

Model radijusa putanje vozila u sredini kružnog raskrižja

Šurdonja, Sanja; Dragčević, Vesna; Deluka - Tibljaš, Aleksandra; Korlaet, Željko

Source / Izvornik: **Građevinar, 2019, 71, 163 - 175**

Journal article, Published version

Rad u časopisu, Objavljena verzija rada (izdavačev PDF)

<https://doi.org/10.14256/JCE.2318.2018>

Permanent link / Trajna poveznica: <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:237:934705>

Rights / Prava: [In copyright](#) / [Zaštićeno autorskim pravom.](#)

Download date / Datum preuzimanja: **2025-03-13**

Repository / Repozitorij:

[Repository of the Faculty of Civil Engineering,
University of Zagreb](#)



Primljen / Received: 8.1.2018.

Ispravljen / Corrected: 4.2.2019.

Prihvaćen / Accepted: 20.2.2019.

Dostupno online / Available online: 25.3.2019.

Model radijusa putanje vozila u sredini kružnog raskrižja

Autori:



Doc.dr.sc. **Sanja Šurdonja**, dipl.ing.grad.
Sveučilište u Rijeci
Građevinski fakultet
sanja.surdonja@uniri.hr



Prof.dr.sc. **Vesna Dragčević**, dipl.ing.grad.
Sveučilište u Zagrebu
Građevinski fakultet
vesnad@grad.hr



Prof.dr.sc. **Aleksandra Deluka - Tibljaš**, dipl.ing.grad.
Sveučilište u Rijeci
Građevinski fakultet
aleksandra.deluka@gradri.uniri.hr



Prof.emer.dr.sc. **Željko Korlaet**, dipl.ing.grad.
Sveučilište u Zagrebu
Građevinski fakultet
zeljko.korlaet@grad.hr

Prethodno priopćenje

Sanja Šurdonja, Vesna Dragčević, Aleksandra Deluka - Tibljaš, Željko Korlaet

Model radijusa putanje vozila u sredini kružnog raskrižja

U ovome radu su prezentirana terenska istraživanja stvarnih putanja vozila na jednostručnim izvanurbanim kružnim raskrižjima, provedena na uzorku od 22 ravna smjera kroz kružna raskrižja različitih obilježja. Utvrđene su statistički značajne korelacije određenih elemenata kružnih raskrižja s radijusom putanje vozila u sredini kružnog raskrižja, na temelju kojih je razvijen model radijusa putanje vozila u sredini kružnog raskrižja, za slučaj kretanja vozila ravno kroz raskrižje.

Ključne riječi:

kružno raskrižje, putanja vozila, geometrijski elementi, model putanje vozila

Preliminary note

Sanja Šurdonja, Vesna Dragčević, Aleksandra Deluka - Tibljaš, Željko Korlaet

Model of vehicle path radius at roundabout centre

Field investigations of real-life vehicle paths at single lane rural roundabouts, conducted on a sample of 22 straight directions through roundabouts of varying properties, are presented in this paper. Statistically significant correlations of some roundabout elements and vehicle path radii at roundabout centre were determined and used as a basis for developing a model of vehicle path radius at roundabout centre, for the case of vehicles moving straight through the roundabout.

Key words:

roundabout, vehicle path, geometric elements, model of vehicle path

Vorherige Mitteilung

Sanja Šurdonja, Vesna Dragčević, Aleksandra Deluka - Tibljaš, Željko Korlaet

Radiusmodell einer Fahrzeugspur in der Mitte eines Kreisverkehrs

In dieser Abhandlung werden Felduntersuchungen der tatsächlichen Fahrzeugspuren bei einspurigen Kreisverkehren außerhalb der Stadt präsentiert, durchgeführt an einer Stichprobe von 22 geraden Richtungen durch den Kreisverkehr mit unterschiedlichen Eigenschaften. Festgestellt wurden statistisch bedeutende Korrelationen bestimmter Elemente der Kreisverkehre mit einem Radius der Fahrzeugspur in der Mitte des Kreisverkehrs, aufgrund dessen ein Radiusmodell der Fahrzeugspur in der Mitte des Kreisverkehrs entwickelt wurde, für den Fall, dass das Fahrzeug gerade durch die Kreuzung fährt.

Schlüsselwörter:

Kreisverkehr, Fahrzeugspur, geometrische Elemente, Modell des Fahrwegpfads

1. Uvod

Za osiguravanje funkcionalnosti i sigurnosti prometa na raskrižjima bitno je pronaći korelaciju između brzine i različitih parametara koji na nju utječu [1]. Istraživanja pokazuju da brzina vozila u kružnim raskrižjima znatno ovisi o putanji vozila kroz kružno raskrižje [2, 3]. Autori Montella i drugi navode da je najispruženija, najbrvnija putanja koju vozilo može imati pri ulazu, prolasku kroz kružno raskrižje i na izlazu iz kružnoga raskrižja, uz uvjet slobodnog prometnog toka, ujedno i najbrža putanja prolaska vozila [2].

U tehničkoj regulativi za provjeru provozne brzine vozila kroz kružna raskrižja uobičajeno se koriste dva modela, nizozemski model [4, 5] preuzet i u aktualnim hrvatskim [6] i još nekim europskim smjernicama za kružna raskrižja [7, 8] te američki model [9, 10] koji je u primjeni još i u Australiji [11]. Nizozemski model proračunava provoznost na temelju radijusa putanje vozila, a koji je rezultat usvojenih geometrijskih elemenata kružnog raskrižja. Američki model proračun provozne brzine temelji na definiranju putanje vozila prema određenim pravilima te primjeni izraza za brzinu u zavoju.

S obzirom na različitu projektantsku praksu, mjerodavna vozila u prometu te općenito prometnu kulturu i tradiciju, primjena postupaka razvijenih u različitim uvjetima od lokalnih može rezultirati velikim odstupanjima izračunanih od stvarnih vrijednosti brzina.

Provedena eksperimentalna ispitivanja brzina na kružnim raskrižjima u Hrvatskoj pokazuju da su izmjerene vrijednosti brzina, u odnosu na brzine koje se tijekom projektiranja koriste za provjeru konzistentnosti geometrijskih elemenata, znatno različite [12]. Također, preporučeni odmaci, temeljem kojih se formiraju putanje vozila na kojima se proračunava brzina, znatno se razlikuju od onih utvrđenih istraživanjima na terenu. Ovo se posebno odnosi na središnji dio putanje vozila u kružnom raskrižju [13]. Navedeno upućuje na potrebu preciznijeg utvrđivanja stvarne putanje vozila kroz kružna raskrižja kao podloge za precizniji proračun provoznih brzina.

Autori Pilko i drugi u svom radu također ističu važnost utvrđivanja stvarne putanje vozila i provoznih brzina kao mogućih parametara za validaciju razvijenog multikriterijskog modela za optimizaciju geometrijskih elemenata, efikasnosti i sigurnosti na jednostručnom kružnom raskrižju [14].

Istraživanje provoznih brzina na različitim pozicijama u širem užem području kružnog raskrižja, te niza geometrijskih elemenata kao što su broj privoza, broj i širina prometnih traka na ulazu u raskrižje, broj i širina traka u kružnom kolniku, proširenje na ulazu omogućilo je autorima Sangyoupu i Jaisungu razvoj modela za predviđanje broja nesreća na kružnim raskrižjima [15].

U ovome radu je prikazano istraživanje koje je provedeno s ciljem utvrđivanja korelacije putanje vozila kroz kružno raskrižje s njegovim geometrijskim elementima, što je osnova za definiranje preciznijeg modela putanje vozila. Model je razvijen primjenom regresijske analize na temelju prikupljenih eksperimentalnih podataka s 10 kružnih raskrižja, odnosno

ukupno 20 smjerova kretanja vozila. Prikazani su rezultati istraživanja i model radijusa putanje vozila u sredini kružnoga raskrižja u slučaju vožnje ravno kroz raskrižje radi definiranja novoga modela provozne brzine vozila u kružnim raskrižjima.

2. Putanja vozila kroz kružno raskrižje

Za primjenu postupaka na kojima se temelji provjera provozne brzine, sadržanih u sadašnjim nacionalnim smjernicama za projektiranje kružnih raskrižja, nužno je konstruirati putanje kretanja vozila kroz kružno raskrižje. Za potrebe ovoga rada analizirane su smjernice koje se primjenjuju u SAD - u [9, 10] i Australiji [11] te od europskih država u Velikoj Britaniji [16], Nizozemskoj [4, 5] Hrvatskoj [6], Sloveniji [7] i Srbiji [8].

Osnovna je pretpostavka svih smjernica da se putanja vozila u kružnom raskrižju sastoji od više kružnih lukova za slučaj kretanja vozila ravno kroz raskrižje te skretanja lijevo, odnosno od jednog kružnog luka za slučaj skretanja desno. Smjernicama se definira način formiranja putanje vozila uzimajući u obzir zaštitne odmake vozila od uzdignutih rubnjaka, iscrtanih središnjih linija ili iscrtanog ruba otoka. Geometrijski elementi i zaštitni odmaci od rubova na prilazu i unutar kružnog raskrižja razlikuju se u navedenim smjernicama, što u konačnici rezultira različitim pretpostavljenom putanjom vozila.

2.1. Konstruiranje putanje vozila prema analiziranim smjernicama

Oblikovni elementi kao i načini provjere konzistentnosti raskrižja u smislu provoznosti, preglednosti i brzine, definirani prema hrvatskim smjernicama [6], kompatibilni su s onima u nizozemskim [4, 5], slovenskim [7] i srbijanskim smjernicama [8]. Putanju vozila kroz kružno raskrižje moguće je definirati za slučaj raskrižja kod kojih osi nasuprotnih privoza zatvaraju približan kut od 180°. Radijus putanje vozila (slika 1.) ovisi o geometrijskim elementima kružnog raskrižja i izračunava se prema izrazu (1):

$$R = \frac{(0,25 \cdot L)^2 + (0,5 \cdot (U + 2))^2}{U + 2} \quad (1)$$

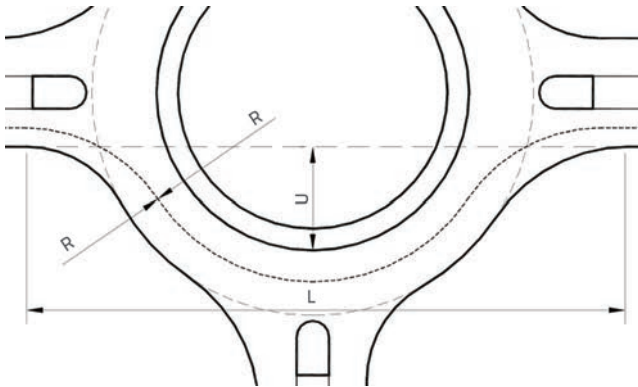
gdje je:

R - radijus putanje vozila kroz kružno raskrižje [m]

L - tangentna udaljenost početka ulaznog radijusa i kraja izlaznog radijusa [m]

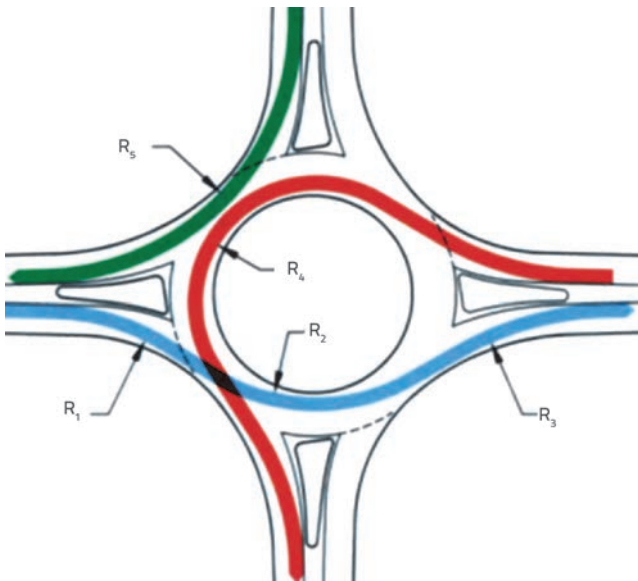
U - udaljenost tangente između početka ulaznog radijusa i kraja izlaznog radijusa do ruba središnjeg otoka [m].

Nedostatak navedenih smjernica je taj što ne nude mogućnost konstruiranja putanje vozila za slučaj skretanja lijevo ili desno u kružnom raskrižju te za slučaj kružnog raskrižja kod kojeg primijenjeni oblikovni elementi raskrižja odstupaju od preporuka nizozemskih smjernica (npr. proširenje na ulazu ili kut između privoza različit od 180°).

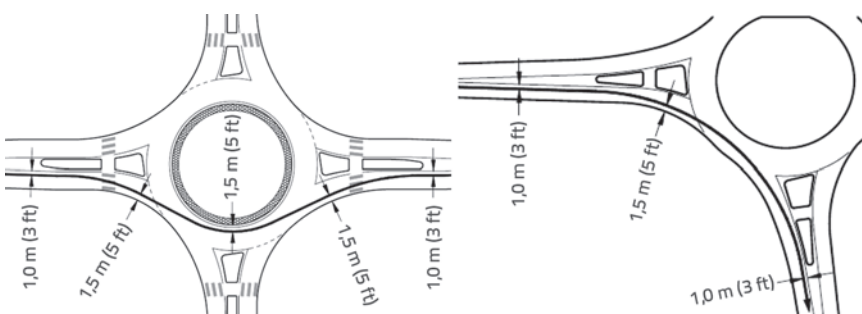


Slika 1. Definiranje parametara U i L za potrebe modela [4, 5]

Prema američkim smjernicama [9, 10], iscrtavanje putanja vozila kroz kružno raskrižje obavezno je za sve dopuštene smjerove kretanja u kružnom raskrižju (slika 2.). Pretpostavka je da je u slučaju skretanja ulijevo, radijus putanje vozila najmanji te se očekuje i razvijanje manje brzine u odnosu na ostale moguće smjerove kretanja. Najveći se radijusi putanje i brzine vozila očekuju za slučaj kretanja ravno kroz kružno raskrižje ili skretanje udesno.

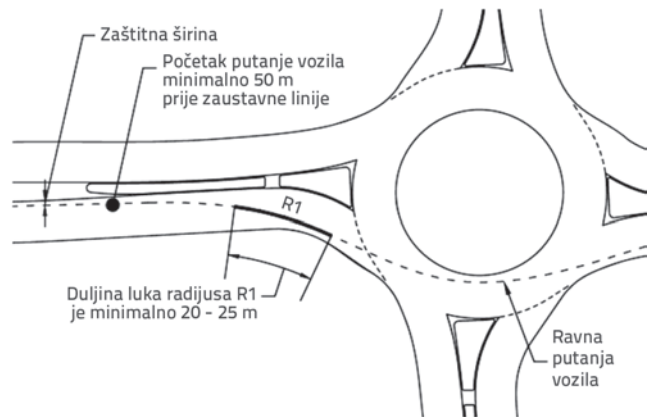


Slika 2. Radijusi putanja vozila [9,10]



Slika 3. Konstrukcija ravne (lijevo) i desne putanje (desno) vozila kroz raskrižje [5]

Navedeni radijusi prikazuju os vozila i nisu jednaki radijusima oblikovnih elemenata raskrižja (radijus ulaza i izlaza iz kružnog raskrižja, odnosno radijus središnjeg otoka). Prilikom konstrukcije putanje vozila pretpostavlja se širina vozila od 2 m, te minimalna zaštitna udaljenost od 0,5 m ruba vozila od iscrtanih linija ili sredine kolnika te uzdignutih rubnjaka. S obzirom na to, prilikom konstrukcije putanje vozila preporučuje se udaljenost osi vozila 1,5 m od uzdignutih rubnjaka i središnjeg otoka te 1,0 m od iscrtanih linija (slika 3.).

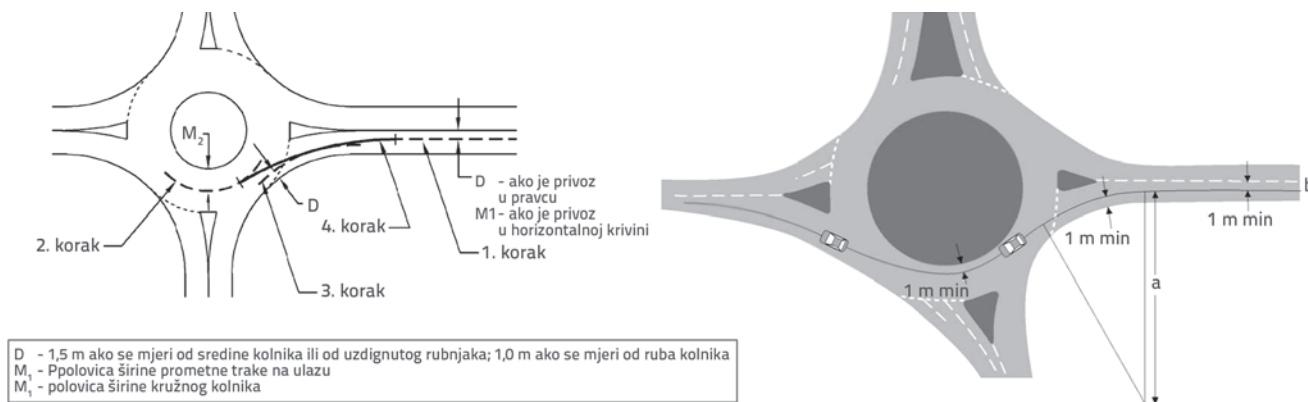


Slika 4. Određivanje radijusa putanje na ulazu [5]

Pretpostavka je američkih smjernica da je ulazni radijus kod ravne putanje vozila posljedica defleksije nametnute vozilu primjenom oblikovnih elemenata na ulazu u kružno raskrižje (širine ulaza u kružno raskrižje, ulaznog radijusa, kuta defleksije i sl). Na slici 4. prikazan je način određivanja vrijednosti radijusa na ulazu. Konstrukciju putanje treba započeti minimalno 50 m prije zaustavne linije koristeći prije navedene zaštitne udaljenosti od uzdignutih rubnjaka ili iscrtanih linija. Vrijednost radijusa mjeri se u blizini zaustavne linije, pri čemu duljina luka ne smije biti manja od 20 do 25 m (slika 4.).

Australske [11] i engleske smjernice [16] na sličan način kao i američke smjernice [5] definiraju način konstrukcije putanje vozila, ali samo za slučaj ravnog kretanja kroz kružno raskrižje. Način konstrukcije navedene putanje kroz jednostručno kružno raskrižje prema australskim i engleskim smjernicama prikazan je na slici 5. Nakon što je određena vrijednost ulaznog radijusa putanje vozila, potrebno ju je usporediti s vrijednostima koje su preporučene u smjernicama [11].

Prema engleskim smjernicama, ulazni radijus putanje vozila (a) mjeri se u području označene zaustavne linije na kolniku, na ulazu u kružno raskrižje. Ne smije biti kraći od 25 m, a konstrukciju putanje vozila treba započeti minimalno 50 m prije zaustavne linije. Nakon konstruiranja putanje, određuje se vrijednost ulaznog radijusa putanje, koja ne smije biti veća od 70 m kod kompaktnih kružnih raskrižja (kružna



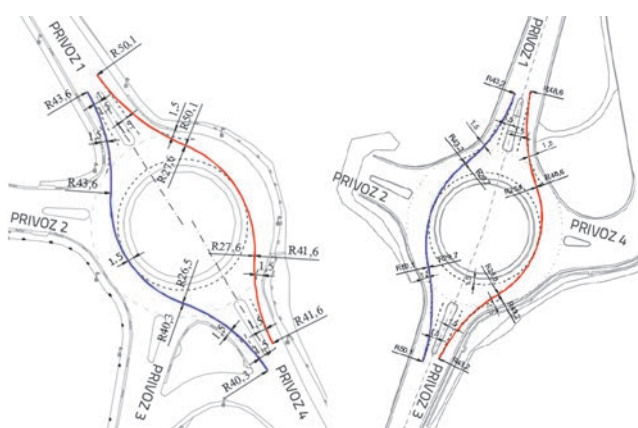
Slika 5. Teoretska putanja vozila kroz kružno raskrižje prema australskim smjernicama (lijevo) [11] i prema engleskim smjernicama (desno) [16]

raskrižja kod kojih se ne primjenjuju elementi proširenja kolnika na ulazu u raskrižje), a kod ostalih kružnih raskrižja vrijednost ulaznog radijusa putanje ne smije biti veća od 100 m [16].

2.2. Eksperimentalno ispitivanje putanje vozila

Eksperimentalna ispitivanja putanje vozila prikazana u radu [13] provedena su s ciljem utvrđivanja primjenjivosti postojećih načina definiranja putanje vozila u lokalnim uvjetima na kružnim raskrižjima projektiranim prema hrvatskim smjernicama [6]. U radu su prikazani rezultati dobiveni na dva kružna raskrižja u Hrvatskoj (slika 6.). Analizirana su dva moguća ravna smjera kretanja na svakom od kružnih raskrižja.

U prvom koraku su na pribavljenim geodetskim podlogama izvedenih kružnih raskrižja (usvajanjem preporuka američkih smjernica) konstruirane teoretske putanje vozila za oba raskrižja te su očitani radijusi putanja na ulazu, u sredini i na izlazu. U sljedećem koraku, na temelju očitanih građevinskih oblikovnih elemenata kružnih raskrižja, te primjenom izraza danog u hrvatskim, nizozemskim, slovenskim i srbijanskim smjernicama, određen je radijus teoretske putanje vozila.



Slika 6. Konstruirane teoretske putanje vozila prema američkim smjernicama: a) raskrižje Omišalj; b) raskrižje Adria

U konačnici je provedeno eksperimentalno ispitivanje putanje pomoću preciznog Hiper V dvofrekvencijskog Global Navigation

Satellite System (GNSS) uređaja koji je bilježio putanju vozila kroz kružno raskrižje. Taj uređaj omogućuje bilježiti poziciju vozila s preciznošću: horizontalna 10 mm + 1 ppm, vertikalna 15 mm + 1 ppm, odnosno 5 georeferencijskih točaka u jednoj sekundi. Uređaj je bio instaliran na krovu osobnog vozila Alfa Romeo 159 sportwagon, duljine 4469 mm, širine 1828 mm te visine 1417 mm. Te su dimenzije unutar statistički utvrđenih vrijednosti standardnog osobnog vozila srednje kategorije u RH [17]. U provedbi eksperimentalnih mjerenja sudjelovala su tri vozača, podjednako vozačkog iskustva, od kojih je svaki obavio N broj prolazaka (N = min. 50) na svakom od dva ravna smjera kroz kružno raskrižje. Vožnje su obavljene u stabilnim vremenskim uvjetima i u uvjetima slobodnog toka prometa.

Za svaku zabilježenu putanju vozila prenesenu na geodetsku podlogu izvedenog stanja raskrižja, softverom AutoCAD aproksimirani su radijusi putanje na ulazu, u sredini kružnog raskrižja te na izlazu iz kružnog raskrižja. Radijusi su aproksimirani na način da ne odstupaju od stvarno zabilježene (točkaste) putanje vozila više od 10 cm. Izmjerene su njihove duljine kao i odmak od uzdignutih rubnjaka raskrižja na ulazu, od središnjeg otoka i na izlazu, te su određene prosječne vrijednosti. Navedene vrijednosti su zatim uspoređene s preporukama američkih [9, 10], nizozemskih [4, 5], australskih [11] i engleskih smjernica [16].

Iz tablice 1. može se zaključiti da je teoretski radijus, određen prema nizozemskim, slovenskim, hrvatskim i srbijanskim smjernicama, po svojoj vrijednosti najbliži vrijednosti radijusa eksperimentalne putanje vozila u sredini raskrižja. Prema tim smjernicama, pretpostavka je da je putanja vozila udaljena minimalno 1.0 m od uzdignutih rubnjaka ili iscrtanih linija, što u slučaju eksperimentalnih putanja nije postignuto. Na ulazu u kružno raskrižje eksperimentalne su putanje u prosjeku 1,5 m udaljene od ruba, na izlazu u prosjeku 1,7 m, a u sredini kružnog raskrižja udaljene su u prosjeku 0,7 m od ruba.

Radijusi na ulazu očitani za teoretske putanje konstruirane prema američkim smjernicama znatno su bliži vrijednostima radijusa na ulazu za eksperimentalne putanje, iako preporuke o duljini radijusa putanje na ulazu nisu zadovoljene u tri od četiri navedena smjera. Preporučene udaljenosti putanje od uzdignutih rubnjaka (1,5 m) također nisu zadovoljene, a najveće odstupanje je u sredini kružnog raskrižja.

Tablica 1. Usporedba eksperimentalne putanje i teoretskih putanja

| Kružno raskrižje | Smjer ravnog kretanja | Putanja | Radius ulazne putanje R_1 [m] | Duljina ulaznog radijusa L_1 [m] | Udaljenost putanje od uzdignutog rubnjaka na ulazu X_1 [m] | Radius putanje u sredini R_2 [m] | Duljina radijusa u sredini L_2 [m] | Udaljenost putanje u sredini od središnjeg otoka X_2 [m] | Radius izlazne putanje R_3 [m] | Duljina izlaznog radijusa L_3 [m] | Udaljenost putanje od uzdignutog rubnjaka na izlazu X_3 [m] | |
|------------------|-----------------------|-----------------|---------------------------------|------------------------------------|--|------------------------------------|--------------------------------------|--|----------------------------------|-------------------------------------|---|---------|
| Omišalj | smjer 1 - 4 | Eksperimentalna | 42,9 | 18,5 | 1,5 | 23,3 | 20,9 | 0,5 | 49,9 | 20,2 | 1,8 | |
| | | Teoretska | SAD | 43,6 | 20 - 25 | 1,5 | 26,5 | - | 1,5 | 40,3 | - | 1,5 |
| | | | NIZ | 24,6 | - | min 1,0 | 24,6 | - | min 1,0 | 24,6 | - | min 1,0 |
| | | | AUS | 55,0 | - | 1,5 | - | - | 4,0 | - | - | - |
| | UK | <100 | 25,0 | 1,0 | - | - | 1,0 | - | - | 1,0 | | |
| | smjer 4 - 1 | Eksperimentalna | 55,0 | 19,0 | 1,2 | 23,5 | 20,2 | 0,4 | 56,6 | 20,8 | 2,0 | |
| | | Teoretska | SAD | 41,6 | 20 - 25 | 1,5 | 27,6 | - | 1,5 | 50,1 | - | 1,5 |
| | | | NIZ | 20,2 | - | min 1,0 | 20,2 | - | min 1,0 | 20,2 | - | min 1,0 |
| AUS | | | 55,0 | - | 1,5 | - | - | 4,0 | - | - | - | |
| UK | <100 | 25,0 | 1,0 | - | - | 1,0 | - | - | 1,0 | | | |
| Adria | smjer 1 - 3 | Eksperimentalna | 46,0 | 19,2 | 1,7 | 25,0 | 21,8 | 0,9 | 55,8 | 19,7 | 1,6 | |
| | | Teoretska | SAD | 43,2 | 20 - 25 | 1,5 | 29,7 | - | 1,5 | 50,1 | - | 1,5 |
| | | | NIZ | 26,7 | - | min 1,0 | 26,7 | - | min 1,0 | 26,7 | - | min 1,0 |
| | | | AUS | 55,0 | - | 1,5 | - | - | 4,0 | - | - | - |
| | UK | <100 | 25,0 | 1,0 | - | - | 1,0 | - | - | 1,0 | | |
| | smjer 3 - 1 | Eksperimentalna | 47,7 | 21,6 | 1,4 | 21,8 | 23,0 | 1,0 | 52,2 | 20,1 | 1,3 | |
| | | Teoretska | SAD | 43,2 | 20 - 25 | 1,5 | 25,6 | - | 1,5 | 48,6 | - | 1,5 |
| | | | NIZ | 24,4 | - | min 1,0 | 24,4 | - | min 1,0 | 24,4 | - | min 1,0 |
| AUS | | | 55,0 | - | 1,5 | - | - | 4,0 | - | - | - | |
| UK | <100 | 25,0 | 1,0 | - | - | 1,0 | - | - | 1,0 | | | |

Australske [11] i engleske smjernice [16] daju samo preporuku o vrijednosti radijusa putanje na ulazu, te preporuku o udaljenosti putanje od uzdignutih rubnjaka ili iscrtanih linija, a engleske dodatno daju i preporuku o duljini radijusa putanje na ulazu.

3. Model putanje vozila kroz kružno raskrižje

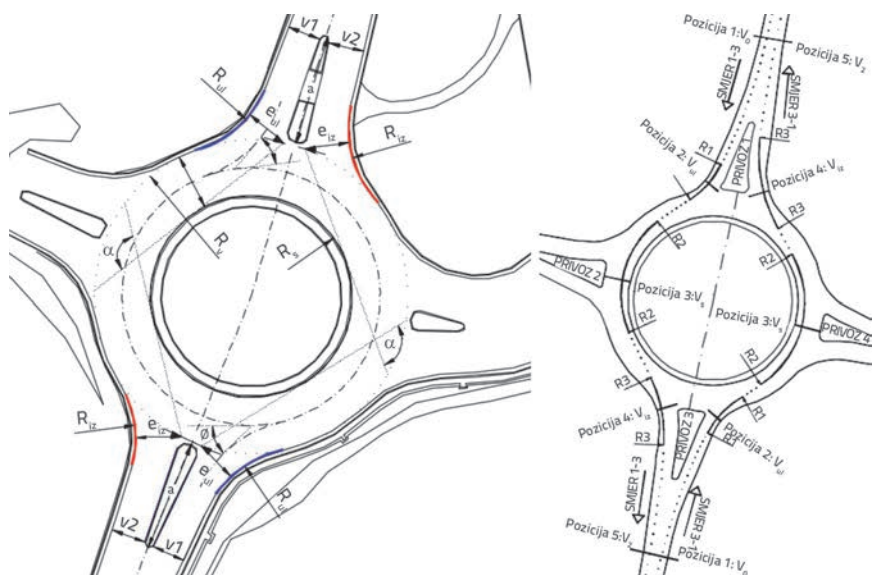
Eksperimentalne putanje zabilježene terenskim ispitivanjima, odnosno njihovi elementi, znatno se razlikuju od preporuka danih u analiziranim smjernicama, što je bio poticaj za daljnje istraživanje prikazano u ovom radu.

Za potrebe definiranja modela putanje vozila u sredini kružnog raskrižja provedena su detaljna eksperimentalna ispitivanja na ukupno 11 jednostranih izvanurbanih kružnih raskrižja [18].

Pri odabiru kružnih raskrižja za eksperimentalna ispitivanja, usvojeni su sljedeći kriteriji vezani za lokaciju i oblikovne elemente raskrižja:

- osi nasuprotnih privoza kružnog raskrižja zatvaraju kut od približno 180 °;
- osi nasuprotnih privoza su u pravcu ili zaobljeni radijusom većim od 250 m, minimalno u zoni 50 m prije ulaska u kružno raskrižje te 50 m nakon izlaska iz kružnog raskrižja;
- vrijednosti primijenjenih oblikovnih elemenata kružnih raskrižja se međusobno razlikuju;
- uzdužni nagibi privoza približno su horizontalni.

Na temelju usvojenih kriterija odabrano je 11 kružnih raskrižja, od čega su četiri raskrižja smještena u Primorsko - goranskoj županiji (lokacija Krk), a sedam raskrižja u Istarskoj županiji (lokacije Pula, Poreč, Žminj i Bale). Odabrana raskrižja predstavljaju izvanurbani tip kružnog raskrižja, jer na njima ili nema pješačkih i biciklističkih prijelaza ili ako ih ima (na dva raskrižja postoje pješački prijelazi), njihov intenzitet te utjecaj na prometni tok vozila je zanemariv. Za sva odabrana raskrižja



Slika 7. Podaci prikupljeni eksperimentalnim ispitivanjima [18]; a) podaci o geometrijskim oblikovnim elementima; b) podaci o elementima putanje vozila

autori su raspolagali geodetskim podlogama izvedenog stanja raskrižja.

Za utvrđivanje korelacije između geometrijskih oblikovnih elemenata kružnih raskrižja i radijusa putanje, kao i za razvoj numeričkog modela korišteni su podaci prikupljeni na 10 raskrižja (20 ravnih smjerova), a podaci s jednog raskrižja (dva ravna smjera) korišteni su za validaciju razvijenog modela. Primijenjena metodologija eksperimentalnih ispitivanja podrazumijevala je prikupljanje dvije vrste podataka:

1. podataka o geometrijskim oblikovnim elementima kružnih raskrižja,
2. podataka o radijusima putanje vozila kroz kružno raskrižje.

Podaci o geometrijskim oblikovnim elementima (slika 7.) očitani su i određeni s geodetskih podloga izvedenih stanja kružnih raskrižja te su dodatno provjereni neposrednim mjerenjem na kružnim raskrižjima.

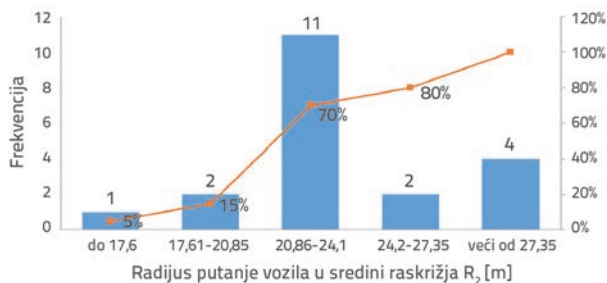
Podaci o provoznim brzinama i radijusima putanje vozila kroz kružno raskrižje određeni su na temelju zabilježenih podataka, za svaki prolazak vozila uz pomoć uređaja GNSS, pri vožnji ravno kroz kružno raskrižje. Vožnje su obavljene u stabilnim vremenskim uvjetima, i u uvjetima slobodnog toka prometa.

Putanja vozila je precizno bilježena s pet georeferencijskih točaka u jednoj sekundi. Prolasci kod kojih uređaj GNSS nije kontinuirano bilježio putanju vozila eliminirani su iz daljnje analize, te je u konačnici za analizu usvojeno 719 prolazaka. Na temelju podataka GNSS uređaja o zabilježenoj putanji za svaki prolazak vozila kroz kružno raskrižje primjenom računalnog programa AutoCAD aproksimirani su i očitani sljedeći podaci:

- radijus putanje na ulazu - R_1
- radijus putanje u sredini - R_2 (slika 8.)
- radijus putanje na izlazu - R_3 .

Na slici 8. prikazana je distribucija prosječnih radijusa putanje vozila u sredini raskrižja za 20 ravnih smjerova na raskrižjima korištenih za razvoj modela. Prvi korak u razvoju modela višestruke linearne regresije bilo je utvrđivanje linearne korelacije (Pearsonov koeficijent) između radijusa putanje te geometrijskih elemenata. Kako bi se navedeni elementi mogli međusobno korelirati, trebalo je ispuniti uvjet normalne distribucije podataka. Normalnost distribucije podataka za svaki geometrijski element te za radijuse putanje provjerena je Kolmogorov - Smirnovljevim testom (K - S test). Normalnost distribucije podataka potvrđena je za radijuse putanje te za sve geometrijske oblikovne elemente, osim širine kružnog kolnika (u), duljine razdjelnog otoka na ulazu u raskrižje

(a_1), duljine razdjelnog otoka na izlazu iz raskrižja (a_2) i radijusa izlaza (R_{iz}), prikazane u tablici 2. Za varijable (geometrijske elemente) kod kojih nije potvrđena normalnost distribucije (u , R_{iz} , a_1 , a_2) koristila se Box - Cox transformacija varijabli, nakon koje je ponovljen K - S test koji je potvrdio normalnost distribucije podataka za transformirane varijable.



Slika 8. Distribucija eksperimentalno prikupljenih podataka o radijusu putanje vozila u sredini raskrižja

Nakon zadovoljenja uvjeta normalnosti distribucije podataka, određeni su Pearsonovi koeficijenti linearne korelacije između geometrijskih elemenata i radijusa putanje (tablica 3.). Za sve vrijednosti prikazane u tablici 3., određene su t - testom p - vrijednosti koje potvrđuju statističku znatnost određene korelacije. Sve vrijednosti korelacije za koje su utvrđene p - vrijednosti manje od 0,05 pokazuju da je nužno odbaciti nultu pretpostavku koja tvrdi da je koeficijent korelacije između određenih podataka jednak nuli, odnosno da ne postoji statistički značajna korelacija. Svi koeficijenti za koje je utvrđeno da su statistički značajni istaknuti su u tablici 3. Statistički značajna linearna korelacija potvrđena je između radijusa putanje u sredini R_2 i sljedećih geometrijskih elemenata:

- vanjskog radijusa kružnog raskrižja R_v ($k = 0,9$),

Tablica 2. Vrijednosti ulaznih varijabli modela [18]

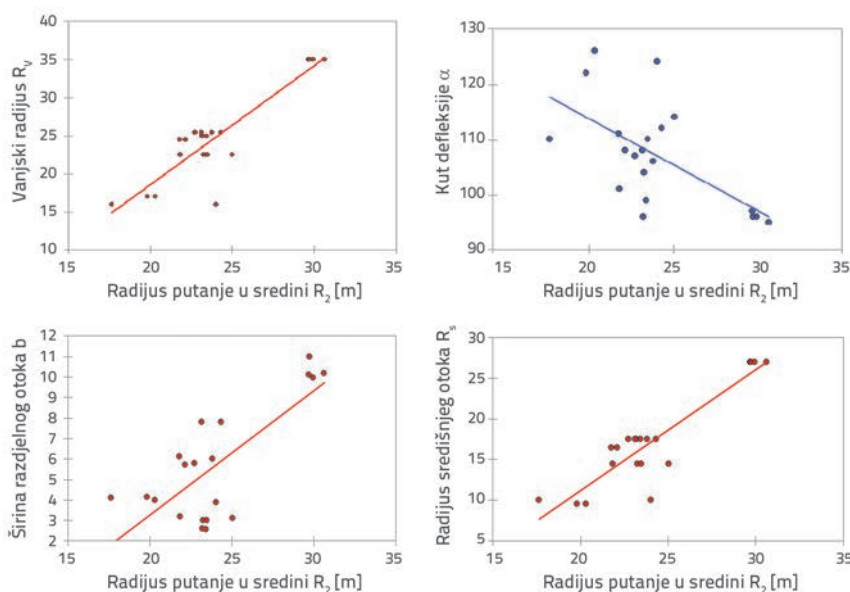
| Kružno raskrižje | Smjer | Geometrijski oblikovni elementi | | | | | | | | | | | | | Eksperimentalni podaci | | |
|------------------|-------|---------------------------------|-----------------------|----------------------------------|----------------|------------|-------------------------|---|--|-------------------------------------|--------------------------|--|---|---|------------------------|--------------------------|----------------------|
| | | širina ulaza u kružno | Radius ulaza u kružno | Vanjski radius kružnog raskrižja | Kut defleksije | Ulazni kut | Širina razdjelnog otoka | Širina prometnog traka na početku razdjelnog otoka - ulaz | Širina prometnog traka na kraju razdjelnog otoka - izlaz | Radius središnjeg otoka+povozni dio | Širina izlaza iz kružnog | R _{iz} (Box - Cox trans, $\wedge = - 2$) | a ₁ (Box - Cox trans, $\wedge = - 1$) | a ₂ (Box - Cox trans, $\wedge = - 1$) | Radius putanje ulaz | Radius putanje u sredini | Radius putanje izlaz |
| | | e _{ul} | R _{ul} | R _v | α | ϕ | b | v ₁ | v ₂ | R _s | e _{iz} | R _{iz} (trans) | a ₁ (trans) | a ₂ (trans) | R ₁ | R ₂ | R ₃ |
| A | 1 - 4 | 6,2 | 13,2 | 22,5 | 104,0 | 45,0 | 3,0 | 4,4 | 5,2 | 14,5 | 7,6 | 0,499 | 0,935 | 0,935 | 42,9 | 23,3 | 49,9 |
| | 4 - 1 | 5,8 | 8,6 | 22,5 | 110,0 | 41,0 | 3,0 | 4,0 | 4,5 | 14,5 | 6,6 | 0,499 | 0,935 | 0,935 | 55,0 | 23,5 | 56,6 |
| B | 1 - 3 | 6,4 | 18,0 | 24,5 | 108,0 | 36,0 | 5,7 | 5,0 | 4,2 | 16,5 | 6,9 | 0,499 | 0,988 | 0,942 | 41,1 | 22,1 | 81,2 |
| | 3 - 1 | 6,5 | 27,2 | 24,5 | 111,0 | 32,0 | 6,1 | 5,0 | 5,8 | 16,5 | 7,2 | 0,498 | 0,942 | 0,988 | 47,6 | 21,8 | 54,5 |
| C | 1 - 3 | 6,3 | 15,0 | 22,5 | 114,0 | 42,0 | 3,1 | 4,7 | 4,9 | 14,5 | 6,6 | 0,498 | 0,938 | 0,938 | 46,0 | 25,0 | 55,8 |
| | 3 - 1 | 6,1 | 15,8 | 22,5 | 101,0 | 43,0 | 3,2 | 4,7 | 5,1 | 14,5 | 6,6 | 0,498 | 0,938 | 0,938 | 47,7 | 21,8 | 52,2 |
| D | 1 - 3 | 5,3 | 15,0 | 35,0 | 96,0 | 35,0 | 10,0 | 4,7 | 5,7 | 27,0 | 6,6 | 0,499 | 0,956 | 0,956 | 38,5 | 29,9 | 45,7 |
| | 3 - 1 | 5,3 | 15,1 | 35,0 | 95,0 | 35,0 | 10,2 | 4,8 | 5,6 | 27,0 | 6,8 | 0,499 | 0,956 | 0,956 | 39,8 | 30,6 | 46,7 |
| E | 1 - 3 | 6,3 | 13,3 | 25,0 | 99,0 | 46,0 | 2,6 | 4,4 | 4,5 | 17,5 | 7,1 | 0,498 | 0,937 | 0,938 | 28,3 | 23,4 | 39,4 |
| | 3 - 1 | 6,4 | 13,4 | 25,0 | 96,0 | 42,0 | 2,6 | 4,5 | 4,3 | 17,5 | 6,7 | 0,498 | 0,938 | 0,937 | 33,8 | 23,2 | 42,6 |
| F | 1 - 3 | 6,8 | 31,5 | 25,5 | 108,0 | 29,0 | 7,8 | 5,1 | 5,8 | 17,5 | 7,0 | 0,500 | 0,952 | 0,952 | 42,7 | 23,1 | 70,3 |
| | 3 - 1 | 6,3 | 18,2 | 25,5 | 112,0 | 34,0 | 7,8 | 5,4 | 5,8 | 17,5 | 7,7 | 0,499 | 0,952 | 0,952 | 53,5 | 24,3 | 84,6 |
| G | 1 - 3 | 6,6 | 26,4 | 25,5 | 107,0 | 36,0 | 5,8 | 4,9 | 6,0 | 17,5 | 7,5 | 0,499 | 0,943 | 0,942 | 36,5 | 22,7 | 65,5 |
| | 3 - 1 | 6,8 | 27,0 | 25,5 | 106,0 | 34,0 | 6,0 | 5,0 | 6,0 | 17,5 | 7,3 | 0,500 | 0,942 | 0,943 | 43,7 | 23,8 | 59,3 |
| H | 1 - 3 | 5,3 | 15,3 | 35,0 | 97,0 | 35,0 | 10,1 | 4,6 | 5,5 | 27,0 | 6,3 | 0,499 | 0,956 | 0,958 | 41,2 | 29,7 | 47,6 |
| | 3 - 1 | 5,1 | 15,0 | 35,0 | 96,0 | 34,0 | 11,0 | 4,6 | 5,8 | 27,0 | 6,6 | 0,499 | 0,958 | 0,956 | 41,1 | 29,7 | 47,0 |
| I | 1 - 3 | 5,0 | 11,0 | 17,0 | 126,0 | 39,0 | 4,0 | 4,1 | 4,3 | 9,5 | 5,1 | 0,499 | 0,932 | 0,921 | 39,0 | 20,3 | 47,0 |
| | 3 - 1 | 4,7 | 10,2 | 17,0 | 122,0 | 38,0 | 4,1 | 3,9 | 4,1 | 9,5 | 5,4 | 0,499 | 0,921 | 0,932 | 37,6 | 19,8 | 59,4 |
| J | 1 - 3 | 4,8 | 10,8 | 16,0 | 124,0 | 42,0 | 3,9 | 4,1 | 5,0 | 10,0 | 5,6 | 0,498 | 0,943 | 0,888 | 33,8 | 24,0 | 68,9 |
| | 3 - 1 | 4,4 | 11,0 | 16,0 | 110,0 | 41,0 | 4,1 | 4,0 | 5,2 | 10,0 | 5,8 | 0,497 | 0,888 | 0,943 | 35,6 | 17,6 | 55,4 |

- kuta defleksije α ($k = - 0,6$),
- širine razdjelnog otoka b ($k = 0,7$),
- radijusa središnjeg otoka (uključujući i povozni dio) R_s ($k = 0,9$),
- duljine razdjelnog otoka na ulazu a_{1_tran} ($k = 0,6$).

Navedene korelacije prikazane su na slici 9. Utvrđeno je i to da nema statistički značajne korelacije između geometrijskih oblikovnih elemenata i radijusa putanje na ulazu (R_1) i izlazu (R_2).

Tablica 3. Poissonovi koeficijenti linearne korelacije [18]

| | e_{ul} | R_{ul} | R_v | α | ϕ | b | v_1 | v_2 | R_s | e_{iz} | $R_{iz(trans)}$ | $a_{1(trans)}$ | $a_{2(trans)}$ | R_1 | R_2 | R_3 |
|-----------------|------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-----------------|----------------|----------------|------------|-------------|------------|
| e_{ul} | 1,0 | 0,7 | 0,1 | -0,2 | -0,2 | -0,1 | 0,7 | 0,2 | 0,1 | 0,8 | 0,4 | 0,4 | 0,3 | 0,3 | -0,1 | 0,3 |
| R_{ul} | 0,7 | 1,0 | 0,2 | -0,1 | -0,7 | 0,3 | 0,8 | 0,7 | 0,2 | 0,6 | 0,6 | 0,3 | 0,5 | 0,2 | 0,0 | 0,4 |
| R_v | 0,1 | 0,2 | 1,0 | -0,8 | -0,5 | 0,8 | 0,5 | 0,5 | 1,0 | 0,4 | 0,4 | 0,6 | 0,6 | 0,1 | 0,9 | -0,3 |
| α | -0,2 | -0,1 | -0,8 | 1,0 | 0,1 | -0,4 | -0,3 | -0,3 | -0,8 | -0,5 | -0,1 | -0,3 | -0,5 | 0,1 | -0,6 | 0,4 |
| ϕ | -0,2 | -0,7 | -0,5 | 0,1 | 1,0 | -0,8 | -0,6 | -0,6 | -0,5 | -0,2 | -0,7 | -0,5 | -0,6 | -0,3 | -0,3 | -0,4 |
| b | -0,1 | 0,3 | 0,8 | -0,4 | -0,8 | 1,0 | 0,5 | 0,7 | 0,8 | 0,2 | 0,5 | 0,5 | 0,6 | 0,1 | 0,7 | 0,0 |
| v_1 | 0,7 | 0,8 | 0,5 | -0,3 | -0,6 | 0,5 | 1,0 | 0,6 | 0,5 | 0,7 | 0,5 | 0,6 | 0,6 | 0,4 | 0,3 | 0,4 |
| v_2 | 0,2 | 0,7 | 0,5 | -0,3 | -0,6 | 0,7 | 0,6 | 1,0 | 0,5 | 0,5 | 0,4 | 0,2 | 0,5 | 0,2 | 0,4 | 0,1 |
| R_s | 0,1 | 0,2 | 1,0 | -0,8 | -0,5 | 0,8 | 0,5 | 0,5 | 1,0 | 0,4 | 0,3 | 0,6 | 0,6 | 0,0 | 0,9 | -0,3 |
| e_{iz} | 0,8 | 0,6 | 0,4 | -0,5 | -0,2 | 0,2 | 0,7 | 0,5 | 0,4 | 1,0 | 0,4 | 0,4 | 0,5 | 0,3 | 0,2 | 0,2 |
| $R_{iz(trans)}$ | 0,4 | 0,6 | 0,4 | -0,1 | -0,7 | 0,5 | 0,5 | 0,4 | 0,3 | 0,4 | 1,0 | 0,5 | 0,3 | 0,2 | 0,2 | 0,3 |
| $a_{1(trans)}$ | 0,4 | 0,3 | 0,6 | -0,3 | -0,5 | 0,5 | 0,6 | 0,2 | 0,6 | 0,4 | 0,5 | 1,0 | 0,2 | 0,2 | 0,6 | 0,3 |
| $a_{2(trans)}$ | 0,3 | 0,5 | 0,6 | -0,5 | -0,6 | 0,6 | 0,6 | 0,5 | 0,6 | 0,5 | 0,3 | 0,2 | 1,0 | 0,3 | 0,3 | -0,1 |
| R_1 | 0,3 | 0,2 | 0,1 | 0,1 | -0,3 | 0,1 | 0,4 | 0,2 | 0,0 | 0,3 | 0,2 | 0,2 | 0,3 | 1,0 | 0,1 | 0,4 |
| R_2 | -0,1 | 0,0 | 0,9 | -0,6 | -0,3 | 0,7 | 0,3 | 0,4 | 0,9 | 0,2 | 0,2 | 0,6 | 0,3 | 0,1 | 1,0 | -0,3 |
| R_3 | 0,3 | 0,4 | -0,3 | 0,5 | -0,4 | 0,0 | 0,4 | 0,1 | -0,3 | 0,2 | 0,3 | 0,3 | -0,1 | 0,4 | -0,3 | 1,0 |



Slika 9. Korelacija radijusa putanje u sredini R₂ i pojedinih geometrijskih oblikovnih elemenata kružnog raskrižja [18]

U odabiru nezavisnih varijabli za model višestruke linearne regresije primijenjena je metoda stupanjske regresije, odnosno metoda postupnog proširivanja i postupnog smanjivanja dimenzije modela. Navedenom metodom razmatrane su sve varijable (svi geometrijski elementi raskrižja) neovisno o jačini korelacijske veze, a znatnost svake varijable preispitivala se u svakom koraku.

Metodom stupanjske regresije za model radijusa putanje u sredini raskrižja odabrane su četiri varijable, neovisno o jačini linearne korelacije:

- kut defleksije α ,
- ulazni kut ϕ ,
- radijus središnjeg otoka (uključujući i povozni dio) R_s ,
- duljina razdjelnog otoka na izlazu a_{2_trans} .

Korelacijska matrica između odabranih nezavisnih varijabli (α , ϕ , R_s , a_{2_trans}) i zavisne varijable R_2 prikazana je u tablici 4.

Tablica 4. Korelacijska matrica između nezavisnih varijabli i zavisne R_2 varijable [18]

| | α | ϕ | R_s | a_{2_trans} | R_2 |
|----------------|----------|--------|--------|----------------|--------|
| α | 1 | 0,080 | -0,814 | -0,526 | -0,620 |
| ϕ | 0,080 | 1 | -0,459 | -0,600 | -0,308 |
| R_s | -0,814 | -0,459 | 1 | 0,592 | 0,905 |
| a_{2_trans} | -0,526 | -0,600 | 0,592 | 1 | 0,299 |
| R_2 | -0,620 | -0,308 | 0,905 | 0,299 | 1 |

Jedna od osnovnih pretpostavki višestruke linearne regresije je nepostojanje multikolinearnosti između nezavisnih varijabli. Ta pretpostavka provjerena je određivanjem faktora inflacije varijacije (VIF), što je najčešće korišten pokazatelj multikolinearnosti. Faktor inflacije varijacije i veličina tolerancije dani su izrazima (2) i (3):

$$VIF_j = \frac{1}{1 - R_j^2} \quad j = 1, 2, \dots, k \quad (2)$$

$$TOL_j = \frac{1}{VIF_j} \quad TOL_j = 1 - R_j^2 \quad (3)$$

U izrazima (2) i (3) R_j^2 je koeficijent determinacije za model višestruke linearne regresije u kojemu je j -ta regresijska varijabla u ulozi zavisne varijable, a preostale $(k - 1)$ regresijska varijable u ulozi nezavisnih varijabli. Problem multikolinearnosti prisutan je ako je VIF_j veći od 5 ili TOL_j manji od 0,2. U tablici 5. prikazani su faktori inflacije varijacije te veličine tolerancije za model s gore odabrane četiri nezavisne varijable (α , ϕ , R_s , a_{2_trans}) i zavisnu varijablu R_2 .

Tablica 5. Faktori inflacije varijacije te veličine tolerancije [18]

| | α | ϕ | R_s | a_{2_trans} |
|-------------|--------------|--------|--------------|----------------|
| Tolerancije | 0,174 | 0,324 | 0,173 | 0,392 |
| VIF | 5,744 | 3,084 | 5,782 | 2,550 |

Iz tablice 5. vidljivo je da postoji mogućnost multikolinearnosti jer je $VIF = 5,744$ veće od 5 (za varijablu α) i $VIF = 5,782$ veće od 5 (za varijablu R_s), pa je stoga navedeni model, koji uključuje četiri nezavisne varijable (α , ϕ , R_s , a_{2_trans}) i zavisnu varijablu R_2 , odbačen iz daljnje analize.

Osim tog razmatran je model višestruke regresije za radijus putanje u sredini, koji je u obzir uzeo tri nezavisne varijable (α , R_s , a_{2_trans}) i zavisnu varijablu R_2 . Varijabla ulazni kut ϕ odbačena je iz daljnje analize jer je već i Poissonov koeficijent linearne korelacije pokazao vrlo slabu vezu s radijusom putanje u

sredini R_2 . U tablici 6. prikazana je korelacijska matrica između tri nezavisne varijable i radijusa putanje u sredini. U tablici 7. prikazani su faktori inflacije varijacije te veličine tolerancije koje potvrđuju da u ovom slučaju ne postoji mogućnost multikolinearnosti.

Tablica 6. Korelacijska matrica između nezavisnih varijabli i zavisne R_2 varijable [18]

| | α | R_s | a_{2_trans} | R_2 |
|----------------|----------|--------|----------------|--------|
| α | 1 | -0,814 | -0,526 | -0,620 |
| R_s | -0,814 | 1 | 0,592 | 0,905 |
| a_{2_trans} | -0,526 | 0,592 | 1 | 0,299 |
| R_2 | -0,620 | 0,905 | 0,299 | 1 |

Tablica 7. Koeficijenti inflacije varijacije te veličine tolerancije [18]

| | α | R_s | a_{2_trans} |
|-------------|----------|-------|----------------|
| Tolerancija | 0,335 | 0,301 | 0,644 |
| VIF | 2,987 | 3,326 | 1,552 |

Za model s odabranim nezavisnim varijablama (α , R_s , a_{2_trans}) i za zavisnu varijablu R_2 provjeren je uvjet nepostojanja autokorelacije pogrešaka relacije e_i Durbin - Watsonovim testom (DW test). Nulta hipoteza testa tvrdi da ne postoji autokorelacija između pogrešaka. Nulta hipoteza se prihvaća ako vrijedi (4):

$$d > d_{upper} \quad \text{ili} \quad d < (4 - d_{upper}) \quad (4)$$

gdje je

d - test veličina

d_U - kritične vrijednosti, vrijednosti sampling - distribucije.

Za slučaj navedenog modela primijenjeni DW test, odnosno izračunana vrijednost testa d_{stat} ne zadovoljava izraz (4), što je uvjet za nepostojanje autokorelacije. Vrijednost testa d_{stat} nalazi se između graničnih vrijednosti ($d_{lower} \leq d_{stat} \leq d_{upper}$, tablica 8.), što ne omogućuje donošenje zaključka o postojanju autokorelacije pogrešaka relacije e_i .

Tablica 8. Rezultati DW testa o autokorelaciji [18]

| | |
|--|----------|
| Test veličina - d_{stat} | 1,648649 |
| Donja kritična vrijednost - d_{lower} | 0,99755 |
| Gornja kritična vrijednost - d_{upper} | 1,67634 |

S obzirom na nemogućnost donošenja zaključka o autokorelaciji pogrešaka, navedeni model s tri nezavisne varijable (α , R_s , a_{2_trans}) i zavisnom varijablom R_2 je odbačen.

Za konačni model višestruke linearne regresije odabrane su samo dvije nezavisne varijable, kut defleksije α te radijus središnjeg otoka (uključujući povozni dio) R_s te kao zavisna varijabla radijus

putanje u sredini R_2 . Slijedi provjera osnovnih pretpostavki modela višestruke regresije, kao i njegova reprezentativnost.

Linearnost

Vrijednosti Pearsonovih koeficijenata korelacije prikazane u korelacijskoj matrici (tablica 9.) potvrdile su prvu pretpostavku modela višestruke regresije, jer je t - test za sve koeficijente pokazao da su pripadajuće p - vrijednosti manje od 0,05 te se nulta hipoteza o nepostojanju linearne korelacije treba odbaciti.

Tablica 9. Korelacijska matrica između nezavisnih varijabli i zavisne R_2 varijable [18]

| | | | |
|----------|----------|--------|--------|
| | α | R_s | R_2 |
| α | 1 | -0,814 | -0,620 |
| R_s | -0,814 | 1 | 0,905 |
| R_2 | -0,620 | 0,905 | 1 |

Normalna distribucija zavisne varijable i slučajna varijabla e

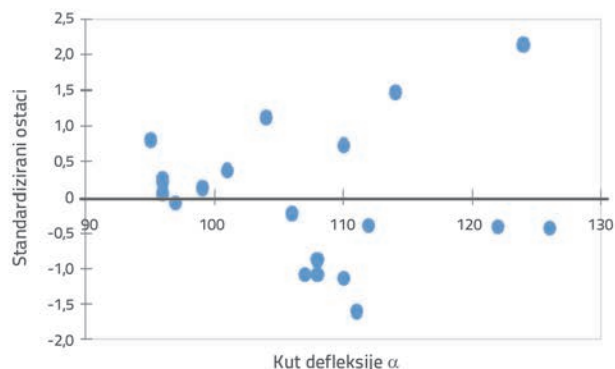
Za provjeru normalne distribucije rezidualnih odstupanja i zavisne varijable korišten je K - S test, a rezultati testa prikazani su u tablici 10. Rezultati (p - vrijednosti veće od 0,05) upućuju na prihvaćanje nulte hipoteze da podaci dolaze iz normalne distribucije podataka.

Tablica 10. Rezultati K - S testa o normalnosti distribucije rezidualnih odstupanja i varijable R_2 [18]

| | | | | |
|------------------------------------|-------|---------------|-----------------------|---------------------------------------|
| | R_2 | R_{2_pred} | Rezidualna odstupanja | Standardizirana rezidualna odstupanja |
| p - vrijednost | 0,291 | 0,330 | 0,991 | 0,990 |
| α - razina signifikantnosti | 0,05 | 0,05 | 0,05 | 0,05 |

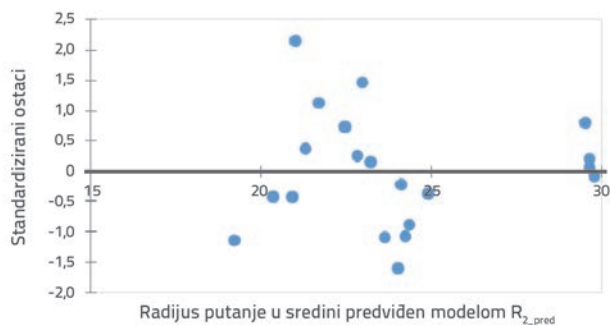
Homoskedastičnost

Nakon što su zadovoljena prethodno navedena dva uvjeta višestruke linearne regresije, provjerena je pretpostavka o ispunjenju uvjeta homoskedastičnosti, odnosno, pretpostavke da pogreške relacije e_i imaju jednaku varijaciju. Za provjeru



Slika 10. Rezidualna odstupanja u odnosu na nezavisne varijable [18]

te pretpostavke analiziran je prikaz rezidualnih odstupanja u odnosu na nezavisne varijable (slika 10.) te u odnosu na regresijske vrijednosti R_{2_pred} (slika 11.).



Slika 11. Rezidualna odstupanja u odnosu na regresijske vrijednosti R_{2_pred} [18]

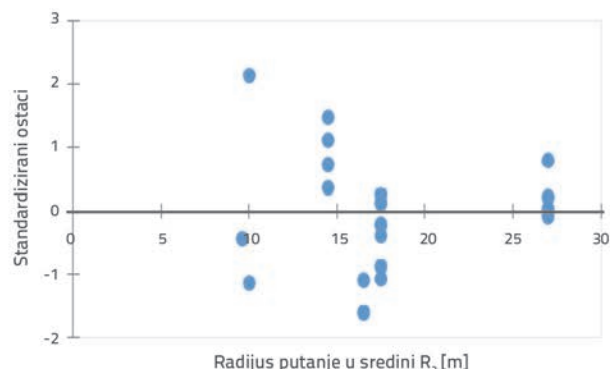
Iz slika 10. i 11. očito je da su rezidualna odstupanja nasumično (nepravilno) raspoređena oko x - osi i da ne postoji izražen trend. Vrijednosti Spearmanovog koeficijenta korelacije kao i vrijednosti t - testa (p - vrijednosti) (tablica 11.) potvrdile su da između nezavisnih varijabli i rezidualnih odstupanja te regresijskih vrijednosti i rezidualnih odstupanja ne postoji statistički značajna korelacija.

Tablica 11. Spearmanov koeficijent korelacije i vrijednosti t - testa (p - vrijednost) [18]

| | | | |
|------------------------|--|---|--|
| | Regresijske vrijednosti (R_{2_pred}) – stand. rezidualna odstupanja | Nezavisna varijabla (α) – stand. rezidualna odstupanja | Nezavisna varijabla (R_s) – stand. rezidualna odstupanja |
| Koeficijent korelacije | -0,059 | -0,234 | -0,026 |
| p - vrijednost | 0,806 | 0,320 | 0,912 |

Autokorelacija

Provjeren je i uvjet nepostojanja autokorelacije pogrešaka relacije DW testom prema izrazu (4), čiji su rezultati u tablici 12. potvrdili navedeno svojstvo linearne regresije.



Tablica 12. Rezultati DW testa [18]

| | |
|------------------------------------|----------|
| Test veličina - d | 2,090617 |
| Donja kritična vrijednost - d_l | 1,1004 |
| Gornja kritična vrijednost - d_u | 1,53668 |

Multikolinearnost

Uvjet nepostojanja multikolinearnosti provjeren je određivanjem faktora inflacije varijacije te veličine tolerancije (tablica 13.). Utvrđeno je da ne postoji multikolinearnost između odabranih varijabli.

Tablica 13. Faktori inflacije varijacije te veličine tolerancije za konačni model [18]

| | | |
|-------------|----------|-------|
| | α | R_s |
| Tolerancije | 0,338 | 0,338 |
| VIF | 2,960 | 2,960 |

Budući da su zadovoljene sve pretpostavke modela višestruke linearne regresije, u konačnici je definiran analitički izraz modela za radijus putanje vozila u sredini kružnoga raskrižja kako slijedi (5):

$$R_{2_pred} = -2,036 + 0,128 \cdot \alpha + 0,719 \cdot R_s \quad (5)$$

gdje je:

- R_{2_pred} - radijus putanje vozila u sredini raskrižja [m]
- α - kut defleksije [°]
- R_s - radijus središnjeg otoka (uključujući i povozni dio ako postoji) [m].

Korigirani koeficijent determinacije $R^2_{adj} = 0.842$ za dobiveni model radijusa putanje u sredini raskrižja potvrdio je da je 84,2 % veze između promatranih varijabli objašnjeno višestrukim linearnim regresijskim modelom.

Kako bi se potvrdila valjanost razvijenog modela za radijus putanje vozila kroz kružno raskrižje, provedena su dodatna mjerenja na kružnom raskrižju koje nije bilo korišteno za razvoj modela (tablica 14.). Po svojim obilježjima odabrano kružno raskrižje odgovara geometrijskim oblikovnim elementima deset kružnih raskrižja koja su se koristila za razvoj modela. Nasuprotne osi raskrižja zatvaraju kut od 180°, a osi privoza su u smjeru ili zaobljeni minimalnim radijusom 250 m u užoj zoni raskrižja, te su približno horizontalni. Raskrižje je izvanurbano, čime se eliminirao utjecaj biciklista i pješaka na brzine kretanja vozila u zoni raskrižja. Sve navedeno odgovara kriterijima koji su primijenjeni

pri odabiru raskrižja (njih 10) za razvoj modela. Na temelju analitičkog izraza modela za radijus putanje vozila kroz kružno raskrižje (5) izračunan je radijus putanje vozila u sredini raskrižja, zasebno za svaki ravni smjer kružnog raskrižja:

- smjer 1 - 3 (za $\alpha = 107^\circ$ i $R_s = 14$ m) $R_{2_pred} = 21,71$ m
- smjer 3 - 1 (za $\alpha = 108^\circ$ i $R_s = 14$ m) $R_{2_pred} = 21,84$ m

Eksperimentalno utvrđeni radijusi $R_{1-3} = 21,5$ m i $R_{3-1} = 21,51$ m (tablica 14.) po svojim vrijednostima nalaze se unutar raspona 55 % vrijednosti radijusa putanje (slika 8.) na temelju kojih je razvijen model, a isto tako i vrijednosti izračunane modelom. Izračunan radijus putanje vozila u sredini raskrižja uspoređen je s prosječnim radijusom putanje vozila u sredini raskrižja, zasebno određenim za 32 prolaska u smjeru 1 - 3 i 30 prolazaka u smjeru 3 - 1 (tablica 14.).

Tablica 14. Podaci potrebni za validaciju modela [18]

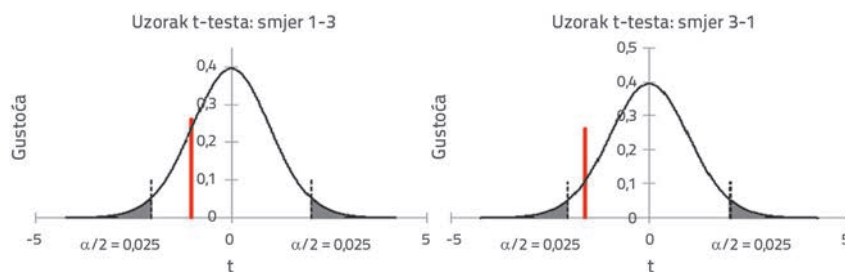
| | Podaci iz GNSS uređaja | Geometrijski podaci | |
|-------------|--|-----------------------------|--|
| | Radijus putanje vozila u sredini raskrižja R_2 [m] | Kut defleksije α [°] | Radijus središnjeg otoka (uključujući povozni dio) R_s [m] |
| Smjer 1 - 3 | 21,50 | 107 | 14 |
| Smjer 3 - 1 | 21,51 | 108 | 14 |

Rezultati t - testa (p - vrijednosti) prikazani u tablici 15. potvrđuju da nema statistički značajne razlike između prosječne vrijednosti radijusa putanje i one izračunane modelom.

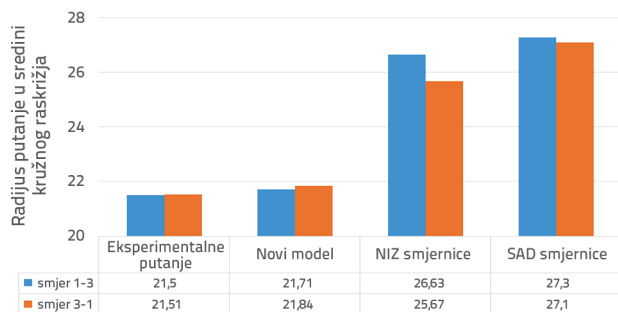
Tablica 15. Rezultati t - testa za usporedbu prosječne vrijednosti radijusa putanje u sredini i vrijednosti izračunane modelom [18]

| | Smjer 1 - 3 | Smjer 3 - 1 |
|------------------------------------|-------------|-------------|
| p - vrijednost | 0,322 | 0,119 |
| α - razina signifikantnosti | 0,05 | 0,05 |

Rezultati t - testa potvrđeni su i grafički na slici 12.



Slika 12. Rezultati t - testa usporedbe prosječne vrijednosti radijusa putanje i vrijednosti određene modelom [18]: a) smjer 1 - 3; b) smjer 3 - 1



Slika 13. Razlika između radijusa putanje u sredini određenog modelom i prosječne vrijednosti dobivene terenskim ispitivanjima

Rezultati dobiveni primjenom novog modela uspoređeni su s prosječnim radijusom putanje vozila taj je dobiven terenskim ispitivanjem te s rezultatima koji su dobiveni primjenom nizozemskog modela, izraz (1), i primjenom metode konstrukcije putanje vozila prema američkim smjernicama (slika 3. lijevo). Male razlike između novim modelom određenog i terenskim ispitivanjima dobivenog radijusa putanje u sredini raskrižja (slika 13.) rezultat su vrlo dobro objašnjene veze između promatranih varijabli višestrukim linearnim regresijskim modelom (korigirani koeficijent determinacije $R^2 = 0,84$).

4. Zaključak

Glavnina smjernica za kružna raskrižja, koja su analizirana u ovome radu, daje preporuku o načinu formiranja putanje vozila kroz kružno raskrižje definiranjem zaštitnih odmaka od uzdignutih rubnjaka i iscrtanih linija kolnika ili otoka. Zaštitni odmaci u modelima za konstrukciju putanje variraju od vrijednosti 1 m do 1,5 m. Eksperimentalno utvrđene putanje znatno se razlikuju od preporuka danih u analiziranim smjernicama, što je bio poticaj za daljnja istraživanja, odnosno razvoj originalnog modela putanje vozila kroz kružno raskrižje koji je opisan u ovome radu. Za tu svrhu provedena su detaljna eksperimentalna ispitivanja na ukupno deset odabranih kružnih raskrižja te su određeni podaci o geometrijskim oblikovnim elementima kružnih raskrižja kao i podaci o radijusima putanje vozila kroz kružno raskrižje. Primjenom višestruke regresijske analize, razvijen je model za proračun radijusa putanje vozila u sredini raskrižja koji se temelji na snažnoj korelaciji s pojedinim

geometrijskim elementima kružnog raskrižja. Statistička analiza podataka nije potvrdila značajne korelacije između geometrijskih oblikovnih elemenata i radijusa putanje na ulazu (R_1) i izlazu (R_3), te stoga navedeni modeli nisu razvijeni. Metodom postupnog proširivanja modela, kao parametri koji najbolje objašnjavaju linearnu vezu s radijusom putanje u sredini raskrižja odabrani su kut defleksije (α) za promatrani ravni smjer kretanja vozila te radijus središnjeg otoka R_s (koji uključuje i širinu povoznog dijela središnjeg otoka ako postoji). Korigirani koeficijent determinacije $R^2_{adj} = 0,842$ za dobiveni model radijusa putanje u sredini raskrižja potvrđuje da je 84,2 % veze između radijusa putanje u sredini, kuta defleksije i radijusa središnjeg otoka objašnjeno višestrukim linearnim regresijskim modelom i može se smatrati vrlo pouzdanim. Validacija modela je provedena na temelju terenskih ispitivanja na kružnom raskrižju koje nije bilo predmet ovih ispitivanja prema kojima je razvijen model. Statistički testovi potvrdili su da se za razinu signifikantnosti $\alpha = 0,05$ vrijednosti izračunanih radijusa putanje vozila u sredini kružnog raskrižja i prosječnih vrijednosti radijusa određenih na temelju terenskih ispitivanja ne razlikuju, odnosno da je nužno prihvatiti nultu hipotezu koja tvrdi da između promatranih radijusa ne postoji statistički značajna razlika.

Model putanje vozila u sredini raskrižja razvijen je i validiran za raskrižja s radijusom središnjeg otoka u rasponu od 9,5 do 27 m te za kutove defleksije u rasponu od 95° do 126°. Primjena modela za radijus središnjeg otoka i kut defleksije koji odstupaju od navedenih vrijednosti moguća je uz dodatnu validaciju.

Razvijeni model putanje vozila u sredini kružnog raskrižja predstavlja temelj za daljnja istraživanja modela brzine vozila u kružnim raskrižjima pa time pridonosi optimizaciji postupka projektiranja kružnog raskrižja s aspekta zadovoljenja uvjeta sigurnosti i kapaciteta.

Zahvala

Ovaj rad je djelomično podržan od strane Ministarstva znanosti, obrazovanja i športa Republike Hrvatske u sklopu projekta *Research Infrastructure for Campus - based Laboratories* Sveučilišta u Rijeci, broj RC.2.2.06 - 0001. Projekt se sufinancira iz Europskog fonda za regionalni razvoj (ERDF). Istraživanje predstavljeno u ovom radu također je rezultat projekta *Održivi dizajn kolničkih konstrukcija u urbanim područjima* koji podržava Sveučilište u Rijeci.

LITERATURA

- [1] Bassani, M., Sacchi, E.: The effect of road geometrics and traffic regulations on driver - preferred speeds in northern Italy. An exploratory analyses, *Transportation Research Part F*, pp.11 - 26, 2014.
- [2] Montella, A., Turner, S., Chiaradonna, S., Aldrige, D.: Proposals for Improvement of the Italian Roundabout Geometric Design Standard, *Procedia - Social and Behavioral Sciences*, 53 (2012), pp. 189-202.
- [3] Al - Ohmari, B.H., Ghuzlan, K.A., Al - Helo, L.B.: Modeling through Traffic Speed at Roundabouts along Urban and Suburban Street Arterials, *Journal of the Transportation Research Forum*, 53 (2014), pp. 7-19.
- [4] CROW: Eenheid in rotondes, CROW publication no.126, Ede, The Netherlands, 1998.

- [5] Dutch Ministry of Transport, Public Works and Water Management: Roundabouts - Application and Design: A practical manual, Partners for Roads. 2009.
- [6] Smjernice za projektiranje kružnih raskrižja na državnim cestama, Hrvatske ceste d.o.o. Zagreb, Izrađivač: Građevinski fakultet Sveučilišta u Rijeci, Rijeka, 2014. (in Croatian)
- [7] Ministarstvo za promet Republika Slovenija. Tehnička specifikacija za javne ceste TSC 03.341:2011 - Kružna križišča, 2011. (in Slovenian)
- [8] Putevi Srbije: Priručnik za projektovanje puteva u Republici Srbiji. Beograd: Funkcionalni elementi i površine puteva. Kružne raskrtnice. 2012. (in Serbian)
- [9] Federal Highway Administration. Roundabouts: An informational Guide Report, FHWA - RD - 00 - 067, 2000.
- [10] Rodegerdts, L., Bansen, J., Tiesler, C., Knudsen, J., Myers, E., Johnsonm, M., Moule, M., Persaud, B., Lyon, C., Hallmark, S., Isebrands, H., Crown, R.B., Guichet, B., & O'Brien, A.: Roundabouts: An Informational Guide, Second Edition. NCHRP Report 672, Washington, DC, USA, 2010.
- [11] Velth, G., Arndt, O.: Guide to Road design Part 4B: Roundabouts (2nd ed.) Austroads, Sydney, Australia, 2011.
- [12] Pilko, H., Brčić, D., Šubić, N. Istraživanje brzine kretanja vozila pri projektiranju kružnih raskrižja//, GRADEVINAR, 66 (2014) 5, pp. 407-416, <https://doi.org/10.14256/JCE.887.2013>
- [13] Surdonja, S., et al., Analyses of maximum - speed path definition at single - lane roundabouts, Journal of Traffic and Transportation Engineering (English Edition) (2018), <https://doi.org/10.1016/j.jtte.2017.06.006>
- [14] Pilko, H., Mandzuka, S., Baric, D.: Urban single - lane roundabouts: A new analytical approach using multi - criteria and simultaneous multi - objective optimization of geometry design, efficiency and safety, Transportation Research Part C, 80 (2017), pp. 257-271.
- [15] Kim, S., Choi, J.: Safety Analysis of Roundabout Designs based on Geometric and 10 Speed Characteristics. KSCE Journal of Civil Engineering, 17 (2013) 11 pp. 1446-1454, <http://dx.doi.org/10.1007/s12205-013-0177-4>
- [16] Highways Agency. Geometric Design of Roundabouts. Design Manual of Roads and Bridges, TD 16/07, London, 2007.
- [17] Brčić, D., Šoštarić, M., Ševrović, M.: Analytic Determination of Reference Passenger Car Size for Parking Space Dimensioning in Croatia, Promet - Traffic&Transportation, 24 (2012) 3, pp. 215-222.
- [18] Šurdonja, S.: Numerički model provodne brzine kružnoga raskrižja (disertacija). Zagreb: Građevinski fakultet, 2017.