

Environmental engineering Aplinkos inžinerija

KELIO TRASOS HORIZONTALIŲJŲ KREIVIŲ ĮTAKA TRANSPORTO SRAUTO GREIČIUI

Mindaugas ŠEPORAITIS*, Viktoras VOROBYOVAS

Vilniaus Gedimino technikos universitetas, Vilnius, Lietuva

Gauta 2019 m. birželio 28 d.; priimta 2019 m. liepos 4 d.

Santrauka. Kelio trasos geometriniai parametrai yra pagrindiniai elementai, apibrėžiantys leistiną važiavimo greitį, ir atvirkščiai. Skirtingai nei leistinas važiavimo greitis, transporto srauto greitis kelių ruožų atnaujinimo projektuose turi didelę įtaką saugiam transporto judėjimui keliuose. Straipsnyje apžvelgiama rajoninės reikšmės kelių tinklo sudėtis Lietuvoje, kelių su žvyro danga atnaujinimo projektuose taikomi projektiniai greitis, leistinas greitis, praktinės problemos taikant kelio trasos geometrinius parametrus pagal Lietuvoje galiojančius normatyvinius dokumentus, nuodugniau nagrinėjami horizontaliųjų kreivių parinkimo metodai, taikomi Lietuvoje ir kitose šalyse. Atlikti lyginamieji pradiniai horizontaliųjų kreivių skaičiavimai, taikant skirtingus šoninės trinties koeficientus. Atliktas apibendrinimas ir suformuluoti teiginiai diskusijai.

Reikšminiai žodžiai: horizontaliosios kreivės, projektinis greitis, transporto srauto greitis.

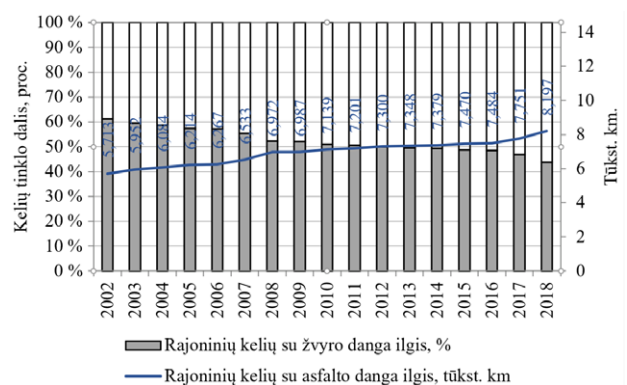
Įvadas

Lietuvoje yra 14,5 tūkst. km valstybinės reikšmės rajoninių kelių, iš jų 46 % – su žvyro danga. Nuo 2002 m. vykdomas šių kelių asfaltavimas (atnaujinimo projektai). 2002–2019 m. buvo išasfaltuota 2197 km žvyrkelių (1 pav.). Nuo 2017 m. numatyta skirti finansavimą žvyrkelių asfaltavimo programai. Lietuvos automobilių kelių direkcija siekia, kad Lietuvos keliai tarnautų visuomenei, būtų saugūs ir gerintų susisiekimą. Siekdama šio tikslo, Kelių direkcija 2018–2020 m. planuoja išasfaltuoti 1009 km.

Žvyrkelių asfaltavimo projektuose numatoma pakoreguoti kelio trasos geometrinius parametrus taip, kad jie atitiktų projektuojamo kelio kategoriją, o kartu ir projektiniam greičiui nustatytus reikalavimus. Kelio trasos geometrinių parametrų koregavimas numatytas pagal galiojančių normatyvinių dokumentų reikalavimus, bet išimtinai tik suformuoto kelio sklypo ribose, o reikalingą papildomą žemės plotą minimaliam projektiniam greičiui užtikrinti išpirkti nenumatoma.

Lietuvoje projektavimo procesas prasideda kelio savininkui nustačius planuojamo atnaujinti kelio kategoriją pagal to kelio eismo intensyvumo duomenis. Kiekvienai kelio kategorijai nustatytas projektinis greitis. Projektiniai greičiai parenkami atsižvelgiant į kelio reikšmę, paskirtį ir vietovės sudėtingumą. Kelio trasos geometriniai parametrai parenkami pagal projektinį greitį.

Eismo organizavimo sprendiniams ir kelio projektavimui nustatomas projektinis greitis V_p ir didžiausias leistinas greitis V_L . Projektinis greitis V_p nustatomas atsižvelgiant į kelio kategoriją ir vidutinį metinį paros eismo intensyvumą, kelio tiesimo (rekonstravimo) sąlygas (žr. 1 lentelės 3–5 stulpelius). Projektinis greitis turi būti numatomas pastovus kiek galima ilgesniuose kelio ruožuose, tačiau didžiausią leistiną greitį V_L nustato Kelių



1 paveikslas. Rajoninės reikšmės kelių tinklo ilgio kitimas pagal dangos tipus (parengta autorių)

Figure 1. Changes in length of regional road network according to pavement types (prepared by authors)

*Autorius susirašinėti. El. paštas mindaugas.seporaitis@vgtu.lt

1 lentelė. Projektinio greičio, skersinio profilio tipo parinkimo lentelė pagal kelio kategoriją (KTR „Automobilių keliai“, 2008)
Table 1. Design speed, cross-section type selection table by road category (KTR “Automobilių keliai”, 2008)

Kelio reikšmė		Kelio kategorija	Projektinis vidutinis metinis paros eismo intensyvumas, aut./parą	Projektinis greitis, km/h	Eismo juostų skaičius (S – skiriamoji juosta)	Skersinio profilio tipas	Sankryžų tipai
1		3	4	5	6	7	8
Valstybinės reikšmės keliai	magistraliniai keliai	AM	>45 000	130/110	3+S+3	1	skirtingų lygių
		AM	12 000–55 000	130/110	2+S+2	2	
		I	12 000–55 000	110/100	2+S+2	3	skirtingų lygių,
		II	iki 15 000 (20 000)	90	2	5	
		IIa	iki 18 000 (23 000)	100	2+1	6	vieno lygio
		III	iki 15 000 (20 000)	90	2	7	
	krašto keliai	Ia	12 000–30 000	90	2+S+2	4	vieno (skirtingų) lygio
		IIa	iki 18 000 (23 000)	90	2+1	6	
		III	iki 15 000 (20 000)	90	2	7	
		(IV)	iki 10 000 (12 000)	90	2	8	
	rajoniniai keliai	IV	iki 10 000 (12 000)	90	2	8	vieno lygio
		V	iki 3000, iki 1000 ¹⁾	70	2	9, 10	
Va		iki 1500	70/50	1	11		
Vietinės reikšmės keliai		Iv	1000–2000	50/40	2	12, 13	vieno lygio
		IIv	500–1000	40/30	1	14, 15	vieno lygio
		IIIv	iki 500	30/20	1	16	vieno lygio

eismo taisyklės. Taip susidaro prieštaringa situacija, kai atnaujinimo projektuose rajoninės reikšmės keliams (žvyrkelių asfaltavimo) nustatoma V ar Va kelio kategorija (žr. 1 lentelės 3 stulpelį), kurių projektinis greitis V_p yra 70 km/h, tačiau, nepažeidžiant Kelių eismo taisyklių, keliais su asfalto ar betono danga galima važiuoti ne didesniu kaip $V_L = 90$ km/h greičiu. Kitaip tariant, projektuojant $V_p = 70$ km/h yra atitinkamai parenkami ir derinami kelio trasos geometriniai parametrai (kreivių spinduliai, skersiniai ir išilginiai nuolydžiai ir kt.), tačiau, suprojektavus kelio trasą, sustatomi greičio ribojimo ženklai, numatantys $V_L = 70$ km/h.

Taip pat, rengiant tokio tipo projektus, jau projektavimo etape neįmanoma užtikrinti kelio plano elementų suderinamumo. Kelių techniniame reglamente KTR 1.01:2008 „Automobilių keliai“ (Lietuvos Respublikos aplinkos ministerija, 2008) nurodyta išlyga, kad, atliekant kelių rekonstravimą ir kapitalinį remontą, techniškai ir ekonomiškai pagrindus, leidžiama neatsižvelgti į keliamus reikalavimus gretimų elementų suderinamumui. Dėl to įrengiami nesaugūs kelio ruožai, pvz., ilgų tiesių ruožų su pabaigoje esančios mažo spindulio kreivės arba dviejų, viena po kitos išdėstyty, nesuderintų spindulių kreivių.

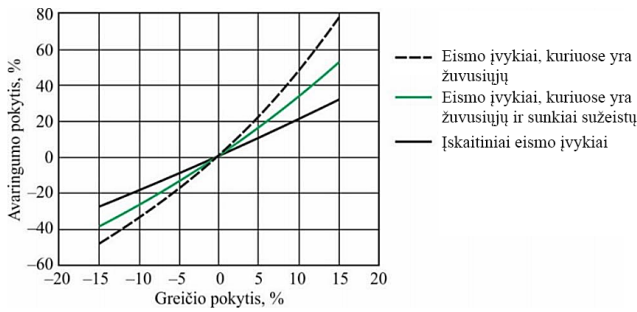
Kita atnaujinimo projektų rengimo problema – suformuotas kelio statiniui skirtas žemės sklypas, kuris dažniausiai apriboja horizontaliųjų kreivių parametrus. Dažnai pasitaiko atvejų, kai suformuotame sklype nėra įmanoma suprojektuoti ir įrengti horizontaliųjų kreivių,

atitinkančių projektinį greitį, todėl leistinas greitis papildomai apribojamas kelio ženklais iki $V_L = 50$ km/h ar netgi $V_L = 30$ km/h, nes žemių išpirkti nenumatoma dėl ilgų procedūrų. Pradėjus eksploatuoti tokį kelio ruožą, kurio gretimieji elementai nėra suderinti ir principai atitinka „amerikietiškus kalnelius“, yra didelė tikimybė, kad vairuotojams bus sunku atpažinti kelio elementus ir tinkamai pasirinkti saugų važiavimo greitį.

Pasaulyje atlikta daug tyrimų, kuriuose nustatyta transporto priemonės važiavimo greičio ir eismo įvykio rizikos priklausomybė. Transporto priemonės važiavimo greitis yra pagrindinis rizikos veiksnys, lemiantis eismo įvykio pasekmes eismo dalyviams. Didelis važiavimo greitis turi įtakos eismo įvykio rizikai ir padidina sunkių sužeidimų tikimybę jam įvykus. Taip pat transporto priemonės važiavimo greičio padidėjimas 10 km/h, lyginant su vidutiniu greičiu, užmiesčio kelių ruožuose yra pakankamas, kad eismo įvykių su žuvusiais rizika išaugtų dvigubai (Koornstra, Lynam ir Nilsson, 2002).

Nilsson (2004) sudarė modelį, kuriuo vertinamas vidutinio greičio pasikeitimo poveikis eismo įvykių dažnumui ir sunkumui (2 pav.). Šiame modelyje vidutinio greičio padidėjimas 5 proc. padidina eismo įvykių, kuriuose yra sužeistųjų, apie 10 proc. ir apie 20 proc. – kai yra žuvusiųjų (Nilsson, 2004).

Labai svarbu, kad kelio trasos geometriniai parametrai būtų pagrįsti, o projektinis greitis atitiktų realų transporto srauto greitį. Projektuojami geometriniai parametrai



2 paveikslas. Avaringumo pokyčio priklausomybė nuo greičio pokyčio (Nilsson, 2004)
 Figure 2. The relationship between change in speed and change in accident number (Nilsson, 2004)

atnaujinimo projektuose dažnai neatitinka KTR ir kelio funkcinei paskirčiai keliamų reikalavimų bei neužtikrina transporto srauto greičio atitikimo V_p .

1. Transporto srauto greitis ir kelio trasos geometriniai parametrai

Daugelyje Vakarų Europos ir Amerikos šalių parenkant kelių geometrinius parametrus, buvo taikoma projektinio greičio koncepcija. Ji pagrįsta transporto priemonių kinematika, kai duotam greičiui apskaičiuojami minimalūs kreivių spinduliai, viražų nuolydžiai ir būtinas sustojimo atstumas. Vėliau ši koncepcija buvo papildyta atsižvelgiant į įgytas žinias apie vairuotojų elgsenos bei transporto srauto greičio modelius. Taip buvo išvystyti ir išplėtoti kelio geometrinių elementų suderinamumo modeliai. Atsiradus

techninėms priemonėms apdoroti kelių tinklo geometrinius duomenis grafinėmis kompiuterinėmis programomis, surinkti didžiulius duomenų kiekius apie eismo dalyvių elgsenos ypatumus, bei šiuos duomenis analizuoti sugreitinant su avaringumo duomenimis, atsirado galimybės tiksliau modeliuoti ar pagrįsti kelių infrastruktūros parametrus ir juos priskirti konkrečiai funkcinei paskirčiai.





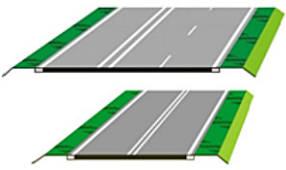
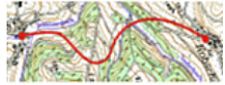

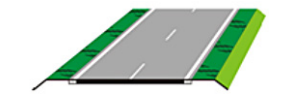
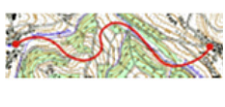


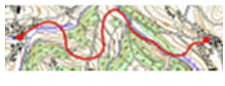
Šiuo metu Europoje nėra visuotinai priimtoms automobilių kelių klasifikavimo sistemos, nes daugelyje šalių taikoma kelių klasifikacija pagal funkcinę paskirtį yra tik tikslas suskirstyti kelius, o norminiuose dokumentuose kaip pagrindinis skirstymas taikomas kelių kategorizavimas ir projektavimo klasės. Pagal šį suskirstymą privažiuojamuosiuose keliuose taikomi skirtingi leistini greičiai V_L nuo 60 km/h (Olandijoje) iki 70–90 km/h (Vokietijoje, Lietuvoje) (Vorobjovas, 2010).

Eismo saugumo požiūriu kai kuriose pirmaujančiose šalyse (pvz., Olandija) kelių tinklas skirstomas pagal tris pagrindines funkcines paskirtis (Vorobjovas, 2010):

1. Tranzitiniai keliai – sukuriama infrastruktūra ir sudaromos sąlygos automobiliams važiuoti greitai ir netrikdomai.
2. Skirstomieji keliai – eismas paskirstomas tarp tranzitinių kelių ar miestų.
3. Privažiuojamieji keliai – sudaromos sąlygos privažiuoti prie pavienių objektų ar teritorijų.

Vokietijoje taikomos skirstymo į kelių projektavimo klases sistemos tikslas – nustatyti panašumą tarp tos pačios klasės kelių ir sudaryti galimybę kelių naudotojams atskirti juos pagal požymius, būdingus skirtingų kelių projektavimo klasių keliams (Lippold, Lemke, Jaehrig ir Stöckert, 2015).

2 lentelė. Kelių suskirstymas į projektines klases su kelio naudotojui aiškiai atskiriamais atpažįstamumo elementais (Lippold et al., 2015)
 Table 2. Designation of roads into design classes with clearly recognizable elements for the user (Lippold et al., 2015)

Projektavimo klasė	Projektinis greitis	Kelio naudojimas	Skersinio profilio tipas	Reikalavimai kelio trasos projektavimui
1	2	3	4	
EKL-1	110 km/h			
EKL-2	100 km/h			
EKL-3	90 km/h			
EKL-4	70 km/h			

Kelio priskyrimas konkrečiai projektavimo klasei nustato atitinkamus projektinius to kelio parametrus (žr. 2 lentelę). Projektavimo klasė pagal numatomą kelio naudojimo paskirtį iš anksto lemia projekcinį greitį ir kelio skersinį profilį. Visos kelių projektavimo klasės iš anksto nustato tik vieną tipinį skersinį profilį. Skirtingų skersinio profilio tipų elementai (skiriamoji juosta, horizontalusis ženklinimas, eismo juostų skaičius, plotis ir kt. elementai) yra individualūs kiekvienai projektavimo klasei. Toks atskyrimas suteikia galimybę kelių naudotojui identifikuoti skirtumą tarp atskirų kelių projektavimo klasių ir pasirinkti tokį važiavimo režimą, kokiam suprojektuoti kelio trasos elementai. Todėl kelio trasos geometriniai parametrai pagrindžiami projekciniu greičiu, kuris atitinka transporto srauto važiavimo greitį V_{85} . 2 lentelėje vaizduojami kelių funkcijos pagrindiniai atpažįstamumo principai.

Siekiant sumažinti eismo įvykių skaičių, projektuojamas kelias turi atitikti vieną paskirtį ir būti lengvai „atpažįstamas“ ar „save paaiškinantis“ vairuotojui, t. y. vairuotojas turi nedviprasmiškai suprasti, kaip jam elgtis kelyje. Vienas iš svarbių elementų – prieštarų reikalavimų nebuvimas kelyje, pvz., vairuotojo vertinimu, vizualiai kelio kreivė ir skersinio profilio tipas atrodo skirti važiuoti 90 km/h greičiu, tačiau sustatyti ribojamieji 70 km/h kelio ženklai arba atvirkščiai, taip pat prieštaravimai tarp vertikalaus ir horizontalaus ženklinimo ir kt. Tokios ir panašios situacijos trikdo vairuotojus ir nulemia jų elgesį pasirenkant saugų greitį.

Kaip vienas iš eismo komforto lygį apibūdinančių kriterijų, priskirtinų atitinkamai kelio funkcinei paskirčiai, yra nurodomas leistinas važiavimo greitis (KTR „Automobilių keliai“, 2008).

Transporto srauto greitis yra susiejamas su kelio trasos geometriniais parametrais pradiniam projektavimo etape. Pagal numatomo tiesti ar rekonstruoti kelio kategoriją reglamentuose nurodyta tvarka yra nustatomas projektinis kelio greitis V_p .

Transporto srauto greičio įvertinimas yra dažniausiai naudojamas kriterijus, nusakantis kelio geometrinių parametrų suderinamumą (Gibreel, Easa, Hassan ir El-Diemeery, 1999).

V_{85} greitis literatūroje apibrėžiamas kaip greitis, kuriuo netrukdomai važiuoja 85 % srauto automobilių. Kai kuriuose šaltiniuose nurodoma, kad tai greitis, kuriuo netrukdomai švaria ir šlapią dangą važiuoja 85 % srauto automobilių, taip pat jis taikomas mažiausiam horizontaliųjų kreivių spinduliui, kai važiuojamosios dalies skersinis nuolydis nukreiptas į išorę (Palšaitis ir Vidugiris, 1999).

Šis greičio rodiklis gali būti naudojamas kelio trasos geometrinių parametrų suderinamumui vertinti, nagrinėjant skirtumus tarp projekcinio greičio V_p ir transporto srauto greičio V_{85} arba tikrinant transporto srauto greičio V_{85} ir projekcinio greičio V_p tarp greta esančių kelio geometrinių elementų pokytį. Kelio ruožas, kuriame tiesė pereina į kreivę, yra svarbiausia vieta numatant eismo saugumo gerinimo priemones. Daugiau nei 50 % eismo įvykių keliuose įvyksta vingiuotuose kelio ruožuose, apie

pusė iš jų – dėl šlapios ar apledėjusios kelio dangos ir saugaus greičio viršijimo. 65 % eismo įvykių kreivėse dalyvauja tik viena transporto priemonė (Lamm, Choueiri ir Mailaender, 1991, 1992).

Suomijoje buvo atliktas tyrimas (Salusjarvi, 1981), kuriame vertintas greičio apribojimų nustatymas užmiesčio keliuose, kuriuose anksčiau tokio apribojimo nebuvo. Ataskaitoje pateikiama analizė, kaip greičio V_L apribojimai kelio ženklais yra susiję su pradiniais (ženklais neribotais) greičiais. Tyrimas parodė, kad (Manual ir Decision-makers, 2006):

- kelio ženklais apribotas V_L , įrengtas *mažesnis* už anksčiau buvusį V_{85} , *sumažino* vėlesnį vidutinį srauto greitį;
- kelio ženklais apribotas V_L , įrengtas *didesnis* už anksčiau buvusį V_{85} , *padidino* vėlesnį vidutinį srauto greitį;
- kelio ženklais apribotas V_L , įrengtas *atitinkantis* buvusį V_{85} , *nepaveikė* vidutinio srauto greičio.

Šie tyrimai parodė, kad transporto srauto greitis padidės, jei nauji greičio ribojimai bus didesni už ankstesnį V_{85} (Manual ir Decision-makers, 2006), todėl vykdant atnaujinimo (žvyrkelių asfaltavimo) projektus būtina atlikti esamo kelio transporto srauto greičių tyrimus ir atitinkamai patikrinti ar pritaikyti eismo organizavimo (greičio ribojimo) projektinius sprendinius.

Kelio projektinių parametrų suderinamumo modeliai (angl. *Design Consistency Module*, sutr. DCM), pagrįsti transporto srauto greičiu, yra plačiai naudojami pasaulyje (Camacho-Torregrosa, Pérez-Zuriaga, Campoy-Ungria ir García-García, 2013; Fitzpatrick, Carlson, Brewer, Wooldrige ir Miaou, 2005; Gaca ir Kiec, 2016). Šie modeliai skirti transporto srauto greičio profiliams įvertinti ir nustatyti ruožus, kuriuose numatomas staigus sulėtėjimas, arba greičio pasiskirstymui nagrinėjamo ruožo elementuose įvertinti.

Kelio projektinių parametrų suderinamumo modelyje pateikiama informacija apie tai, kokių mastu kelio projektiniai parametrai atitinka kelio naudotojų lūkesčius arba kaip kelio naudotojai atpažįsta kelio elementus. Projektinių parametrų suderinamumo vertinimas atliekamas atsižvelgiant į greičio profilio modelį, pagal kurį apskaičiuojamas greitis V_{85} kiekviename kelio ruožo taške. Probleminės vietos identifikuojamos ten, kur nustatomi dideli skirtumai tarp projekcinio greičio V_p ir V_{85} , taip pat didelis V_{85} greičio pokytis tarp vienas po kito einančių kelio trasos elementų (pvz., ilga tiesė pereina į mažo spindulio kreivę).

Vienas iš naujesnių transporto srauto greičio nustatymo modelių buvo sukurtas taikant atskirų transporto priemonių stebėjimo duomenis dviejų eismo juostų užmiesčio keliuose (Camacho-Torregrosa et al., 2013; Llopis-Castelló, Camacho-Torregrosa ir García, 2018). Šis ispanų autorių transporto srauto greičio nustatymo modelis buvo sukurtas remiantis viso kelio ruožo transporto greičio profiliais naudojant GPS įrenginius, kurie leido tiksliai nustatyti visus greičio pasikeitimų pradžios ir pabaigos taškus, taip pat faktinius transporto srauto greičius

atskiruose kelio trasos elementuose (kreivėse ir tiesėse). Transporto srauto greičio nustatymo modelis kreivėse, kuriame kreivės spindulys naudojamas kaip pagrindinis kintamasis, pateiktas matematine išraiška:

$$V_{85} = 97,4254 - \frac{3310,94}{R}, \text{ kai } 400 \text{ m} < R \leq 950 \text{ m}, \quad (1)$$

$$V_{85} = 102,048 - \frac{3990,26}{R}, \text{ kai } 70 \text{ m} < R \leq 400 \text{ m}, \quad (2)$$

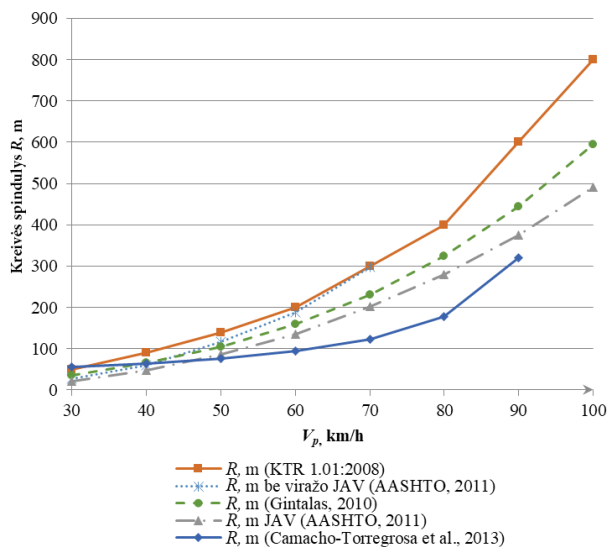
čia R – mažiausias horizontaliosios kreivės spindulys, m; V_{85} – transporto srauto greitis, m/s.

Įvairiose šalyse taikomi horizontaliųjų kreivių parinkimo principai pagrįsti priklausomybe nuo projektinio greičio. Dažniausiai naudojamos suskaičiuotos minimalių parametrų reikšmės arba kai kuriais atvejais pateikiama metodika tokioms reikšmėms skaičiuoti ar pagrįsti.

Lietuvos automobilių kelių projektavimo norminiuose dokumentuose nurodyti mažiausieji horizontaliųjų kreivių spinduliai yra didesni už nustatytus užsienio šalyse (American Association of State Highway and Transportation Officials (toliau – AASHTO), 2011) (3 pav.):

- apie 1,5 karto, kai greitis 70 km/h, ir 2 kartus, kai greitis 30–40 km/h, lyginant su AASHTO (2011) metodika;
- apie 2,4 karto, kai greitis 70 km/h, ir 1,4 karto, kai greitis 40 km/h, lyginant su Ispanijos autorių grupės modeliu, kuris paremtas eksperimentiniais realaus srauto greičio tyrimo duomenimis.

Įdomu pažymėti, kad mažiausi horizontaliųjų kreivių spinduliai Lietuvoje, kai viražo nuolydis yra 4 proc. ir nukreiptas į kreivės vidų, yra gerokai didesni už analogiškam greičiui taikomus minimalius spindulius, kai viražas neregiamas pagal AASHTO (2011) metodiką.



3 paveikslas. Minimalių horizontaliųjų kreivių parametrų ir projektinio greičio priklausomybė
 Figure 3. Relationship between minimum horizontal curve parameters and design speed

2. Kelio trasos geometrinį parametrų pagrįstumas

Automobilis, važiuojantis horizontaliaja kreive, yra veikiamas išcentrinės jėgos. Išcentrinė jėga sumažina automobilio stabilumą šoniniam slydimui ir apvirtimui, sukelia nemalonius pojūčius vairuotojui ir keleiviams. Dėl išcentrinės jėgos poveikio deformuojasi ir sparčiau dyla padangos, didėja kuro sąnaudos. Tamsiu paros metu automobilio važiuojimą kreivėmis apsunkina dar ir tai, kad kelias apšviečiamas mažesniu atstumu negu tiesiuose ruožuose. Neigiama visų minėtų veiksnių įtaka tuo didesnė, kuo mažesnis horizontaliosios kreivės spindulys (Gintalas, 2010).

Automobilių kelių projektavimo patirtis rodo, kad mažiausias projektuojamų horizontaliųjų kreivių spindulys turi būti tiesiogiai proporcingas projektinio greičio kvadratai ir apskaičiuojamas formule (AASHTO, 2011; Gintalas, 2010).

$$R = \frac{V_{85}^2}{g \times (e + f_{s.tr.})}, \quad (3)$$

čia R – mažiausias horizontaliosios kreivės spindulys, m; V_{85} – transporto srauto greitis, m/s; e – viražo nuolydis, proc.; $f_{s.tr.}$ – šoninės trinties koeficientas.

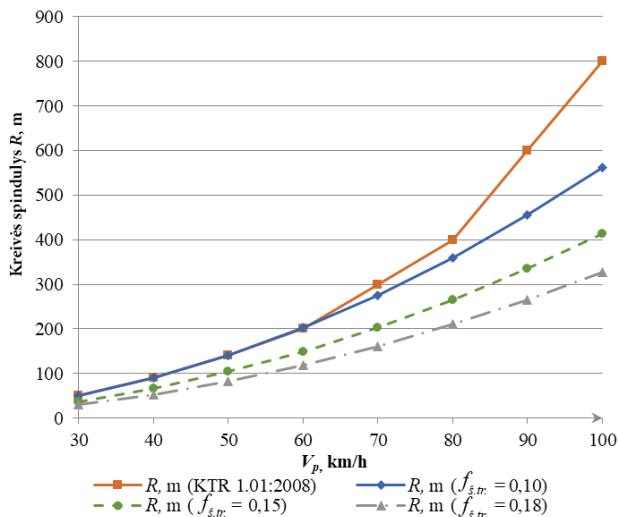
Transporto priemonei važiuojant keliu veikia trinties jėgos tarp automobilio ratų ir kelio dangos. Mokslinėje literatūroje skiriami dviejų tipų trinties koeficientai:

- trinties koeficientas išilgine kryptimi ($f_{i.s.tr.}$), kai automobilio ratas rieda savo sukimosi plokštuma ir neslysta;
- trinties koeficientas skersine kryptimi ($f_{s.tr.}$ – šoninės trinties koeficientas), kai automobilio ratas ir rieda, ir slysta į šoną.

Trinties koeficientas tarp automobilio rato ir kelio dangos priklauso nuo įvairių veiksnių: kelio dangos būklės, kelio skersinio profilio parametrų, padangų būklės, važiuojimo greičio (Do, Tang, Kane ir de Larrard, 2009). Dėl išcentrinės jėgos poveikio ir didelio sukibimo koeficiento (esant sausai kelio dangai, $f_{s.tr.} = 0,60-0,80$) automobilis gali apvirsti. Išcentrinei jėgai viršijus padangų su kelio danga sukibimo jėgą (pvz., šlapiame ar iš dalies apledėjusiame kelyje $f_{s.tr.} = 0,20-0,40$) automobilis ima slysti (Li ir He, 2016; Palšaitis ir Vidugiris, 1999).

Transporto priemonei judant horizontaliaja kreive vairuotoją veikia skersinė (išcentrinė) jėga, dėl to jie svyra į išorinę pusę. Įvažiuojant pastoviuoju greičiu į mažesnio spindulio kreivę, didėja skersinė jėga, vairuotojas labiau svyra į išorę, todėl jaučia didesnę diskomfortą važiuojančioje transporto priemonėje. Nustatyta, kad, nepaisant subjektyvaus skersinės jėgos poveikio apibūdinimo, dauguma keleivių nejaučia šios jėgos, kai $f_{s.tr.} < 0,1$. Keleiviai silpnai jaučia skersinę jėgą, kai $f_{s.tr.} = 0,15$, o kai $f_{s.tr.} = 0,18$, keleiviai, važiuodami kreive, jaučiasi nepatogiai. Labai nepatogiai keleiviai jaučiasi, kai $f_{s.tr.} \geq 0,25$ (Palšaitis ir Vidugiris, 1999).

Šiuo metu Lietuvoje galiojančiame KTR „Automobilių keliai“ horizontaliųjų kreivių spinduliai projektiniams greičiui apskaičiuoti taikant skersinės jėgos koeficientą $f_{s.tr.} = 0,10$, kai $V_p \leq 60$ km/h (4 pav.), $f_{s.tr.} \approx 0,089$, kai $V_p = 70$ km/h, $f_{s.tr.} \approx 0,086$, kai $V_p = 80$ km/h, $f_{s.tr.} \approx 0,066$, kai $V_p = 90$ km/h ir $f_{s.tr.} \approx 0,058$, kai $V_p = 100$ km/h.



4 paveikslas. Projektinio greičio ir reglamentuoti bei suskaičiuoti kelio horizontaliųjų kreivių spinduliai, kai skersinis viražo nuolydis 4 % ir kintamas $f_{s,tr}$ koeficientas

Figure 4. Design speed of the road horizontal curve radii (regulated and calculated), when superelevation slope of 4% and variable $f_{s,tr}$ coefficient

Įvertinus literatūros šaltiniuose nurodytus $f_{s,tr}$ koeficientus, buvo perskaičiuoti minimalūs horizontaliųjų kreivių spinduliai (4 pav.), kai viražo nuolydis 4 proc. Atsižvelgiant į tai, kad Lietuvoje greičio ribojimo ženklai statomi pagal KTR 1.01:2008 nurodytus minimalius kreivių parametrus, o atnaujinimo projektuose viražo nuolydis ribojamas iki 4 proc., taip pat reglamente nenumatytos galimybės projektuotojui pagrįsti skaičiavimais V_L , būtina atlikti papildomus tyrimus kelių tinkle, kurie įvertintų avaringumo pokytį pakoregavus V_L .

3. Apibendrinimas ir diskusija

Istoriškai geometriniai parametrai yra pagrįsti transporto priemonių kinematika (kūnų judėjimo trajektorijos, greičiai, pagreičiai, judesiai atskaitos sistemos atžvilgiu). Skirtingų autorių tyrimai parodė, kad tradicinės prielaidos nėra pagrįstos ir gauti trinties koeficientai buvo didesni negu tikėtasi (Roos, Zimmermann ir von Loeben, 2005; Steinauer, 2002). Vyravo tvirtas įsitikinimas, kad šlapio kelio paviršiaus trinties koeficientai ($f_{s,tr}$ ir $f_{iš,tr}$) yra esminis pagrindas kinematiniais principais parenkant kelio trasos geometrinius parametrus ir projektinį greitį. Ši teorija rėmėsi tyrimais, kad trinties koeficientai priklauso nuo transporto priemonių greičio, kai trinties koeficientai buvo gauti stacionariuose padangų trinties matavimų įrenginiuose. Atliekant tokius tyrimus buvo nustatytas trinties koeficientas 0,25, esant 80 km/h greičiui. Viršijus šį greitį patikimų empirinių duomenų nenustatyta, todėl buvo būtina ekstrapoliuoti duomenis.

Atlikti eksperimentiniai tyrimai realiomis eismo ir laboratorinėmis sąlygomis (Donnell, Wood, Himes ir Torbic, 2016; Roos, Zimmermann ir von Loeben, 2005) taip pat ir teorinis pagrindimas (Gintalas, 2010) parodė, kad

trinties koeficientų vertės yra gerokai pervertintos, kol yra išlaikoma sąlyga: padangų protektoriaus gylis atitinka techninius reikalavimus. Šiais tyrimais nustatyta, kad trinties koeficientų reikšmės buvo didesnės, negu tikėtasi, atsižvelgiant į sisteminius automobilių skirtumus su stabdžių antiblokavimo sistemomis (ABS) ir be jų.

Techniniuose reglamentuose nurodžius minimalius reikalaujamus trinties koeficientus ar kelio trasos geometrinius parametrus (horizontaliosios kreivės, viražai), pagrįstus kinematiniais principais, bei taikant patikslintus koeficientus, būtų projektuojami keliai ypač mažais horizontaliųjų kreivių spinduliais. Šiuo principu suprojektuotais keliais būtų leidžiamas santykinai didelis greitis ir vartotojams tai taptų panašu į „amerikietiškus kalnelius“. Neabejotinai šis sprendimas padidintų avaringumą.

Kinematiniais principais modeliuojamas vairuotojo elgesys nėra pagrįstas, vairuotojai nevažiuoja idealiomis projekcinėmis trajektorijomis (Lemke, 2011; Lippold et al., 2015).

Visi šie principai verčia abejoti klasikinėmis kelių projektavimo taisyklėmis. Akivaizdu, kad vien kinematika nebegali būti pagrindinis kelio trasos projektavimo principas, parenkant kelio trasos geometrinius parametrus pagal projektinį greitį.

Išvados ir rekomendacijos

Atlikus literatūros analizę nustatyta:

- Kelio trasos geometriniai parametrai atnaujinimo projektuose parenkami pagal projektinį greitį, tačiau dažnai dėl sklų apribojimų būtina jį dar labiau sumažinti, nepaisant kelių eismo taisyklėse nurodyto leistino greičio.
- Lietuvoje galiojančiuose projektavimo norminiuose dokumentuose apibrėžti reikalavimai kelio trasos geometriniais parametrams neatitinka plačiai taikomų projektinio greičio ir geometrinių parametrų matematinio modelio ir nepakankamai pagrįsti aktualiais praktiniais tyrimais.
- Kelio trasos geometriniai parametrai turi įtaką kelio naudotojo pasirinktam važiavimo greičiui, nepaisant nustatyto greičio režimo kelių eismo taisyklėmis ir kelio ženklais.
- Kinematiniais principais grįsti projekciniai reikalavimai neatliepia infrastruktūros–transporto priemonės–vairuotojo sąveikos.
- Vien tik kinematiniai principai nebegali būti laikomi kelio projektavimo pagrindu.
- Kelio infrastruktūra turi būti „atpažįstama“ ir „save paaiškinanti“ (angl. *self-explaining*) kelio naudotojui.
- Kompleksiniai geometrinių parametrų, transporto srauto greičio ir vairuotojų elgesio tyrimai aktyviai vyksta keičiantis baziniams projektavimo principams: pereinama nuo kinematikos prie kompleksinio vertinimo.

Projektinis ir leistinas greitis horizontaliosiose kreivėse turi būti parenkamas užtikrinant kelio naudojimo paskirties ir eismo saugumo reikalavimus, taikant greičio profilio modelius ir atpažįstamumo kriterijus.

Naujas projektavimo principas, kuris turėtų būti įtrauktas ir į projektavimą reglamentuojančius teisės aktus, – kelių naudojimo tipų standartizavimas (suvienodinimas) ir „atpažįstamumas“ – turėtų būti pagrindinis veiksnys, užtikrinantis didesnę eismo saugumą.

Literatūra

- American Association of State Highway and Transportation Officials. (2011). *A policy on geometric design of highways and streets* (6th ed.). Retrieved from https://nacto.org/wp-content/uploads/2015/04/GDHS-6_ToC.pdf
- Camacho-Torregrosa, F. J., Pérez-Zuriaga, A. M., Campoy-Ungria, J. M., & García-García, A. (2013). New geometric design consistency model based on operating speed profiles for road safety evaluation. *Accident Analysis and Prevention*, 61, 33-42. <https://doi.org/10.1016/j.aap.2012.10.001>
- Do, M. T., Tang, Z., Kane, M., & de Larrard, F. (2009). Evolution of road-surface skid-resistance and texture due to polishing. *Wear*, 266(5-6), 574-577. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2008.04.060>
- Donnell, E., Wood, J., Himes, S., & Torbic, D. (2016). Use of side friction in horizontal curve design: a margin of safety assessment. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 2588(1), 61-70. <https://doi.org/10.3141/2588-07>
- Fitzpatrick, K., Carlson, P., Brewer, M. A., Wooldridge, M. D., & Miaou, S. P. (2005). *National cooperative highway research program report 504 design speed, operating speed and posted speed practices*. Transportation Research Board of the National Academies, Washington, DC.
- Gaca, S., & Kiec, M. (2016). Speed management for local and regional rural roads. *Transportation Research Procedia*, 14, 4170-4179. <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2016.05.388>
- Gibreel, G. M., Easa, S. M., Hassan, Y., & El-Dimeery, I. A. (1999). State of the art of highway geometric design consistency. *Journal of Transportation Engineering*, 125(4), 305-313. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-947X\(1999\)125:4\(305\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-947X(1999)125:4(305))
- Gintalas, V. (2010). *Projektinių sprendinių kokybės gerinimo galimybės žvyrkelių rekonstrukcijos projektuose* (Doctoral dissertation, Vilnius Gediminas Technical University). Prieiga per internetą: <https://vb.vgtu.lt/object/elaba:2066661/>
- Koornstra, M., Lynam, D., & Nilsson, G. (2002). *SUNflower: a comparative study of the development of road*. Leidschendam: SWOV Institute for Road Safety Research.
- Lamm, R., Choueiri, E. M., & Mailaender, T. (1991). Side friction demand versus side friction assumed for curve design on two-lane rural highways. *Transportation Research Record*, (1303), 11-21.
- Lamm, R., Choueriri, E. M., & Mailaender, T. (1992). Traffic Safety on two continents – a ten-year analysis of human and vehicular involvements. In *Proceedings 5HRP* (pp. 18-20), Goutenberg, Sweden.
- Lemke, K. (2011, March). *Design guidelines for rural roads in Germany – current situation rural: design guidelines in Germany* (pp. 29-30). Retrieved from https://nmfv.dk/wp-content/uploads/2012/06/R_D_Germany_2011.pdf
- Li, P., & He, J. (2016). Geometric design safety estimation based on tire-road side friction. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 63, 114-125. <https://doi.org/10.1016/j.trc.2015.12.009>

- Lietuvos Respublikos aplinkos ministerija. (2008). *Kelių techninis reglamentas KTR 1.01:2008 „Automobilių keliai“*. Vilnius.
- Lippold, C., Lemke, K., Jaehrig, T., & Stöckert, R. (2015). Country report Germany “The new generation of design guidelines for roads and motorways in Germany”. In *International Symposium on Highway Geometric Design* (pp. 1-23). Retrieved from <https://static1.squarespace.com/static/51cc8d46e4b0b242fc8d0f33/t/55c4f627e4b0852b09fa899a/1438971431239/172.+Germany+Country+Report.pdf>
- Llopis-Castelló, D., Camacho-Torregrosa, F. J., & García, A. (2018, May). Calibration of the inertial consistency index to assess road safety on horizontal curves of two-lane rural roads. *Accident Analysis and Prevention*, 118, 1-10. <https://doi.org/10.1016/j.aap.2018.05.014>
- Manual, A. R. S., & Decision-makers, F. O. R. (2006). *Speed management*. <https://doi.org/10.1787/9789282103784-en>
- Nilsson, G. (2004). Traffic safety dimensions and the power model to describe the effect of speed on safety. In *Bulletin – Lunds Tekniska Högskola, Inst för Teknik och Samhälle, Lunds Universitet* (Vol. 121). Traffic Engineering.
- Palšaitis, E. ir Vidugiris, L. (1999). *Automobilių kelių projektavimas: teorija ir praktika* (pp. 144-193). Vilnius.
- Roos, R., Zimmermann, M., & von Loeben, W. (2005). *Mögliche Bremsverzögerung in Abhängigkeit von der Straßengriffigkeit* (Maximum decelerations depending on road skid resistance). Federal Highway Research Institute (BASt).
- Salusjarvi, M. (1981). *The speed limit experiments on public roads in Finland*. VTT Technical Research Centre of Finland.
- Steinauer, E. A. (2002). Griffigkeit von Fahrbahnoberflächen (Skid resistance of road surfaces). *Series “Forschung Strassenbau und Strassenverkehrstechnik”*, 841, part 3.
- Vorobjovas, V. (2011). *Mažo eismo intensyvumo kelių funkcinės paskirties užtikrinimas važiavimo sąlygoms gerinti* (Doctoral dissertation, Vilnius Gediminas Technical University). Prieiga per internetą: <file:///C:/Users/33167/Downloads/1977956.pdf>

INFLUENCE OF ROAD ALIGNMENT HORIZONTAL CURVE ON TRANSPORT FLOW OPERATING SPEED

M. Šeporaitis, V. Vorobjovas

Abstract

Geometric parameters of road alignment are fundamental elements defining permissible speed and vice versa. Unlike permissible speed, determined operating speed in upgrade projects has a significant impact on the safe movement of transport on the roads. The article reviews the composition of the regional road network in Lithuania, the design speed, the permitted speed, the practical problems of applying the geometry parameters of the road alignment according to the legal documents valid in Lithuania, methods of horizontal curve selection in Lithuania and other countries are analysed in more detail. Comparative initial calculations of horizontal curves were performed using different side friction coefficients. Review summary of analysis conducted and statements are prepared for discussion.

Keywords: horizontal curves, design speed, operating speed.