

Utjecaj projektnih elemenata na prometnu uslužnost kružnih raskrižja

The impact of the design elements on the level of service of roundabouts

Sanja Šurdonja^{*}, Aleksandra Deluka-Tibljaš^{}, Sergije Babić^{***}**

^{,**,***} Građevinski fakultet Sveučilišta u Rijeci, R.Matejčić 3, Rijeka*

E-mail: [{sanja.surdonja,deluka,sergije.babic}@gradri.hr](mailto: {sanja.surdonja,deluka,sergije.babic}@gradri.hr)

Sažetak. Primjena kružnih raskrižja u gradovima nalazi svoju opravdanost na mjestima smanjene sigurnosti u odvijanju prometa (neprimjerene brzine, veći broj težih prometnih nezgoda...) ili na mjestima nezadovoljavajuće protočnosti prometa. Opravdanost primjene ovoga tipa raskrižja na mjestu klasičnih trokrakih ili četverokrakih raskrižja uvjetovana je prometnom opravdanošću koja uključuje niz kriterija: prometne kriterije, prostorne kriterije, sigurnosne kriterije, kriterije propusne moći i dr.

Prostorni uvjeti u gradu predstavljaju limitirajući faktor pri optimiranju tipa raskrižja, odnosno odabiru veličine vanjskog radijusa koji osigurava uvjete protočnosti. S obzirom na navedeno postavlja se pitanje utjecaja vanjskog radijusa kružnog raskrižja na njegovu propusnu moć. U radu su analizirani standardi pojedinih zemalja (Austrija, Engleska, Australija) za definiranje zahtjeva za geometrijskim elementima kružnih raskrižja te utjecaj primjene različitih vanjskih promjera na razinu uslužnosti ovoga tipa raskrižja. Analiza temeljena na austrijskoj metodi pokazala je da povećanje radijusa ne uvjetuje bitno povećanje kapaciteta kružnog raskrižja. Pokazalo se da veći utjecaj na kapacitet ima oblikovanje ulaza i izlaza kružnog raskrižja, odnosno razmak između točaka uliva i izliva. Veći radijus kružnog raskrižja omogućava bolje oblikovanje privoza sa stanovišta sigurnosti prometa i proвозnosti raskrižja dok primjena manjih radijusa uvjetuje tangecijalno rješavanje ulaza i izlaza što se ne može ocijeniti povoljnim bez obzira što su zadovoljeni minimalni uvjeti propisani važećim hrvatskim smjernicama.

Ključne riječi: urbana kružna raskrižja, geometrija raskrižja, kapacitet kružnih raskrižja

Abstract. Application of roundabouts in the city finds its justification in the areas of reduced safety in the traffic (inappropriate speed, the greater number of serious traffic accidents ...) or in places with unsatisfactory traffic flow. Justification of this type of intersection at the place of classic three-way or four-way intersections is conditioned by traffic justification which includes a number of criteria: traffic criteria, location criteria, safety criteria, capacity criteria, etc. The location conditions in the city represent a restricting

factor in optimizing the type of intersection, or choose the size of the inscribed radius, which ensures free flow conditions. With regard to the above, the question is how much inscribed radius of the roundabout affects its capacity. The paper analyzed the standards of some countries (Austria, England, Australia) in defining requirements for the geometric elements of roundabouts and the impact of different inscribed radius on the level of service of this type of intersection. The analysis based on the Austrian method showed that the increase in radius does not necessarily increase the capacity of a roundabout. A far greater impact has design of entrance and exit of roundabout, or achieved distance between entrance and exit points. Larger the radius of the roundabout is, the better design of entrance is, from the point of traffic safety and driving conditions in the roundabout. The result of application of smaller radius is more tangential entrance and exit that can not be evaluated positively, although they met boundary conditions of design recommended by Croatian guidelines.

Key words: urban roundabouts, intersection geometry, roundabouts capacity

1 Urbana kružna raskrižja

Kružna raskrižja nalaze svoju primjenu na mjestima smanjene sigurnosti odvijanja prometa i na mjestima gdje njihova primjena jamči bolju protočnost prometa. Opravdanost primjene ovoga tipa raskrižja na mjestu smanjene sigurnosti utemeljuje se brojem prometnih nezgoda u ovisnosti o njihovim posljedicama, brzinama koje se postižu nakon uvođenja kružnih raskrižja u odnosu na period prije rekonstrukcije te drugim mjerama koje jamče sigurnost prvenstveno pješaka i biciklista. [1]

Bolja protočnost prometa vrlo se jednostavno opravdava usporedbom razine uslužnosti na postojećem raskrižju i planiranom kružnom raskrižju vodeći računa o definiranom projektnom (planskom) razdoblju, odnosno, procijenjenim stopama rasta prometa u tom razdoblju. [2,3]

Kružna raskrižja u urbanim područjima se prema lokaciji i veličini (vanjskog radijusa) dijele na:

- mini kružna raskrižja - vanjskog radijusa od 7 do 12,50 metara,
- mala kružna raskrižja - vanjskog radijusa 11 do 17,50 metara,
- srednje velika kružna raskrižja - vanjskog radijusa od 15 do 20,00 metara. [1,3]

Okvirni (teoretski) kapacitet navedenih raskrižja (pod pretpostavkom da imaju podjednako opterećena 4 privoza) za mini kružna raskrižja iznosi 10.000 voz/dan [3], za mala raskrižja je 15.000 voz/dan, a za srednje velika 20.000 voz/dan [1].

U pravilu se nezadovoljavajuće razine uslužnosti pojavljuju na raskrižjima smještenim u centru ili uz centar grada gdje prostorni uvjeti vrlo rijetko omogućavaju primjenu kružnih raskrižja većih vanjskih radijusa i kapaciteta. Analiza 5 potencijalnih lokacija za primjenu kružnih raskrižja u Rijeci je za rezultat imala to da je na 4 od 5 lokacija predviđen vanjski radijus koji ova raskrižja svrstava u srednje velika urbana raskrižja (u rasponu radijusa od 15 do 20 m), a samo je jedna lokacija prostorno omogućavala raskrižje vanjskog radijusa 22 m, dakle u kategoriji srednje velikog (jednotračnog) izvanurbanog raskrižja.[2] U navedenom slučaju rješenjima se nastojalo, uzimajući u obzir raspoloživi prostor, predvidjeti raskrižje najvećeg radijusa i to dominantno iz razloga osiguravanja provoznosti. Postavlja se, međutim, pitanje utjecaja radijusa na kapacitet urbanih kružnih raskrižja i, posljedično, opravdanosti primjene

određene veličine radijusa na lokaciji unutar urbane sredine gdje je prostor izrazito dragocjen jer ga dijele motorizirani i nemotorizirani sudionici u prometu.

Cilj ovoga rada je prikazati metode koje se uobičajeno koriste za proračun razine uslužnosti kružnih raskrižja te analizirati na koji način te metode uzimaju u obzir geometrijske elemente kružnog raskrižja odnosno druge potrebne elemente za proračun kapaciteta kružnog raskrižja. Prema austrijskoj metodi, koja je preporučena u hrvatskim smjernicama [1], za unaprijed definirane uvjete izvedbe kružnih raskrižja, analizirano je da li povećanje radijusa (unutar kategorije srednje velikih urbanih kružnih raskrižja tj, u rasponu od 15 do 20 m) dovodi do povećanja kapaciteta raskrižja i koliko, te koji elementi oblikovanja raskrižja dominantno utječu na njegov kapacitet.

Treba napomenuti da u ovom radu nisu analizirani ostali bitni elementi vezani za primjenu kružnih raskrižja u gradovima, a to je prisustvo intenzivnijih pješačkih i biciklističkih tokova u zoni raskrižja te proвозnost mjerodavnih vozila (primjerice autobusa) kroz raskrižje koje je za cjelovitu analizu neophodno provjeriti.

2 Metode za proračun kapaciteta kružnog raskrižja

Veličina kružnog raskrižja prvenstveno ovisi o prometnim i prostornim uvjetima, što direktno utječe i na propusnu moć kružnog raskrižja.

Propusna moć kružnog raskrižja C određuje koliko vozila može proći kroz kružno raskrižje u određenoj vremenskoj jedinici. Dobije se kao zbroj propusnosti svih ulaza Q_{Ei} u kružno raskrižje:

$$C = \sum_1^n Q_{Ei} \quad [EOA/h] \quad (1)$$

gdje je n broj ulaza.

Propusnost ulaza Q_E određuje koliko vozila može ući u kružno raskrižje na jednom ulazu u vremenskoj jedinici:

$Q_E = f(Q_C, \text{geometrije raskrižja ili ponašanja vozača})$

gdje je Q_C prometno opterećenje u kružnom toku. [3]

Metode koje se koriste za proračun kapaciteta kružnog raskrižja uobičajeno se dijele na dvije vrste:

- metode temeljene na linearnoj regresiji (austrijska metoda, britanska linearna regresijska metoda, švicarska metoda i sl.) i
- metode koje se temelje na graničnim vremenskim intervalima slijeda vozila (australska metoda, metoda po Ning Wu i dr.).

Prve modele bazirane na graničnim vremenskim intervalima slijeda vozila razvijaju Trutbeck (1989.) i Wu (1997.), dok je temelje za linearne regresijske modele postavio Kimber (1980.), a Stuwe (1992.) je razradio postupak kojim uvodi geometrijske parametre raskrižja u proračun. [4]

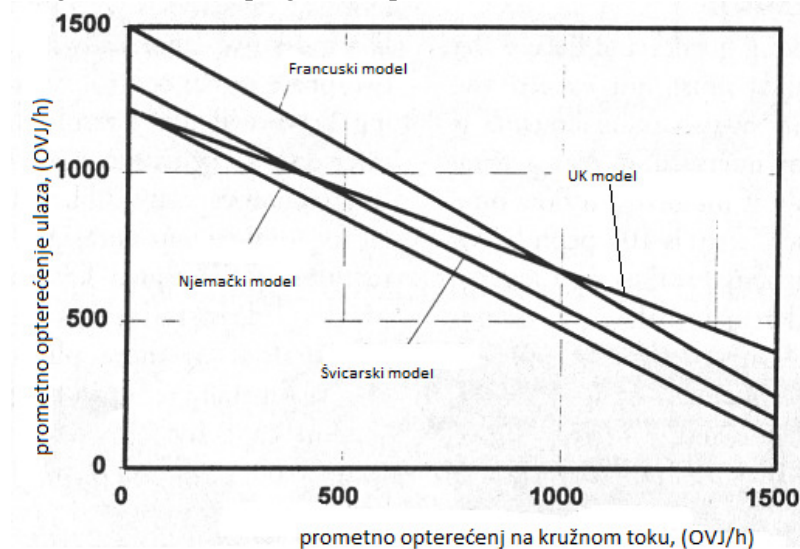
Slika 1 prikazuje različite metode (modele) razvijene u Engleskoj, Australiji, Švicarskoj i Njemačkoj. Engleski i australski modeli uključuju vanjski promjer "D" dok njemački i švicarski modeli ne ovise o promjeru i stoga, mogu biti usvojeni samo za opće planiranje, a ne i za detaljne izvedbene projekte. [5]

Usporedba različitih metoda pri proračunu kapaciteta kružnog raskrižja pokazala je da se rezultati dosta razlikuju zbog upotrebe različitih vrijednosti koeficijenata te zbog različitog ponašanja vozača u državama. Ono što je zajedničko svim metodama je da je

propusna moć kružnog raskrižja u svim državama uvijek veća od propusne moći klasičnog nesemaforiziranog raskrižja iste veličine. [3]

Hrvatske smjernice za projektiranje raskrižja kružnog oblika [1], za proračun propusne moći preporučuju dvije metode: austrijsku i australsku.

Austrijska metoda proračuna propusne moći kružnog raskrižja koristi se obično kod malih i srednjih raskrižja dok se za velika kružna raskrižja koristi nelinearna australska metoda. Zbog složenosti postupka proračuna kod australske metode preporučuje se korištenje nekog od računalnih programa (npr.SIDRA).[1]

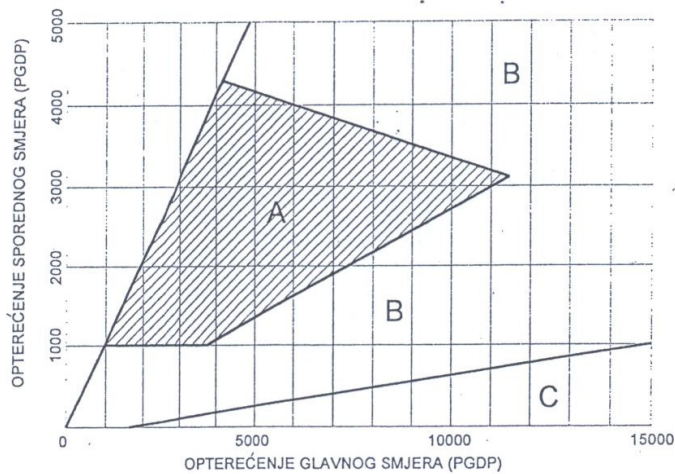


Slika 1: Usporedba ulaznog kapaciteta za jednostručna kružna raskrižja prema različitim metodama korištenim u različitim državama (Brilon i Vandehey, 1998) [5]

2.1 Metode temeljene na linearnoj regresiji

2.1.1 Austrijska metoda[1]

Austrijska metoda na samom početku postupka provjere propusne moći sugerira procjenu opravdanosti izvedbe kružnog raskrižja na određenoj lokaciji i u određenim prometnim uvjetima (Slika 2). Ukoliko se opterećenost glavnog i sporednog smjera sijeku u području zone A, preporučljiva je izvedba kružnog raskrižja. Ukoliko se sijeku u području zone B potrebno je provjeriti primjerenost izvedbe ostalih raskrižja, a ukoliko se sijeku u području zone C preporučljiva je izvedba klasičnog raskrižja.



Slika 2: Primjerenost izvedbe kružnog raskrižja [1]

Propusna moć kružnog raskrižja ovisi o propusnoj moći ulaza u kružni tok, koji se određuje prema slijedećem izrazu:

$$L = 1500 - \left[\frac{8}{9} (b \cdot M_K + a \cdot M_A) \right] \quad [EOA/h] \quad (2)$$

gdje je:

L – propusna moć ulaza [EOA/h]

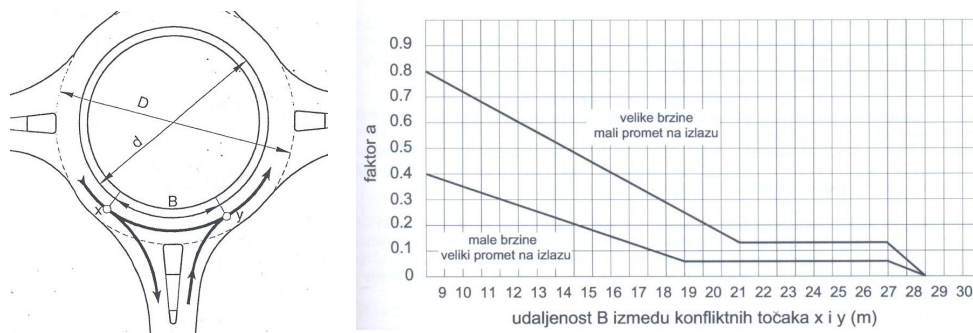
M_K – prometno opterećenje u kružnom toku, [EOA/h]

M_A – prometno opterećenje izlaza, [EOA/h]

a – koeficijent geometrije ulaza (određuje se prema Slici 3)

b – koeficijent broja voznih traka u kružnom raskrižju.

Koeficijent a ovisi o udaljenosti B konfliktnih točaka uliva i izliva vozila (Slika 3).



Slika 3: Mjerodavna udaljenost B između konfliktnih točaka x i y potrebna za određivanje koeficijenta a [1]

Udaljenost B računa se prema izrazu za slučaj jednotračnog ulaza u kružno raskrižje (Slika 4) [1]:

$$B = \frac{(D - FB) \cdot \pi \cdot \varphi}{180} \quad [m] \quad (3)$$

gdje je:

- D - vanjski promjer kružnog raskrižja [m]
 FB - širina kružnog voznog traka [m]
 φ - polovica središnjeg kuta između konfliktnih točaka [°].
 Središnji kut φ ovisi o geometrijskoj izvedbi raskrižja

$$\sin \varphi = \frac{B'}{D - FB} \quad [rad] \quad (4)$$

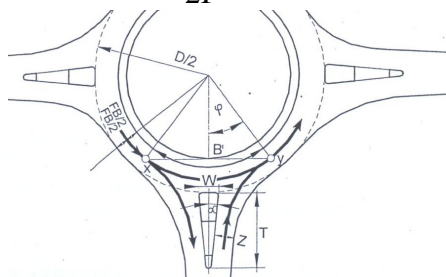
pri čemu je B'

$$B' = \frac{(T + FB/2 + Z/2 \cdot \sin \alpha) \cdot W}{T} \quad [m] \quad (5)$$

gdje je:

- T - duljina razdjelnog otoka [m]
 W - širina razdjelnog otoka [m]
 Z - širina ulaza [m]
 α - polovica oštrog kuta razdjelnog otoka [°]

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{W}{2T} \quad [rad] \quad (6)$$



Slika 4: Geometrijski elementi potrebni za određivanje udaljenosti B između konfliktnih točaka [1]

Koeficijent b izražava utjecaj broja voznih traka u kružnom kolniku (u zagradama su vrijednosti istog koeficijenta koje se koriste u Švicarskoj i Austriji):

jednotračna $b=0,90-1,00$ (0,90-1,00)

dvotračna $b=0,80-0,84$ (0,60-0,80).

Nakon određivanja propusne moći ulaza određuje se stupanj opterećenosti svakog ulaza prema izrazu:

$$A = \frac{c \cdot M_E}{L} \cdot 100 \quad [\%] \quad (7)$$

gdje je:

- A - stupanj opterećenosti [%]
 M_E - prometno opterećenje ulaza [EOA/h]
 L - propusna moć ulaza [EOA/h]
 c - koeficijent broja prometnih traka na ulazu u raskrižje.

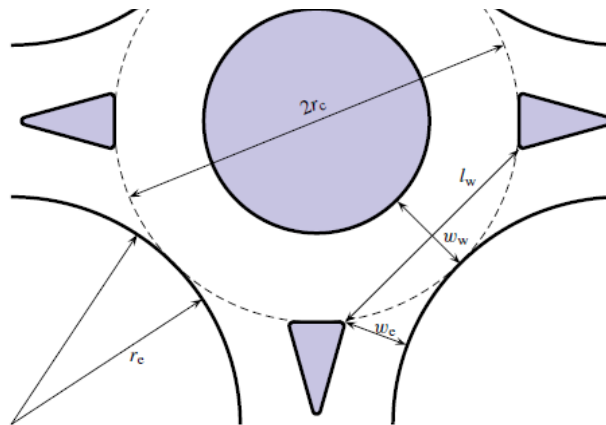
Koeficijent c ovisi o broju prometnih traka na ulazu (u zagradama su vrijednosti istog koeficijenta koje se koriste u Švicarskoj i Austriji):

jednotračni ulaz $c=0,90-1,00$ (1,00)
 dvotračni ulaz $c=0,50-0,65$ (0,60-0,70).

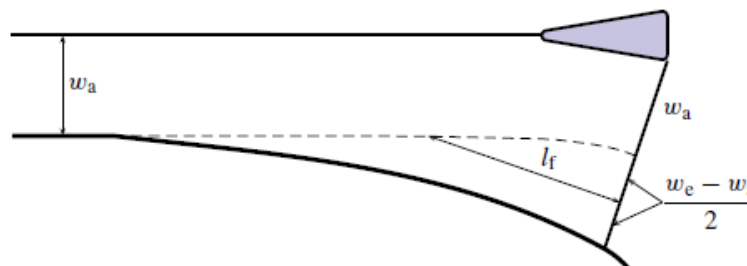
Stupanj opterećenosti ulaza ne smije prelaziti 90% maksimalnog satnog prometnog opterećenja [1].

2.1.2 Britanska linearna regresijska metoda[5,6]

Kod ove metode, proračun kapaciteta kružnog raskrižja temelji se na odnosu između prometnog opterećenja ulaza i raznih geometrijskih parametara. Na primjer, kapacitet svakog privoza kružnom raskrižju linearno se smanjuje s povećanjem ulaznog kuta. Ostali geometrijski parametri koje ova metoda uzima u obzir su: širina ulaza, širina ulaznog traka pred kružnim raskrižjem, ulazni radijus i vanjski promjer. Računalni programi koji se koriste za izračunavanje kapaciteta kružnog raskrižja koji se temelje na ovoj metodi su ARCADY (Assessment of Roundabout CAPacity and DelaY) i RODEL (ROundabout DELay). [5]



Slika 5: Geometrijski parametri potrebni za proračun prema britanskoj metodi [6]



Slika 6: Geometrijski parametri ulaza u kružno raskrižje, potrebni za proračun prema britanskoj metodi [6]

Kapacitet ulaza računa se prema geometrijskim parametrima prikazanim na Slikama 5 i 6, prema izrazu [6]:

$$C_p = \begin{cases} a_1(a_2 - a_3q_M), & \text{ako je } a_3q_M \leq a_2 \\ 0, & \text{ako je } a_3q_M > a_2 \end{cases} \quad [\text{voz/h}] \quad (8)$$

gdje je:

$$a_1 = 1 - 0.00347(\phi_c - 30) - 0.978(r_c^{-1} - 0.05) \quad (9)$$

$$a_2 = 303a_4 \quad (10)$$

$$a_3 = 0.210a_5 \quad (11)$$

$$a_4 = w_a + \frac{w_e - w_a}{1 + 2a_6} \quad (12)$$

$$a_5 = 1 + \frac{0.5}{1 + e^{(2r_c - 60)/10}} \quad (13)$$

$$a_6 = \frac{w_e - w_a}{l_f} \quad (14)$$

gdje je:

q_M	- prometno opterećenje na kružnom toku [voz/h],
ϕ_C	- ulazni kut [°],
r_C	- vanjski polumjer kružnog raskrižja [m],
w_a	- širina voznog traka [m],
w_e	- proširenje voznog traka na ulazu [m],
l_f	- duljina proširenja ulaza [m].

2.2 Metode temeljene na graničnim vremenskim intervalima slijeda vozila

2.2.1 Australaska metoda[3]

Australske smjernice za oblikovanje kružnih raskrižja koje je izdao National Association of Road Authorities (NAASRA) za proračun kapaciteta koriste Australsku metodu.

Kod ove metode, kružno raskrižje se analizira kao niz uzastopnih trokrakih T-raskrižja na jednosmjernoj cesti, na kojoj je glavni prometni tok koji ima prednost, dok se sporedni tok, izborom prihvatljivih udaljenosti između vozila na glavnom prometnom smjeru, uključuje u glavni prometni tok. [3]

Kapacitet kružnog raskrižja izračunava se primjenom kritične vremenske praznine između vozila. Pretpostavka je da mora postojati minimalni vremenski interval između dva vozila u prometnom opterećenju kružnog toka prije nego se vozilo sa privoza (sporednog smjera) uključi u tok. Što je veći taj vremenski interval, više od jednog vozila se može uključiti u kružni tok. Kapacitet se izračunava za svaki privoz zasebno kao funkcija prometnog opterećenja kružnog toka, kritičnog vremenskog intervala, te vremenskog interval između vozila koja se uključuju u kružno raskrižje ("follow-up vrijeme"). [3,5]

Temelj ove metode proizlazi iz spoznaje da 5 sekundi vremenske praznine između vozila kružnog toka nudi 85% mogućnosti iskorištenja (uporabe).

SIDRA (Signalized and unsignalized Intersection Design and Research Aid) je računalni program koji se temelji na ovoj metodi prilikom proračuna kapaciteta kružnog raskrižja. [5]

Kapacite uliva računa se prema:

$$q_{e,\max} = \frac{q_t(1 - \Delta q_t)e^{-q_t(T-A)}}{1 - e^{-q_e T_0}} \quad [EOA/h] \quad (15)$$

gdje je:

- q_t - prometno opterećenje u kružnom toku [EOA/h];
- $q_{e,\max}$ - kapacitet uliva [EOA/h];
- T - kritična vremenska praznina između vozila [s];
- T_0 - vremenski interval između dva uzastopna vozila, koja iz kolone koja stoji ulaze u vremensku prazninu između vozila na glavnom prometnom smjeru (kružnom toku) [s];
- Δ - minimalni vremenski interval između uzastopnih vozila na sporednom smjeru (privozu kružnom toku) [s]; [3]

Metoda nudi dodatno i proračun zastoja kolone na privozu (sporednom smjeru) za što je potrebno odrediti prihvatljive vremenske praznine između vozila.

Propusnost pojedinih prometnih trakova C dobije se iz izraza:

$$C = \frac{3600(1 - \theta)q_c e^{-\lambda(t_a - \tau)}}{e^{-\lambda t_f}} \quad [EOA/h] \quad (16)$$

gdje je:

- C - propusnost pojedinog ulaznog traka [EOA/h]
- θ - postotak vozila u kružnom toku koja voze u redu [%]
- q_c - prometno opterećenje u kružnom toku [EOA/h]
- t_a - kritična vremenska praznina [s]
- t_f - vrijeme slijeđenja ("follow up") [s]
- τ - minimalno vrijeme slijeđenja u kružnom toku [s]

pri čemu je:

$$\lambda = \frac{(1 - \theta)q_c}{1 - \theta q_c} \quad [s] \quad (17)$$

Stupanj zasićenja dobije se iz odnosa ulaznog prometnog toka i propusne moći tog ulaza:

$$\chi = \frac{Q_m}{C} \quad (18)$$

gdje je:

- Q_m - ulazni prometni tok [EOA/h]
- C - propusnost ulaza [EOA/h].

Preporuka metode je da stupanj zasićenja kružnog raskrižja na kraju planskog razdoblja ne premašuje 0,8 do 0,9. [3]

2.2.2 Metoda po Ning Wu[7]

Ning Wu 1997.godine razvija formula za koju je karakteristično da uzima u obzir broj prometnih trakova na ulazu u kružno raskrižje te u kružnom kolniku.[7]

Kapacitet ulaza računa se prema izrazu [7]:

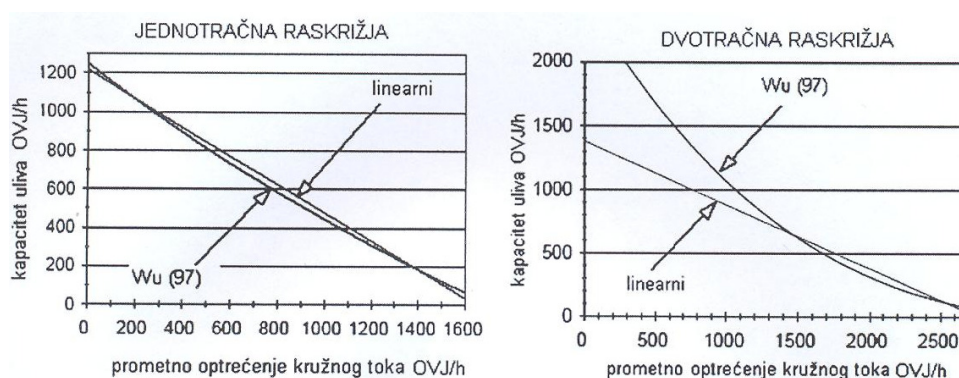
$$q_{u,\max} = \left[1 - \frac{\tau \cdot q_k}{n_n} \right]^{n_k} \cdot \frac{n_u}{t_{sl.}} \cdot \exp[-q_k \cdot (t_0 - \tau)] \quad [voz/h] \quad (19)$$

gdje je:

- $q_{u,max}$ - kapacitet ulaza u kružno raskrižje [voz/h]
- q_k - intezitet vozila u kružnom kolniku [voz/h]
- n_u - broj prometnih trakova na ulazu
- n_k - broj prometnih trakova u kružnom kolniku,

$$t_0 = t_g - \frac{t_{sl.}}{2} \quad [s] \quad (20)$$

- t_g - granična vremenska praznina u slijedu vozila [s]
- $t_{sl.}$ - vremenska praznina između vozila u slijedu [s]
- τ - minimalna vremenska praznina između vozila u kružnom toku [s].



Slika 7: Kapacitet kružnog raskrižja prema različitim metodama [4]

Metoda po Ning Wu dala je slične rezultate kao i metode temeljene na linearnoj regresiji u slučaju jednostranog kružnog toka s jednostranim privozom, dok kod dvotračnih raskrižja rezultati se razlikuju (Slika 7).

3 Utjecaj brzine vozila i geometrijskih elemenata kružnog raskrižja na proračun kapacitet raskrižja

3.1 Kapacitet i brzina kretanja vozila u kružnom raskrižju

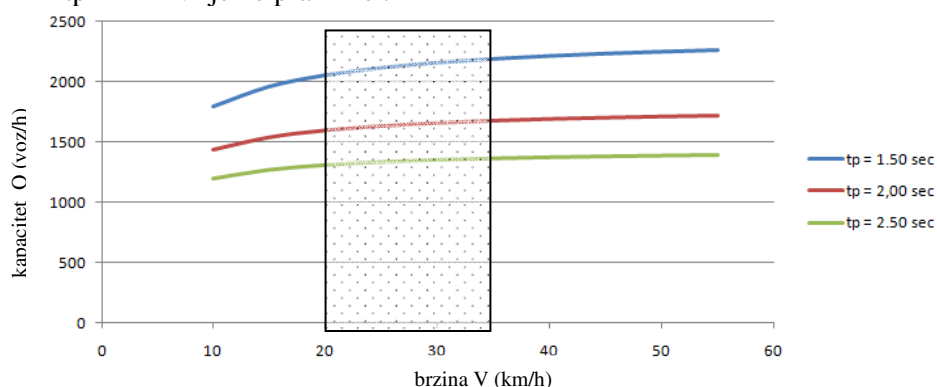
Opterećenje prometnog traka blisko kapacitetu ostvaruje se za homogene i neprekinute prometne tokove i povećava se povećanjem brzine kretanja vozila. Na kružnim raskrižjima ostvaruju se relativno niske brzine kretanja. Očekivane brzine kretanja kreću se u granicama od 25 km/h kod mini kružnih raskrižja do 40 km/h kod srednje velikih kružnih raskrižja [1,3]. Homogenost prometnog toka se u proračunima kapaciteta uvodi kroz svodjenje različitih kategorija vozila na određeni broj Ekvivalentnih Osobnih Automobila (EOA). Gustoća prometnog toka (EOA/km) ovisna je o potrebnom odnosno ostvarenom razmaku između vozila koji se povećava pri većim brzinama kretanja vozila. Maksimalna gustoća prometnog toka se pri tome ostvaruje uz minimalni razmak vozila u koloni koji treba odgovarati očekivanom zaustavnom putu. Zaustavni put vozila određen je vremenom reakcije vozača i vremenom zaustavljanja vozila koje se pri malim brzinama kreće u granicama od $t_z = 1$ sec ($v=25$ km/h, $\mu=0.6$) do $t_z = 2$ sec ($v=40$ km/h, $\mu=0.6$). Vrijeme reakcije vozača ovisno je ne samo o

spособnostima vozača već i o karakteru okoline koja izaziva reakciju i kreće se u granicama $t_r=1.26$ sec do $t_r = 3.6$ sec (odgovara populaciji 90% vozača) [8]. Za vozače su kružna raskrižja područja posebne pažnje i usredotočenosti na okolnosti u odvijanju prometa pa se može reći da se očekivana vremena reakcije vozača nalaze bliže donjoj granici navednih vrijednosti čemu odgovara i preporučeno vrijeme reakcije vozača od $t_r = 1.5$ sec. Vrijeme reakcije t_r i vrijeme zaustavljanja vozila t_p zajedno predstavljaju poželjno vrijeme prolaska dva uzastopna vozila odnosno “vrijeme praznine” t_p prometnog toka. Na Slici 8 prikazan je dijagram promjene kapaciteta jednog prometnog traka u ovisnosti o brzini kretanja vozila a za različita vremena t_p prema izrazu :

$$Q = \frac{v * 3600}{Lv + (tp * v)} \quad [voz/h] \quad (21)$$

gdje je :

- Q - kapacitet prometnog profila ceste [voz/h],
- v - brzina kretanja vozila [m/s],
- Lv - duljina vozila i
- tp - vrijeme praznine .



Slika 8: Teoretski kapacitet prometnog toka u ovisnosti o brzini vozila

Iz Slike 8 uočljivo je da na kapacitet prometnog traka daleko veći utjecaj ima razmak vozila odnosno “vrijeme praznine” nego brzina kretanja vozila. Nadalje ako se promatra realno područje brzine kretanja vozila (25 do 40 km/h) može se reći da je utjecaj promjene radijusa kružnog raskrižja odnosno brzine kretanja vozila linearan i u granicama 5 do 10%. Realna prometna opterećenja kružnih raskrižja su često i veća od ovih prikazanih na Slici 8 što upućuje na zaključak da vozači u kružnom prometnom toku realno ne ostvaruju minimalno potrebne razmake vozila koji bi spriječili nalijetanje vozila odnosno da se u proračunima kapaciteta mogu usvojiti i niže vrijednosti vremena reakcije vozača. Ponašanje vozača u kružnom prometnom toku je predmet brojnih istraživanja kojima se nastoje utvrditi precizniji parametri za proračune kapaciteta i propusne moći raskrižja.[9]

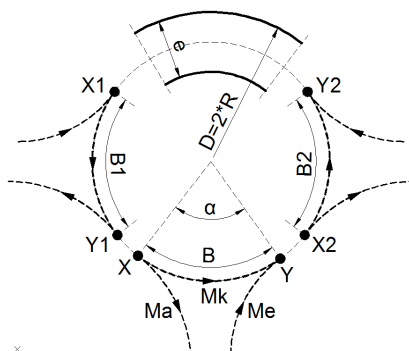
3.2 Radijus vanjskog ruba kolnika i kapacitet kružnog raskrižja

Oblikovni elementi privoza kružnom raskrižju definirani su graničnim vrijednostima rubnih radijusa prema preporukama Smjernica [1]. Kut ulazne putanje u kružno raskrižje

je pri tome kriterij uspješnosti oblikovanja privoza. Odstupanja od preporučenih vrijednosti mogu biti uzrok smanjenja razine sigurnosti prometa.

Za određivanje propusne moći kružnog raskrižja je prema hrvatskim smjernicama mjerodavna propusna moć ulaza u kružni tok. Proračun se vrši austrijskom metodom uz neznatno korigirane faktore primjenjive u našim prilikama, kako je detaljno opisano u ovom radu.

Kapacitet odnosno propusna moć ulaza L određen je izrazom (2). Pored prometnog opterećenja na izlazu privoza Ma i u kružnom toku neposredno ispred ulaza Mk u izrazu se koristi koeficijent a – koeficijent geometrije ulaza. Za određivanje vrijednosti koeficijenta a koristi se empirijski određen dijagram (Slika 3) ovisnosti koeficijenta a o udaljenosti B točaka uliva i izliva prometnih tokova privoza u odnosu na kružni tok prometa (konfliktne točke x i y). Koeficijent geometrije ulaza a prema Slici 3 može imati vrijednosti od $a=0.08$ za male brzine i veliki promet na izlazu, do $a=0.8$ za veće brzine i mali promet na izlazu. Pri istom prometnom opterećenju Mk i Ma propusna moć ulaza biti će veća uz manju vrijednost faktora a . Pri tome, prema Slici 3, vrijednosti koeficijenta a u granicama 0.08 do 0.13 odgovaraju udaljenosti konfliktnih točaka B većim od 21 m. Na Slici 9 prikazane su putanje kretanja vozila u kružnom raskrižju s položajem konfliktnih točaka X i Y .



Slika 9: Putanje vozila u kružnom raskrižju s položajem konfliktnih točaka

Maksimalan razmak konfliktnih točaka B privoza postiže se poklapanjem izlazne točke X s ulaznom točkom $Y1$ prethodnog privoza i ulazne točke Y s izlaznom točkom $X2$ narednog privoza. Pri tome je zanemareno područje preplitanja prometnih tokova ulaza, izlaza i kružnog toka što prema navedenoj metodi proračuna ne utječe na kapacitet privoza. Udaljenost konfliktnih točaka B na putanji vozila u kružnom toku tada je :

$$B = \frac{(D - u) * \pi}{N} \quad [m] \quad (22)$$

gdje je :

- N - broj privoza kružnom raskrižju,
 - u - širina kolnika kružnog toka prometa i
 - $D = 2R$ - promjer vanjskog ruba kružnog kolnika
- Promjer vanjskog ruba kolnika tada je :

$$D = u + \frac{B * N}{\pi} \quad [m] \quad (23)$$

Pod navedenim uvjetima uz usvojenu vrijednost $u = 6.0$ m (jednotračan kolnik) poželjan radijus vanjskog ruba kolnika odnosno radijus kod kojeg je moguće ostvariti poželjan razmak konfliktnih točaka $B > 21$ m bio bi :

za trokrako raskrižje : $R > 13.0$ m

za četverokrako raskrižje : $R > 16.40$ m

Iz navednog bi se dalo zaključiti da je kod srednje velikih (urbanih) kružnih raskrižja povoljnim oblikovanjem ulaza i izlaza moguće ostvariti poželjnu vrijednost razmaka konfliktnih točaka $B > 21$ m primjenom i minimalno preporučenih vrijednosti radijusa vanjskog ruba kolnika.

3.3 Oblikovanje privoza i radijus vanjskog ruba kolnika

Oblikovni elementi privoza kružnom raskrižju opterećenog teškim teretnim vozilima definirani su graničnim vrijednostima rubnih radijusa prema preporukama hrvatskih smjernica kako je prikazano u Tabeli 1. [1].

Tabela 1: Vanjski radijus kružnog raskrižja ovisno o polumjeru središnjeg otoka [1]

Vanjski polumjer R_V [m]	Širina kružnog voznog traka $R_V - R_U$ [m]	Uvjeti			
		Širina voznog traka na ulazu [m]	Širina voznog traka na izlazu [m]	Veličina ulaznog polumjera R_{UL} [m]	Veličina izlaznog polumjera R_{IZ} [m]
13,00 - 17,50	6,50 - 8,00	3,25 - 3,50	3,50 - 3,75	10,00 - 12,00	12,00 - 14,00
17,50 - 22,50	5,75 - 6,50	3,50 - 4,00	3,50 - 4,25	12,00 - 14,00	14,00 - 16,00

Na prometno opterećenim gradskim raskrižjima gotovo redovito nailazimo i na komponentu teretnog prometa ili zglobna BUS vozila javnog prijevoza tako da se izbor elementa raskrižja prema Tabeli 1 pokazao primjerenim u realnim uvjetima odvijanja prometa. U radu su razmatrana raskrižja s vanjskim radijusima $R = 15.0$ do $R = 20.0$ m koja se prema veličini radijusa svrstavaju u srednje velika jednotačna kružna raskrižja. Preporučene vrijednosti ulaznih i izlaznih radijusa kreću se u granicama $10.0 \text{ m} < R_{ul} < 14.0 \text{ m}$ odnosno $12.0 \text{ m} < R_{iz} < 16.0 \text{ m}$. Širina kružnog kolnika primjerena je potrebama provoznosti i kreće se u granicama $5.75 \text{ m} < u < 8.00 \text{ m}$.

Usvojene su za oblikovanje nepovoljnije granične vrijednosti primjenjivih elemenata: minimalni elementi : $R = 15.0 \text{ m}$, $R_{ul} = 10.0 \text{ m}$, $R_{iz} = 12.0 \text{ m}$, $u = 8.0 \text{ m}$, maksimalni elementi : $R = 20.0 \text{ m}$, $R_{ul} = 12.0 \text{ m}$, $R_{iz} = 14.0 \text{ m}$, $u = 6.5 \text{ m}$.

Pri tome putanje kretanja vozila imaju nešto drugačije vrijednosti ovisno o širini kolnika tako da je za konstrukciju elemenata kružnog raskrižja usvojeno:

minimalni elementi putanje: $R = 11.0 \text{ m}$, $R_{ul} = 11.75 \text{ m}$, $R_{iz} = 13.75 \text{ m}$

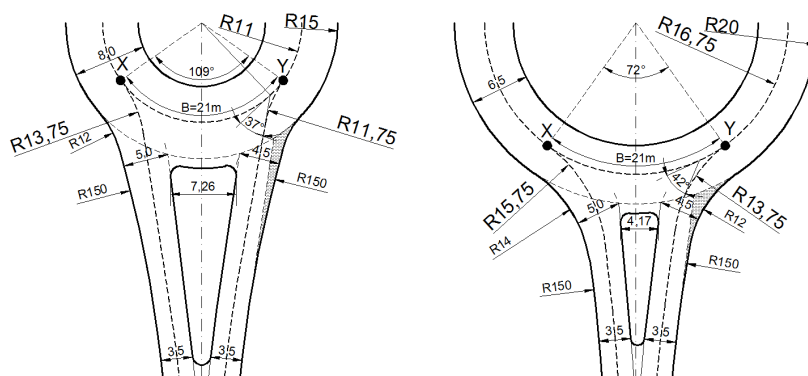
maksimalni elementi putanje: $R = 16.75 \text{ m}$, $R_{ul} = 13.75 \text{ m}$, $R_{iz} = 15.75 \text{ m}$.

Konstrukcija privoza prema navedenim vrijednostima uz poštivanje poželjnog razmaka konfliktnih točaka $B > 21$ m prikazana je na Slici 10. Osnova za konstrukciju

privoza su putanje kretanja vozila koje su načelno definirane kao središnjice prometnih traka.

Kut ulaza je pri ovako definiranim elementima veći od optimalnog iako je prvi dojam tangecijalnost privoza. Širina razdjelnog otoka na vrhu privoza se kod manjeg vanjskog radijusa bitno povećala. Iz Slike 10 vidljivo je da povećanje ulaznog i izlaznog radijusa neće bitno promijeniti konstrukciju privoza.

Poželjna udaljenost točaka uliva i izliva ($B=21\text{ m}$) primjenom minimalnog radijusa može se ostvariti kod trokrakih raskrižja, a primjenom većih radijusa moguća je konstrukcija i peterokrakih.



Slika 10: Konstrukcija privoza prema usvojenim graničnim vrijednostima

Uvriježeno je da se pri projektiranju kružnih raskrižja nastoji postići pravilan geometrijski odnos osi privoza (120° kod trokrakih, 90° kod četverokrakih raskrižja), te da se izbor radijusa kružnog kolnika svede na najveći mogući radijus u ograničenim uvjetima lokacije (urbana sredina).

Pravilniji izbor osnovnih konstruktivnih elemenata može se postići ako se proračunom opterećenosti privoza unaprijed odaberu poželjne vrijednosti razmaka konfliktnih točaka uliva i izliva koje će prema očekivanom prometnom opterećenju dati podjednake opterećenosti svih privoza. Zbroj tako dobivenih udaljenosti dati će nam minimalnu duljinu putanje vozila u kružnom toku iz čega se može odrediti minimalno potreban radijus vanjskog ruba kolnika. Iz slike 10 vidljivo je da se takvim pristupom mogu osigurati preporučeni elementi oblikovanja i za zahtijevnije uvjete prometnog opterećenja.

Stupanj opterećenosti ulaza određen je izrazom (7). Ako pretpostavimo da je za prihvatljivo rješenje stupanj opterećenosti ulaza $A = 80\%$, tada iz (7) možemo odrediti potrebnu sposobnost ulaza kao :

$$L_{pot} = \frac{c * Me}{80} * 100 = 1.25 * c * Me \quad [EOA/h] \quad (24)$$

Tako određenim L_{pot} iz izraza (2) možemo odrediti potrebnu vrijednost koeficijenta a kao :

$$a = \frac{9}{8} * \frac{L_{pot} - 1500 - \frac{8}{9} * b * Me}{Ma} \quad (25)$$

Nadalje iz Slike 3 možemo odrediti potrebnu udaljenost B konfliktnih točaka izlaza x i ulaza y.

Ponavljanjem postupka za sve privoze kružnog raskrižja odrediti ćemo minimalno potreban radijus putanje vozila u kružnom toku kao :

$$R_{\min} = \frac{\sum B_i}{2\pi} \quad [m] \quad (26)$$

Odnos duljina B_i ujedno je i poželjan odnos kuteva među privozima određen prema prometnom opterećenju kružnog raskrižja. Konačan izbor radijusa kružnog kolnika u urbanim sredinama ovisiti će dakako o raspoloživom prostoru na lokaciji.

4 Zaključak

Tijekom vremena u svijetu se razvio velik broj metoda za proračun kapaciteta kružnog raskrižja. Metode su većinom, na osnovu vlastitih iskustava i promatranja izgrađenih raskrižja, prilagođene svakoj pojedinoj državi. Uočeno je da se osim geometrijskih elemenata, u obzir uzima i ponašanje (reakcija) vozača, koja se razlikuje između ostalog i prema prometnoj kulturi svake države.

Kroz rad opisana su dva različita načina određivanja kapaciteta kružnog raskrižja, preko metoda temeljenih na linearnoj regresiji i preko metoda temeljenih na graničnim vremenskim intervalima slijeda vozila. Za svaki od ova dva načina, kao primjer dane su po dvije metode, koje su u pravilu ugrađene u smjernice pojedinih država. Tako je austrijska metoda, koja je i detaljnije analizirana u rada, preporučena u austrijskim i hrvatskim smjernicama, britanska metoda preporučena u engleskim smjernicama, a australska metoda u australskim smjernicama (a koristi se i kao dio računalnog programa SIDRA, veoma raširenog u svijetu).

Prema analizi temeljenoj na austrijskoj metodi proračuna opterećenosti privoza kružnog raskrižju i prikazanom utjecaju na određivanje radijusa kružnog raskrižja može se zaključiti da povećanje radijusa ne znači nužno i povećanje kapaciteta kružnog raskrižja. Daleko veći utjecaj na kapacitet ima oblikovanje ulaza i izlaza kružnog raskrižja, odnosno postignuti razmak između točaka uliva i izliva. Veći radijus kružnog raskrižja omogućava bolje oblikovanje privoza sa stanovišta sigurnosti prometa i provoznosti raskrižja.

Primjena manjih radijusa uvjetuje značajnije izraženu tangencijalnost pri oblikovanju ulaza i izlaza što se može ocijeniti nepovoljnim iz aspekta sigurnosti odvijanja prometa bez obzira što su zadovoljeni, hrvatskim smjernicama, preporučeni granični geometrijski parametri.

U ovom radu nisu razmatrani uvjeti provoznosti mjerodavnog vozila koji ponekad imaju presudan utjecaj na izbor radijusa kružnog raskrižja i način oblikovanja privoza te ih se pri projektiranju treba analizirati.

5 References

- [1] Dadić, Ivan; Tollazzi, Tollazzi, Tomaž; Legac, Ivan; Čičak, Mirko; Marić, Vladimir; Kos, Goran; Brlek, Predrag. *Smjernice za projektiranje i opremanje raskrižja kružnog oblika-rotora*, Institut prometa i veza, Zagreb, 2002.g.

- [2] Deluka-Tibljaš, Aleksandra; Babić, Sergije; Cuculić, Marijana; Šurdonja, Sanja. Possible reconstructions of intersections in urban areas by using roundabouts. *Road and rail infrastructure, Proceedings of the conference CETRA 2010*. 171-178, 2010.
- [3] Tollazzi, T.: *Kružna raskrižja*, IQ Plus, Kastav, 2007.
- [4] Ištoka Otković, Irena. Modeliranje kapaciteta kružnih raskrižja u Osijeku. *Tehnički vjesnik*. 15; 41-47, 2008.
- [5] Mohamed A., Aty; Yasser, Hosni. Final Report. State of the art report on: Roundabouts design, modeling and simulation, 2001.
- [6] Tapio, R., Luttinen. Capacity and Level of Service at Finnish Unsignalized Intersections. Finnish Road Administration, Helsinki, 2004.
- [7] Legac, Ivan; Šubić, Nikola; Pilko, Hrvoje. Analiza kapaciteta kružnih raskrižja u gradu Zagrebu. *Ceste*: 111-121, 2010.
- [8] Triggs, T., Harris, W.G. Reaction time of Drivers to Road Stimuli. Human Factors Report HFR-12, Monash University, Clayton, Australia, 1982
- [9] Cheng, Jie; Yang, Xinmiao; Deng, Wei; Huang, Xin. Driver's Critical Gap Calibration at Urban Roundabouts: A Case Study in China. *Tsinghua Science and Technology*: 18/20, 237-242, 2008.