




Environmental engineering Aplinkos inžinerija

KELIŲ INFRASTRUKTŪROS PRITAIKYMO SAVIVALDĖMS TRANSPORTO PRIEMONĖMS VERTINIMAS

Vladislav KONDRATOVIČ , Donatas ČYGAS , Edita JUODVALKIENĖ *

Vilniaus Gedimino technikos universitetas, Vilnius, Lietuva

Gauta 2023 m. kovo 15 d.; priimta 2023 m. liepos 3 d.

Santrauka. Straipsnyje nagrinėjamos savivaldžių transporto priemonių (STP) naudojimo viešuosiuose keliuose ir kelių infrastruktūros pritaikymo jų eismui problemos, vertinimo būtinumas ir tikslai, užsienio šalių patirtis šioje srityje. Išnagrinėti pagrindiniai faktoriai, turintys įtaką savivaldžių automobilių eismui. Sukurtas STP infrastruktūros pritaikymo vertinimo modelis, leidžiantis racionaliai planuoti bei parinkti tinkamiausius savivaldžių viešojo transporto priemonių maršrutus. Siekiant efektyviai integruoti STP į susisiekimo sistemas, rekomenduojama potencialias maršrutų alternatyvas vertinti taikant SAW metodą ir taip pat naudoti darbe pasiūlytus efektyvumo rodiklius bei jų reikšmingumus. Išnagrinėjus teorinius ir praktinius kelių infrastruktūros pritaikymo STP vertinimo aspektus, pateikiamos išvados ir siūlymai.

Reikšminiai žodžiai: savivaldis automobilis, savivaldė transporto priemonė, miestų infrastruktūra, rodikliai, keliai, daugiakriteris vertinimas, SAW.

Įvadas

Skaitmeninės technologijos ir su jomis susiję verslo modeliai kelių transporte suteikia naujas galimybes intelektinėms transporto sistemoms (ITS) vystyti. Nuolatinis ES kelių eismo saugumo didėjimas per pastaruosius dešimt metų sulėtėjo, neramina tai, kad 2022 m., palyginus su 2020 m., žuvusiųjų skaičius, tenkantis 1 mln., ES keliuose išaugo nuo 18 800 iki 20 600. Kelių transportas vis dar lemia didžiąją transporto sektoriaus išmetamųjų teršalų – tiek šiltnamio efektą sukeliančių dujų, tiek oro teršalų – dalį. Milijonų europiečių darbo vieta tiesiogiai arba netiesiogiai priklauso nuo automobilių ir transporto sektoriaus, todėl labai svarbu sudaryti jam sąlygas išlikti pirmaujančiose pozicijose pasaulyje (European Commission [EC], 2016). Siekiant mieste naudojamas transporto rūšis padaryti efektyvesnes ir kartu siekti Europos Sąjungos (ES) tikslų sukurti konkurencingą ir efektyviai išteklius naudojančią susisiekimo sistemą, reikia įprastas miesto susisiekimo sistemas pritaikyti STP eismui, tai itin padidintų eismo saugą, sumažintų eismo spūstis ir leistų mažinti kaštus, reikalingus susisiekimo infrastruktūrai.

Tyrimai parodė, kad sąveikiųjų susietųjų ir automatizuotų transporto priemonių naudojimo rinkos potencialas galėtų siekti dešimtis milijardų eurų per metus ir galėtų padėti sukurti šimtus tūkstančių darbo vietų (Berger, 2014).

Daugeliu atžvilgių šiuolaikinės transporto priemonės jau yra tapusios susietaisiais įrenginiais. Tačiau artimiausioje ateityje jos taip pat tiesiogiai sąveikaus tarpusavyje ir su kelių infrastruktūra. Ši sąveika yra sąveikiųjų intelektinių transporto sistemų (C-ITS) sritis. Šios sistemos kelių naudotojams ir eismo valdytojams užtikrins galimybę keistis ir naudotis informacija, kuri anksčiau nebuvo prieinama, ir koordinuoti savo veiksmus. Tačiau STP poveikis kelių infrastruktūrai pereinamuoju laikotarpiu yra nežinomas. Todėl reikalingi tolesni tyrimai norint įvertinti norimas geometrinės kelio konfigūracijas, pvz., greitėjimo ir lėtėjimo juostų ilgus bei pageidaujama manevravimo ruožo ilgį pereinamuoju laikotarpiu. Be jokios abejonės, šiuo pereinamuoju laikotarpiu dominuos žmogiškasis faktorius, tačiau reikalavimai gali būti sugriežtinti arba tapti konservatyvesni, nes vairuotojai neturės patirties, kaip elgtis eisme su STP. Taigi saugumo ir patogumo sumetimais gali reikėti naudoti konservatyvesnius reikalavimus (Othman, 2021). Transporto priemonių tarpusavio ryšys ir ryšys su infrastruktūra bei kitais eismo dalyviais yra labai svarbus ir siekiant didinti STP saugą bei jas visiškai integruoti į bendrą transporto sistemą. Sąveika, susiejamumas ir automatizavimas yra viena kitą papildančios technologijos, kurios viena kitą stiprina ir ilgainiui visiškai susilies. Sinchronizuotas sunkvežimių vairavimas (angl. *platooning*), kai sunkvežimiai palaiko ryšį, kad automatiškai

*Autorius susirašinėti. El. paštas edita.juodvalkiene@vilniustech.lt

ir saugiai važiuotų vienas paskui kitą labai mažai vienas nuo kito nutolę, yra geras pavyzdys – jam kartu būtini junglumas, sąveika ir automatizavimas. Sąveika bus būtina, kai būsimos STP turės saugiai ir efektyviai važiuoti daug sudėtingesnėse eismo situacijose (EC, 2016). Mokslininkai, ieškodami atsakymo į klausimą, kaip turėtų būti sukurta kelių infrastruktūra, pritaikyta STP eismui, yra išskyrę trys etapus. Pirmas etapas apima kelių priežiūros darbus, antras etapas apima kelių infrastruktūros, reikalingos atskirti STP eisme, statybą, o trečias etapas susijęs su supaprastintu kelių infrastruktūros statybos standarto sukūrimu. Nors 3 etapų planas turi didelių apribojimų, susijusių su renkamų duomenų trūkumu, reikėtų atsižvelgti į tai kaip į atspirties tašką, kurį galima panaudoti skatinant tolesnius tyrimus kelių infrastruktūros atnaujinimo srityje ir STP integravimo į mišrų eismą metu. Atliekant būsimus tyrimus galėtų būti sukurti konkretūs planai, atsižvelgiant į skirtingus miestų dydžius, gyventojų skaičių ir net energijos paskirstymo apribojimus (Liu et al., 2019). Kelių infrastruktūrą taip pat reikės patobulinti – tai gali reikšti naujų ženklų, kitokio tipo papildomų kelio juostų įrengimą ar galbūt net kapitalinį remontą. Tačiau ateityje šią problemą reikia spręsti, jei žmonės nori saugiai važiuoti STP (Lengyel et al., 2020).

Šiam iššūkiui spręsti autoriai siūlo kelių infrastruktūros vertinimo modelį, kurį pasitelkus, išnaudojant esamą infrastruktūrą, būtų galima efektyviai priimti sprendimus nustatant STP maršrutus.

2017 m. Vilniuje buvo pirmą kartą išbandytas savivaldis automobilis – autobusiukas, kuris važinėjo jam parengtu maršrutu. Tokio tipo 15 vietų savivaldis elektromobilis gali važiuoti iki 45 km/val. greičiu, jo 15 kW nominaliosios galios varikliui energiją tiekia 33 kWh talpos LiFePO4 tipo akumuliatoriai.

Tyrimų tikslas – panaudojant daugiakriterės analizės skaičiavimo algoritmą, sukurti savivaldėms viešojo trans-

porto priemonėms infrastruktūros pritaikymo vertinimo modelį, kuris leistų racionaliai planuoti bei parinkti tinkamiausius savivaldžių viešojo transporto priemonių maršrutus.

1. Kelių infrastruktūra ir jos pritaikymas savivaldžiams automobiliams

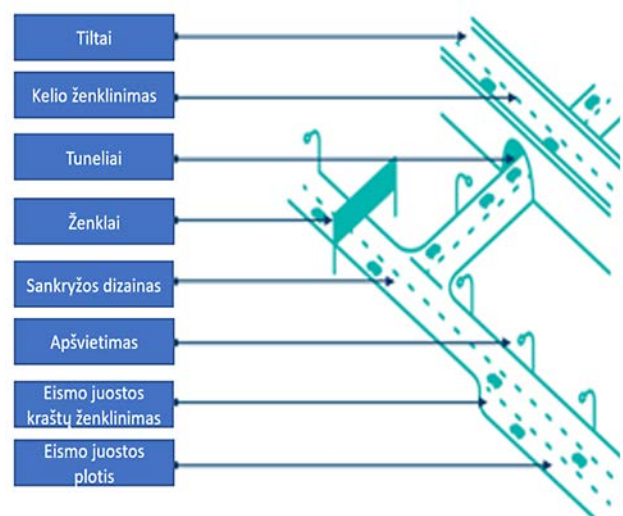
Visos STP turi sąveikauti su aplinka, todėl norint, kad STP galėtų dalyvauti eisme, bus reikalinga tam tikrų standartizuotų parametrų kelių infrastruktūra. Todėl yra labai svarbu nustatyti svarbiausias šalies kelių infrastruktūros plėtros kryptis, siekiant kuo labiau kelių infrastruktūrą pritaikyti STP eismui. Kokios investicijos bus reikalingos, kokio biudžeto reikės – galiausiai priklausys nuo to, kaip bus nuspręsta vystyti STP ekosistemą Lietuvoje (1 pav.) (Kurk Lietuvai, 2017).

Nepriklausomai nuo STP technologinio išvystymo ir dabartinių galimybių dalyvauti eisme, komunikacija su kelių infrastruktūra ir su ja susijusiomis sistemomis, pvz., šviesoforai, išmanieji kelio ženklai ir pan., yra neišvengiama, siekiant sklandesnio eismo valdymo. Keliuose ir gatvėse įrengtos komunikacinės priemonės, kurias atpažįsta STP, padeda joms lengviau prognozuoti maršrutą ir galimus eismo pokyčius. Nors dabar kuriamoms STP judėti naudojami duomenys gaunami tik iš įrengtų sensorių, didėjant STP skaičiui keliuose ir tobulėjant jų technologinėms galimybėms, reikės užtikrinti C-ITS (angl. *Cooperative Intelligent Transport Systems*) plėtrą ir sklandų veikimą. 2 paveiksle pavaizduoti būtini kelių infrastruktūros elementai, kurie ateityje turėtų būti standartizuoti, norint, kad STP eismas būtų nepertraukiamas ir kuo efektyvesnis (3 pav.) (Infrastructure Partnerships Australia [IPA], 2017).

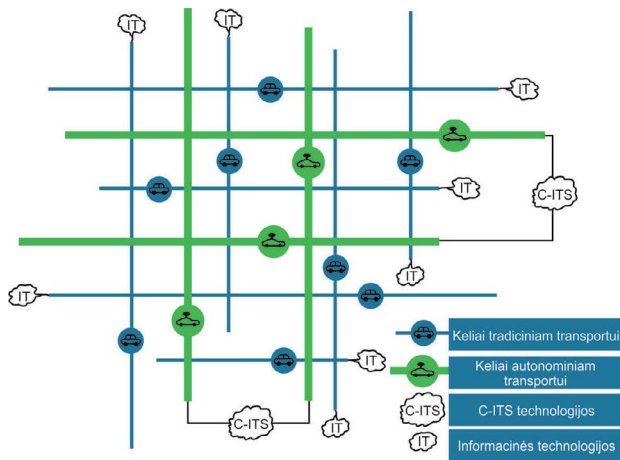
Tikėtina, kad pirminiuose STP kelių infrastruktūros plėtros etapuose, kai STP aktyviau bus naudojamos susisiekimo sistemose, atsirastų problemų sąveikaujant su



1 paveikslas. STP ekosistema Lietuvoje (Kurk Lietuvai, 2017)
Figure 1. STP ecosystem in Lithuania (Kurk for Lithuania, 2017)



2 paveikslas. Svarbiausi STP eismui kelių infrastruktūros elementai (IPA, 2017)
Figure 2. The most important road infrastructure elements for STP traffic (IPA, 2017)



3 paveikslas. Principinis C-ITS technologijų plėtros mieste modelis (Palevičius et al., 2018)

Figure 3. Principle model of C-ITS technology development in the city (Palevičius et al., 2018)

tradicinėmis transporto priemonės bendrame kelių tinkle. Siekiant išvengti avarinių situacijų C-ITS technologijos turi būti ypač gerai išvystytos pagrindinių kelių atkarpose, kur tikėtinas didžiausias STP eismas (3 pav.) (Palevičius et al., 2018).

Kaip teigia Intini et al. (2019), projektuojant STP eismui naujus kelius, bendras kelių plotis gali būti sumažintas nei tradicinių kelių atveju. Tai leis taupyti žemę ir lešas kelių tiesimui bei priežiūrai. Sumažintas STP eismo juostų plotis suteikia daugiau erdvės labiau pažeidžiamiems eismo dalyviams, todėl šios erdvės galėtų būti naudojamos pėsčiųjų ir dviračių arba atsirandančių naujų transporto rūšių infrastruktūros plėtrai.

Tinkamas kelių, ypač gatvių, apšvietimas nakties valandomis yra būtinas siekiant užtikrinti visų eismo dalyvių saugumą. Pasak Shladover ir Bishop (2015), gerinant kelio ženklavimo, signalų ir ženklų matomumą, užtikrinant STP eismą, gali pririesti padidinti kelių apšvietimą arba geriau

apšviesti, arba žibintus pastatyti arčiau važiuojamosios dalies. Ypač svarbiose kelio atkarpose, tokiose kaip kelių požeminės perėjės ir tuneliai, gali pririesti daugiau apšvietimo nei yra dabar, nes neseniai atlikti tyrimai rodo, kad STP jautkliai negali aptikti ženklavimo linijų tuneliuose dėl mažo apšvietimo lygio (Konstantinopoulou & Ljubotina, 2020).

Dabartinės automatizuotos vairavimo sistemos dar nesugeba saugiai atlikti visus vairavimo uždavotus dideliu greičiu (Schwall et al., 2020). Nors jautkliai paprastai mato geriau nei žmonės, o žmogus negali prilygti kompiuteriui, žmonės dažnai žymiai geriau skaito eismą ir aptinka potencialiai pavojingas situacijas. Didelio greičio eismas yra sudėtingas STP automatizuoto valdymo sistemoms, kad suprastų ir nuspėtų situacijas, susidarančias eisme (Pendleton et al., 2017). Esant didesniajam važiavimo greičiui, automatizuotos transporto priemonės turi greičiau suvokti ir reaguoti – pvz., aplinkos aptikimas jautkliais, apdorojimas programine įranga jautklių duomenis arba valdymo sprendimo pasiekimą (Campbell et al., 2010).

Nustatyta, kad sankryžų elementai, tokie kaip juostų plotis, kelkraščiai, kelio atitvarai, taip pat turi įtakos veiksmingam STP automatizuotų vairavimo sistemų veikimui. Tačiau reikia atlikti tolesnius tyrimus, siekiant įvertinti STP poveikį šių elementų konfigūracijai. Be to, jų dizainą reikia iš naujo pritaikyti būsimiems eismo scenarijams (Tengilimoglu et al., 2023).

Tikimasi, kad STP žymiai pagerins eismą sankryžose, pasitelkus naujas ryšio technologijas, kurios sudarys sąlygas informacijai apsikeisti tarp transporto priemonių ir infrastruktūros. Modeliavimas parodė, kad STP prisidės prie eismo srauto valdymo efektyvumo didinimo, padidinant sankryžų pralaidumą ir sumažinant degalų sąnaudas bei laukimo laiką sankryžose (Atkins, 2016).

1 lentelėje pateikiami būtini kelių infrastruktūros pakeitimai pritaikant STP eismui ir siūlymai, kaip šie pokyčiai galėtų būti valdomi (1 lentelė) (IPA, 2017).

1 lentelė. Būtini kelių infrastruktūros pakeitimai pritaikant STP eismui
Table 1. Road infrastructure changes are necessary to accommodate STP traffic

Galimas nukrypimas nuo standartinių reikalavimų	Reikalingų investicijų apibūdinimas
<p>Kelio konstrukciją, paviršiaus, kelio pločio ir linijų ženklavimo reikalavimus reikės keisti, nes:</p> <ul style="list-style-type: none"> – STP gali judėti arčiau viena kitos, palaikant saugų ir fiksuotą atstumą, todėl reikia mažesnio kelio pločio. – STP valdyti bus naudojamos ženklavimo linijos. Neaiškios arba prastai prižiūrimos linijos trikdydys sklandų STP eismą. – STP atskyrimas nuo tradicinių transporto priemonių užtikrins didesnę saugumą. – STP gali važiuoti greičiau įvertinant kelio būklę, eismą realiuoju laiku ir supančius aplinkos elementus. – STP gali būti sunku naviguoti važiuojant per tiltus, viadukus ir kitas atviras vietas, nes aplinkai atpažinti trūksta orientyrų. – Kelių ženklavimo juostų susiliejimo vietų konfigūracijos turės būti standartizuotos ir aiškiai aprašytos. 	<p>Projektavimo standartų peržiūra, siekiant užtikrinti suderinamumą su STP eksploatacija, įskaitant:</p> <ul style="list-style-type: none"> – STP ir tradicinių transporto priemonių sąveiką ir su tuo susijusį poveikį saugai. – Specialių kelio juostų STP greitkeluose ir didelio intensyvumo keliuose išskyrimą. – Standartizuotų kelių projektavimą ir diegimą. – Atnaujintas kelių priežiūros ir stebėjimo programas pagal naujus standartus. – Kelių remonto darbų eigos stebėsenos užtikrinimą, kad STP galėtų naudotis naujausia informacija. – Tiltų projektavimo standartus, kad jie būtų suderinami su STP technologijomis. – STP kelių standarto laikymąsi, užtikrinant, kad STP būtų galima naudoti standarto neatitinkančiuose keliuose.

2. Kelių infrastruktūros pritaikymo STP eismui vertinimo modelis ir jo sudarymo metodika

Planavimo praktikoje plačiai taikomas variantinis planavimas. Tai yra toks planavimas, kai, lyginant kelis variantus, leidžiama išsirinkti racionaliausius sprendimus. Variantai yra lyginami pagal identifikuotus efektyvumo rodiklius, kurie dažniausiai yra daugiadimensiniai dydžiai ir savo fizine prasme – dažnai prieštaringi (Jakimavičius, 2008).

Praktikoje žinomi įvairūs variantinio planavimo, tiksliau – daugiatislo vertinimo, metodai: paprastų svorių sudėjimo, entropijos, idealaus taško ir kiti, kurie leidžia sudaryti variantų prioritetų eilutes. Prioritetų eilutė – tai sprendimų matricos perdirbimų ir skaičiavimų rezultatas, kai objektai išdėstomi tam tikra tvarka (Jakimavičius, 2008). Visi metodai skiriasi pagal savo sudėtingumą, tačiau daugiatislių vertinimo metodų taikymo praktika rodo, kad objektų rangavimas, remiantis skirtingais metodais, dažnai sutampa arba mažai skiriasi (Palevičius, 2014). Tipinis, žinomiausias ir dažniausiai taikomas moksliniuose straipsniuose yra paprastųjų svorių sudėjimo (angl. *Simple Additive Weighing*, toliau – SAW) metodas (Zavadskas ir Kaklauskas, 1996; Palevičius, 2014).

2.1. Paprastųjų svorių sudėjimo metodo taikymas

Taikant SAW metodą, pradiniai duomenys yra sprendimų matrica P (sprendimų matrica tik su skaitinėmis reikšmėmis) ir kiekvieno efektyvumo rodiklio reikšmingumai $q = \{q_1, q_2, \dots, q_n\}$. Sprendžiant šiuo metodu, visų reikšmingumų suma turi būti lygi vienetui (Jakimavičius, 2008):

$$\sum_{j=1}^n q_j = 1 - \text{būtina sąlyga.} \quad (1)$$

Pirmausia sudaroma sprendimų priėmimų matrica, o toliau ji normalizuojama. Sprendimų priėmimų matricos normalizavimas – matricos perdirbimas, siekiant suvienodinti rodiklių reikšmes arba kitaip pakeisti jų dimensijas, nepakeičiant santykio tarp atskirų rodiklių. Sprendimų priėmimo matricos normalizavimas vyksta norint juos minimizuoti arba maksimizuoti pagal šias formules (Ginevičius ir Podvezko, 2008):

$$\bar{r}_{ij} = \frac{r_{ij}}{\max r_{ij}} - \text{jei matricos nariai yra maksimizuojami;} \quad (2)$$

$$\bar{r}_{ij} = \frac{\min r_{ij}}{r_{ij}} - \text{jei norima minimizuoti,} \quad (3)$$

čia r_{ij} – i -tojo rodiklio reikšmė j -ajam objektui.

Normalizuotos matricos to pačio varianto nariai sudaujinami su jo reikšmingumu ir sudedami su kitais taip pat gautais alternatyvos (eilutės) nariais. Tokiu būdu pateikiama matematinė variantų racionalumo išraiška (Ginevičius ir Podvezko, 2008):

$$S_j = \sum_{i=1}^n q_i \bar{r}_{ij} - \text{matematinė variantų racionalumo išraiška.} \quad (4)$$

SAW metodo pritaikymas padės išsiaiškinti susisieki- mo infrastruktūros elementų ir dinaminių veiksmų pasirinkimo pagrįstumą. Pagal pasirinktus efektyvumo rodiklius nustatomos potencialiausios trasos (maršrutai) tam tikroje teritorijoje, tikintis didžiausio jos naudojimo.

2.2. Efektyvumo rodiklių pasirinkimas ir jų reikšmingumas

Sudarant vertinimo modelį, ekspertizės būdu buvo sudarytas 8 svarbiausių efektyvumo rodiklių sąrašas (pagal susisieki- mo infrastruktūros elementus ir dinaminis veiksmus):

1. Eismo intensyvumas (motorinių ir nemotorinių transporto priemonių skaičius per valandą) – leidžia įvertinti transporto spūsčių susidarymo galimybes, kurios neleidžia sklendaus STP eismo.
2. Sankryžų skaičius savivaldžio automobilio maršrute – kliūtys, kurias STP įveikti reikalinga papildoma infrastruktūra ir gerai išvystytos C-ITS.
3. Važiuojamosios kelio dalies plotis – leidžia įvertinti, ar kliūčiai esant kelyje bus įmanoma ją įveikti neišvažiuojant į priešingo eismo juostą ir ar įmanoma įrengti atskirą juostą, skirtą STP eismui.
4. Aptarnaujančio ir kito transporto priemonių stojimo skaičius savivaldžio automobilio maršrute – kliūtys, kurias iš anksto numatyti yra beveik neįmanoma.
5. Dviraičių takų ilgis važiuojamojoje kelio dalyje (bendrame sraute) – leidžia įvertinti susidūrimo rizikas su vienais pažeidžiamiausių eismo dalyvių bei numatyti, kaip laikomasi atitinkamo atstumo.
6. Savivaldžio automobilio maršruto greitis (neviršiant leidžiamojo greičio) – leidžia įvertinti iš taško A į tašką B numatyto maršruto laiką.
7. Mobiliojo ryšio sparta (Mbps) savivaldžio automobilio maršrute – leidžia įvertinti internetinio ryšio sutrikimus, kurių įtaka tiesiogiai veikia STP sklandų veikimą.
8. Pėsčiųjų perėjų skaičius – natūralios kliūtys, kurios neprognozuojamai gali sutrikdyti STP eismą ir prieš kurias būtinas ypatingas atidumas.

Vertinant miesto infrastruktūrą STP eismui, reikia pažymėti, kad ne visi kelių infrastruktūriniai elementai yra vienodai reikšmingi sklandžiam ir efektyviam STP eismui, todėl, pasitelkus ekspertus, pasirinktiems efektyvumo rodikliams nustatomi reikšmingumai (Zavadskas et al., 2010). Efektyvumo rodiklių reikšmingumai parodys, kurie susisieki- mo infrastruktūros elementai ir dinaminiai veiksmai turi didelį, mažą ar vienodą poveikį sklandžiam STP eismui.

Vertinimo modelio rezultatų patikimumas priklauso ne tik nuo pasirinkto daugiatislo vertinimo metodo, bet ir nuo ekspertų, kurie atlieka ekspertinį vertinimą. Siekiant, kad būtų parinkti tinkamiausi ekspertai, jiems buvo keliamas reikalavimas būti praktiškai ir teoriškai susipažinusiems su STP veikimu, taikoma teisine baze, mokslinė veikla ar priemonių diegimu.

Šie efektyvumo rodikliai buvo pateikti 11 ekspertų, kurių buvo paprašyta sureitinguoti šiuos efektyvumo rodiklius pagal svarbą. Didžiausią įtaką STP eismui turintis rodiklis vertinamas aukščiausiai, mažiausią įtaką turintis – žemiausiai. Kiekvienas efektyvumo rodiklis skaičiuojant šiuo metodu įgauna svertinį koeficientą, kuris parodo jo svarbą vertinant STP maršruto parinkimą. Visų rodiklių svertinių koeficientų suma turi būti lygi vienetui. Identifikuotų rodiklių reikšmingumą vidutinė vertė apskaičiuojama pagal formulę (Jakimavičius, 2008; Ginevičius ir Podvezko, 2008):

$$\bar{t}_j = \frac{\sum_{k=1}^r t_{jk}}{r}, \quad (5)$$

čia t_{jk} – k eksperto nustatyto j rodiklio reikšmė; r – ekspertų skaičius.

Efektyvumo rodiklių reikšmingumas nustatomas pagal formulę (Jakimavičius, 2008; Ginevičius ir Podvezko, 2008):

$$q_j = \frac{t_j}{\sum_{j=1}^n \bar{t}_j}. \quad (6)$$

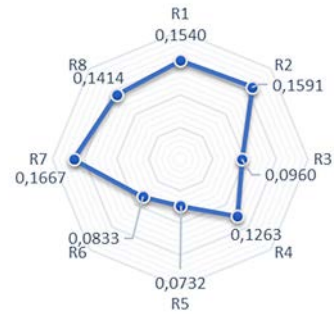
Kelių infrastruktūros vertinimo modelio efektyvumo rodiklių reikšmingumai pateikiami 2 lentelėje ir 4 paveiksle.

Ekspertų pagalba gauti efektyvumo rodiklių reikšmingumai rodo vertinamos infrastruktūros elementų svarbumą ir įtaką sklandžiam STP eismui.

Norint taikyti vertinimo modelį praktikoje esamos situacijos analizės metu pagal tuos pačius efektyvumo rodiklius pasirinktoms STP maršrutų alternatyvoms turi būti surinkti pradiniai duomenys. Šiuo tikslu turi būti su-

2 lentelė. Efektyvumo rodikliai ir jų reikšmingumai
Table 2. Efficiency indicators and their significance

Nr.	Efektyvumo rodiklis	Rodiklio reikšmingumo vidutinis įvertinimas
R1	Eismo intensyvumas (motorinių ir nemotorinių transporto priemonių skaičius per valandą)	0,1540
R2	Sankryžų skaičius STP maršrute	0,1591
R3	Važiuojamosios kelio dalies plotis	0,0960
R4	Aptarnaujančio ir kitų transporto priemonių stovėjimo skaičius STP maršrute	0,1263
R5	Dviračių takų ilgis važiuojamojoje kelio dalyje (bendrame sraute)	0,0732
R6	STP maršruto greitis (neviršijant leidžiamojo greičio)	0,0833
R7	Mobiliojo ryšio sparta (Mbps) STP maršrute	0,1667
R8	Pėsčiųjų perėjų skaičius	0,1414



4 paveikslas. Efektyvumo rodiklių reikšmingumai
Figure 4. Significance of efficiency indicators

darytos naujos duomenų bazės, kuriose kaupiama atitinkama informacija. Atskirų efektyvumo rodiklių pradinių duomenų skaitinės reikšmės ne visada turės tą patį matavimo dydį, tokiu atveju reikia visas skaitines reikšmes suvienodinti, t. y. normalizuoti. Normalizavimas atliekamas siekiant suvienodinti rodiklių reikšmes arba kitaip pakeisti jų dimensijas, nepakeičiant santykio tarp atskirų rodiklių. Normalizavimas vyksta pagal 2 ir 3 formules.

Turint normalizuotą efektyvumo rodiklių pradinių duomenų matricą pagal 4 formulę apskaičiuojamos matematinės pasirinktų STP maršrutų alternatyvų racionalumo išraiškos. Nustatant alternatyvos racionalumą, atitinkamai efektyvumo rodiklio pradinis dėmuo dauginamas iš jo reikšmingumo ir sumuojamas su kitais tokiu pat principu apskaičiuotais efektyvumo rodiklio pirminiais duomenimis.

Apskaičiavus visas alternatyvas gaunama prioritėtų eilutė, kurioje eilės tvarka, pagal racionaliausias reikšmes, išdėstomos pasirinktų STP maršrutų alternatyvos. Gauta prioritėtų eilutė rodo, kurie STP maršrutai, skaičiuojant SAW metodu, yra efektyviausi ir turėtų būti pirmaisiai naudojami. Taip pat iš sudarytos prioritėtų lentelės galima atrinkti ir mažiausiai potencialo turinčius maršrutus.

Išvados

1. Tradicinei automobilių pramonei keičiantis ir vis didesnę rinkos dalį užleidžiant STP, miestų susisiekimo sistemos turi tapti pritaikytos STP. Tikimasi, kad per artimiausius 10–15 metų STP išstums tradicinę automobilių pramonę Europos Sąjungos keliuose. Tai leistų pasiekti geresnius eismo saugumo rodiklius, sumažinti spūstis ir oro taršą miestuose, o kelių infrastruktūros plėtrai reiktų vis mažiau investicijų.
2. Straipsnyje aprašytas kelių infrastruktūros pritaikymo STP eismui vertinimo modelis pirminiuose plėtros etapuose leistų STP integruoti į bendrą susisiekimo sistemą neskiriant daug investicijų, o maršrutams pritaikant esamą infrastruktūrą. Vėlesniuose etapuose, išnaudojus visas esamas galimybes ir itin padidėjus STP eisme, atsirastų poreikis investicijoms į sąveikiąsias intelektines transporto sistemas, be kurių sklandus ir efektyvus STP eismas nėra įmanomas.
3. Siekiant efektyviai integruoti STP į susisiekimo sistemas, rekomenduojama potencialias STP maršrutų alternatyvas

vertinti taikant SAW metodą ir taip pat naudoti straipsnyje pasiūlytus efektyvumo rodiklius bei jų reikšmingumus.

4. Atsižvelgiant į straipsnyje aprašyto ekspertinio vertinimo rezultatus ir gautus efektyvumo rodiklių reikšmingumus, matoma, kad didžiausią reikšmingumą turi *Mobiliojo ryšio sparta (Mbps) STP maršrute* (0,1667). Ekspertų nuomone, šis efektyvumo rodiklis yra svarbiausias todėl, kad be greito ir kokybiško mobiliojo ryšio sutriktų visas STP veikimas. Žinoma, STP funkcionuotų, net jei ir mobiliojo ryšio sparta būtų labai maža, tačiau tokiu atveju galėtų kilti nenumatyti trikdžiai, kurie nutrauktų sklandų STP eismą maršrute. Kiti du panašų reikšmingumą turintys efektyvumo rodikliai yra *Sankryžų skaičius STP maršrute* (0,1591) ir *Eismo intensyvumas (motorinių ir nemotorinių transporto priemonių skaičius per valandą)* (0,1540). Šie efektyvumo rodikliai yra svarbūs tuo, kad jie apibūdina svarbiausias kliūtis, kurios turi didelę įtaką STP eismui. Sankryžos yra transporto priemonių srautų susikirtimo vietos, kurias norint įveikti STP reikia įvertinti daug dinamišų kintamųjų, todėl tai gali sukelti didelių sklaidaus eismo sutrikimų. Atitinkamai panašų poveikį turi ir didelis eismo intensyvumas, o tiksliau STP maršrute esančios transporto priemonės. Kuo šis skaičius didesnis, tuo kyla didesnė rizika, kad STP eismas bus sutrikdytas kitai transporto priemonei atliekant manevrą, pvz., persirikiuojant, lenkiant, staigiai stabdant ar nesilaikant saugaus atstumo. Mažiausią reikšmingumą turi *Dviračių takų ilgis važiuojamojoje kelio dalyje (bendrame sraute)* (0,0732) efektyvumo rodiklis. Tai galima paaiškinti tuo, kad dviračių takas ar dviračių juosta, esanti važiuojamojoje dalyje, yra aiškiai apibrėžtas dydis, kuriame eismas vyksta tik bemotorėmis transporto priemonėmis, o tokiu atveju šioms transporto priemonėms retai susidaro kliūtys ar konfliktinės situacijos su motorinėmis transporto priemonėmis, todėl joms nedažnai tenka išvažiuoti į motorinių transporto priemonių eismui skirtas juostas, kartu sudarant kliūtį STP.

Literatūra

- Atkins. (2016). *Research on the impacts of connected and autonomous vehicles (CAVs) on traffic flow. Stage 2: Traffic modelling and analysis technical report*. https://assets.publishing.service.gov.uk/government/uploads/system/uploads/attachment_data/file/530093/impacts-of-connected-and-autonomous-vehicles-on-traffic-flow-technical-report.pdf
- Berger, R. (2014). *Autonomous driving*. <https://www.rolandberger.com/en/Publications/Autonomous-driving.html>
- Campbell, M., Egerstedt, M., How, J. P., & Murray, R. M. (2010). Autonomous driving in urban environments: Approaches, lessons and challenges. *Philosophical Transactions of the Royal Society a Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 368, 4649–4672. <https://doi.org/10.1098/rsta.2010.0110>
- European Commission. (2016). *A European strategy on Cooperative Intelligent Transport Systems, a milestone towards cooperative, connected and automated mobility (COM) 2016*. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX%3A52016DC0766>
- Ginevičius, R. ir Podvezko, V. (2008). Daugiakriterinio vertinimo būdų suderinamumas. *Business: Theory and Practice*, 9(1), 73–80. <https://doi.org/10.3846/1648-0627.2008.9.73-80>
- Infrastructure Partnerships Australia. (2017). *Automated vehicles: Do we know which road to take?* <http://infrastructure.org.au/wp-content/uploads/2017/09/AV-paper-FINAL.pdf>
- Intini, P., Colonna, P., Berloco, N., & Ranieri, V. (2019). Rethinking the main road design concepts for future Automated Vehicles Native Roads. *European Transport - Trasporti Europei*, 73(3), 1–28. <https://www.scopus.com/record/display.uri?eid=2-s2.0-85078774558&origin=inward>
- Jakimavičius, M. (2008). *Multi-criteria assessment of urban areas transport systems development according to sustainability* [Doctoral dissertation, Vilnius Gediminas Technical University]. Lithuanian Academic Electronic Library. <https://vb.vgtu.lt/object/elaba:1737844/1737844.pdf>
- Konstantinopoulou, L., & Ljubotina, L. (2020). *D7.2: Other initiatives to meet the needs of automated cars. SLAIN: Saving Lives Assessing and Improving TEN-T Road Network Safety*. <https://eurorap.org/wp-content/uploads/2020/12/SLAIN-D7.2-under-review-by-INEA.pdf>
- Kurk Lietuvai. (2017). *Savivaldžių transporto priemonių eksploatavimas Lietuvos keliuose atsižvelgiant į investuotojo ir vartotojo poreikius*. <http://kurklt.lt/wp-content/uploads/2017/08/Savivaldziu-strategija-ir-veiskmu-planas-L-Ginkute-ir-M-Siavris.pdf>
- Lengyel, H., Tettamanti, T., & Szalay, Z. (2020). Conflicts of automated driving with conventional traffic infrastructure. *IEEE Access*, 8, 163280–163297. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.3020653>
- Liu, Y., Tight, M., Sun, Q., & Kang, R. (2019). A systematic review: Road infrastructure requirement for Connected and Autonomous Vehicles (CAVs). *Journal of Physics: Conference Series*, 1187(4), 042073. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1187/4/042073>
- Othman, K. (2021). Impact of autonomous vehicles on the physical infrastructure: Changes and challenges. *Designs*, 5(3), 40. <https://doi.org/10.3390/designs5030040>
- Palevičius, V. (2014). *Lengvųjų automobilių stovėjimo aikštelių mieste vertinimas daugiataktiniais metodais* [Daktaro disertacija, Vilniaus Gedimino technikos universitetas]. VGTU talpykla. <https://doi.org/10.20334/2269-M>
- Palevičius, V., Zapolskytė, S., & Damidavičius, J. (2018, November 22–23). *Alternative travel planning by autonomous vehicles* [Conference presentation]. International Scientific and Technical Conference “Highways: Safety and Reliability”, Minsk, Belarus.
- Pendleton, S. D., Andersen, H., Du, X., Shen, X., Meghiani, M., Eng, Y. H., Rus, D., & Ang, M. H. (2017). Perception, planning, control, and coordination for autonomous vehicles. *Machines*, 5(1), 6. <https://doi.org/10.3390/machines5010006>
- Schwall, M., Daniel, T., Victor, T., Favaro, F., & Hohnhold, H. (2020). *Waymo public road safety performance data*. CoRR abs/2011.0. [http://refhub.elsevier.com/S1366-5545\(22\)00366-0/h0940](http://refhub.elsevier.com/S1366-5545(22)00366-0/h0940)
- Shladover, S. E., & Bishop, R. (2015). Road transport automation as a public–private enterprise. In *Transportation Research Board Conference Proceedings* (pp. 40–64), Washington District of Columbia, United States.
- Tengilimoglu, O., Carsten, O., & Wadud, Z. (2023). Implications of automated vehicles for physical road environment: A comprehensive review. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 169, 102989. <https://doi.org/10.1016/j.tre.2022.102989>
- Zavadskas, E. K. ir Kaklauskas, A. (1996). *Pastatų sistemotechninis įvertinimas*. Technika.
- Zavadskas, E. K., Turskis, Z., Ustinovičius, L., & Sevcenko, G. (2010). Attributes weights determining peculiarities in multiple attribute decision making methods. *Engineering Economics*, 21(1), 32–43.

THE EVALUATION OF ROAD INFRASTRUCTURE FOR SELF-DRIVING VEHICLES

V. Kondratovič, D. Čygas, E. Juodvalkienė

Abstract

The article deals with the problems of the use of self-driving vehicles (SDV) on public the adaptation of road infrastructures well as with, the necessity and objectives of assessment, and the experience of foreign countries in this field. The main factors influencing for SDV were analyzed. An evaluation model of infrastructure adaptation for SDV has been developed, allowing rational planning and selection of the most appropriate self-driving public transport routes. In order to efficiently integrate SDV into transport systems, it is recommended to evaluate the potential route alternatives using the SAW method and also to use the efficiency indicators proposed in the thesis and their significance. After analyzing the theoretical and practical aspects of road infrastructure adaptation for SDV conclusions and suggestions are given.

Keywords: self-driving cars, self-driving vehicle, urban infrastructure, indicators, roads, multi-criteria evaluation, SAW.