

DOI: <https://doi.org/10.5592/CO/ZT.2021.11>

ANALIZA POLUMJERA PUTANJE VOZILA U HORIZONTALNIM KRIVINAMA IZVANGRADESKIH DVOTRAČNIH CESTA

ANALYSIS OF VEHICLE PATH RADII ON HORIZONTAL CURVES FOR TWO-LANE RURAL ROADS

Biljana Maljković¹, Dražen Cvitanić¹

(1) Sveučilište u Splitu, Fakultet građevinarstva, arhitekture i geodezije, Matice hrvatske 15, Split, R. Hrvatska, biljana.maljkovic@gradst.hr; drazen.cvitanic@gradst.hr

Sažetak

U ovome radu analizirani su polumjeri putanje vozila u horizontalnim krivinama izvangradskih dvotračnih cesta radi uočavanja lokacija sa smanjenom razinom konzistencije. U analizi su korišteni podatci prikupljeni eksperimentalnim istraživanjem provedenim na dionici dvotračne državne ceste DC1 u Republici Hrvatskoj, u kojem su uz primjenu visokofrekventnoga GPS uređaja snimane vožnje reprezentativnoga uzorka vozača. Primjenom višestruke regresijske analize istražen je moguć utjecaj geometrijskih obilježja trase na vozačev izbor putanje vozila, a provedena analiza nije rezultirala statistički važnim modelom. Ustanovljeno je kako vozači uglavnom izvode polumjer putanje vozila manji od projektiranoga (u prosjeku 12 % manji). Najveća odstupanja izvedenih polumjera od projektiranih vrijednosti uočena su u krivinama manjih polumjera ($R < 150$ m) što ukazuje na povećani rizik od proklizavanja, a može se dovesti u svezu i s povećanom stopom prometnih nesreća u oštrim krivinama.

Ključne riječi: polumjer putanje vozila, horizontalna krivina, konzistencija toka trase

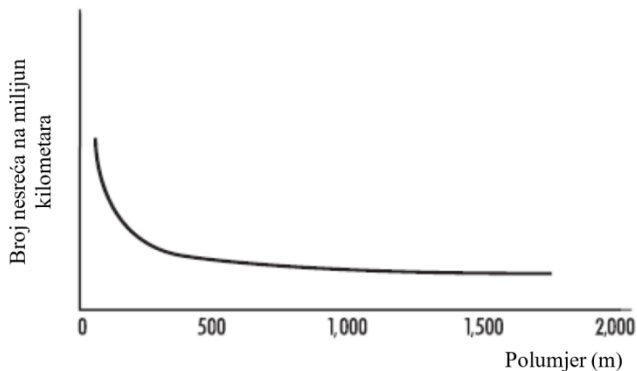
Abstract

In order to obtain locations with reduced level of consistency, vehicle path radii on horizontal curves for two-lane rural roads were analyzed. The data collected in an experimental investigation on a segment of two-lane state road DC1 in Croatia were used, in which the drives of a representative sample of drivers were recorded with a high frequency GPS device. The multiple linear regression was used to investigate the possible influence of geometric characteristics of the road on the driver's choice of path radius and no statistically significant correlation was found. The analysis showed that the vehicle path radii were mainly smaller than curve radius (on average for 12%). The largest deviations of vehicle path radii from designed values were found on sharper curves ($R < 150$ m), indicating an increased risk of skidding which may be related to the fact that sharp curves are associated with increased accident rates.

Keywords: vehicle path radius, horizontal curve, design consistency

1. Uvod

Sudionici, vozila i obilježja ceste tri su najvažnija čimbenika za sigurnost prometa, a upravo *crne točke* prometnoga sustava ukazuju na činjenicu kako, osim pogrešaka samih vozača, obilježja ceste često mogu biti uzrok nesreće. Jedna od lokacija povećanoga rizika na kojoj se češće događaju prometne nesreće jest horizontalna krivina. Detaljnija istraživanja pokazala su kako postoji veza između broja prometnih nesreća i zakrivljenosti, odnosno učestalost prometnih nesreća raste sa smanjivanjem polumjera krivine, pri čemu je taj porast intenzivnije izražen kod krivina polumjera manjega od 200 m (Slika 1).



Slika 1. Broj prometnih nesreća u odnosu na polumjer krivine [1]

Prometne nesreće nastaju zbog nekonzistencije toka trase, odnosno kada obilježja ceste nisu usklađena s očekivanjima vozača. Većina prijašnjih studija o konzistenciji i sigurnosti na cesti zasnivaju se na operativnim brzinama, dok je zabilježeno samo nekoliko istraživanja u kojima su proučavani polumjeri stvarnih putanja vozila u horizontalnim krivinama [2–7]. Stoga su u ovome radu analizirani polumjeri putanje vozila prikupljeni eksperimentalnim istraživanjem na dionici dvotračne izvangradske ceste, koje je provedeno u sklopu doktorske disertacije Maljković [8].

2. Metodologija prikupljanja podataka

Radi prikupljanja podataka o stvarnome ponašanju vozača provedeno je eksperimentalno istraživanje na 24 km dugoj dionici državne ceste DC1 (Slika 2), u sklopu kojega su snimane vožnje reprezentativnoga uzorka vozača, odnosno ostvarene brzine i izvedeni polumjeri putanje vozila. U istraživanju je sudjelovalo 20 vozača različite dobi i vozačkoga iskustva koji su prošli analiziranu dionicu u oba smjera, vozeći svoje osobne automobile opremljene visokofrekventnim GPS uređajem. Riječ je o dvotračnoj izvangradskoj cesti s relativno malim prometnim opterećenjem (PGDP iznosi oko 1400 voz/dan) te bez priključaka važnijih cesta, što je olakšalo prikupljanje podataka ostvarenih u uvjetima slobodne vožnje. Istraživanje se provodilo u optimalnim vremenskim uvjetima (dnevna vožnja i suh kolnik).



Slika 2. Prikaz analizirane dionice DC1 [8]

GPS uređaj precizno detektira položaj vozila i kut otklona od sjevera u svakoj desetinki sekunde, na temelju čega se računaju polumjeri putanje vozila:

$$R = \frac{57.3 \cdot L}{D_C} \quad (1)$$

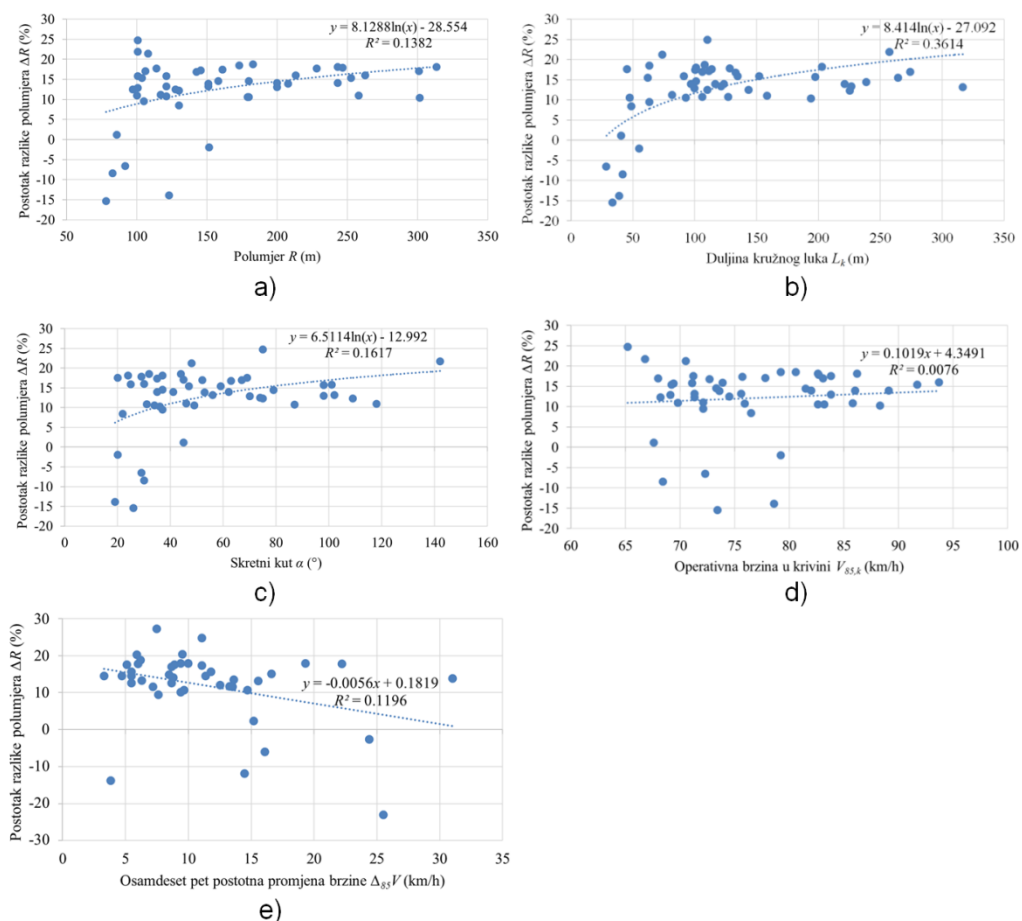
gdje je L (m) duljina kružnoga luka, a D_C (°) promjena kuta otklona od sjevera. Pri tome su analizirane samo oštrije krivine (polumjera od 80 do 315 m) koje su odabrane za temu istraživanja ovoga rada zbog izražene veće stope prometnih nesreća kao i činjenice kako se preciznost metoda za određivanje polumjera putanje vozila povećava sa smanjivanjem polumjera krivine [9]. Kao relevantan polumjer putanje vozila za pojedinu krivinu i pojedinu testnu vožnju odabrana je vrijednost najmanjega konstantnog polumjera, odnosno relativno konstantna vrijednost polumjera (odstupanja zakrivljenosti do 5 %) s duljinom vožnje od najmanje 0,5 sekunde. Prema preporuci nekih autora ([2], [10]) za kritični polumjer putanje vozila pojedine krivine odabrana je 15-postotna vrijednost R_{15} (polumjeri putanje vozila kod samo 15 % vozača manji su od R_{15}).

3. Analiza i rezultati

Radi osiguravanja konzistencije i sigurnosti obilježja ceste trebaju biti usklađena s očekivanjima vozača. Konzistenciju je najlakše provjeriti uspoređivanjem vrijednosti parametara kojima se može opisati stvarno ponašanje vozača (primjerice kritičan polumjer putanje vozila) i odgovarajućih vrijednosti koje se koriste pri projektiranju (polumjer u osi ceste). Podatci snimljeni na terenu korišteni su za usporedbu polumjera osi ceste i kritičnih 15-postotnih polumjera putanja vozila te za proučavanje mogućega utjecaja brzine vozila, promjene brzine i geometrijskih obilježja ceste na vozačev izbor putanje vozila. Analiza je provedena pomoću višestruke linearne regresije, a za zavisnu varijablu odabran je postotak razlike između polumjera krivine i kritičnoga 15-postotnog polumjera putanje vozila kako bi se mogle analizirati horizontalne krivine različitih zakrivljenosti:

$$\Delta R = \frac{R - R_{15}}{R} \cdot 100 \quad (2)$$

Razmatrane su sljedeće nezavisne varijable: 85-postotna brzina u krivini $V_{85,k}$ (km/h), 85-postotna promjena brzine $\Delta 85V$ (km/h), polumjer krivine R (m), uzdužni nagib s (%), duljina kružnoga luka L_k (m), duljina pristupnoga pravca L_{p1} (m), duljina pravca iza krivine L_{p2} (m) i duljine prijelaznica prije kružnoga luka i poslije kružnoga luka L_{pr1} , L_{pr2} (m). Osim navedenih geometrijskih obilježja ceste, kao nezavisna varijabla uzeta je i promjena brzine između pristupnoga elementa i krivine $\Delta 85V$ (km/h) kako bi se razmotrilo i ponašanje vozača na prijelazu između dvaju elemenata. Prije provođenja višestruke regresijske analize istraženi su pojedinačni utjecaji svake nezavisne varijable te je pokazano kako je utjecaj geometrijskih obilježja okolnih elemenata na ΔR zanemariv. Stoga su u nastavku prikazani samo dijagrami rasipanja za sljedeće varijable: polumjer krivine (Slika 3 a), duljina kružnoga luka (Slika 3 b), skretni kut (Slika 3 c), operativna brzina u krivini (Slika 3 d) i 85-postotna promjena brzine – smjer sjever – jug (Slika 3 e).



Slika 3. Pojedinačni dijagrami rasipanja postotka razlike polumjera u odnosu na: a) polumjer krivine; b) duljinu kružnoga luka; c) skretni kut; d) operativnu brzinu u krivini; e) 85-postotnu promjenu brzine (smjer sjever – jug) [8]

Iz rezultata sa Slike 3 može se zaključiti kako odabrane nezavisne varijable ne utječu bitno na ΔR , a najveći utjecaj ima L_k . Ipak, iz provedene analize mogu se uočiti određene

pravilnosti u ponašanju vozača. Općenito, vozači u krivinama izvođe polumjere putanje manje od polumjera osi ceste, neovisno o smjeru vožnje, a u prosjeku je kritični polumjer putanje vozila 12 % manji od polumjera krivine. Slični rezultati dobiveni su i u istraživanju [6] odnosno [7].

Najveći raspon polumjera putanje vozila uočen je u oštrim krivinama (Slika 3 a). Radi udobnije vožnje u oštrim i kratkim krivinama s malim skretnim kutovima većina vozača „siječe krivinu“ izvodeći polumjer putanje veći od polumjera u osi ceste (Slika 3 a, b i c). Izvođenje takvih radnji u određenoj mjeri može se objasniti i ograničenom preglednošću koja je karakteristična za krivine malih polumjera. Istodobno, u krivinama polumjera manjih od 150 m uočene su najveće pozitivne vrijednosti ΔR od čak 25 %. Budući da su to krivine malih polumjera, odgovaraju im niže vrijednosti operativnih brzina, neovisno o duljini krivine i skretnome kutu. Kako bi što udobnije prošli oštru krivinu, vozači često podcijene stvarnu zakrivljenost. Negdje duž krivine uočava se pogreška koja se najčešće korigira manje ili više naglim zakretanjem upravljača što rezultira izvođenjem polumjera putanje manjega od polumjera krivine. Manji polumjer putanje vozila uzrokuje porast centripetalnoga ubrzanja, a time i porast potrebnoga bočnog trenja. U lošim uvjetima kolnika i kod brzina neprilagođenih geometriji krivine takvi nagli zaokreti upravljača mogu rezultirati nestabilnošću vozila i potencijalno mogu dovesti do prometne nesreće. Najizraženija nekonzistentnost polumjera putanja (najveće vrijednosti ΔR) uočena je u krivinama manjih polumjera ($R < 150$ m) što ukazuje na povećani rizik od proklizavanja, a može se povezati i s povećanom stopom prometnih nesreća u krivinama manjih polumjera (Slika 1).

Nakon pojedinačnih regresijskih analiza provedena je višestruka linearna regresija. Budući da je analizirano više nezavisnih varijabli, potrebno je odrediti koje su od njih najvažnije. Jedna od metoda izbora nezavisnih varijabli u regresijskome modelu jest stupanjska regresija (engl. *stepwise regression*) kojom je dobiven model postotka razlike između polumjera krivine i kritičnoga 15-postotnog polumjera putanje vozila. Analizom pojedinačnih dijagrama rasipanja (Slika 3 a, b i c) uočeno je kako bi za razmatrane nezavisne varijable R , L_k i α aproksimacija logaritamskoga oblika bila bolja od linearne. Stoga su prilikom provođenja višestruke regresijske analize upotrijebljene logaritamske vrijednosti navedenih varijabli. Kako je bilo i očekivano, s obzirom na individualne dijagrame rasipanja, stupanjska regresija rezultirala je samo duljinom kružnoga luka kao nezavisnom varijablom:

$$\Delta R = 8.41 \cdot \ln L_k - 27.09 \quad (3).$$

Ostale predložene nezavisne varijable isključene su iz modela jer je utvrđeno kako ne pridonose bitno sveukupnomu modelu. Razvijeni model pokazuje kako se postotak razlike između polumjera krivine i kritičnoga 15-postotnog polumjera putanje vozila povećava s porastom duljine kružnoga luka. Iako postoji određena zavisnost između postotka razlike polumjera i duljine kružne krivine, korigirani koeficijent determinacije od $\bar{R}^2 = 0,348$ pokazuje kako je ona slaba i nepouzdana.

4. Zaključak

U ovome radu analizirano je ponašanje vozača u horizontalnim krivinama u smislu izvedenih polumjera putanje vozila na temelju podataka prikupljenih eksperimentalnim istraživanjem na dionici izvangradske dvotračne ceste. Primjenom višestruke regresijske analize istražen je moguć utjecaj geometrijskih karakteristika trase na vozačev izbor putanje vozila. Iako provedena analiza nije rezultirala statistički bitnim modelom, ustanovljeno je kako vozači uglavnom izvođe polumjer putanje vozila manji

od projektiranoga u osi ceste, neovisno o smjeru vožnje. Uočena odstupanja više su izražena u oštrim krivinama. Manji izvedeni polumjer putanje podrazumijeva veće centripetalno ubrzanje, odnosno porast potrebnoga bočnog trenja. Stoga u uvjetima lošega stanja kolnika i pri neprilagođenoj brzini u oštroj krivini lako može doći do gubitka poprečne stabilnosti vozila i potencijalno do prometne nesreće. Prema tome najvažniji zaključak provedene analize jest činjenica kako se uzrocima prometnih nesreća u krivinama, do kojih najčešće dolazi uslijed gubitka kontrole ili stabilnosti vozila zbog prekoračenja raspoloživih vrijednosti bočnog trenja, ne može pripisati samo neprimjerena brzina. Uzrok se može pronaći i u vozačevu ponašanju, odnosno u izvođenju polumjera putanje vozila u krivini.

Literatura

- [1] PIARC World Road Association, Road Safety Manual, 2003.
- [2] Said, D., Abd El Halim, A. O., Hassan, Y.: Methodology for driver behaviour data collection and analysis for integration in geometric design of highways, Proceedings of the 4th International Symposium on Highway Geometric Design, June 2.-5. 2009; Valencia, Španjolska, 2009.
- [3] Fitzsimmons, E. J. et al.: Determining vehicle operating speed and lateral position along horizontal curves using linear mixed-effects models, Traffic Injury Prevention, 2013; 14(3): 309–321. doi: 10.1080/15389588.2012.701356.
- [4] Wong, Y. D., Nicholson, A.: Speed and lateral placement on horizontal curves, Road and Transport Research, 1993; 2(1): 74–87.
- [5] Wong, Y. D., Nicholson, A.: Driver behaviour at horizontal curves: risk compensation and the margin of safety, Accident Analysis and Prevention, 1992; 24(4): 425–436. doi: 10.1016/0001-4575(92)90053-L.
- [6] Glennon, J. C., Weaver, G. D.: Highway curve design for safe vehicle operations, Highway Research Record, 1972; 390; 15-26.
- [7] Glennon, J. C., Neuman, T. R., Leisch, J. E.: Safety and operational considerations for design of rural highway curves, Report FHWA-RD-86-035, Federal Highway Administration, U. S. Department of Transportation, Washington, DC, 1983.
- [8] Maljković, B.: Unapređenje kriterija konzistencije u horizontalnim krivinama vangradskih dvotračnih cesta uz primjenu bicikl-modela vozila te realnih parametara ponašanja vozača, doktorska disertacija, Sveučilište u Splitu, Fakultet građevinarstva, arhitekture i geodezije, 2021.
- [9] Carlson, P. J., Burris, M., Black, K., Rose, E. R.: Comparison of radius-estimating techniques for horizontal curves, Transportation Research Record, 2005; 1918(1): 76–83. doi: 10.3141/1918-10.
- [10] Nicholson, A.: Superelevation, side friction, and roadway consistency, Journal of Transportation Engineering, 1998; 124(5): 411–418. doi: 10.1061/(ASCE)0733-947X(1998)124:5(411).