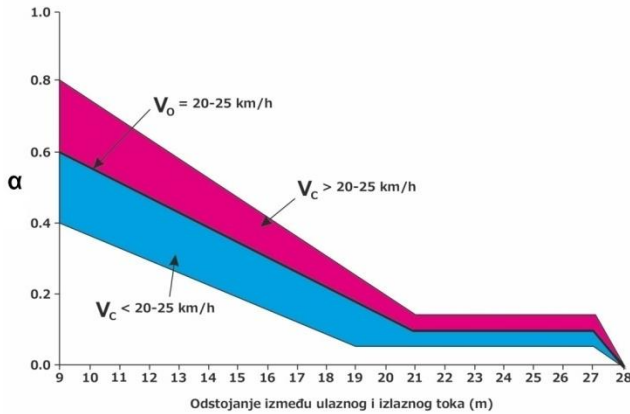
α – udeo grupisanih vozila (koeficijent izlaznog toka) i

β – koeficijent uticaja saobraćajnih traka u kruženju.

U jednačini (5), β zavisi od broja saobraćajnih traka u kruženju, a α pokušava odraziti uticaj vozila koja napuštaju kružnu raskrsnicu (V_{ex}) neposredno u gornjem delu toka (na kružnom kolovozu) pre tačke ulaska (Slika 3.).

Mikroskopskom simulacijom utvrđeno je da se α smanjuje s rastojanjem razdvajanja između tačke u kojoj se kružni i izlazni tok razilaze i tačke u kojoj se ulazni i kružni tok spajaju [48].

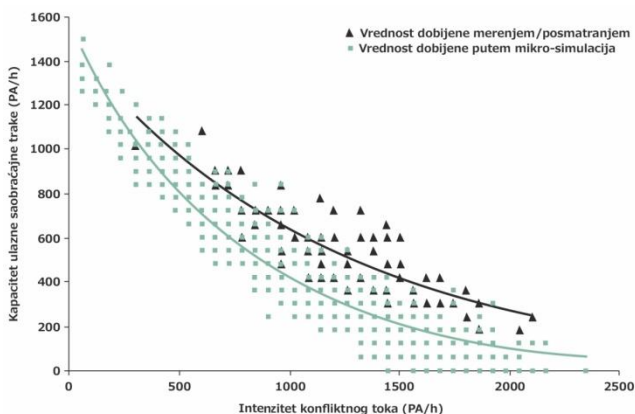
Na Slici 3. dat je grafički prikaz odnosa između koeficijenta izlaznog toka α u odnosu na odstojanje razdvajanja tokova na ulazu i izlazu istog kraka kružne raskrsnice, pri čemu na slici V_c predstavlja brzinu vozila u kružnom kolovozu.



Slika 3. Odnos između koeficijenta izlaznog toka α u odnosu na udaljenost razdvajanja između ulazne i izlazne trake istog kraka kružne raskrsnice Izvor: Simon (1991)

2.3.2. Ograničenje modela mikroskopske simulacije

Najpoznatije ograničenje mikroskopskog simulacijskog modeliranja kružnih raskrsnica je fenomen poništenja prioriteta i deljenja prioriteta. Dok se prvi slučaj može pojaviti zbog ograničenja kapaciteta drugih raskrsnica u donjem delu toka (zbog čega nije detaljnije razmatrano), važnije je pitanje deljenja prioriteta, koje se događa posebno pri velikim tokovima u kruženju. Relativno jednostavni algoritmi prihvatanja vremenskih intervala između vozila koji se koriste u uobičajenim programima mikroskopske simulacije možda ne modeliraju adekvatno uticaj podele prioriteta, što dovodi do lošijeg predviđanja kapaciteta ulaza pri velikim tokovima u kruženju, kao što je prikazano na Slici 4. Iz tog razloga će biti potrebni složeniji algoritmi prihvatanja kritičnih intervala sleđenja sa više nivoa ili alternative poput algoritma verovatnoće prihvatanja kritičnih intervala sleđenja kojeg su ustanovili *Chevallier* i *Leclercq*, kako bi se preciznije modelirali kapaciteti kružne raskrsnice u zagušenim uslovima [49].

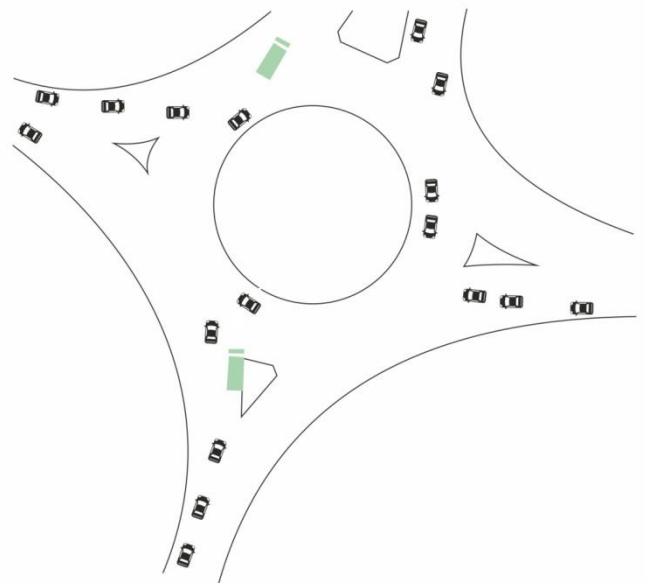


Slika 4. Poređenje posmatranih tokova jednodominantnih kapaciteta na istočnom ulazu kružne raskrsnice A33 / B3349 sa tokovima na komercijalnom modelu mikroskopske simulacije
*Izvor: Yap, Gibson, Waterson (2013), Figure 4.

Neki modeli mikroskopske simulacije takođe imaju poteškoća u preciznom modeliranju ponašanja na ulazima sa više traka. Na primer, u kružnoj raskrsnici sa dve ulazne i dve kružne trake, u teoriji ne postoji konflikt između ulazećeg vozila iz ulazne dominantne trake (desna traka gde se saobraćaj odvija desnom stranom, leva traka gde se saobraćaj odvija levom stranom) i vozila koje se kreće unutrašnjom trakom u toku u kruženju, pošto se oba vozila mogu istovremeno kretati bez međusobnih konflikata. Mreža mikroskopske simulacije koja to odražava (Slika 5, dominantna leva traka) proizvela bi veći kapacitet ulaza za ulaznu dominantnu traku jer je u sukobu samo sa vanjskom trakom u kruženju, a ne sa obe kružne trake.

Međutim, u praksi se često primećuje da vozila u dominantnoj traci ne ulaze u kružni tok kada u unutrašnjoj traci postoji vozilo u kretanju, jer obično postoji određena nesigurnost oko toga da li će to vozilo iz unutrašnje trake preći u spoljnu traku kako bi izašlo na sledećem kraku kružne raskrsnice. Veštačko umetanje konfliktne tačke u model mikroskopske simulacije moguće je rešenje kako bi se napravila replika toga, ali ne prikazuje tačno stanje kada neki vozači iz dominantne trake povremeno ulaze u raskrsnicu na prethodno opisan nesiguran način.

Na Slici 5. dat je primer modela mikroskopske simulacije postavljen tako da prikazuje automobil koji ulazi iz dominantne trake (na slici leva traka, jer je prikazana kružna raskrsnica gde se saobraćaj odvija levom stranom, u smeru kazaljke na satu) pored drugog vozila koje cirkuliše u unutrašnjoj traci, dok teretno vozilo čeka u poddominantnoj traci (na slici desna saobraćajna traka).



Slika 5. Primer modela mikroskopske simulacije
*Izvor: Yap, Gibson, Waterson (2013), Figure 5.

Rezultati modela mikroskopske simulacije zavise od velikog broja različitih parametara koji upravljaju kretanjem vozila. Mnoge od ovih parametara teško je kalibrirati (prilagođavati) na osnovu dostupnih podataka sa terena, pa mogu biti ostavljeni kao zadane vrednosti koje preporučuju programeri. Kalibracija i validacija modela su zato presudni za osiguravanje prikladnosti ovih parametara, a oni se obično izvode poređenjem rezultata modela sa podacima sa terena koristeći mere poput vremena putovanja i tokova na izlazima [50].

Najvažnija mera za određivanje kapaciteta kružnih raskrsnica jeste intenzitet konfliktnog toka. Međutim, kapacitet ulaza je osetljiv na vrednost kritičnog intervala sleđenja vozila, kao i na druge parametre kao što su: minimalno vreme sleđenja, ubrzanje vozila, vreme reakcije, brzine obavljanja manevra, dužine vozila i preglednosti [51]. Za predložene dizajne bez dostupnih podataka sa terena, potrebno je primeniti prilagođene parametre iz drugog postojećeg modela kružne raskrsnice koji je potvrđen uz pomoć podataka sa terena. Međutim, upitno je da li se takvi parametri mogu preneti direktno s jedne kružne raskrsnice na drugu, posebno kada su geometrija i tokovi različiti.

3. Razlike u metodologijama i njihov uticaj na projektna rešenja

Temeljne metodološke razlike između pristupa modeliranju takođe se moraju uzeti u obzir pri odabiru modela za analizu kapaciteta. Ne postoji jasan odgovor koji od tri pristupa modeliranju je najbolji u svim situacijama, iako će neki modeli više odgovarati određenim scenarijima u poređenju s drugima. Na primer, pošto se empirijski modeli razvijaju iz baze podataka kružnih raskrsnica unutar određenog skupa uslova, njihova će upotreba verovatno biti efikasnija i prikladnija kada je kružna raskrsnica koja se analizira slična onima unutar izvorne baze podataka u pogledu geometrije, saobraćajnih uslova, vozača, vozila i drugih karakteristika. Sa druge strane, ako su vremena sleđenja tokova u kruženju vrlo neuobičajena (npr. usled stvaranja kolone zbog uslova u gornjem delu toka ili neuobičajenih polazno-odredišnih elemenata), modeli prihvatljivih intervala sleđenja mogu biti prikladniji. Simulacioni modeli mogu se zahtevati u slučajevima ometanja ulazne trake u proširenim ulazima, s obzirom na potrebu da se izričito modelira upotreba traka, stohastička priroda procesa čekanja u redu i dolazaka, i interakcije sa proširenim dužinama.

Navodeći primer novih turbo kružnih raskrsnica gde se vozila iz poddominantne trake (leva traka za kretanje desnom stranom, desna traka za kretanje levom stranom) ukrštaju umesto da se stapaju s konfliktnim tokom, modeli koji se zasnivaju na prihvatljivim intervalima sleđenja ili mikroskopskoj simulaciji mogli bi biti prikladniji, iako bi se gotovo sigurno zahtevalo pažljivo kalibriranje parametara kritičnih intervala

sleđenja i vremena sleđenja [46]. Takva razmatranja su manje jasna kada su u pitanju razlike u populaciji vozača. Modeli prihvatljivih intervala sleđenja su verovatno osetljiviji na razlike vozača i karakteristike saobraćaja koje se ogledaju u izmenjenim kritičnim intervalima sleđenja, vremenima sleđenja i distribuciji intervala sleđenja. Međutim, deo uočenih razlika u tim vrednostima mogao bi biti posledica razlika u izgledu samih raskrsnica, a ne samo ponašanju vozača, i ne može se praviti razlika između njih osim ako se merenja ne dobiju na osnovu raskrsnica sa identičnim izgledom. Dakle, nije uvek jasno koja bi metoda u takvim okolnostima imala mogućnost prenošenja na druge tipove raskrsnica.

4. Razlike u rezultatima i uloga kalibracije

Glavna komponenta grešaka u modelu za određivanje kapaciteta proizilazi iz varijabilnosti ponašanja vozača i okolnosti u saobraćaju u procesu prihvatanja vremenskih intervala između vozila. To se odražava lošijim predviđanjima kapaciteta za raskrsnice sa prihvatanjem vremenskog intervala između vozila u odnosu na semaforisane kružne raskrsnice [52]. Procene kapaciteta *LR942* za tipično mesto imale su standardnu grešku od oko 15% ili 200 (PA/h) pri srednjim vrednostima kapaciteta na izlazu od 1300 (PA/h) [16]. Granice pouzdanosti od 95% za *SIDRA* bile su oko 105 (voz/h) za isti kapacitet na izlazima, iako treba napomenuti da je to isključilo bilo kakve greške u predviđanju kritičnog intervala sleđenja i vremena sleđenja [53] koji verovatno neće biti mali zbog prethodno navedenih razloga. Nije jasno koje su ekvivalentne greške za ostale modele, ali veličina takvih grešaka sugeriše da bi uključivanje dodatnih varijabli moglo potencijalno poboljšati njihovu sposobnost objašnjavanja svih procesa na ulazima u kružni tok.

U nekoliko studija upoređeni su predviđeni kapaciteti istih kružnih raskrsnica iz različitih modela, koristeći njihov kalibrirani oblik:

- *Özuysal* i njegovi saradnici [23] su utvrdili da je model *LR942* slabije predvidio kapacitet turskih jednostranih kružnih raskrsnica, kao i da je predložio lošija predviđanja u poređenju sa nemačkim modelom kojeg je dao *Stuwe* [54]. Suprotno tome, jednačine *SR45* nedovoljno su predviđale kritični interval sleđenja i vreme sleđenja.
- Određene studije [22] ukazuju da su svi glavni modeli precenili kapacitet ulaza 25 američkih kružnih raskrsnica, pri čemu je nemački model slabije predvidio samo jedan.
- *Polus* i *Shmueli* [55] otkrili su da je regresioni model *LR942* predvidio veće kapacitete za izraelske kružne raskrsnice u odnosu na nemačke, australijske i švajcarske modele.

- *Troutbeck* [28] je utvrdio da je nemački linearni empirijski model stvorio znatno niže predviđene kapacitete u odnosu na engleske modele, modele *Troutbeck* i *SIDRA*, zasnovane na hipotetičkoj kružnoj raskrsnici.
- *Stanek* [56] je uporedio modele *HCM 2010*, *SIDRA*, *Vissim* i *Paramics* na hipotetičkoj kružnoj raskrsnici i utvrdio razlike u kapacitetima ulaza u rasponu od oko 620 do 260 (voz/h) kod tokova u kruženju od 0 odnosno 1000 (voz/h).
- *Lenters i Rudy* [60] su istražili nekoliko metoda kalibracije linearnog modela *LR942* kako bi se uklopili u regresioni model *HCM 2010*. S obzirom na nedostatke ovih metoda, zaključili su da je najbolji pristup bila opšta ponovna kalibracija modela *LR942* za američke uslove koji može biti moguć samo uz više podataka iz posebno opterećenih američkih kružnih raskrsnica.
- U radu [22] izvršeno je kalibriranje glavnih modela sa parametrima intervala sleđenja specifičnim za dati prilaz koji su upoređivani sa izmerenim kapacitetom tokova iz 22 prilaza. Upotreba kalibriranih vrednosti specifičnih za data mesta pružila je bolje prilagođavanje nego što bi bilo moguće s prosečnim vrednostima s terena. Međutim, iako su ukupne greške modela značajno smanjene u poređenju s njihovim nekalibriranim oblicima, ustanovljeno je da su novi eksponencijalni regresioni modeli pokazali bolje performanse u poređenju s kalibriranim modelima. Dakle, regresioni modeli su izabrani kao osnova modela *HCM 2010* i *HCM 6*.

S obzirom na relativnu sličnost u dizajnim kružnih raskrsnica širom sveta, ranije navedene razlike su verovatno rezultat različitih izvora empirijskih podataka korištenih u razvoju i kalibraciji modela, posebno onih koji se odnose na ponašanja u vožnji. Na primer, američki model *HCM 2010* ima veći zadati kritični interval sleđenja i vreme sleđenja u poređenju sa drugim zemljama, što možda odražava činjenicu da su američki vozači najmanje iskusni u korištenju kružnih raskrsnica [22].

Razlike u kapacitetima između različitih zemalja pripisuju se različitim dužinama iskustva sa kružnim raskrsnicama [22,28], iako bi se te razlike vremenom mogle smanjiti jer se vozači postupno navikavaju na kružne raskrsnice [56].

Većina modela tako ima uređaj za kalibraciju, poput korekcije faktora životne sredine – *SIDRA* [45], kritičnog intervala sleđenja i vremena sleđenja u *HCM 2010* [41] i *HCM 6* [42] i parametara modela ponašanja vozila u mikroskopskim simulatorima. Međutim, postoji nekoliko problema povezanih s kalibracijom svake od tri metodologije modeliranja. 2008. godine u radu [58] vrši se poređenje nekoliko makroskopskih i mikroskopskih modela i otkriva se da kalibrirani parametri, koji se koriste u svakom modelu, verovatno zavise od samog mesta. To bi predstavljalo problem jer određivanje tih parametara zahteva podatke sa kružnih raskrsnica koje su lokalne i/ili imaju slične karakteristike, i možda neće biti dostupni kod svih predloženih vidova dizajna.

Razlike između rezultata modela i uočenih uslova mogu se umanjiti kalibracijom, a u nekoliko studija su primenjene preporučene metode kalibracije za poređenje modela u odnosu na hipotetičke ili stvarne podatke:

- *Akçelik* [59] je uporedio modele *LR942*, *HCM 2010* i *SIDRA* zasnovane na hipotetičkoj jednostranoj kružnoj raskrsnici u američkim uslovima. Razlika u predviđenim kapacitetima od kalibriranih modela bila je oko 100-220 (voz/h), osim pri malim konfliktnim tokovima. Takve razlike se povećavaju pri većim konfliktnim tokovima, s potencijalno velikim uticajima na predviđene redove čekanja i zastoje.

Ova zapažanja pokazuju da kalibracija s lokalnim ili uporednim podacima može imati samo ograničen uticaj na poboljšanje predvidljive sposobnosti modela u novim kontekstima. Ključno ograničenje metoda kalibracije je nepotpuno razumevanje načina na koji se parametri modela menjaju sa kapacitetima i ulaznim podacima u svim modelima. Iako parametri kalibracije (kao što su intervali sleđenja kod *HCM 2010* i *HCM 6*, faktor životne sredine kod *SIDRA* ili parametri pravila prioriteta modela mikrosimulacija) omogućavaju da se predviđeni kapaciteti modela usklade s posmatranim tokovima kapaciteta, nije uvek jasno na koji način se dobijene promene u rezultatima odnose na promene u koeficijentima modela ili ulaznim podacima. Na primer, nije jasno na koji način treba menjati ove parametre kalibracije kako bi reflektovali glavna prilagođavanja sa geometrijom kružne raskrsnice. Razumevanje mehanizma kalibracije i njegove povezanosti s ulaznim i izlaznim podacima modela je od suštinske važnosti da bi model mogao biti istinski prenosiv u druge kontekste ili dizajne.

5. Zaključak

U ovom radu dat je pregled tri metodologije koje čine osnovu za glavne modele pri određivanju kapaciteta kružnih raskrsnica. Empirijski modeli mapiraju odnose između kapaciteta i značajnih ulaznih varijabli, ali podležu ograničenjima statistike i uzorkovanja. Modeli prihvatljivih intervala sleđenja se zasnivaju na modelima ponašanja vozača i karakteristika saobraćaja, ali su ograničeni relativno slabim odnosima sa geometrijom kružnih raskrsnica. Stohastički modeli mikroskopske simulacije pružaju najveću fleksibilnost, ali veoma zavise od tačnog prikaza interakcija među vozilima, koje je teško ponoviti, čak i uz stvarna posmatranja.

Različita ograničenja i svojstvene aproksimacije u ovim metodologijama sprečavaju ih da u potpunosti objasne veoma složene procese pri ulasku u kružne raskrsnice. To samo po sebi nije problem, jer je glavni cilj modela za određivanje kapaciteta da obezbedi razumno tačne procene kapaciteta, a ne tačan i strog opis postupaka koji su uključeni, s obzirom na svojstvenu varijabilnost karakteristika vozača i vozila. Međutim, ovi problemi znače da se svi glavni modeli oslanjaju na delimično ili potpuno empirijske baze, koristeći podatke iz svojih zemalja za određivanje opsega odnosa između različitih parametara ili za kalibraciju prilagođenih koeficijenata. Osim što uzrokuje razlike u predviđenim kapacitetima između modela, empirijske baze takođe znače da se nijedan model ne bi trebao koristiti izvan raspona izvorne baze podataka, bez uzimanja u obzir potrebe za ažuriranjem kalibracijom, što se primenjuje u pogledu novih projektnih rešenja, lokacija ili vremenskih perioda.

Kalibracija s domaćim podacima ima ograničenu sposobnost poboljšanja prenosivosti modela, zbog nepotpunog razumevanja odnosa između parametara modela i kapaciteta. Dakle, istorijski trendovi sugerišu da će jedino preuređenje modela uključivanjem empirijskih podataka obezbediti veću tačnost. Razvoj modela za određivanje kapaciteta kružne raskrsnice je pratio sličan obrazac u mnogim zemljama, obično započinjući usvajanjem osnovnog modela razvijenog u drugih zemljama koje su imale veće iskustvo s kružnim raskrsnicama. U najčešćem slučaju kretalo se od *Harders* ili *Siegloch*-ovog modela, koji je usvojen u *HCM 2010* i *HCM 6*. Zatim se vrši kalibriranje sa bilo kojim dostupnim domaćim empirijskim podacima, kao što su kritični intervali sleđenja i vremena sleđenja za modele zasnovane na prihvatljivim intervalima sleđenja. Nakon toga sledi dalji razvoj i kalibracija sa empirijskim podacima lokalnih kružnih raskrsnica, jer su podaci o kapacitetu sada mnogo dostupniji usled pojave sve većeg broja zagušenja kružnih raskrsnica.

Models for estimating the capacity of roundabouts

Dragan Stanimirović, M.Sc. TE

The Public Institute for Urbanism, Civil Engineering and Ecology of Republic of Srpska, Banja Luka, dragan.stanimirovic@iugers.com

Vuk Bogdanović, PhD TE

University of Novi Sad, Faculty of Technical Sciences, vuk@uns.ac.rs

Abstract: Roundabouts, as a special form of unsignalised intersections, are an increasingly common choice of designers around the world. Adjusting the capacity of roundabouts with flow requirements is one of the most important steps in order to meet the planned traffic conditions. The capacity of roundabouts can be determined by empirical methods, by the methodology of gap acceptance and by simulation. Each of these methodologies has some limitations, because none of them can independently and fully take into account the complex

processes of driver behaviour, as well as the kinematic processes that occur at the entry flows of roundabouts. All of these models require certain semi-empirical or fully-empirical parameters that take into account local conditions that are largely dependent on driver behaviour. Although such calibration allows applicability in similar traffic conditions, it is often restricted by data availability or an incomplete understanding of the relationships between model parameters and capacity.

Keywords: roundabouts, capacity determination models, model transferability

Literatura

- [1] Kyte, M., Dixon, M., List, G., Flannery, A., & Rodegerdts, L. (2005). *NCHRP 3-65: Data Collection and Extraction*. Paper presented at the National Roundabout Conference, Vail, Colorado, U.S.A.
- [2] Guichet, B. (1997). Roundabouts in France: Development, Safety, Design, and Capacity. In M. Kyte (Ed.), *Proceedings of the Third International Symposium on Intersections without Traffic Signals*, (pp. 100-105). 21-23 July 1997, Portland, Oregon, U.S.A.: University of Idaho.
- [3] Yap, Y. H., Gibson, H. M., & Waterson, B. J. (2013). An International Review of Roundabout Capacity Modelling. *Transport Reviews* 33 (5), 593-616.
- [4] Department for Transport. (2007). *TD 16/07 Geometric Design of Roundabouts Design*. Manual for Roads and Bridges, Volume 6, Section 2, Part 3.
- [5] AASHTO. (2011). *A Policy on Geometric Design of Highways and Streets* (6th ed.). Washington, DC: American Association of State Highway and Transportation Officials.
- [6] Rodegerdts, L., Bansen, J., Tiesler, C., Knudsen, J., Myers, E., Johnson, M., et al. (2010). *National Cooperative Highway Research Program (NCHRP) Report 672 Roundabouts: An Informational Guide (2nd ed.)*. Washington D.C.: Transportation Research Board of the National Academies.
- [7] Austroads. (2009). *Guide to Road Design*. Sydney, Australia: Austroads.
- [8] Priručnik za projektovanje puteva u Republici Srbiji. (2012). Beograd, Republika Srbija: Javno preduzeće Putevi Srbije.
- [9] Savoy Computing Services Ltd. (2010). *AutoTrack Junctions*. Cranbrook, Kent: Savoy Computing Services Ltd.
- [10] Transoft Solutions Inc. (2012). *TORUS Roundabouts 4.0*. Richmond, BC: Transoft Solutions Inc.
- [11] TRL Software. (2012). *Junctions 8 (Version 8.0.1.305)*. Wokingham: TRL Software.
- [12] Akçelik, R. (2013). *SIDRA Intersection 6.0*. Greythorn, Victoria: Akçelik & Associates Pty Ltd.
- [13] Department for Transport. (1981). *TA 23/81 Junctions and Accesses: Determination of Size of Roundabouts and Major/Minor Junctions*. Design Manual for Roads and Bridges, Volume 6, Section 2.
- [14] Rodel Software Ltd. (2012). *RODEL. Stoke-on-Trent: Rodel Software Ltd.*
- [15] Kimber, R. M. (1980). *LR942 The traffic capacity of roundabouts*. Crowthorne: Transport and Road Research Laboratory.
- [16] Kimber, R. M., & Semmens, M. C. (1977). *SR334 A track experiment on the entry capacities of offside priority roundabouts*. Crowthorne: Transport and Road Research Laboratory.
- [17] Barnard, S. R., Hall, R. D., & McDonald, M. (1995). *Roundabout Capacity Studies: Conventional Roundabouts - Assessment of the Existing Capacity Formula*. Southampton: Transportation Research Group, University of Southampton. Unpublished report to the Transport Research Laboratory.

- [18] Louah, G. (1988). Recent French Studies on Capacity and Waiting Times at Rural Unsignalized Intersections. In W. Brilon (Ed.), *Intersections without Traffic Signals: Proceedings of an International Workshop*, (pp. 248-262). 16-18 March 1988, Bochum West Germany: Springer-Verlag.
- [19] Alphand, F., Noelle, U., & Guichet, B. (1991). Evolution of Design Rules for Urban Roundabouts in France. In W. Brilon (Ed.), *Intersections without Traffic Signals II: Proceedings of an International Workshop*, (pp. 126-140). 18-19 July 1991. Bochum Germany: Springer-Verlag.
- [20] Brilon, W. (1988). Recent Developments in Calculation Methods for Unsignalized Intersections in West Germany. In W. Brilon (Ed.), *Intersections without Traffic Signals: Proceedings of an International Workshop*, (pp. 111-153). 16-18 March 1988, Bochum West Germany: Springer-Verlag.
- [21] Louah, G. (1992). Panorama critique des modeles français de capacité des carrefours giratoires Actes du séminaire international "Giratoires 92", (pp. 213-228). 14-16 October 1992, Nantes, France: Centre d'Etudes des Transports Urbains.
- [22] Rodegerdts, L., Blogg, M., Wemple, E., Myers, E., Kyte, M., Dixon, M., et al. (2007). *National Cooperative Highway Research Program (NCHRP) Report 572: Roundabouts in the United States*. Washington, D.C.: Transportation Research Board of the National Academies.
- [23] Özuysal, M., Çalışkanelli, S. P., Tanyel, S., & Baran, T. (2009). Capacity prediction for traffic circles: applicability of ANN. *Transport*, 162 (TR4), 195-206.
- [24] Brilon, W., & Stuwe, B. (1993). Capacity and design of roundabouts in Germany. *Transportation Research Record*, 1398, 61-67.
- [25] Leemann, N., & Santel, G. (2009). Two-lane roundabouts. Paper presented at the 9th Swiss Transport Research Conference. Monte Verità, Ascona.
- [26] Chard, B. (1997). ARCADY Health Warning – Account for unequal lane usage or risk damaging public purse. *Traffic Engineering and Control*, 38(3), 122-132.
- [27] Brilon, W. (2011). Studies on Roundabouts in Germany: Lessons Learned. Paper presented at the 3rd International TRB Roundabout Conference. Carmel, Indiana.
- [28] Troutbeck, R. J. (1998). Background for HCM Section on Analysis of Performance of Roundabouts. *Transportation Research Record*, 1646, 54-62.
- [29] Brilon, W., Koenig, R., & Troutbeck, R. J. (1999). Useful estimation procedures for critical gaps. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 33, 161-186.
- [30] Wu, N. (2012). Equilibrium of Probabilities for Estimating Distribution Function of Critical Gaps at Unsignalized Intersections. *Transportation Research Record* (2286), 49-55.
- [31] Cowan, R. J. (1975). Useful headway models. *Transportation Research*, 9(6), 371-375.
- [32] Akçelik, R. (2007). A Review of Gap-Acceptance Capacity Models., (p. Paper presented at the 29th Conference of Australian Institutes of Transport Research (CAITR) 2007). University of South Australia, Adelaide.
- [33] Hagring, O. (1996). The use of the Cowan M3 distribution for modelling roundabout flow. *Traffic Engineering and Control*, 37 (5), 328-332.
- [34] Troutbeck, R. J. (1989). SR45 Evaluating the Performance of a Roundabout. Vermont South: Australian Road Research Board.
- [35] Tanyel, S., & Yayla, N. (2003). A discussion on the parameters of Cowan M3 distribution for Turkey. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 37(2), 129-143.
- [36] Tanner, J. C. (1962). A theoretical analysis of delays at an uncontrolled intersection. *Biometrika*, 49(1 and 2), 163-170.
- [37] Armitage, D. J., & McDonald, M. (1974). Roundabout capacity. *Traffic Engineering and Control*, 15 (8), 812-815.
- [38] Ashworth, R., & Laurence, C. J. (1978). A new procedure for capacity calculations at conventional roundabouts. *Institution of Civil Engineers Proceedings Part 2*, 65, 1-16.
- [39] Akçelik, R. (1994). Gap acceptance modelling by traffic signal analogy. *Traffic Engineering and Control*, 35 (9), 498-506.
- [40] *Highway Capacity Manual* (2000). Washington D. C. Transportation Research Board of The National Research Council.
- [41] *Highway Capacity Manual* (2010). Washington D. C. Transportation Research Board of The National Research Council.
- [42] *Highway Capacity Manual Edition 6* (2016). Washington D. C. Transportation Research Board, The National Research Council.
- [43] Stanimirović, D., Bogdanović, V., Davidović, S., Zavadskas, E. K., & Stević, Ž. (2019). The influence of the participation of non-resident drivers on roundabout capacity. Sustainability, 210-245.
- [44] Brilon, W., Wu, N., & Bondzio, L. (1997). Unsignalized intersections in Germany-A state of the art 1997. In M. Kyte (Ed.), *Third International Symposium on Intersections without Traffic Signals*, (pp. 61-70). 21-23 July 1997, Portland Oregon: University of Idaho.
- [45] Akçelik, R. (2011). Some common and differing aspects of alternative models for roundabout. Paper presented at the 3rd International Conference on Roundabouts. Carmel, Indiana, U.S.A.
- [46] Fortuijn, L. G. (2009). Turbo Roundabouts: Estimation of Capacity. *Transportation Research Record*, 2130, 83-92.
- [47] Akçelik, R. (1997). Lane-by-lane modelling of unequal lane use and flares at roundabouts and signalised intersections: the SIDRA solution. *Traffic Engineering and Control*, 38 (7/8), 388-399.
- [48] Tan, J.-a. (1991). A Microscopic Simulation Model of Roundabout Entry Operations. In W. Brilon (Ed.), *Intersections without Traffic Signals II: Proceedings of an International Workshop* (str. 159-176). 18-19 July 1991, Bochum Germany: Springer-Verlag.
- [49] Chevallier, E., & Leclercq, L. (2009b). Microscopic Dual-Regime Model for Single-Lane Roundabouts. *Journal of Transportation Engineering*, 135(6), 386-394.
- [50] Ryder, P. (2001). Interim Advice Note (IAN 36/01) The Use and Application of Microsimulation Traffic Models. London: Highways Agency.
- [51] Casas, J., Ferrer, J. L., Garcia, D., Peramau, J., & Torday, A. (2010). Traffic Simulation with Aimsun. In J. Barceló (Ed.), *Fundamentals of Traffic Simulation*, (pp. 173-232). New York: Springer.
- [52] Kimber, R. M. (1989). Gap-Acceptance and Empiricism in Capacity Prediction. *Transportation Science*, 23(2), 100-111.
- [53] Akçelik, R., Chung, E., & Besley, M. (1998). *Roundabouts: Capacity and performance analysis*. Vermont South, Australia: ARRB Transport Research.: Research Report ARR 321.
- [54] Stuwe, B. (1991). Capacity and Safety of Roundabouts – German results. In W. Brilon (Ed.), *Intersections without Traffic Signals II: Proceedings of an International Workshop* (str. 1-12). 16-18 March 1991, Bochum Germany: Springer-Verlag.
- [55] Polus, A., & Shmueli, S. (1997). Analysis and evaluation of the capacity of roundabouts. *Transportation Research Record*, 1572, 99-104.
- [56] Stanek, D. (2012). Comparing Roundabout Capacity Analysis Methods, or How the Selection of Analysis Method Can Affect the Design. Paper presented at the Transportation Research Board 91st Annual Meeting, Washington, D.C., U.S.A.
- [57] Johnson, M. T. (2013). Synthesis of Roundabout Geometric Capacity Measurement; Calibration and Validation to U.S. Field Measurements. Paper presented at the Transportation Research Board 92nd Annual Meeting. Washington, D.C., U.S.A.
- [58] Gagnon, C., Sadek, A. W., Touchette, A., & Smith, M. (2008). Calibration Potential of Common Analytical and Micro-simulation Roundabout Models: A New England Case Study. *Transportation Research Record*, 2071, 77-86.
- [59] Akçelik, R. (2011). Roundabouts-Comments on the SIDRA Intersection model and the UK TRL linear regression mode. Akçelik and Associates Pty Ltd.
- [60] Lenters, M., & Rudy, C. (2010). HCM Roundabout Capacity Methods and Alternative Capacity Models. *ITE Journal*, 80(7), 22-27.