

Primljen / Received: 16.11.2016.

Ispravljen / Corrected: 24.2.2017.

Prihvaćen / Accepted: 28.3.2017.

Dostupno online / Available online: 10.5.2017.

Novi postupak oblikovanja četverokrakih kanaliziranih raskrižja

Autori:



Doc.dr.sc. **Ivica Stančerić**, dipl.ing.građ.
Sveučilište u Zagrebu
Građevinski fakultet
istanceric@grad.hr



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



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

Izvorni znanstveni rad

Ivica Stančerić, Željko Korlaet, Vesna Dragčević

Novi postupak oblikovanja četverokrakih kanaliziranih raskrižja

U radu se istražuje projektiranje kanaliziranih četverokrakih raskrižja i moguća pojednostaljenja. Provedeno je istraživanje rezultiralo novim i jednostavnijim pristupom u kojem su svi elementi raskrižja pravilno oblikovani od samog početka, tako da je potreba za kontrolom provoznosti i redefiniranjem elemenata raskrižja postala suvišna. Prikazani novi postupci projektiranja četverokrakih kanaliziranih raskrižja za kutove presjecanja osi od 60 do 90° za tegljač s poluprikolicom duljine 16.5 m.

Ključne riječi:

četverokraka kanalizirana raskrižja, nesemaforizirana raskrižja, trajektorije kretanja vozila, prometni otoci, rubovi kolnika, mjerodavno vozilo

Original scientific paper

Ivica Stančerić, Željko Korlaet, Vesna Dragčević

New design procedure for four-leg channelized intersections

The design and possible simplifications of four-leg channelized intersections are analysed in the paper. The research resulted in a new simpler approach in which all intersection elements are properly formed from the very beginning, so that the need for the swept path analysis and redefining of intersection elements is rendered superfluous. New procedures for the design of four-leg channelized intersections for the 60 to 90 degree intersection angles, and for semi-trailer trucks 16.5 m in length, are presented.

Key words:

four-leg channelized intersections, unsignalized intersections, vehicle movement trajectories, traffic islands, pavement edges, design vehicle

Wissenschaftlicher Originalbeitrag

Ivica Stančerić, Željko Korlaet, Vesna Dragčević

Neues Verfahren zum Entwurf kanalisierter Vierfach-Kreuzungen

In dieser Arbeit wird die Projektierung kanalisierter Vierfach-Kreuzungen und möglicher Vereinfachungen untersucht. Die durchgeführten Untersuchungen resultierten in einem neuen und einfacheren Verfahren, bei dem alle Elemente der Kreuzung von Anfang an gleichmäßig ausgebildet werden, so dass der Bedarf an Verkehrsflusskontrollen und nachträglichen Anpassungen einzelner Elemente der Kreuzung entfällt. Die dargestellten neuen Verfahren für den Entwurf von Vierfach-Kreuzungen sind bei Achsenschnittwinkeln zwischen 60 und 90° für 16,5 m lange Sattelzüge anwendbar.

Schlüsselwörter:

kanalisierte Vierfach-Kreuzungen, ampellose Kreuzungen, Fahrzeug-Fahrwege, Verkehrsinseln, Fahrbahnränder, maßgebendes Fahrzeug

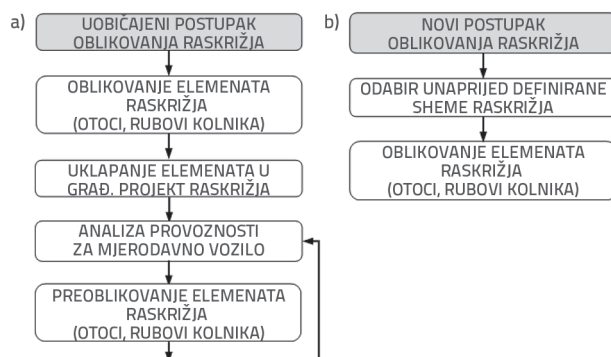
1. Uvod

Osnovni cilj kod projektiranja prometnica i prometnih površina je sigurno i nesmetano odvijanje prometa te racionalno korištenje površina. Sa stajališta sigurnosti odvijanje prometa na raskrižjima u razini bitno se razlikuje od onog na otvorenom potezu ceste, a glavni uzrok tomu je težina i broj prometnih radnji koje se izvode na njima. Upravo spajanje, odvajanje, preplitanje i presijecanje prometnih tokova čini takva mjesta potencijalno opasnim za nastanak prometnih nezgoda [1, 2]. Preporučene mjere za smanjenje prometnih nezgoda na raskrižjima najčešće uključuju: odabir lokacije, osiguranje dovoljne preglednosti, kanaliziranje prometnih tokova dodatnim trakovima za skretanje i razdjelnim otocima, rekonstrukciju osi kod raskrižja s nepovoljnim kutovima presijecanja osi cesta, smanjenje brzine vožnje te postavljanje adekvatnih prometnih znakova [1-3].

U pogledu prometne sigurnosti na raskrižjima, uz spomenuta istraživanja značajan broj istraživačkih radova bavi se ponašanjem starijih vozača na njima [4-8] jer stariji vozači zbog smanjenih fizičkih, percepcijskih i kognitivnih sposobnosti predstavljaju potencijalnu opasnost za sebe i ostale sudionike u prometu. Međutim, rezultati tih istraživanja nude samo općenite preporuke i mjere za poboljšanje uvjeta odvijanja prometa na raskrižjima bez konkretno razrađenih i praktičnih primjera.

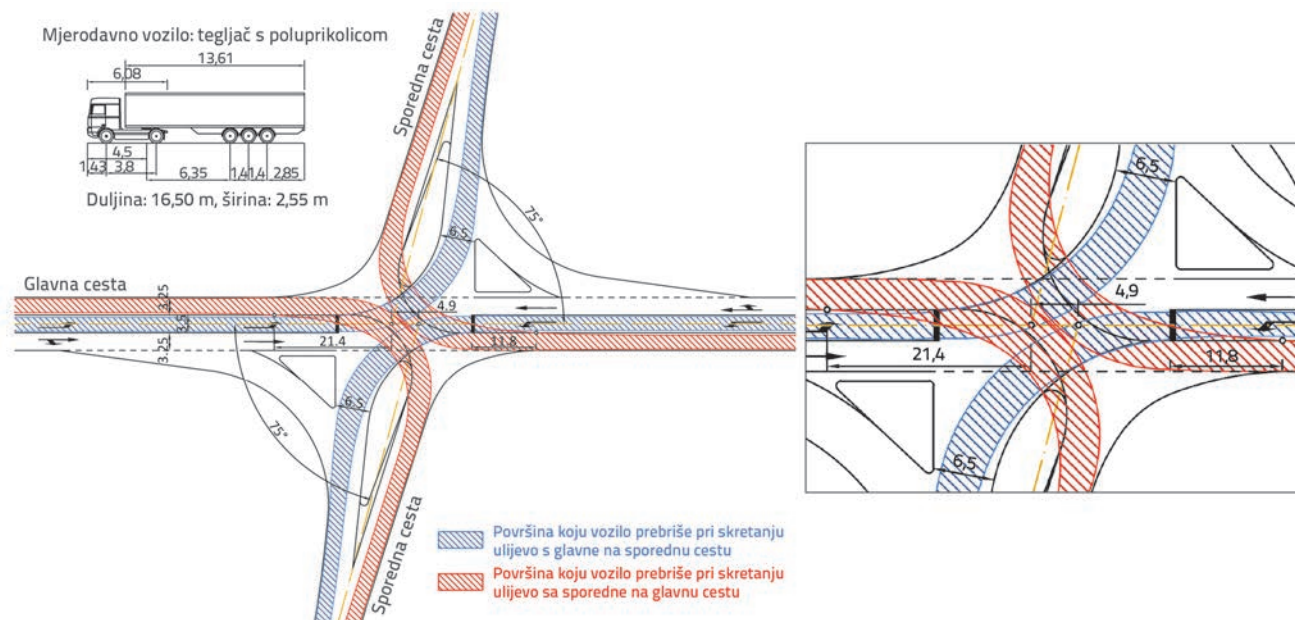
U posljednjih desetak godina značajnijih znanstvenih radova na temu sustavnog oblikovanja četverokrakih raskrižja u razini gotovo da i nema. Noviji radovi uglavnom se odnose na oblikovanje kružnih raskrižja [9] ili na oblikovanje pojedinačnih elemenata raskrižja, desnog ruba kolnika kod desnog skretanja sa sporedne na glavnu cestu [10, 11] te dodatnih trakova za lijevo [12, 13] i desno [14] skretanje iz glavne na sporednu cestu. Uobičajeni postupak oblikovanja četverokrakih kanaliziranih

raskrižja u razini na kojem se zasnivaju hrvatske [15], relevantne europske [16-18] i američke smjernice [19] sastoji se od zasebnog oblikovanja projektnih elemenata raskrižja i njihovom slaganju u građevinski projekt, zatim na ispitivanju prozivnosti za mjerodavno vozilo te ispravljanju krivo oblikovanih elemenata (slika 1.a).



Slika 1. Postupak oblikovanja raskrižja: a) uobičajeni postupak; b) novi postupak

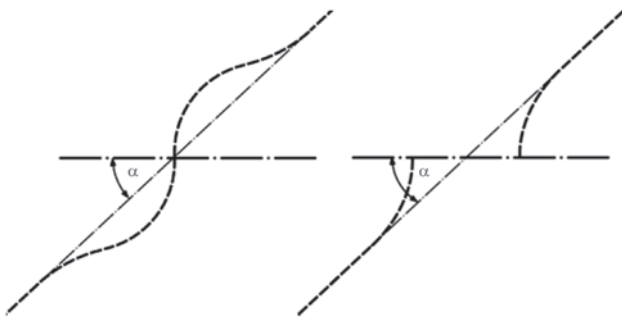
Takav pristup donekle funkcionira kod oblikovanja trokrakih raskrižja (potreba za preoblikovanjem krivo projektiranih elemenata nije česta) jer su i spomenute smjernice najčešće namijenjene njihovom oblikovanju. Međutim, oblikovanje četverokrakih kanaliziranih raskrižja prema takvom pristupu rijetko kada završava (osim za pravi kut presijecanja osi cesta) bez značajnijih izmjena početno oblikovanih elemenata raskrižja (osi privoza, rubova kolnika, otoka i lokacije "stop" linije). Neki od spomenutih problema mogu se vidjeti na primjeru raskrižja prikazanom na slici 2., oblikovanom u skladu s hrvatskim normama [15] i njemačkim smjericama [16] za kut križanja



Slika 2. Provjera prozivnosti četverokrakog raskrižja s razmaknutim osima sporedne ceste, oblikovanom prema normi [15] i smjericama [16], za kut križanja od 75°

od 75°. Na tom raskrižju, radi izbjegavanja naleta vozila (koja prolaze ravno kroz raskrižje) na otoke, osi sporednih cesta moraju biti na određenoj udaljenosti. Dakle, umjesto jedne osi na sporednoj cesti pojavila se potreba za dvije, što znači da se te osi na nekom potezu moraju prilagoditi originalnoj osi sporedne ceste. Osim toga vozila koja skreću ulijevo (sa sporedne na glavnu cestu) da bi se mimoišla bez sudara moraju prelaziti preko vrhova izduženih otoka i "stop" linije. Ovaj primjer raskrižja (slika 2.) pokazuje da su značajne promjene u oblikovanju elemenata potrebne i uglavnom uzrokovane činjenicom da na četverokrakim kanaliziranim raskrižjima posebnu pozornost treba obratiti na neometan prolazak vozila kroz raskrižje te na vozila koja skreću ulijevo sa sporedne na glavnu cestu.

Kod oblikovanja projektnih elemenata četverokrakih raskrižja s kutovima manjim od 70° i većim od 110° radi poboljšanja vidljivosti iz vozila potrebno je izvršiti rekonstrukciju osi sporedne ceste [20-23]. Pri tome se u smjernicama [16, 19] nude različiti načini rekonstrukcije osi sporedne ceste, ali ne i detaljan način oblikovanja elemenata i njihovog slaganja u građevinsko-prometnu cjelinu (slika 3.). Rekonstrukcija osi sporedne ceste podrazumijeva i niz dodatnih problema u smislu oblikovanja raskrižja i vođenja prometnih tokova te dodatnog otkupa zemljišta.



Slika 3. Rekonstrukcije osi sporedne ceste na četverokrakim raskrižjima kod oštrog kuta križanja osi cesta [16]

Sve je to motivacija za provedbu sustavnog istraživanja s ciljem pojednostavljenja oblikovanja četverokrakih kanaliziranih (nesemaforiziranih) raskrižja u razini i ispunjavanja potrebe projektanata za što većom pouzdanošću i učinkovitošću pri rješavanju projektnih zadataka. Istraživanje se temelji na simulaciji (trajektorijama) kretanja mjerodavnog vozila, kako bi se u što većoj mjeri isključila potreba za naknadnom provjerom prozvodnosti i ispravljanjem krivo oblikovanih elemenata. Zbog opsega provedenog ispitivanja i ograničenog prostora za opširnije razlaganje, u ovom radu bit će prikazana rješenja samo za kutove od 60 do 90°.

2. Metodologija

Razvoj računalnih programa koji simuliraju kretanje vozila (Auto track, Vehicle tracking, AutoTURN) omogućio je lakše i brže iscrtavanje trajektorija kretanja vozila, a samim tim i iznalaženje

novog postupka oblikovanja raskrižja za odabrano mjerodavno vozilo. Osnovni preduvjet za primjenu računalnih programa za iscrtavanje trajektorija kretanja vozila jest njihova pouzdanost. U ovom su radu, kao korisnička aplikacija u AutoCAD-u, za iscrtavanje trajektorija kretanja vozila primijenjena dva računalna programa: AutoTrack i GF (izrađen na Građevinskom fakultetu u Zagrebu). Pouzdanost navedenih programa verificirana je u odnosu na eksperimentalna ispitivanja geometrije kretanja vozila na poligonu [24, 25]. Rezultati ispitivanja [24, 25] su pokazali da su odstupanja od stvarno izmjerenih vrijednosti u granicama točnosti izvedbe cestovnih kolnika te da su programi pogodni za istraživački rad na iscrtavanju trajektorija kretanja vozila. Prije početka ispitivanja oblikovanja četverokrakih raskrižja provedeno je i ispitivanje vidljivosti iz vozila [23] kako bi se odredio granični kut presijecanja osi ceste do kojeg je moguće zadržati os sporedne ceste u pravcu, jer su dosadašnja istraživanja [20-22] pokazala da se na raskrižjima s kutovima presijecanja osi sporedne i glavne ceste manjim od 70° javlja problem nedovoljne vidljivosti iz vozila. Ispitivanje [23] provedeno je na shemi četverokrakog raskrižja s tri traka na glavnoj cesti (srednji trak je bio za lijevo skretanje) uzimajući u obzir fizička ograničenja (okret glave) [26] i vidnu sposobnost vozača (vidno polje) prema Direktivi EU komisije [27]. Rezultati ispitivanja [23] pokazali su da za brzine vozila na glavnoj cesti do 80 km/h treba kut presijecanja osi ceste ograničiti na najmanje 60°. Zato je pri iznalaženju novog postupka oblikovanja četverokrakih kanaliziranih raskrižja u razini sa zadržavanjem osi sporedne ceste u pravcu kao početni usvojen kut od 60°.

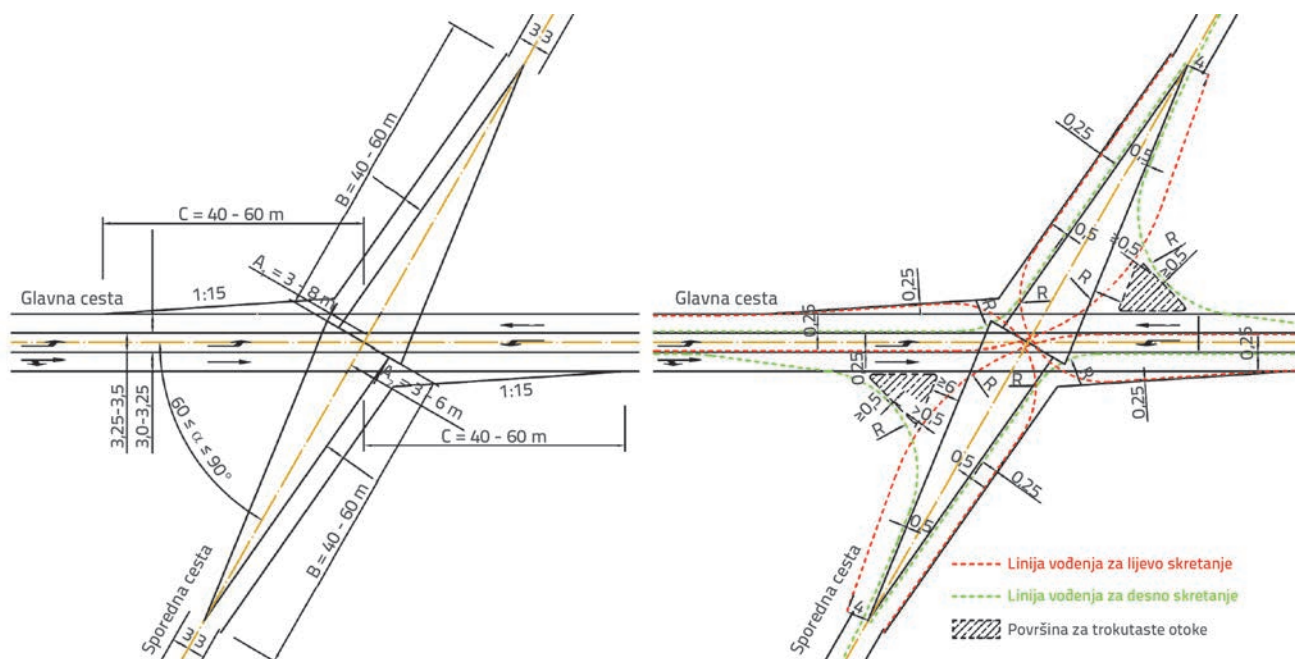
3. Istraživanje

Istraživanje s ciljem definiranja novog postupka oblikovanja četverokrakih kanaliziranih raskrižja u razini (slika 1.b) započelo je s traženjem adekvatne sheme raskrižja, tj. sheme na kojoj svi elementi raskrižja mogu biti oblikovani za različite kutove križanja osi ceste bez potrebe za naknadnim ispitivanjem prozvodnosti.

Iz tog razloga definirane su mnogobrojne teoretske sheme (ukupno 1240) četverokrakih raskrižja (slika 4.) koje su oblikovane na osnovi sljedećih kriterija:

- kutovi presijecanja osi sporedne i glavne ceste $60 \leq \alpha \leq 90^\circ$ (korak od 5°)
- tri traka (dva prolazna i jedan trak za lijevo skretanje) na glavnoj cesti širine od 3,0 do 3,5 m
- dva traka na sporednoj cesti širine 3,0 m
- desni prilazni vozni trak na sporednoj cesti širine 3,5 m
- prilazni trakovi na sporednoj cesti oblikovani tako da je moguće smjestiti središnji otok ($A_{1,2} = 3,0 - 8,0$ m i $B = 40,0 - 60,0$ m)
- vanjski rubovi prolaznih trakova na glavnoj cesti zakošeni u nagibu 1:15 na različitim udaljenostima od sjecišta osi ($C = 40,0 - 60,0$ m).

Tako veliki broj shema raskrižja odabran je s namjerom da se pronade shema koja će imati najkraći razmak između "stop" linije



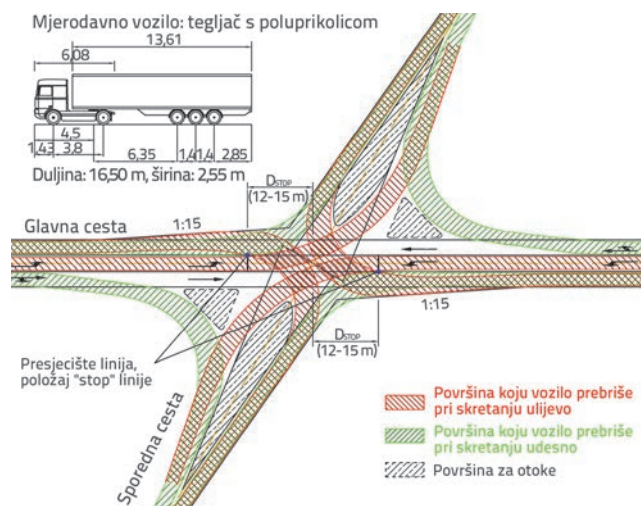
Slika 4. Postavke polaznih shema s linijama vođenja i bočnim zaštitnim širinama

i točke u kojoj je sjecište osi glavne i sporedne ceste te shema koja će imati najkraću udaljenost između vrha izduženog otoka na sporednoj cesti i vanjskog ruba prolaznog traka na glavnoj cesti (prema hrvatskoj normi [15] i njemačkim smjernicama [16], odmak vrha otoka od vanjskog ruba trebao bi biti između 2,0 i 4,0 (5,0) m, tako da se može osigurati mimoilaženje vozila iz suprotnih privoza pri skretanju lijevo i da ga vozači mogu pravovremeno uočiti).

Na svim tim shemama raskrižja provedeno je ispitivanje provoznosti (iscrtavanje trajektorija kretanja vozila) za vozilo tegljač s poluprikolicom duljine 16,5 m (slika 5.), čije su dimenzije u skladu s Direktivom EU komisije [28], uzimajući u obzir sljedeće kriterije relevantne za sigurno i nesmetano odvijanje prometa u raskrižju:

- linije vođenja (prati ih prednja najistaknutija točka vozila) u skretanju sastavljene su od ulaznog i izlaznog pravca te kružnog luka, najmanjeg primijenjenog polumjera od 12,5 m (slika 4.) [28]
- minimalni sigurnosni bočni razmaci iznosili su 0,25 m uz iscrtani otok i rub kolnika
- sigurnosni razmak mimoilaženja iznosio je najmanje 1,0 m za lijevo skretanje vozila iz glavne na sporednu cestu
- sigurnosni razmak mimoilaženja iznosio je od 0,0 do 1,0 m za lijevo skretanje vozila iz glavne na sporednu cestu
- vožnje u skretanju bez zadiranja u trakove namijenjene drugim vozilima i prelaženja punih crta horizontalne signalizacije.

Nakon ispitivanja provoznosti iscrtane su trajektorije kretanja mjerodavnog vozila (površine koje vozilo prebriše pri kretanju) te su oblikovani središnji i trokutasti otoci na sporednoj cesti (slika 5.).



Slika 5. Površine koje mjerodavno vozilo prebriše pri skretanjima na polaznim shemama

Središnji otoci oblikovani su između konusno položenih voznih trakova i površina koje mjerodavno vozilo prebriše pri lijevom skretanju uz minimalni sigurnosni bočni razmak od 0,5 m. Trokutasti otoci su oblikovani između vanjskog ruba prolaznog traka glavne ceste i površine koju vozilo prebriše pri lijevom i desnom skretanju (s glavne ceste na sporednu cestu) uz minimalni sigurnosni bočni razmak od 0,5 m. Sigurnosni bočni razmaci uz površine koje mjerodavno vozilo prebriše pri lijevom skretanju s glavne ceste uvedeni su radi povećanja sigurnosti i propusne moći na raskrižju križanja (neometan protok vozila radi lakšeg mimoilaženja).

Sheme raskrižja sa zakošenim vanjskim rubovima prolaznih trakova na glavnoj cesti pokazale su se boljima od shema

raskrižja bez zakošenja zbog poboljšanja u kanaliziranju prometnih tokova. To poboljšanje se ogleda u dovođenju "stop" linije što bliže sjecištu osi, što posljedično dovodi do kraćeg vremena prolaska vozila kroz raskrižje. Položaj "stop" linije određen je na temelju presjecišta trajektorije kretanja vozila za lijevo skretanje iz sporednog na glavni smjer ceste i ruba traka za lijevo skretanje na glavnoj cesti (slika 5.). Udaljenost presjecišta ovisno o kutu između osi cesta u rasponu je od 25,0 do 28,0 m za sheme raskrižja bez zakošenja, te od 12,0 do 15,0 m kod shema raskrižja sa zakošenjem. Zakošeni vanjski rubovi prolaznih trakova na glavnoj cesti namijenjeni su dugim teretnim vozilima i njihovom se primjenom ne smanjuje sigurnost u odvijanju prometa na glavnoj cesti jer vozila na njoj i dalje mogu zadržati vožnju u pravcu.

4. Rezultati istraživanja

Na temelju simulacija kretanja mjerodavnog vozila na mnogobrojnim shemama raskrižja odabrana je mjerodavna shema za kutove presijecanja osi glavne i sporedne ceste $60 \leq \alpha \leq 90^\circ$ sa sljedećim parametrima: $A_1 = 7,33$ m, $A_2 = 5,0$ m, $B = 55,0$ m i $C = 45,0$ m. Odabrana shema raskrižja za razliku od ostalih shema ima za većinu kutova križanja osi cesta najkraće udaljenosti (od 14,0 do 15,0 m) između "stop" linije i sjecišta osi i ima najkraće udaljenosti (od 3,46 do 4,04 m) između vrha središnjeg otoka i ruba prolaznog traka na glavnoj cesti (slika 6.). Parametri odabrane sheme raskrižja upućuju na to da su trakovi sporedne ceste asimetrično odmaknuti od osi, lijevi trak u nagibu 1:7,5, a desni u nagibu 1:11. Ispitivanje je pokazalo da se odabrana shema može primijeniti za različite širine trakova na glavnoj i sporednoj cesti, pri čemu kombinacije širina trakova na glavnoj cesti mogu biti sljedeće: 3,0 - 3,5 - 3,0; 3,25 - 3,25 - 3,25 ili 3,25 - 3,5 - 3,25 m (srednja vrijednost predstavlja širinu traka za lijevo skretanje, a ostale dvije predstavljaju širinu prolaznih prometnih trakova). Ova shema poslužila je za daljnje istraživanje oblikovanja elemenata raskrižja (za kutove presijecanja osi glavne i sporedne ceste $60 \leq \alpha \leq 90^\circ$) i to:

- izduženog otoka za kanaliziranje prometa na sporednoj cesti,
- desnog ruba kolnika kod desnog skretanja iz sporedne na glavnu cestu,
- trokutastog otoka i vanjskog ruba kolnika kod desnog skretanja s glavne na sporednu cestu (klinasti izvoz).

S obzirom na ograničeni prostor, u ovom se radu daju preporuke samo za optimalno oblikovanje središnjeg izduženog otoka i desnog ruba kolnika na sporednoj cesti.

4.1. Oblikovanje izduženog otoka za kanaliziranje prometa

Izduženi otok za kanaliziranje prometa na prethodno odabranoj shemi smješta se između zakošenih trakova na sporednoj cesti (slike 5. i 6.). Unutarnji rubovi zakošenih trakova predstavljaju bočne strane otoka. Rezultati ispitivanja pokazali su da vrh

otoka treba oblikovati iz tri kružna luka (R_{MS} , R_{SM} i $R = 0,75$ m). Polumjeri kružnih lukova R_{MS} i R_{SM} određeni su ispitivanjem i navedeni su u tablici 1 ovisno o kutu presijecanja osi cesta. Za ostale kutove križanja osi cesta polumjeri se dobivaju linearnom interpolacijom između dva susjedna iz tablice 1. i zaokružuju na točnost od 0,5 m.

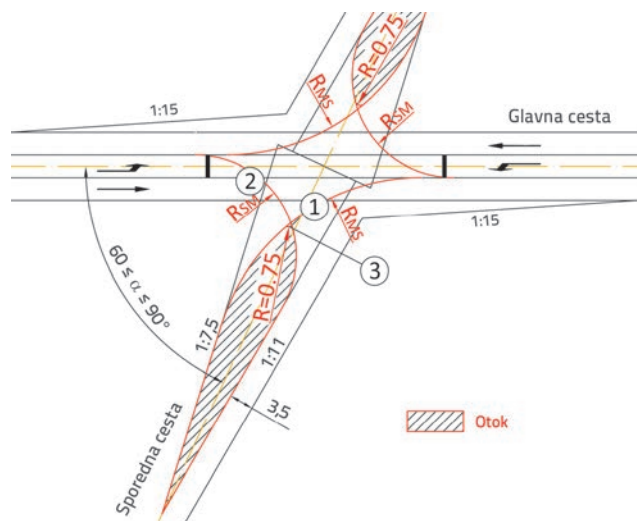
Tablica 1. Polumjeri kružnih lukova R_{MS} i R_{SM}

α [°]	60	65	70	75	80	85	90
R_{MS} [m]	34,0	29,5	26,0	23,5	20,5	18,5	16,5
R_{SM} [m]	12,5 (13,0)	14,0 (14,5)	15,0 (15,5)	16,5 (17,0)	18,5 (19,0)	20,5 (21,0)	23,0 (23,5)

() koristiti samo kada je razmak mimoilaženja 1,0 m između vozila u lijevom skretanju

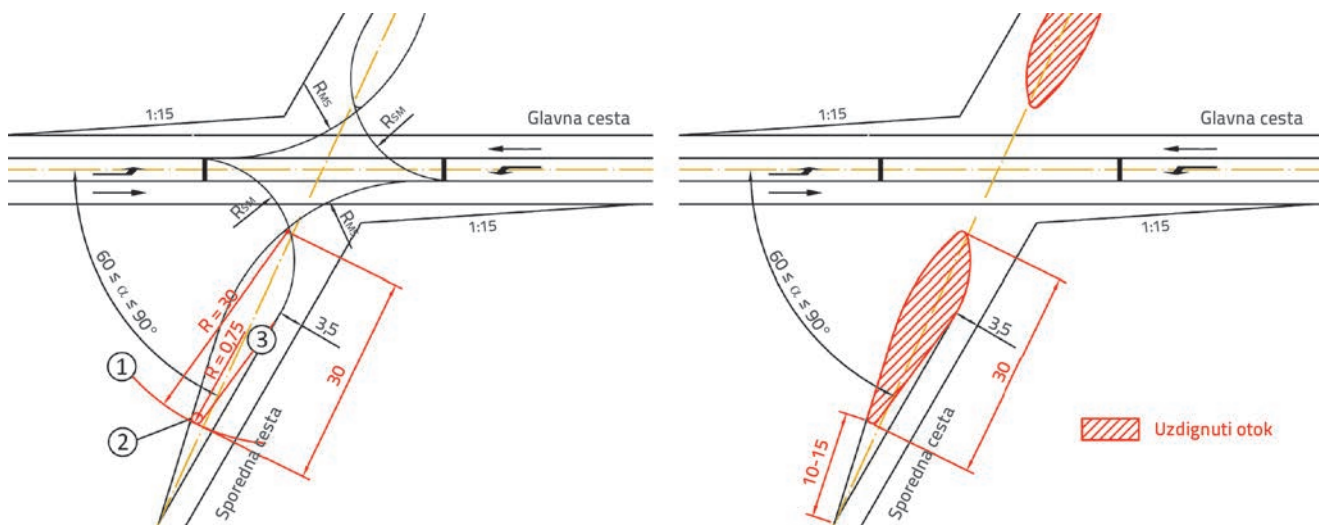
Oblikovanje vrha otoka za kanaliziranje prometa provodi se na sljedeći način (slika 6.):

1. konstruirati kružni luk polumjera R_{MS} koji dodiruje lijevi rub traka za lijevo skretanje na glavnoj cesti i lijevi rub središnjeg otoka na sporednoj cesti,
2. konstruirati kružni luk polumjera R_{SM} koji dodiruje desni rub središnjeg otoka na sporednoj cesti i lijevi rub prolaznog traka na glavnoj cesti,
3. vrh otoka zaobliti kružnicom polumjera 0,75 m.



Slika 6. Konstrukcija vrha otoka za kanaliziranje prometa

Prema projektantskoj praksi i u skladu s normom [15] i smjericama [16], uobičajeno je da se otok za kanaliziranje prometa na sporednoj cesti sastoji od uzdignutog i iscrtanog dijela radi jasnog kanaliziranja prometnih tokova. Ispitivanje na odabranoj shemi raskrižja je pokazalo da uzdignuti dio otoka može biti dugačak najviše 30,0 m ako su oba kraja zaobljena kružnim lukom polumjera 0,75 m, pri čemu iscrtani dio otoka može biti dugačak od 10,0 do 15,0 m.



Slika 7. Konstrukcija uzdignutog dijela središnjeg otoka

Oblikovanje uzdignutog dijela otoka se može provesti na sljedeći način (slika 7.):

1. konstruirati kružni luk polumjera 30,0 m iz gornjeg vrha otoka zaobljenog kružnim lukom ($R = 0,75$ m) tako da presječe osi ceste i lijevi rub središnjeg otoka,
2. konstruirati kružnicu polumjera 0,75 m koja dodiruje kružnicu iz prvog koraka i lijevi rub središnjeg otoka,
3. konstruirati pravac koji tangira kružnicu iz drugog koraka i kružni luk polumjera R_{SM}

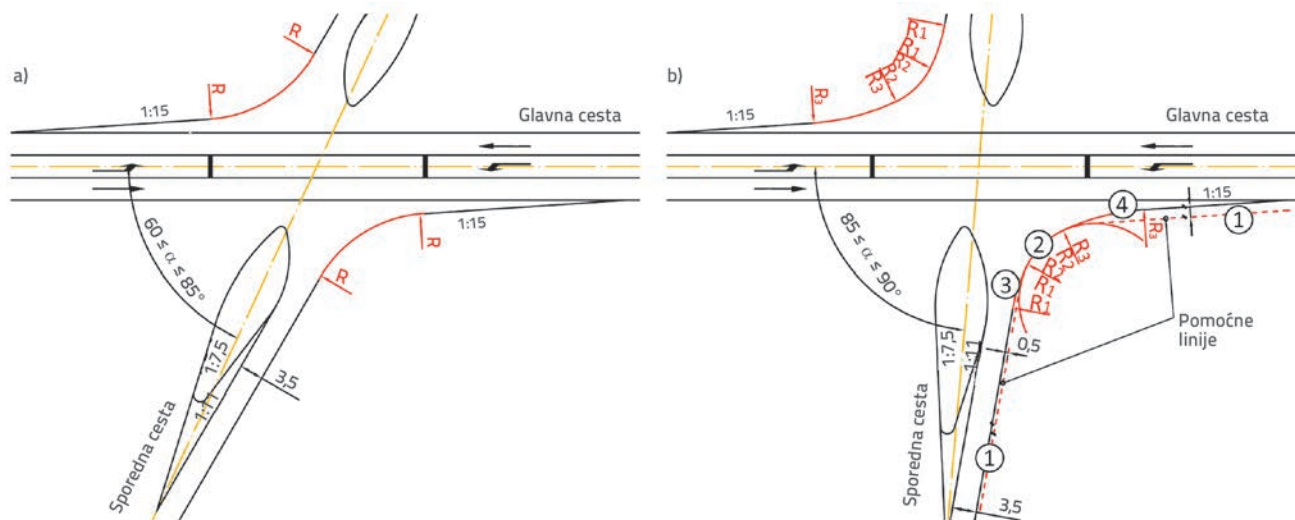
4.2. Oblikovanje desnog ruba kolnika

Oblikovanje desnog ruba kolnika određeno je na temelju trajektorija kretanja mjerodavnog vozila, za lijevo i desno skretanje iz sporedne na glavnu cestu (slika 5.). Ispitivanje je pokazalo da oblikovanje desnog ruba kolnika radi nesmetanog odvijanja prometa treba izvoditi na dva različita načina ovisno o kutu presijecanja osi ceste. Na raskrižjima s kutovima presijecanja

osi ceste $60^\circ \leq \alpha < 85^\circ$ desni rub kolnika treba izvoditi jednim kružnim lukom (slika 8.a). Na raskrižjima s kutovima presijecanja osi ceste $85^\circ \leq \alpha \leq 90^\circ$, oblikovanje desnog ruba kolnika treba izvoditi s tri kružna luka čiji je odnos polumjera $R_1 : R_2 : R_3 = 2 : 1 : 3$ (slika 8.b). Prema navedenom, zakošenja (1:15) vanjskih rubova prolaznih trakova glavne ceste pokazala su se optimalnim rješenjem jer nisu potrebna samo lijevim, već i desnim skretačima sa sporedne na glavnu cestu (slike 8., 9. i 10.). Polumjeri kružnih lukova R i R_2 navedeni su u tablici 2. u ovisnosti o kutu križanja osi ceste.

Tablica 2. Polumjeri kružnih lukova za oblikovanje desnog ruba kolnika na četverokrakim raskrižjima

α [°]	60	65	70	75	80	85	90
R [m]	21,0	19,0	18,0	17,0	17,0	-	-
R_2 [m]	-	-	-	-	-	11,0	11,0



Slika 8. Oblikovanje desnog ruba kolnika: a) za kutove presijecanja osi ceste $60^\circ \leq \alpha < 85^\circ$ b) za kutove presijecanja osi ceste $85^\circ \leq \alpha \leq 90^\circ$

Za kutove $80^\circ < \alpha < 85^\circ$ polumjer kružnog luka treba odabrati kao za 80° . Za ostale kutove križanja osi cesta polumjeri se određuju linearnom interpolacijom između dva susjedna polumjera iz tablice 2. i zaokružuju se na točnost od 0,5 m.

Konstrukcija desnog ruba kolnika s tri kružna luka za kutove presijecanja osi cesta $85^\circ \leq \alpha \leq 90^\circ$ može se provoditi na sljedeći način (slika 8.b):

1. konstruirati dvije pomoćne linije, prvu paralelnu s desnim rubom kolnika sporedne ceste, na razmaku od 0,5 m, i drugu paralelnu sa "zakošenjem" (1:15) vanjskog ruba prolaznog kolnika glavne ceste, na razmaku od 1,5 m
2. konstruirati kružni luk polumjera (R_2) (tablica 2.) koji dodiruje pomoćne linije iz prvog koraka
3. konstruirati kružni luk polumjera (R_1) koji dodiruje (zajednička tangenta) kružni luk polumjera (R_2) i desni rub kolnika sporedne ceste
4. konstruirati kružni luk polumjera (R_3) koji dodiruje kružni luk (zajednička tangenta) polumjera (R_2) i zakošenje (1:15) vanjskog ruba prolaznog traka glavne ceste.

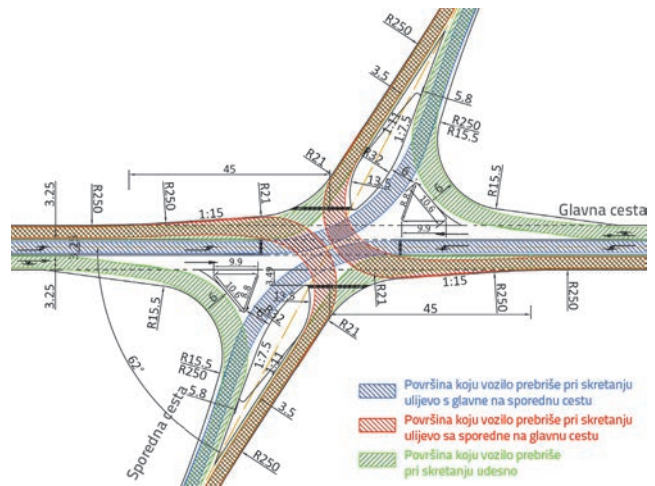
4.3. Provjera novog postupka oblikovanja raskrižja

Provjera novog postupka oblikovanja provedena je na dva teoretska primjera četverokrakih kanaliziranih raskrižja s kutovima presijecanja osi glavne i sporedne ceste koji nisu izravno obuhvaćeni prethodnim ispitivanjem. Za potrebe vrednovanja izvršeno je oblikovanje elemenata raskrižja (rubova kolnika, otoka) u skladu s novim postupkom prethodno opisanim, za kutove presijecanja osi cesta od 62° i 82° (slike 9. i 10.), za 16,5 m dugačak tegljač s poluprikolicom te za širinu trakova na glavnoj cesti od 3,25 - 3,25 - 3,25 m. Na slici 9. prikazano je četverokrako kanalizirano raskrižje za kut od 62° koje je konstruirano na temelju sljedećih ulaznih podataka:

- shema raskrižja nacrtana je prema podacima iz poglavlja 4,
- polumjeri $R_{MS} = 32,0$ m i $R_{SM} = 13,5$ m odabrani su za oblikovanje izduženog otoka interpolacijom iz tablice 1 (razmak između vozila koja se mimoilaze pri lijevom skretanju je 1,0 m)
- polumjer kružnog luka $R = 21,0$ m odabran je iz tablice 2 za oblikovanje desnih rubova kolnika kod desnog skretanja iz sporedne na glavnu cestu.

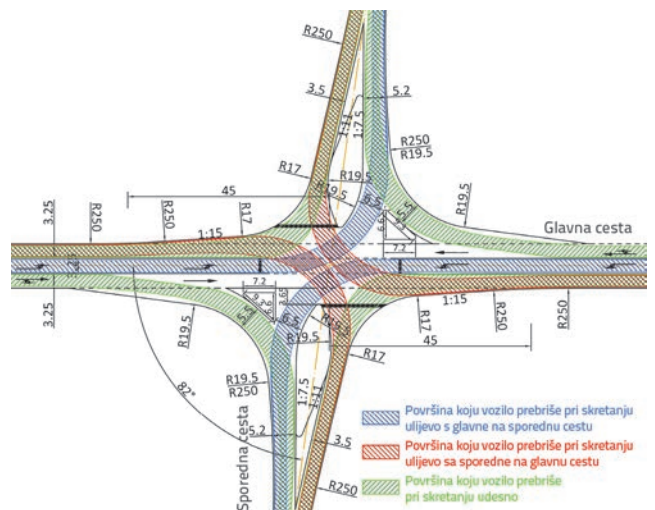
Na slici 10. prikazano je četverokrako kanalizirano raskrižje za kut od 82° koje je konstruirano na temelju sljedećih ulaznih podataka:

- shema raskrižja nacrtana je prema podacima iz poglavlja 4,
- polumjeri $R_{MS} = 19,5$ m i $R_{SM} = 19,5$ m odabrani su za oblikovanje izduženog otoka interpolacijom iz tablice 1 (razmak između vozila koja se mimoilaze pri lijevom skretanju je 1,0 m)
- polumjer kružnog luka $R = 17,0$ m odabran je iz tablice 2 za oblikovanje desnih rubova kolnika kod desnog skretanja iz sporedne na glavnu cestu.



Slika 9. Četverokrako kanalizirano raskrižje za kut presijecanja osi cesta od 62°

Rezultati ispitivanja prozivnosti na raskrižjima (slike 9. i 10.) pokazali su da primijenjeni postupak oblikovanja elemenata raskrižja osigurava nesmetano odvijanje prometa uzimajući u obzir predviđene bočne zaštitne širine od 0,5 m uz uzdignute otoke i 0,25 m uz desne rubove kolnika.



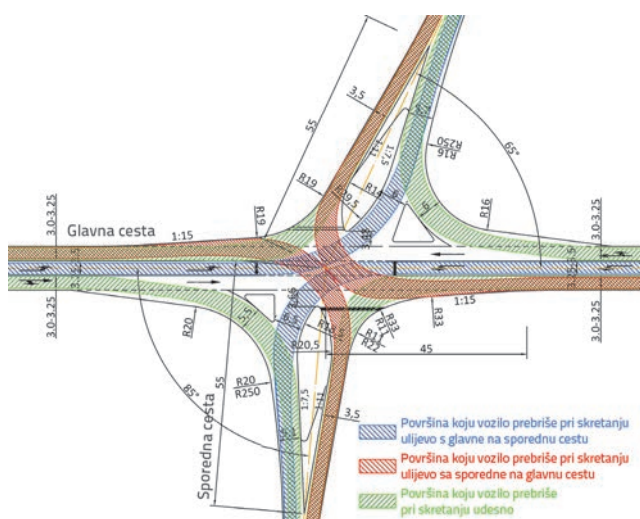
Slika 10. Četverokrako kanalizirano raskrižje za kut presijecanja osi cesta od 82°

Nakon što je ispitivanje prozivnosti pokazalo da su odabrana shema i novi postupak prikladni, provjera je proširena i na četverokrako kanalizirano raskrižja s različitim kutovima presijecanja osi glavne i sporednih cesta (slika 11.). Rezultati testa (tablica 3.) pokazali su da su gotovo sve kombinacije križanja između sporedne i glavne ceste moguće, a jedna od kombinacija s različitim kutovima (65° i 85°) presijecanja osi cesta prikazana je na slici 11.

Tablica 3. Moguće kombinacije kutova presijecanja osi sporedne i glavne ceste

α [°]	60	65	70	75	80	85	90
60	+						
65	+	+					
70	+	+	+				
75	+	+	+	+			
80	+	+	+	+	+		
85	-	+	+	+	+	+	
90	-	-	+	+	+	+	+

+ moguća kombinacija
- nije moguća kombinacija



Slika 11. Četverokrako kanalizirano raskrižje za kuteve presijecanja osi ceste od 65° i 85°

5. Rasprava

Geometrijski primjereno oblikovano raskrižje predstavlja temelj za sigurno i nesmetano odvijanje prometa te odgovarajuću propusnu moć. Ovo je istraživanje upravo usmjereno na to geometrijsko oblikovanje četverokrakih nesignaliziranih raskrižja u razini, tj. na promjene u oblikovanju elemenata raskrižja (otoka, rubova kolnika) za različite kutove presijecanja osi ceste. Osim toga, u ovom se radu razmatra i kako promijeniti dosadašnji (izrazito iterativni) postupak projektiranja raskrižja s ciljem njegova pojednostavljenja i ubrzanja.

Ako projektanti četverokraka kanalizirana raskrižja oblikuju prema sadašnjoj normi [15] ili smjernicama [16-18], koje su prije svega namijenjene oblikovanju trokrakih raskrižja, suočavaju se s mnogobrojnim iteracijama, pa je utrošak vremena velik da bi na kraju dobili nepouzdana rješenja. Stoga su u ovom radu razrađeni elementi oblikovanja četverokrakih raskrižja za različite kutove kako bi se pridonijelo pouzdanosti pri oblikovanju elemenata raskrižja te osmislio novi postupak projektiranja prema kojem nema potrebe za naknadnim

ispitivanjem prozivnosti i rekonstrukcijom osi sporedne ceste. Djelotvornost raskrižja oblikovanih na način prikazan u 4. poglavlju ogleda se u nesmetanom kretanju vozila kroz njih, osobito vozila u lijevom skretanju iz sporedne na glavnu cestu, tj. vozila u skretanju ne moraju čekati tko će prvi proći raskrižjem (slike 9. i 10.). Predložena modifikacija oblikovanja vanjskih rubova kolnika na glavnoj cesti ("zakošenje" u nagibu od 1:15) u zoni raskrižja u odnosu na uobičajeni pristup omogućava vozilima koja skreću ulijevo iz sporedne na glavnu cestu da ne zadiru u trakove namijenjene drugim vozilima, a i vrijeme prolaska za vozila, koja skreću iz glavne na sporednu cestu, kroz raskrižje je kraće jer je "stop" linija bliže sjecištu osi ceste. Također rezultati ovog istraživanja su pokazali da je moguće i kombinirati različite kutove presijecanja osi ceste (tablica 3., slika 11.), pa je i ugradnja semafora moguća bez dodatne rekonstrukcije.

U ovom istraživačkom području sličnih radova uglavnom nema, ali postoje priručnici [29-31] koji su proizašli na temelju prikupljenog iskustva u projektiranju raskrižja u različitim državama SAD-a. U njima su uglavnom obrađeni svi elementi raskrižja (rubovi kolnika, otoci, dodatni trakovi) zasebno, i to uglavnom za kut raskrižja od 90°. Promjena oblika elemenata ovisno o kutu raskrižja definirana je samo u [29], i to samo za desni rub kolnika kod desnog skretanja iz sporedne na glavnu cestu. Primjenjivost američkih priručnika u Europi je upitna jer su europska vozila (osobito teretna) drugačijih dimenzija.

Iako je potvrđena pouzdanost novog postupka projektiranja raskrižja, nedostaci su ovog istraživanja u tome što je ono provedeno na teoretskim shemama raskrižja pa su svakako potrebna dodatna ispitivanja na realnim primjerima raskrižja kako bi se mogući nedostaci korigirali.

Na četverokrakim nesignaliziranim raskrižjima često se zbog brojnih prometnih radnji događaju prometne nezgode. Međutim, jedan od glavnih uzroka za to je prekoračenje brzine u zoni raskrižja. Kako bi se brzina vozila zadržala u dopuštenim granicama, provedena su istraživanja [32, 33], a rezultati tih istraživanja pokazali su koja je vrsta signalizacije najučinkovitija u reduciranju brzine. Ti rezultati svakako bi se mogli primijeniti tijekom testiranja realnih primjera četverokrakih raskrižja.

6. Zaključak

Rezultati istraživanja su pokazali da je moguće osmisli novi postupak oblikovanja četverokrakih kanaliziranih raskrižja koja od početka imaju adekvatne dimenzije elemenata (otoka, rubova kolnika) za odabrano mjerodavno vozilo. Dodatno, novi postupak omogućuje projektiranje raskrižja s različitim kutovima presijecanja osi ceste bez potrebe za rekonstrukcijom osi sporedne ceste.

Projektiranje raskrižja prema novom postupku pokazalo se pouzdanim jer je postupak provjeren na primjerima raskrižja s kutovima presijecanja osi ceste koji nisu bili izravno uključeni u istraživanje. Rezultati ovog istraživanja s obzirom na pouzdanost

pri oblikovanju elemenata raskrižja trebali bi svakako pomoći projektantima u njihovu radu te bi mogli biti implementirani u računalnom programu za projektiranje raskrižja.

Buduća istraživanja treba usmjeriti na primjenu novog postupka na drugim vrstama raskrižja, poput kružnih i turbokružnih raskrižja, i to za različite kutove križanja osi cesta.

LITERATURA

- [1] Ye, X., Pendyala, R.M.: Washington, S. P.; Konduri, K.; Oh, J.: A Simultaneous Equations Model of Crash Frequency by Collision Type for Rural Intersections. *Safety Science*, 47 (2009) 3, pp. 443-452, <https://doi.org/10.1016/j.ssci.2008.06.007>
- [2] Abdel-Aty, M., Haleem, K.: Analyzing Angle Crashes at Unsignalized Intersections Using Machine Learning Techniques. *Accident Analysis and Prevention*, 43 (2011) 1, pp. 461-470, <https://doi.org/10.1016/j.aap.2010.10.002>
- [3] Wang, Y.G., Bai, H., Xiang, W.S.: Traffic Safety Performance Assessment and Multivariate Treatments for Intersection Locations. *The Baltic Journal of Road and Bridge Engineering*, 6 (2011) 1, pp. 30-38., <https://doi.org/10.3846/bjrbe.2011.05>
- [4] Roge, J., Pebayle, T., Lambilliotte, E.: Influence of age, speed and duration of monotonous driving task in traffic on the driver's useful visual field. *Vision Research*, 44 (2004) 23, pp. 2737-2744, <https://doi.org/10.1016/j.visres.2004.05.026>
- [5] Oxley, J., Fildes, B., Corben, B., Langford, J.: Intersection design for older drivers. *Transportation Research Part F, Accident Research Centre, Monash University, Melbourne, Australia*, 9 (2006), pp. 335-346.
- [6] Whelan, M., Langford, J., Oxley, J., Koppel, S., Charlton, J.: The elderly and Mobility: A Review of the Literature. Report 255, Monash University Accident Research Centre, Clayton, Victoria, Australia, pp. 73-84, 2006.
- [7] Dukic, T., Broberg, T.: Older drivers' visual search behaviour at intersections. *Transportation Research Part F-Traffic Psychology and Behaviour*, 15 (2012) 4, pp 462-470, <https://doi.org/10.1016/j.trf.2011.10.001>
- [8] Rakotonirainy, A, Steinhardt, D, Delhomme, P.: Older drivers' crashes in Queensland, Australia. *Accident Analysis and Prevention*, 48 (2012) SI, pp. 423-429, <https://doi.org/10.1016/j.aap.2012.02.016>
- [9] Giuffrè, O., Guerrieri, M., Granà, A.: Turbo-roundabout General Design Criteria and Functional Principles: Case Studies from Real World. *Proceedings of the 4th International Symposium on Highway Geometric Design*, (eds. Harwood, D.W., García García, A.), Universidad Politecnica de Valencia, 2010.
- [10] Dragčević, V., Korlaet, Ž., Rukavina, T., Lakušić, S.: Three-leg Intersection at-Grade - The Right Edge Forming Test. *3rd International Symposium on Highway Geometric Design June 29 - July 1 2005*. Transportation Research Board, Chicago, Illinois.
- [11] Autey, J., Sayed, T., Zaki, M.H.: Safety evaluation of right-turn smart channels using automated traffic conflict analysis. *Accident Analysis and Prevention*, 45 (2012), pp. 120-130, <https://doi.org/10.1016/j.aap.2011.11.015>
- [12] Persaud, B., Lyon C., Gross, F., Eccles, K.: Safety Evaluation of Offset Improvements for Left-Turn Lanes. *Proceedings of the 4th International Symposium on Highway Geometric Design*, (eds. Harwood, D.W., García García, A.), Universidad Politecnica de Valencia, 2010, <https://doi.org/10.3141/2171-05>
- [13] Left-Turn Accommodations at Unsignalized Intersections. National Cooperative Highway Research Program (NCHRP), Report 745. Transportation Research Board. Washington, D.C. 2013.
- [14] Al-Kaisy, A., Roefaro, S. Channelized Right-Turn Lanes at Signalized Intersections: A Review of Practice. *Proceedings of the 4th International Symposium on Highway Geometric Design*, (eds. Harwood, D.W., García García, A.), Universidad Politecnica de Valencia, 2010.
- [15] HRN U.C4.050: Projektiranje i građenje cesta, površinski čvorovi, tehnički uvjeti, 1990.
- [16] Richtlinien für die Anlage von Landstraßen (RAL), Ausgabe 2012. Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (FGSV Verlag), Köln 2012.
- [17] Vereinigung Schweizerischer Strassenfachleute (VSS), Schweizer Norm (SN 640262), Zürich, 1999.
- [18] Plangleiche Knoten – Kreuzungen, T – Kreuzungen, Österreichische Forschungsgesellschaft Straße-Schiene-Verkehr (FSV), (RVS 03.05.12), Wien, 2007.
- [19] A Policy on Geometric Design of Highways and Streets 2004. American Association of State Highway and Transportation Officials.
- [20] Garcia, A.: Lateral Vision Angles and Skewed Intersections Design. *Proceedings of 3rd International Symposium on Highway Geometric Design*. Chicago, June 29-July 1, 2005.
- [21] Garcia, A., Belda-Esplugues, E.: Lateral Vision Angles in Roadway Geometric Design. *Journal of Transportation Engineering*, 133 (2007) 12, pp. 654-662, [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-947X\(2007\)133:12\(654\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-947X(2007)133:12(654))
- [22] Garcia, A., Libreros, C.L.: Safety Effect of the Skew Angle in Right Turn Maneuvers. *3rd Urban Street Symposium June 24 - 27, 2007*. Seattle, Washington.
- [23] Stančerić, I., Korlaet, Ž., Dragčević, V.: Sight distance tests at road intersections with unfavourable angles. *Road and Rail Infrastructure II, Proceedings of the 2nd International Conference on Road and Rail Infrastructure - CETRA 2012* (ed. Lakusic, S.), Faculty of Civil Engineering, University of Zagreb, 2012. pp. 1117-1127.
- [24] Dragčević, V., Korlaet, Ž., Stančerić, I.: Methods for setting road vehicle movement trajectories. *The Baltic Journal of Road and Bridge Engineering*, 3 (2008) 2, pp. 57-64, <https://doi.org/10.3846/1822-427X.2008.3.57-64>
- [25] Korlaet, Ž., Dragčević, V., Stančerić, I.: Designing Criteria of Acute Angle Four-Leg Intersection At-Grade. *Proceedings of the 4th International Symposium on Highway Geometric Design*, (eds. Harwood, D.W., García García, A.), Universidad Politecnica de Valencia, 2010.
- [26] Isler, R.B., Parsonson, B.S., Hansson, G.J.: Age related effects of restricted head movements on the useful field of view of drivers. *Accident Analysis and Prevention*, 29 (1997) 6, pp. 793-801, [https://doi.org/10.1016/S0001-4575\(97\)00048-1](https://doi.org/10.1016/S0001-4575(97)00048-1)

- [27] Commission Directive 2009/113/EC of 25 August 2009 amending Directive 2006/126/EC of the European Parliament and of the Council on driving licences.
- [28] Directive 2002/7/EC of the European Parliament and of the Council of 18 February 2002 amending Council Directive 96/53/EC laying down for certain road vehicles circulating within the Community the maximum authorised dimensions in national and international traffic and the maximum authorised weights in international traffic, 9.3.2002.
- [29] Highway Department Project Development & Design Guide ch. 6: Intersection Design. MADOT, Massachusetts Department of Transportation - Highway Division, 2006. http://www.mhd.state.ma.us/downloads/designGuide/CH_6_a.pdf
- [30] Florida Intersection Design Guide. Florida DOT, 2007. <http://www.fdot.gov/roadway/figd-manual/figd2007.pdf>
- [31] Facilities Development Manual, Chapter 11, Design Section 25, Intersections at Grade. Wisconsin Department of Transportation, June 24, 2016. <http://wisconsindot.gov/rdwg/fdm/fd-11-25.pdf>
- [32] Gross, F., Jagannathan, R., Hughes, W.: Two Low-Cost Safety Concepts for Two-Way, Stop-Controlled Intersections in Rural Areas. Transportation Research Record 2092, pp. 11-18, 2009, <https://doi.org/10.3141/2092-02>
- [33] Montella, A., Aria M., D'Ambrosio, A., Galante, F., Mauriello, F., Perneti, M.: Simulator evaluation of drivers' speed, deceleration and lateral position at rural intersections in relation to different perceptual cues. Accident Analysis and Prevention, 43 (2011), pp. 2072-2084, <https://doi.org/10.1016/j.aap.2011.05.030>