

Kauno technologijos universitetas
Mechanikos inžinerijos ir dizaino fakultetas

Autonominių automobilių įtakos eismo srautui sankryžose tyrimas

Baigiamasis magistro projektas

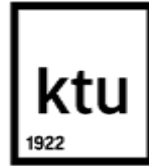
Audrius Alavočius

Projekto autorius

doc. dr. Algis Pakalnis

Vadovas

Kaunas, 2022



Kauno technologijos universitetas
Mechanikos inžinerijos ir dizaino fakultetas

Autonominių automobilių įtakos eismo srautui sankryžose tyrimas

Baigiamasis magistro projektas
Transporto priemonių inžinerija (6211EX021)

Audrius Alavočius

Projekto autorius

doc. dr. Algis Pakalnis

Vadovas

prof. dr. Artūras Keršys

Recenzentas

Kaunas, 2022



Kauno technologijos universitetas
Mechanikos inžinerijos ir dizaino fakultetas
Audrius Alavočius

Autonominių automobilių įtakos eismo srautui sankryžose tyrimas

Akademinio sąžiningumo deklaracija

Patvirtinu, kad:

1. baigiamąjį projektą parengiau savarankiškai ir sąžiningai, nepažeisdama(s) kitų asmenų autoriaus ar kitų teisių, laikydamasi(s) Lietuvos Respublikos autorių teisių ir gretutinių teisių įstatymo nuostatų, Kauno technologijos universiteto (toliau – Universitetas) intelektinės nuosavybės valdymo ir perdavimo nuostatų bei Universiteto akademinės etikos kodekse nustatytų etikos reikalavimų;
2. baigiamajame projekte visi pateikti duomenys ir tyrimų rezultatai yra teisingi ir gauti teisėtai, nei viena šio projekto dalis nėra plagijuota nuo jokių spausdintinių ar elektroninių šaltinių, visos baigiamojo projekto tekste pateiktos citatos ir nuorodos yra nurodytos literatūros sąrašė;
3. įstatymų nenumatytų piniginių sumų už baigiamąjį projektą ar jo dalis niekam nesu mokėjęs;
4. suprantu, kad išaiškėjus nesąžiningumo ar kitų asmenų teisių pažeidimo faktui, man bus taikomos akademinės nuobaudos pagal Universitete galiojančią tvarką ir būsiu pašalinta(s) iš Universiteto, o baigiamasis projektas gali būti pateiktas Akademinės etikos ir procedūrų kontrolieriaus tarnybai nagrinėjant galimą akademinės etikos pažeidimą.

Audrius Alavočius

Patvirtinta elektroniniu būdu



Kauno technologijos universitetas

Mechanikos inžinerijos ir dizaino fakultetas

Studijų programa – Transporto priemonių inžinerija (6211EX021)

Magistro baigiamojo projekto užduotis

Studentui(-ei) *Audriui Alavočiui*

1. Baigiamojo projekto tema:

Autonominių automobilių įtakos eismo srautui sankryžose tyrimas

Investigation of the Influence of Autonomous Cars on Traffic Flow at Intersections

2. Projekto tikslas:

įvertinti autonominių automobilių naudojimo poveikį eismo srautui ir transporto spūstims miesto sankryžose.

3. Projekto uždaviniai:

- *atlikti mokslinės literatūros apie autonominių automobilių panaudojimo modelius analizę;*
- *sudaryti ir aptarti tyrimui naudojamą metodiką;*
- *atlikti mikroskopinius tyrimus;*
- *pateikti tyrimo rezultatus ir išvadas.*

4. Projekto aprašomosios dalies struktūra:

Problemos analizė ir formavimas, teorinis pagrindimas, tyrimo metodika, mikroskopiniai tyrimai naudojant programinę įrangą PTV Vissim bei rezultatų pateikimas.

5. Projekto konsultantai:

Baigiamojo projekto autorius	Audrius Alavočius	2020-10-09
------------------------------	-------------------	------------

(vardas, pavardė, data)

Baigiamojo projekto vadovas	doc. dr. Algis Pakalnis	2020-10-09
-----------------------------	-------------------------	------------

(pareigų sutrumpinimas, vardas, pavardė, data)

Krypties studijų programų vadovas	doc. Saulius Japertas	2020-10-09
-----------------------------------	-----------------------	------------

(pareigų sutrumpinimas, vardas, pavardė, data)

Alavočius, Audrius. Autonominių automobilių įtakos eismo srautui sankryžose tyrimas. Magistro baigiamasis projektas / vadovas doc. dr. Algis Pakalnis; Kauno technologijos universitetas, Mechanikos inžinerijos ir dizaino fakultetas.

Studijų kryptis ir sritis (studijų krypčių grupė): Transporto inžinerija (E12), Inžinerijos mokslai.

Reikšminiai žodžiai: autonominės transporto priemonės, mikroskopinis tyrimas.

Kaunas, 2022. 80 p.

Santrauka

Eismo spūstys sankryžose, o ypač reguliuojamose sankryžose, nuolat didėja daugumoje šiuolaikinių miestų, todėl išauga ir žmogaus vairavimo klaidų rizika. Šiuolaikinės šios problemos sprendimo idėjos remiasi į efektyvius šviesoforų signalų valdymo būdus. Šviesoforinės sankryžos skirtos eismo srautams kontroliuoti ir saugumui keliuose didinti. Tačiau jos gerokai prisideda prie eismo stabdymo miesto eismo tinkle. Viena iš priežasčių, kodėl signalizuotose sankryžose didėja eismo spūstys yra ilgesnis reakcijos laikas, per kurį vairuotojas pradeda judėti, kai šviesoforas iš raudono signalo pereina į žalios spalvos signalą.

Šiame darbe pagrindinis vertinimo įrankis yra PTV Vissim programinė įranga, kurios pagalba buvo pasiektas tyrimo tikslas – nustatytas autonominių automobilių poveikis eismo srautui, vertinant sankryžų efektyvumą. Modeliavimui buvo pasirinktos panašaus tipo šviesoforinės ir nereguliuojamos sankryžos Kauno mieste. Tyrime buvo naudojami trijų skirtingų elgsenos tipų autonominės transporto priemonės, kurios buvo apibrėžtos remiantis autonominių automobilių elgsenos prielaidomis. Patys transporto priemonių vairavimo elgsenos algoritmai ir logika yra įdiegti naujausioje PTV Vissim (2022) programinės įrangos versijoje, kas leido sklandžiai atlikti simuliacinius tyrimus. Buvo modeliuojami 5 skirtingi scenarijai, kurie pasižymėjo skirtingo kiekio autonominio transporto integravimu į eismo srautą važiuojantį per sankryžas.

Mikroskopinių tyrimų rezultatai rodo, kad normalaus ir agresyvaus tipo autonominis transportas minimaliai gali sumažinti – vidutinį transporto priemonių kelionės per sankryžą laiką 7-18 %, vidutinį kelionės pailgėjimo laiką 6-14 %, vidutinį stovėjimo spūstyje laiką 6-13 %, vidutinį transporto priemonių eilių ilgį 4-12 %. Kai kuriais atvejais, rodiklių rezultatai viršija 50 % naudojant eisme vien tik agresyvaus tipo autonominius automobilius. Todėl visi šie rezultatai reiškia, kad eismo spūstys miesto sankryžose sumažės, nes tendencijos yra tokios, kad autonominio transporto pasaulyje tik daugės. Šio tyrimo rezultatai taip pat rodo, kad didesnę atsparumą didėjančiam eismo srautui turi nereguliuojamos sankryžos, per jas važiuojant autonominėms transporto priemonėms.

Atliktas tyrimas atskleidė, kad pereinamuoju laikotarpiu, kai autonominis transportas keliuose važinėja kartu su įprastomis transporto priemonėmis, tiek šviesoforinės tiek ir nereguliuojamos sankryžos bus efektyvesnės palyginti su eismo srautu, kai jame vyrauja tik įprastos transporto priemonės.

Alavocius, Audrius. Investigation of the Influence of Autonomous Cars on Traffic Flow at Intersections. Masters's Final Degree Project / supervisor assoc. prof. Algis Pakalnis; Faculty of Mechanical Engineering and Design, Kaunas University of Technology.

Study field and area (study field group): Transport Engineering (E12), Engineering Science.

Keywords: autonomous vehicles, microscopic simulations.

Kaunas, 2022. 80 p.

Summary

Traffic congestion at intersections, and especially at regulated intersections, is steadily increasing in most modern cities, and so is the risk of human driving errors. Modern ideas for solving this problem are based on efficient ways of controlling traffic light signals. These kind of intersections help to make roads safer and controlled. However, they make a significant contribution to congestion in the urban traffic network. One of the reasons for the increase in traffic congestion at signaled intersections is the longer response time that the driver begins to move when the traffic light changes from a red signal to a green signal.

In this work, the main evaluation tool is PTV Vissim software, which was used to achieve the goal of the study - to determine the impact of autonomous cars on traffic flow by assessing the efficiency of intersections. Similar types of traffic lights and unregulated intersections in Kaunas were selected for modeling. The study used three different types of behavioral autonomous vehicles, which were defined based on the behavioral assumptions of autonomous cars. The algorithms and logic of the driving behavior of the vehicles themselves are implemented in the latest version of PTV Vissim software (2022), which allowed smooth running of the simulation studies. 5 different scenarios were modeled, which were characterized by the integration of different amounts of autonomous transport into the traffic flow passing through the intersections.

The results of microscopic examinations show that normal and aggressive type autonomous vehicles can minimally reduce - the average travel time of vehicles at the intersection by 7-18 %, the average travel elongation time by 6-14 %, the average traffic time in traffic jams by 6-13 %, length of queues 4-12 %. In some cases, the performance of the indicators exceeds 50 % when using an aggressive type of autonomous vehicles alone. Therefore, all these results mean that traffic congestion at city intersections will decrease, as the trend is such that autonomous vehicles will only increase in the world.

The results of this study also show that unregulated intersections have a higher resistance to increasing traffic flow when passing through AT. The study revealed that during the transition period, autonomous road transport will run alongside conventional vehicles, and both traffic lights and unregulated intersections will be more efficient compared to traffic when only conventional vehicles predominate.

Turinys

Lentelių sąrašas	8
Paveikslų sąrašas	9
Įvadas	11
1. Automatizacija transporte	13
1.1. 5 autonominio vairavimo lygiai.....	15
1.2. Autonominiai automobiliai keliuose ir sankryžose	18
2. Autonominių automobilių jutikliai ir jų ryšys su tyrimu	21
3. Mikroskopinis transporto srautų tyrimas	26
4. Tyrimo metodika	28
4.1. Sankryžų duomenys.....	29
4.2. Autonominių transporto priemonių vairavimo elgsena	34
4.3. Palyginimo scenarijai	38
5. Mikroskopinis tyrimas	42
5.1. Mikroskopinio tyrimo parametrai.....	44
5.2. Automobilių tipai ir vairavimo elgsena	49
5.3. Sankryžos eismo reguliavimas šviesoforais	51
5.4. Vertinimo rodikliai	52
6. Tyrimo rezultatai	57
Išvados	76
Literatūros sąrašas	77
Priedai	81
1 priedas. Mikroskopinio tyrimo simuliacijos paveikslai.....	81

Lentelių sąrašas

1 lentelė. Automobilių skaičius važiuojantis per Kariūnų pl. sankryžą	30
2 lentelė. Automobilių skaičius važiuojantis per Breslaujos sankryžą	33
3 lentelė. Autonominių automobilių prielaidos pagal Coexist PTV Vissim.....	35
4 lentelė. Prielaidos (vertės) važiavimui paskui kitą transporto priemonę	35
5 lentelė. Autonominės TP elgsenos parametrai važiuojant paskui kitą transporto priemonę.....	36
6 lentelė. Autonominio transporto eismo juostų keitimo elgsenos modelio parametrai	37
8 lentelė. Tyrimo scenarijai	39
9 lentelė. Transporto srauto padidėjimas Kariūnų pl. sankryžoje	40
10 lentelė. Transporto srauto padidėjimas Breslaujos g. sankryžoje	41
11 lentelė. Parametro „Random seed“ vienos simuliacijos pavyzdys.....	45

Paveikslų sąrašas

1 pav.	Gamintojai, kurie turi didžiausią potencialą AT rinkoje	14
2 pav.	Autonominių automobilių skaičiaus prognozavimas Vokietijoje	14
3 pav.	Automatizacijos lygiai	16
4 pav.	„Stanley“ – automobilis, kuris įveikė autonominio vairavimo iššūkį	18
5 pav.	LIDAR įrenginio sukuriama 360 laipsnių taškų debesis	22
6 pav.	Radarų montavimo ir jų detekcijų zonos	23
7 pav.	Ultragarsinių jutiklių montavimo vietos automobiliuose	24
8 pav.	Kamerų naudojimas autonominiuose automobiliuose	25
8 pav.	Tyrimo eigos schema	28
9 pav.	Kariūnų pl. ir Vaidoto gatvių sankryža	29
10 pav.	Kariūnų pl. ir Vaidoto g. sankryžos geometrija	30
11 pav.	Transporto srauto duomenys Vaidoto g. ir Kariūnų pl. sankryža	31
12 pav.	Breslaujos gatvės sankryža	32
13 pav.	Breslaugos sankryžos geometrija	33
14 pav.	Transporto srauto duomenys Breslaujos g. sankryža	34
15 pav.	Atstumo parametrai važiuojant paskui kitą transporto priemonę	36
16 pav.	Atstumo parametrai važiuojant paskui kitą transporto priemonę	37
17 pav.	PTV Vissim – scenarijų valdymas	40
18 pav.	Matavimo vienetų nustatymas PTV Vissim	42
19 pav.	PTV Vissim sukurtas sankryžos modelis skirtas tyrimui	43
20 pav.	PTV Vissim Breslaujos sankryžos jungčių tipai	43
21 pav.	Sumažinto greičio zonos Breslaujos sankryžoje	44
22 pav.	Konfliktingos zonos Breslaujos sankryžos modelyje	44
23 pav.	Tyrimo parametrai PTV Vissim	45
24 pav.	Pagreičio parametrų keitimo meniu PTV Vissim	46
25 pav.	Maksimalaus pagreičio prielaidos automobiliams PTV Vissim	47
26 pav.	Norimo pagreičio prielaidos įprastam ir autonominiam automobiliui PTV Vissim	47
27 pav.	Maksimalaus lėtėjimo prielaidos automobiliams PTV Vissim	48
28 pav.	Norimo lėtėjimo prielaidos įprastam ir autonominiam automobiliui PTV Vissim	48
29 pav.	Greičio reikšmės įprastiniams ir autonominiams automobiliams	49
30 pav.	Automobilių tipai PTV Vissim programoje	50
31 pav.	Skirtingų automobilių tipų funkcijos	50
32 pav.	Automobilių klasės ir tipai programoje PTV Vissim	51
33 pav.	Vairavimo elgsenos logikos kategorijos PTV Vissim programoje	51
34 pav.	Šviesoforų signalai Breslaujos sankryžoje	52
35 pav.	Tyrimo vertinimo rodikliai PTV Vissim programoje	53
36 pav.	Informacijos rinkimo taškai Breslaujos sankryžoje	54
37 pav.	Transporto priemonių eilių matuokliai Breslaujos sankryžoje	54
38 pav.	Automobilių kelionės laiko parametrai	55
39 pav.	Vidutinis delsimas automobilio visos kelionės laike	56
40 pav.	Breslaujos sankryžos simuliacija PTV Vissim	57
41 pav.	Vidutinis kelionės laikas Breslaujos sankryžoje	58
42 pav.	Vidutinis kelionės laikas Kariūnų pl. sankryžoje	59

43 pav.	Vidutinio kelionės laiko pokytis procentais Breslaujos sankryžoje	60
44 pav.	Vidutinio kelionės laiko pokytis procentais Kariūnų pl sankryžoje.....	60
45 pav.	Vidutinis kelionės pailgėjimo laikas Breslaujos sankryžoje	61
46 pav.	Vidutinis kelionės pailgėjimo laikas Kariūnų pl. sankryžoje.....	62
47 pav.	Vidutinio kelionės pailgėjimo laiko pokytis Breslaujos sankryžoje	63
48 pav.	Vidutinio kelionės pailgėjimo laiko pokytis Kariūnų pl. sankryžoje.....	63
49 pav.	Vidutinis stovėjimo spūstyje laikas Breslaujos sankryžoje.....	64
50 pav.	Vidutinis stovėjimo spūstyje laikas Kariūnų pl. sankryžoje	65
51 pav.	Vidutinio stovėjimo spūstyje laiko pokytis Breslaujos sankryžoje.....	66
52 pav.	Vidutinio stovėjimo spūstyje laiko pokytis Kariūnų pl. sankryžoje	66
53 pav.	Vidutinis transporto priemonių eilės ilgis Breslaujos sankryžoje	67
54 pav.	Vidutinis transporto priemonių eilės ilgis Kariūnų pl. sankryžoje.....	68
55 pav.	Vidutinių transporto priemonių eilių ilgių pokytis Breslaujos sankryžoje.....	69
56 pav.	Vidutinių transporto priemonių eilių ilgių pokytis Breslaujos sankryžoje.....	69
57 pav.	Vidutinių transporto priemonių kelionės laikų palyginimas Breslaujos sankryžoje	70
58 pav.	Vidutinių transporto priemonių kelionės laikų palyginimas Kariūnų pl. sankryžoje.....	70
59 pav.	Vidutinio kelionės laiko pailgėjimo laikų palyginimas Breslaujos sankryžoje	71
60 pav.	Vidutinio kelionės laiko pailgėjimo laikų palyginimas Kariūnų pl. sankryžoje	71
61 pav.	Vid. transporto priemonių stovėjimo spūstyje laikų palyginimas Breslaujos sankryžoje....	72
62 pav.	Vidutinių TP stovėjimo spūstyje laikų palyginimas Kariūnų pl. sankryžoje	72
63 pav.	Vidutinių transporto priemonių eilių ilgių palyginimas Breslaujos sankryžoje.....	73
64 pav.	Vidutinių transporto priemonių eilių ilgių palyginimas Kariūnų pl. sankryžoje	73
65 pav.	Jautrumo analizė Breslaujos sankryžoje.....	74
66 pav.	Jautrumo analizė Kariūnų pl. sankryžoje	75

Įvadas

Nuo pat 1908 m., kai atsirado pirmoji masiškai gaminama transporto priemonė, Ford T, buvo pasiekta didelė pažanga, kuri įtakojo daugybę patobulinimų ir visai pakeitė pasaulinės rinkos automobilių charakteristikas. Tais metais turėti automobilių buvo prabanga, tačiau šiais laikais jis tapo įprasta transporto priemone, o automobilių pramonė kasdien formuoja vis pažangesnes gamybos tendencijas – gerina saugumą, efektyvumą, patogumą. Europos sąjungos (toliau – ES) gyventojų skaičius, remiantis EUROSTAT duomenimis 2044 metais turėtų pasiekti 525 milijonus, nuo dabar siekiančių 448 milijonų [1], o Jungtinėse Amerikos valstijose (toliau – JAV) iki 2045 metų gyventojų skaičius turėtų padidėti net 70 milijonų [2]. Būtent dėl to transporto eismas itin didės dėl išaugusio transporto priemonių skaičiaus. Palyginimui 2010 metais pasaulyje buvo 1 milijardas automobilių, 2014 metais transporto priemonių skaičius pasiekė 1,2 milijardo, o skaičiuojama, kad 2035 metais automobilių skaičius gali siekti net 2 milijardus [3].

Transporto saugumas yra vienas svarbiausių transporto sistemos iššūkių. Pasaulio sveikatos organizacijos duomenimis, per metus kelių eismo įvykiuose miršta maždaug 1,3 milijono žmonių, o žūtys eismo įvykiuose iki 2030 m. taps penkta pagal dažnumą mirties priežastimi, jei išliks dabartinės tendencijos. Tarp visų avarijų, maždaug 90 % avarijų lemia žmogaus faktoriaus klaidos [4].

Nors transporto priemonių skaičius keliuose kasmet didėja, tačiau kelių infrastruktūra nesiplečia vienodai. Pavyzdžiui JAV apie 50 % eismo spūsčių, vadinamų reguliariomis spūstimis, susidaro viršijant kelių pralaidumo rodiklius, nustatytus konkrečioms keliam. Tai vyksta tuomet, kai vienu metu daug transporto priemonių bando važiuoti tais pačiais keliais, kurių pralaidumas nėra pakankamas tokiam dideliame eismo srautui. Kita vertus, kitų 50 % eismo spūsčių, vadinamų nereguliariomis spūstimis, daugiausia lemia trys reikšmingi veiksniai keliuose: kelio remonto vietos (10 %), nepalankios oro sąlygos (15 %) ir eismo įvykiai (25 %) [5]. Galiausiai, tiesiog pridėdant daugiau eismo juostų, spūsčių problemos išspręsti nepavyksta.

Eismo spūstyse vairuotojai ne tik naudoja savo laiką, bet tai jiems dar ir kainuoja papildomas išlaidas sunaudotiems degalams. Eismo modeliavimo eksperimentai ir praktiniai bandymai rodo, kad papildomi automobilių greičio pasikeitimai, trumpame laiko tarpe, padidina transporto priemonių degalų sunaudojimą 14 %, palyginti su transporto priemonėmis, kurios juda pastoviu greičiu [6]. Pastaraisiais dešimtmečiais investicijos į kelių infrastruktūrą siekė reikšmingas sumas tam, kad būtų sumažintas nukentėjusiųjų žmonių skaičius, eismo spūstys, kurias sukelia žmogaus faktoriaus klaidos [5]. Šiuolaikiniai tyrimai pradeda remtis inovatyviomis technologijomis tiek eismo infrastruktūroje, tiek ir transporto priemonėse, sprendžiant šiuos iššūkius.

Pagrindinė šio darbo keliamą **problema**, tai eismo spūstys sankryžose, kurios nuolat didėja daugumoje didžiųjų miestų, todėl išauga ir žmogaus vairavimo klaidų rizika. Šiuolaikinės šios problemos sprendimo idėjos fokusuojasi į efektyvius šviesoforų signalų valdymo būdus. Šviesoforinės sankryžos skirtos eismo srautams kontroliuoti ir saugumui keliuose didinti. Tačiau jos gerokai prisideda prie eismo stabdymo miesto eismo tinkle. Viena iš priežasčių, kodėl reguliuojamose sankryžose didėja eismo spūstys yra ilgesnis reakcijos laikas, per kurį vairuotojas pradeda judėti, kai šviesoforas iš raudono signalo pereina į žalios spalvos signalą. Naudojant naujas technologijas, tokias kaip autonominės ir tarpusavio ryšį turinčios transporto priemonės turi realias galimybes sumažinti transporto spūsčių sankryžose problemas dėl sumažėjusių žmogiškojo faktoriaus klaidų.

Lietuvos mastu, Vilnius, Klaipėda ir Kaunas tai yra tie miestai, kurie patiria didžiausias eismo spūsčių problemas. Bandymai platinti gatves (pridedant daugiau eismo juostų), įgalinant viešojo transporto juostas, kad būtų išspręsta spūsčių problema neduoda norimų rezultatų ir rodo, kad tradicinis požiūris sprendžiant miestų eismo spūsčių problemas, tampa neefektyvus. Todėl analizuojant autonominių automobilių panaudojimo galimybes, galima atrasti dar vieną efektyvų būdą padėti didžiųjų miestų gyventojams normalizuoti eismo srautus.

Šio darbo **tikslas** – įvertinti autonominių automobilių naudojimo poveikį eismo srautui ir transporto spūstims miesto sankryžose. Šiam tikslui pasiekti keliami **uždaviniai**:

- atlikti mokslinės literatūros, nagrinėjančios autonominių automobilių panaudojimo modelius, analizę;
- sudaryti ir aptarti tyrimui naudojamą metodiką;
- Atlikti mikroskopinius tyrimus;
- Pateikti tyrimo rezultatus ir išvadas.

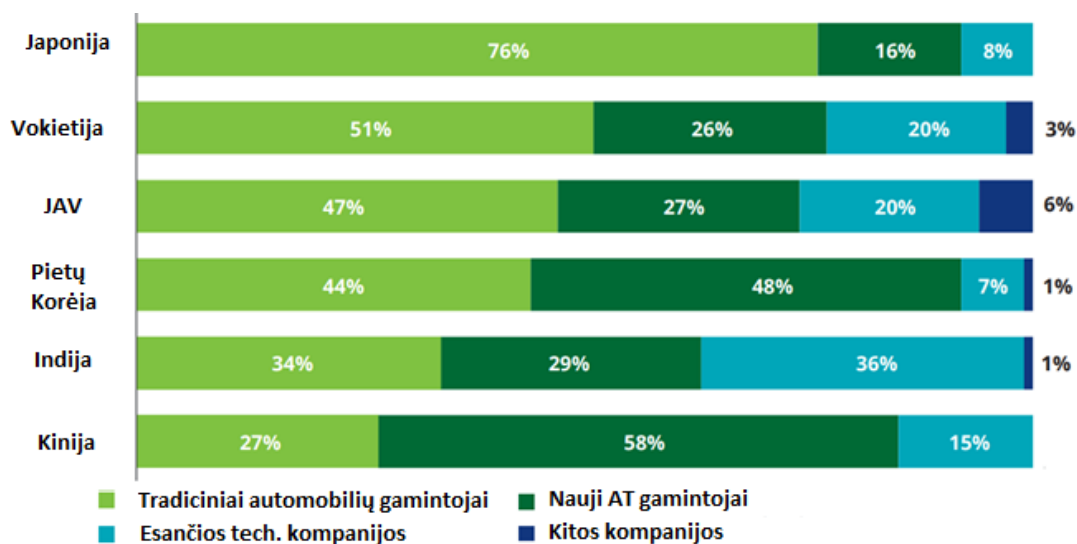
1. Automatizacija transporte

Skaičiuojama, kad 2050 metais miestų gyventojų skaičius visame pasaulyje padidės 54 procentais, kas stipriai paveiks ir transporto priemonių skaičių. Į šiuolaikines transporto priemones jau yra diegiamos pastovaus greičio palaikymo sistemos, kas padeda sumažinti žmogaus indėlį automobilio valdyme [7]. Mokslininkai Oonk ir Svensson pabrėžia, kad pilnai ar tik dalinai automatizuoti automobiliai iš esmės didina eismo saugumą miestuose eliminuojant žmogaus faktoriaus klaidas [8]. Autonominiai automobiliai yra laikomi viena pažangiausių išmaniųjų technologijų naujove, kai dirbtiniu intelektu valdomos transporto priemonės gali gabenti žmones. Tai, tikėtina, greitai taps dominuojančia transporto priemone keliuose ir lems autonominių sistemų diegimą kitose transportavimo srityse.

Pasak grupės mokslininkų, Morando ir kt., transportas, kuris gali važiuoti nuo vieno iki kito taško be vairuotojo įsikišimo yra laikomas autonominiu transportu (toliau – AT). Tokie technologiniai sprendimai nuolatos tobulėja, ką ir galima pamatyti šiuolaikinėse automatizuotose transporto sistemose [9]. Nepaisant to, kad autonominių transporto priemonių kūrimas yra ir 21 amžiaus automobilių plėtros etapo iššūkis, tokių technologijų šaknys nėra naujos. Automobilių išradėjai jau anksčiau planavo AT, netrukus po pačių transporto priemonių išradimo. 1925 m. „Houdina Radio Control“, radijo komponentų gamybos įkūrėjas, Francis Houdina, pirmą kartą bandė valdyti transporto priemonę radijo ryšiu ir net sugebėjo užvesti variklį, perjungti pavaras bei sėkmingai įjungti garso signalą [10]. Nenuilstamai tobulėjant moksliniams tyrimams ir tobulėjant kompiuterių ir belaidžio ryšio diegimui transporto sektoriuje, nuo to laiko AT kūrimas padarė reikšmingų laimėjimų [11].

AT diegimas šiuolaikinėje transporto sistemoje yra itin svarbus dalykas, kur jis vaidina svarbų vaidmenį sprendžiant dabartines ir vis iškylančias transporto sistemos problemas ir iššūkius. Visame pasaulyje sutinkama, kad autonominiai automobiliai gali pakeisti žmogaus vairavimą, siekiant sutaupyti laiko, kuris kasdienį vairavimo laiką gali paversti kita naudinga veikla, tokia kaip vaizdo filmų peržiūra, skaitymas ar net gi miegas. Visas vargas ir stresas dėl saugaus automobilio valdymo, jo parkavimo turėtų būti palikti autonominėms technologijoms. Gamintojai ir mokslininkai daugeliu atvejų nurodo, kad AT užtikrina didesnę saugumą ir naudotojo patogumą žmonėms [12].

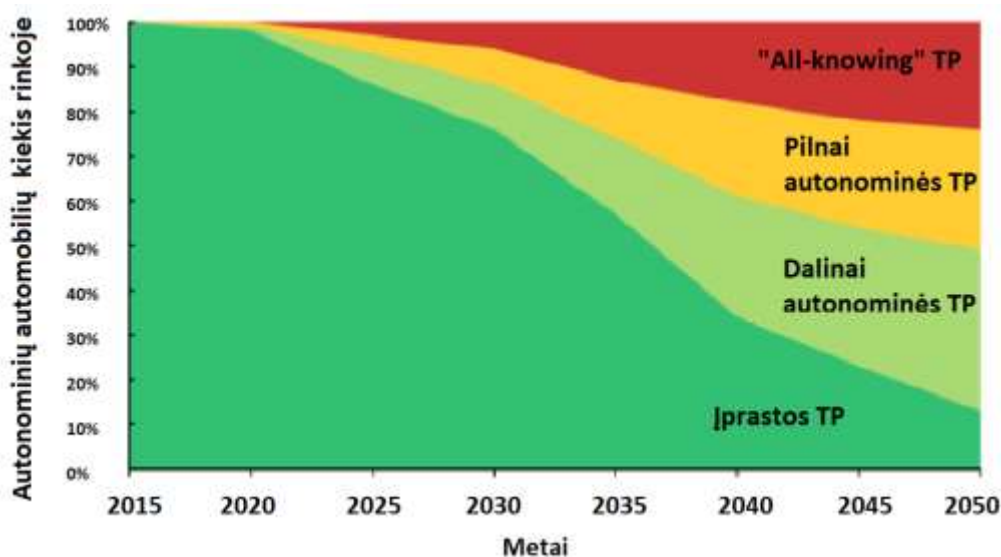
Remiantis Morando ir kt. prognozuojama, kad AT sumažins avarių skaičių keliuose, nes dauguma jų kyla dėl žmogaus klaidų. Be to, AT gali puikiai sumažinti spūstis ir didinti kelių pralaidumą. Autonominių automobilių paklausa visame pasaulyje smarkiai didėja, o tai rodo pasaulinės AT rinkos šviesią ateitį. Tiek esamos, tiek naujos pramonės šakos koncentruojasi į autonominių transporto priemonių kūrimą ir diegimą, atsižvelgdamos į būsimus rinkos poreikius. 1 paveiksle apžvelgiama, kaip išsivysčiusių ir besivystančių šalių esami tradicinių automobilių gamintojai palaipsniui pereina prie AV technologijų [12]. Įvairių technologijų lyderės, valstybės tokios kaip Kinija ir Pietų Korėja, spartina AT plėtrą, nuolatos steigdamos naujus tyrimų centrus, mašinų gamyklas, autonominiams automobiliams vystyti ir gaminti.



1 pav. Gamintojai, kurie turi didžiausią potencialą AT rinkoje [13]

AT su aplinkos bendravimo funkcijomis vadinama išmaniaja autonominė transporto priemone, kuri laikoma pagrindiniu ateities ir kooperatyvinės intelektualiosios transporto sistemos etalonu [14]. Pasak autoriaus Makridio, per ateinančius dešimtmečius transporto pramonės patirs didžiulius pokyčius rengiantis priimti autonomines transporto priemones, o tai bus drastiškų šiandieninių transporto modelių pasikeitimų priežastis [14].

Kaip pavyzdys yra pateikta metų bendrinė prognozė, vizualizuota autorių Motamedidehkordi ir kt. apie numatomą automatizuotų transporto priemonių dalį tarp Vokietijos gyventojų parodyta 2 paveiksle [15]. Šioje iliustracijoje parodyta apytikslė pereinamojo laikotarpio trukmės ir automatizuotų transporto priemonių technologijų diegimo idėja. Skaičiavimai rodo, kad nuo 2020 m. automatizuotų transporto priemonių dalis ėmė sparčiai didėti, tačiau Vokietijos rinkoje iki 2030 m. AT vis dar gali sudaryti mažiau nei 25 % visų transporto priemonių.



2 pav. Autonominių automobilių skaičiaus prognozavimas Vokietijoje [15]

Skaičiuojama, kad jau greitai pasaulyje AT rinka viršys 125 milijonus automobilių su tarpusavio komunikacijos palaikymo funkcijomis, o tai yra rimtas įrodymas, kad artėja autonominio transporto

era [16]. Automobilių gamintojai adaptyviają pastovaus greičio palaikymo sistemą, su komunikacijos funkcijomis laikė itin raktine technologija, kurią privaloma diegti jau baziniame autonominio transporto kūrimo etape. Tai turi tiesioginės įtakos kelionių potyriams žmogui. Pastovaus greičio palaikymo logika gali būti naudojama norint sėkmingai analizuoti AT vairavimo elgseną [17].

Pilnai automatizuotas transporto valdymas yra viena iš karščiausių idėjų automobilių pramonėje pastaraisiais metais. Kadangi šis tyrimas nagrinėja būtent tokius automobilius, tai svarbu tinkamai juos apibrėžti. Tam bus naudojamas „SAE International“ apibrėžimas. SAE angl. *Society of Automotive Engineers* reiškia automobilių inžinierių organizacija, kuri yra įkurta maždaug prieš 100 metų ir kurios misija yra kurti standartus ir dalytis žiniomis apie automobilius ir kitus sektorius, tokius kaip aviacija [18].

Visų pirma, **autonominės vairavimo sistemos** apibrėžimas: „Aparatinė ir programinė įranga, kuri kartu įgalina atlikti dalį arba visą dinaminio vairavimo užduotį“ [19]. Tai yra bendras termino paaiškinimas, tačiau jis yra gana nedetalus, nesuteikiantis tikslios informacijos apie tos autonominės kontrolės laipsnį ir gebėjimą vairuoti.

Todėl toliau yra išskiriami 5 vairavimo automatikos lygiai, kartu ir nulinis lygis, reiškiantis, kad visiškai nėra automatikos ir vairuotojas yra 100 % atsakingas už automobilio valdymą. Prieš analizuojant 5 automatizacijos lygius, reikia aptarti 2 apibrėžimus, nurodančius tam tikrą padalijimą į žemesnę ir aukštesnę automatikos pakopą: aktyvioji saugos sistema (ASS) ir automatizuotos vairavimo sistemos (AVS).

Aktyviosios saugos sistemos yra tokios sistemos, „kurios nustato ir stebi sąlygas transporto priemonės viduje ir išorėje, kad nustatytų esamus ir galimus pavojus transporto priemonei, keleiviams, kitiems eismo dalyviams ir automatiškai įsikiša, kad padėtų išvengti arba sumažinti galimus susidūrimus įvairiais metodais“ [19]. Kita vertus, automatizuotos vairavimo sistemos yra labiau aukštesnio laipsnio ir priklauso 3, 4 ir 5 lygmeniui. AVS apibūdinamos kaip „aparatinė ir programinė įranga, galinti nuolatos kartu atlikti visą vairavimo darbą“ [19].

1.1. 5 autonominio vairavimo lygiai

Kaip parodyta 3 paveiksle, ASS ir AVS vairavimo automatikos grupių atskyrimas yra pažymėtas skirtingomis spalvomis: mėlyna rodo aktyviosios saugos sistemas, o žalia spalva žymi automatizuotas vairavimo sistemas.

	S&E 0 lygis	S&E 1 lygis	S&E 2 lygis	S&E 3 lygis	S&E 4 lygis
Ką žmogus sėdintis vairuotojo sėdynėje turi daryti?	Vairuoja žmogus, nepaisant to, kad nelaiko vairo ar kojų ant pėdalu			Žmogus nevairuoja, nesvarbu ar sėdi vairuotojo vietoje	
	Žmogus privalo sekti situacija ir esant reikalui neatidėliotinai stabdyti, sukti ar greitėti			Esant situacijai Privalo perimti	Perimti neprivaloma
	Žmogaus asistavimo funkcijos			Automatizuota	
Ką šios funkcijos atlieka?	Saugos įspėjimai ir minimali pagalba	Vairavimo ar stabdymo/ greitėjimo pagalba	Vairavimo ir stabdymo/ greitėjimo pagalba	Tam tikromis sąlygomis gali pilnai vairuoti automatizuotai, tačiau neesant sąlygoms nevairuoja	
Savybių pavyzdžiai	*Auto avarinis stabdymas *Aklosios zonos įspėjimai *Juostos palaikymo įspėjimas	Juostos asistentas arba adaptyvi greičio palaikymo sistema	Juostos asistentas ir adaptyvi greičio palaikymo sistema	Eismo spūstys	*Taxi autonominis *Pedalai ir vairas gali būti neįdiegi

3 pav. Automatizacijos lygiai [19]

0 lygis – automatizacijos nėra: šiame lygyje kalbėti apie automatizavimą negalima, nes vairuotojas yra vienintelis dėmuo, kuris atlieka visas vairavimo funkcijas, visose situacijose. Iš esmės beveik visi dabar parduodami automobiliai yra tokio lygio, nepaisant to, kad automobiliuose yra įdiegtos automatinio avarinio stabdymo ir įspėjimo apie nukrypimą nuo eismo juostos, aklosios zonos įspėjimų funkcijos. Vairuotojas turi atlikti 100 % automobilio valdymo ir jam nepadaeda jokios sistemos. Sistemos gali pateikti įspėjimus, pavyzdžiui, kai vairuotojas greitkelyje keičia eismo juostą neįjungęs posūkio signalo arba netgi stabdyti automobilį, kai priešais važiuojanti transporto priemonė stabdo.

1 lygis – pagalba vairuotojui: 1 lygyje yra padidintos automobilio valdymo pagalbos galimybės naudojant išilginio arba šoninio judesio pagalbinę funkciją, kurią atlieka automobilio sistemos. Tokios funkcijos kaip pastovaus greičio palaikymas, eismo juostos išlaikymo funkcijos yra dvi pagrindinės pagalbinės sistemos diegiamos automobiliuose. Turint integruotas tokias sistemas transporto priemonė gali didinti ar sumažinti greitį, palaikyti saugų atstumą nuo priekyje važiuojančio automobilio. Šios dvi sistemos negali būti aktyvuotos tuo pačiu metu ir vairuotojas, be abejo, visą laiką turi laikyti rankas ant vairo.

2 lygis – dalinė vairavimo automatizacija: 2 lygis iš esmės yra 1 lygis, kai abi vairavimo pagalbinės priemonės yra aktyvios tuo pačiu metu be jokių apribojimų. Šiuo atveju transporto priemonė gali ir didinti greitį ir stabdyti, tuo pačiu išlaikant atstumą nuo priekyje važiuojančio automobilio. Šiuo metu tai yra didžiausias leistinas automatizavimo lygis pagal Europos Sąjungos reglamentus, nes

vairuotojas turi laikyti rankas ant vairo arba sistema turės išsijungti, o po pakartotinio įspėjamojo signalo ir priversti automobilį saugiai sulėtinti greitį iki sustojimo [21]. Tai aukščiausias automatizacijos lygmuo, kuriame privalomai reikalingas vairuotojas.

3 lygis – reiškia, kad žmogus gali būti reikalingas tik kaip pagalba dirbtiniam intelektui, o visą vairavimo užduotį atlieka technologinė įranga, esanti automobilyje. Žmogus turi būti pasiruošęs perimti valdymą tik tam tikrais atvejais, kai technologijos negali to padaryti. Nuo trečio lygio ir aukščiau kalbame apie AVS ir vairuotojui nebūtina visą laiką laikyti rankas ant vairo, tačiau jis turi būti pasiruošęs perimti valdymą. Šiandien parduodamų, tokių automobilių gamintojų, kaip „Volvo“ [22] ir „Tesla“ [23], automobilius su tokiu autonominio vairavimo lygiu galima gauti tiesiog įdiegiant tam tikrus įrangos atnaujinimus, nes tai tik programinės įrangos klausimas, kuris turi panaikinti 2 lygio apribojimus.

4 lygis – aukšta vairavimo automatizacija: ketvirtasis lygis reiškia, kad iš esmės visomis sąlygomis nereikia vairuotojo įsikišimo. Vairas vis dar yra, o norintys keleiviai gali bet kada perimti automobilio kontrolę. Tačiau žmogaus įsikišimas nereikalingas ir tai yra pagrindinis skirtumas nuo 3 lygio: transporto priemonė gali būti visiškai nepriklausoma nuo žmogaus.

5 lygis – pilna vairavimo automatizacija: penktasis, paskutinis automatikos lygis, kur vairas netgi neprivalomas, nes nėra tokio dalyko kaip žmogus vairuotojas ir keleiviai negali perimti automobilio valdymo rankiniu būdu. Tokio lygio turi siekti pilnai autonominį pavežėjimą teikiantys automobiliai. Nemažai transporto paslaugas teikiančių įmonių, tokių kaip „Waymo“, investuoja dideles pinigų sumas, kad galėtų tęstuoti savo sukurtas autonomines vairavimo sistemas kuo realesniais ir įvairiausiais scenarijais, ko pasekoje galėtų pasiekti aukštą patikimumo lygį. Pagrindinis tokių komanių kuriamų pilnai autonominių automobilių trūkumas yra tas, kad tokie automobiliai turi važiuoti iš anksto numatytu keliu, tiksliai laikytis nustatytos trajektorijos, remiantis iš ankstesnių kelionių surinktais duomenimis, kurių gali būti šimtai arba tūkstančiai kartų važiuotų vienu maršrutu [24]. Štai kodėl prieš išleisdamos galutinę autonominių taksi paslaugą valstybės mastu, savarankiškai vairuojančių taksi įmonės, tokios kaip „Waymo“ (kuri priklauso „Google“), turės ilgą laiką lavinti automobilių dirbtinį intelektą, nes ši technologija priklauso nuo mašininio mokymosi ir situacijų įsisavinimo realiame laike.

Reikalinga, taip pat, pažvelgti į procesą, kuris pastaraisiais metais pristatė šias technologijas į rinką. Nenuostabu, kad dešimtmečius buvo savotiškas ketinimas priversti transporto priemones važiuoti pačias, bet idėja niekada nebuvo įgyvendinta dėl techninių apribojimų. Tai daugiausia buvo susijęs su technologine pažanga. Net prieš 20 metų tai nebuvo įmanoma taip, kaip daroma dabar ir su tokia žemesne kaina.

Pažvelgus šiek tiek į ankstesnius laikus, leidžiančius pereiti prie šiuolaikinių savaeigių transporto priemonių, atsimušama į praėjusio dešimtmečio pradžią, būtent 2005 m. Vieta – Mohave dykuma, netoli Las Vegaso (JAV), o pagrindinis veikėjas – „Stanley“ – autonominė transporto priemonė, kuri ir buvo, vėliau minimu, iššūkio nugalėtoja. Paties iššūkio, kurį sukūrė gynybos technologijų ir tyrimų projektų agentūra tikslas buvo, kad autonominė transporto priemonė galėtų važiuoti iš anksto suplanuotu 142 mylių maršrutu dykumoje be jokios išorinės pagalbos [25]. Automobilis vardu „Stanley“ buvo 2004 metais pagamintas Volkswagen Touareg visurėgis su dyzeliniu varikliu. Tiesa, jame buvo įdiegta daugybė kamerų ir jutiklių, šeši borto kompiuteriai, kurie buvo skirti gautai apie aplinką informacijais analizuoti ir priimti atitinkamus valdymo sprendimus. Jį sukūrė Stanfordo

universiteto, Volkswagen, Intel ir kitų mokslininkų komandos. Šis automobilis numatytą distanciją įveikė per mažiau nei 7 valandas. Sistemos struktūra buvo pakankamai galinga, kad galėtų nuskaityti aplinką 100 Hz dažniu ir priimti valdymo sprendimus 20 Hz dažniu, o tai reiškia, kad ji galėjo pati koreguoti savo aplinkos vertinimus ir priimti sprendimus, atitinkamai 100 ir 20 kartų per sekundę dažniu.

Automobilis įdomiai nuvažiavo apie 5 % viso kelionės laiko su 60 cm paklaida nuo kelio, o tai reiškia, kad tikriausiai įprastoje gatvėje tai galėjo būti incidentai su kitais automobiliais. Automobilis taip pat turėjo ne vieną atvejį, kai jis bandė išvengti kliūčių kelio viduryje, kur visiškai nieko nebuvo, padarė tai pakankamai saugiai ir į finišą sugebėjo atvažiuoti 19,1 mylių per valandą vidutiniu greičiu (apie 30 km/val). Tikslinga atsigręžti į didžiules įvairių suinteresuotųjų šalių pastangas, kurių prireikė pasiekti tokį rezultatą: automobilis dykumoje važiavo iš anksto nustatytu keliu vidutiniu 30 km/h greičiu be kitų transporto priemonių ar kliūčių kelyje. Teigti, kad šis scenarijus yra tinkamas, palyginti su kasdieniais keliais, yra klaidinga, nes nebuvo kitų automobilių, nebuvo kliūčių, o kelias buvo iš anksto nustatytas ir greitis buvo daug mažesnis nei įprastomis sąlygomis [25].



4 pav. „Stanley“ – automobilis, kuris įveikė autonominio vairavimo iššūkį [26]

1.2. Autonominiai automobiliai keliuose ir sankryžose

Per pastaruosius dešimtmečius eismo spūstys tapo didele didžiųjų miestų problema įvairiose valstybėse. Pavyzdžiui, Miunchene, remiantis TomTom eismo indeksu [27], rytinio piko metu vairuotojai turi taikstyti su 51 % pailgėjusiu kelionės laiku. Ateityje eismo problemos miestuose gali dar labiau padidėti, nes vis didesnė pasaulio gyventojų dalis gyvena miestuose – 2014 m. miestuose gyveno 54 % pasaulio gyventojų, o 2050 m. planuojama, kad gyvens – 66 % pasaulio gyventojų. gyvena miestuose [28]. Tai jau savaime didina transporto priemonių srautą ir novatoriškų idėjų potraukį. Daugelis žmonių tikisi padidinti gatvių ir sankryžų pralaidumą dėl autonominių transporto priemonių atsiradimo. Tikimasi, kad AT bus ypač naudingas šviesoforinėse sankryžose, kur sankryžų politikos pertvarkymas, t. y. vadinamosios autonominės sankryžos valdymo strategijos, duoda daug

žadančių rezultatų [29]. Tačiau naujausiuose tyrimuose pristatytos autonominio eismo strategijos veikia tik visiškai autonominėse sankryžose be jokios žmogaus sąveikos. Greičiausiai taip niekada nebus daugumoje miesto sankryžų, nes dviratininkai ir pėstieji taip pat yra svarbi miesto eismo dalyvių dalis.

Be to, AT nebus įdiegtas iš karto, tačiau transporto priemonių parkas miestuose laikui bėgant nuolat keisis. Dėl šios priežasties reikia ne tik atsižvelgti kaip eisme dalyvaus tik autonominis transportas, bet ir kokią įtaką transporto srautui padarys autonominės transporto priemonės važiuodamos kartu su įprastiniais, žmogaus valdomomis automobiliais.

Eismo spūstys sankryžose, o ypač reguliuojamose sankryžose, nuolat didėja daugumoje pagrindinių didmiesčių zonų, todėl išauga ir žmogaus vairavimo klaidų rizika. Šiuolaikinės šios problemos sprendimo idėjos fokusuojasi į efektyvius šviesoforų signalų valdymo būdus. Šviesoforinės sankryžos skirtos eismo srautams kontroliuoti ir saugumui keliuose didinti. Tačiau jos gerokai prisideda prie eismo stabdymo miesto kelių tinkle. Viena iš priežasčių, kodėl reguliuojamose sankryžose didėja eismo spūstys yra ilgesnis reakcijos laikas, per kurį vairuotojas pradeda judėti, kai šviesoforas iš raudono signalo pereina į žalios spalvos signalą. Pirmoji transporto priemonė, vienos eismo juostos eilėje, sankryžoje turi ilgesnį reakcijos laiką nei už jos besirikiuojančios kitos transporto priemonės. Toliau esančios transporto priemonės turi panašius laikus, kalbant apie reakciją, tačiau visų automobilių išibėgėjimo kelias yra trumpesnis. Už 4 automobilio išibėgėjimo kelias visų automobilių turėtų būti patovus [30]. Eismo signalai kaip tik padidina transporto priemonių kelionės laikus ir kelionės laiko vėlavimą sankryžose.

Naudojant naujas technologijas, tokias kaip autonominės transporto priemonės ir ryšys tarp transporto priemonių ir infrastruktūros, atsiranda galimybė sumažinti transporto spūsčių sankryžose problemą dėl sumažėjusios žmogaus klaidos rizikos, ilgesnio ir nenuspėjamo žmogaus reakcijos laiko ir išsiblašymo.

Autonominio transporto dėka, galima sumažinti ir krovinių bei keleivinių pervežimo laiką, kas padėtų sumažinti tokių paslaugų sąnaudas, nes kelių tinklas būtų išnaudojamas efektyviau. Jeigu automobilių sunaudojamų degalų kiekis bus mažesnis, tai blogų medžiagų kiekis, patenkantis į aplinką, taip pat bus mažesnis, kas padeda mažinti šiltamio efekto pasekmes. Autonominių automobilių naudojimas, padeda ir neįgaliems žmonėms naudotis asmeninėmis transporto priemonėmis [31]. Dėl sklandesnio pralaidumo kiekviena sankryža galėtų būti valdoma programiškai, kur būtų reguliuojamas atskirai kiekvienos transporto priemonės judėjimas, priešingai nei tradiciniai šviesoforai, draudžiantys arba leidžiantys judėti visam srautui.

Taigi tampa reikalingas transporto infrastruktūros projektavimas be šviesoforų, kur viską atlieka kompiuterio programos. Pačių sankryžų reguliavimo įtaisų atsisakyti sankryžose, būtų įmanoma tik tokiu atveju, kai autonominis transportas galėtų komunikuoti tarpusavyje, o taip pat ir su infrastruktūra [32].

Automobilių gamintojai dažnai ieško galimybių transporto priemonėse sumontuoti įrangą, kuri galėtų komunikuoti su aplinka. Pavyzdžiui artėjant prie sankryžos, transporto priemonei būtų parinktas važiavimo greitis, kurio laikydamosi, ji galėtų įvažiuoti į sankryžą pačiu laiku, kai tik atsirastų tam tinkamas tarpas. Pagrindinis tokios technologijos ypatumas yra tas, kad kompleksinėje analizėje yra analizuojama situacija kelyje ir transporto priemonės su „nekonfliktinėmis“ trajektorijomis būtų

sujungiamos į grupes ir kartu grupėse kirstų sankryžą. Todėl, remiantis atliktais tyrimais, sankryžų pralaidumo efektyvumas ženkliai padidėtų [33].

Jeigu vienas autonominis automobilis galėtų susijungti ir pasikeisti informacija su kitu panašiu automobiliu, tai kelyje galima būtų išvengti bet kokios eismo įvykio tarp tų automobilių. Transporto priemonės atpažįsta vienas kitą ir savo ruožtu iš anksto „susitaria“ dėl atitinkamų manevrų bei gali akimirksniu reaguoti į nenumatytas kliūtis tame pačiame eismo sraute. Be to, pėstieji taip pat galėtų visą laiką kirsti kelią, nekreipdami dėmesio į pro šalį važiuojančias transporto priemones, nesvarbu, kuria kryptimi ir koku greičiu jos judėtų [33].

Naudojant vien tik autonominius automobilius galima atsisakyti sankryžų reguliavimo šviesoforais ir greičio apribojimų. Apskaičiuota, kad autonominis transportas galėtų sumažinti degalų sąnaudas iki 19-22 procentų, lyginant su žmogaus vairuojamais automobiliais [33]. Komunikuodamos tarpusavyje, tokios transporto priemonės gali nelaukti kitų vairuotojų vėluojančių sprendimų ir padarytų eismo srautą nenutrūkstančiu. Toliau kuriami ir išbandomi šviesoforų valdymo algoritmai, kurie seka transporto priemonių buvimo vietą ir 15 sekundžių intervalais numato transporto priemonės judėjimo (arba sustojimo) kryptį [33].

Kaip teigia grupė mokslininkų, realiu laiku valdomos sankryžos gali padėti sumažinti kelionės laiką transporto priemonėms beveik 34 procentais, o vidutinį greitį padidinti beveik 36 procentais. Tai ypatingai pagerintų sankryžų pralaidumą. Be esminio eismo srautų efektyvumo pagerėjimo, mokslininkai taip pat apskaičiavo, kad toks eismo reguliavimas gali sumažinti šiltnamio efektą sukeliančių dujų kiekį 13 procentų [34].

Kuriant algoritmus, kurie leistų panaudoti tokias technologijas, daugiausia naudojamos valdymo teorijos ir vairavimo simulatoriai. Elektros ir elektronikos inžinierių instituto JAV atlikti tyrimai parodė, jog tokios autonominio vairavimo technologijos gali užtikrinti efektyvų teigiamą ir neigiamą pagreitį tose vietose, kuriose įprastai TP vairuotojai sumažina greitį, o taip pat sumažinant susidūrimo iš galo tikimybę. Kaip teigia autoriaus Tiaprasert sukurti modeliai, tarpusavyje komunikuojančios autonominės transporto priemonės galės įveikti atstumus 26–30 procentų greičiau nei įprastiniai automobiliai [35].

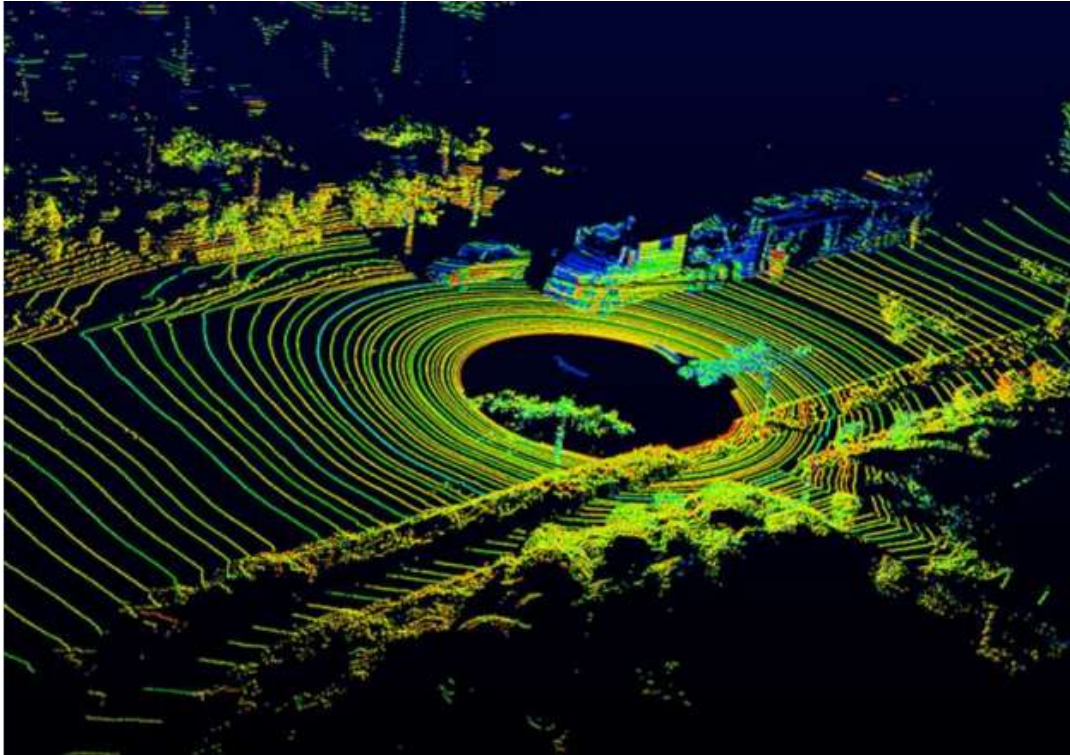
Autonominėms transporto priemonėms duomenų perdavimas iš transporto priemonės į transporto priemonę ir komunikacija su infrastruktūra yra pagrindiniai veiksniai įgalinantys tokios sistemos veikimą. Eismo veiksmų, tokių kaip sankryžų pralaidumas ir avarių dažnis, poveikio Ostino miesto (JAV) eismo koridoriui analizė atskleidė, kad autonominės transporto priemonės žymiai pagerina šiuos rodiklius, mokant mažą kainą [36].

2. Autonominių automobilių jutikliai ir jų ryšys su tyrimu

Autonominiuose automobiliuose įvairaus tipo jutiklių rinkiniai yra itin svarbūs jų veikimui ir mokslininkų bei gamintojų lūkesčiams išpildyti. Naudojant skirtingų tipų aktyvius ir pasyvius jutiklius, galima sukurti sistemą, galinčią aptikti įvairius eismo objektus dideliame diapazone. Labai svarbu turėti galimybę objektus fiksuoti dideliame diapazone, autonominėse transporto priemonėse, ypač tose, kurios skirtos važiuoti viešaisiais keliais. LIDAR (šviesos aptikimas ir nuotolio nustatymas), radaro, ultragarso ir vizualinio fiksavimo derinys būtent ir padeda kurti AT su 360 laipsnių aplink vaizdu.

LIDAR vaidina svarbų vaidmenį skaitmeninio žemėlapių sudarymo, nuotolio nustatymo, objektų aptikimo ir objektų sekimo autonomijoje. LIDAR veikia skleidžiant lazerio šviesos impulsus ant paviršiaus ir matuojant atspindėtos šviesos grįžimo laiką. Žinodami šviesos greitį ir jam reikiamą laiką, atspindima šviesa leidžia apskaičiuoti atstumą. Naudojant kelis šviesos pluoštus, kurie visi skleidžia iki kelių tūkstančių impulsų per sekundę, leidžia sukurti taškinį debesį stebimomis kryptimis. Sukant įrenginį galima sukurti supančios aplinkos 3D vizualizaciją. Taip pat galimas 2D LIDAR, kuris gali būti naudojamas objektų aptikimui ir nuotoliui nustatyti, atsižvelgiant į tai, kad objektai yra aptinkamoje plokštumoje. Autonominėse sistemose naudojami LIDAR įrenginiai gali turėti iki kelių šimtų metrų atstumą ir iki 10–12 cm tikslumą [37]. Naudodamas kai kuriuos LIDAR įrenginius, vartotojas gali valdyti kai kurias jo veikimo savybes, pvz., sukimosi greitį ir grąžinimų skaičių. Priklausomai nuo LIDAR įrenginio, gali būti keli skirtingi lazerio grąžinimų skaičiai. Kuo daugiau lazeris išsiunčia ir priima signalų, tuo didesnis taškų debesis sukuriamas ir tuo daugiau LIDAR sistema gali aptikti aplinkos objektų.

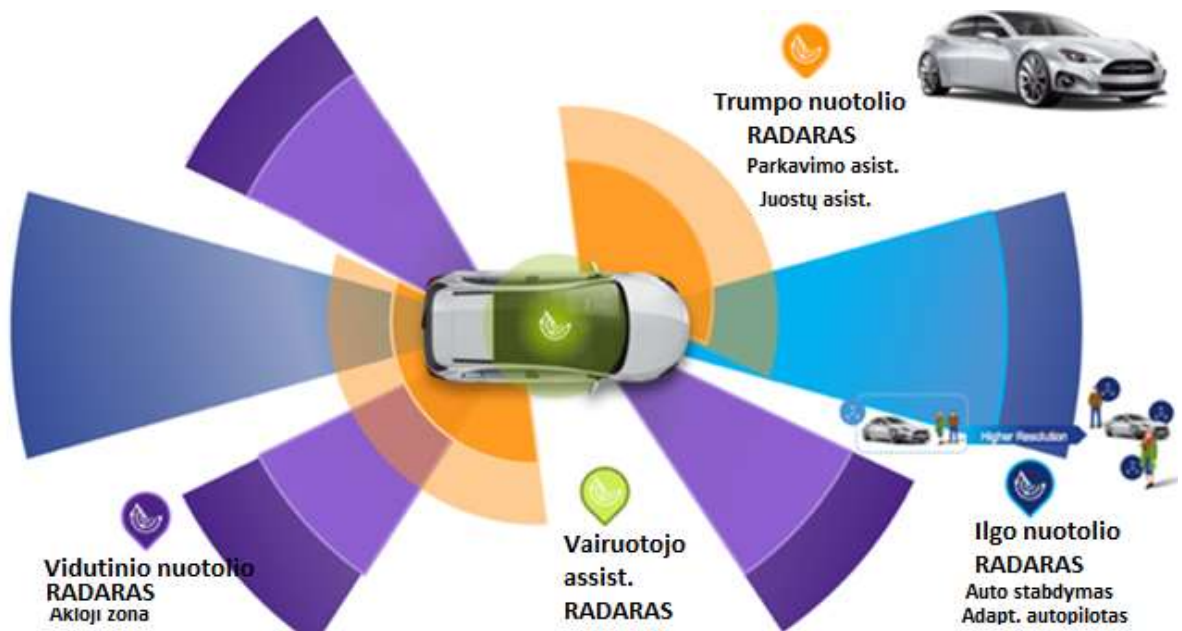
Analizuojant santykinio intensyvumo duomenis, galima bandyti klasifikuoti aptiktą objektą, ar tai būtų gruntas, vanduo, augmenija, pastatas arba automobilis. Tai padeda tokioms sistemoms sužinoti, ar aptiktas objektas yra kliūtis, ar ne [37]. LIDAR trūkumas gali būti jo gebėjimas patikimai veikti esant oro sąlygoms, tokioms kaip lietus, rūkas, sniegas ar itin dulkėtomis sąlygomis. Tai gali būti šviesos bangos ilgio, kurį naudoja dauguma LIDAR įrenginių, ir jo sąveikos su mažomis dalelėmis ore rezultatas. 3D LIDAR įrenginiai yra labai naudingi, kai jie montuojami ant transporto priemonės stogo. Tai leidžia įrenginiui sukurti supančios aplinkos 360° taškų debesį, kaip parodyta 5 paveiksle.



5 pav. LIDAR įrenginio sukuriamas 360 laipsnių taškų debesis [38]

Autonominiame transporte montuojamos **radarų sistemos** yra dar vienas vertingas aplinkos atpažinimo šaltinis, pvz., atstumo, greičio, kampo objekto atžvilgiu matavimas ir objektų sekimas. Radarai veikia siūsdami radijo bangas pasirinkta kryptimi ir nuskaitydami atsispindėjusias bangas. Žinant laiką, per kurį signalas grįžta, galima apskaičiuoti atstumą. Jei objektas juda radaro bloko atžvilgiu, įvyks Doplerio poslinkis. Doplerio poslinkis yra radijo bangų dažnio pokytis. Taigi, jei objektas tolsta, atsispindintis radijo bangų dažnis sumažės, o jei objektas artėja, dažnis padidės. Objekto greitį galima nustatyti žinant dažnio pokytį. Kai juda abu objektai, reikia atsižvelgti į objekto greitį [39]. Turint sumontuotą tokią radarų sistemą, galima aptikti transporto priemonėse esančią akkląją zoną.

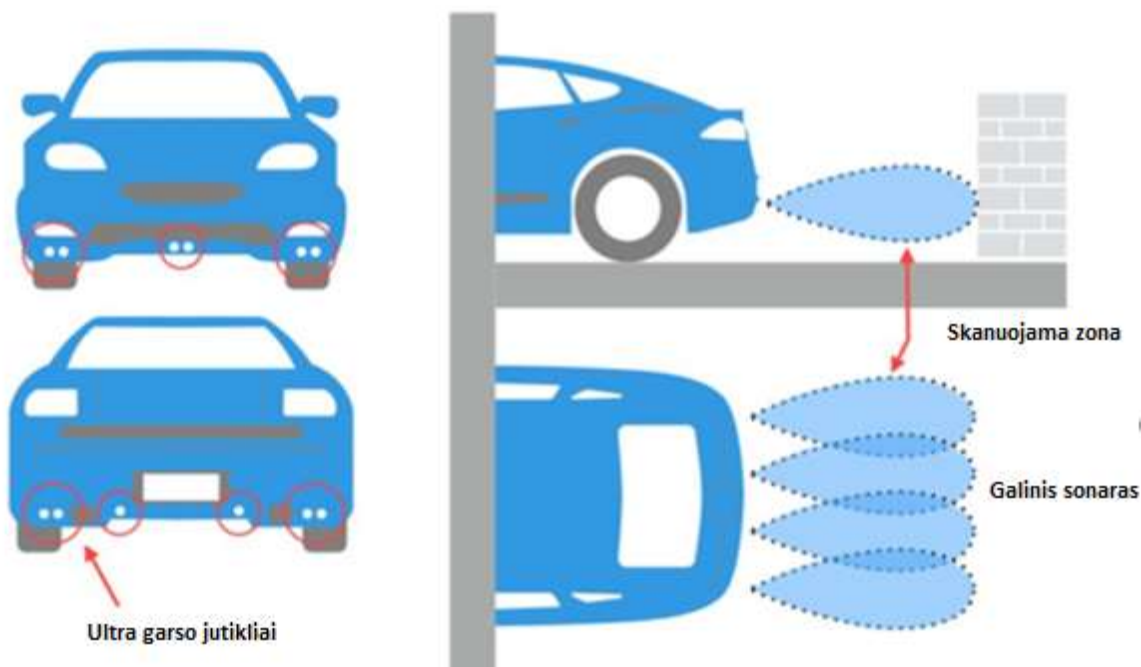
Vidutinio ir trumpo nuotolio radaras gali būti naudojamas įspėjimui apie susidūrimą iš galo, aklosios zonos aptikimui, kryžminio eismo įspėjimui ir kitose vietose. Palyginti su LIDAR, radaras gali būti patikimesnis abejotinomis sąlygomis, tokiomis kaip lietus, rūkas, sniegas ar itin dulkėtomis sąlygomis. 6 paveiksle parodytos tokių radarų montavimo vietos ir aptikimo zonos. Daugeliu atvejų gamintojas gali nuspręsti sumontuoti radarus už plastikinių buferių dangtelių, kad transporto priemonės išlaikytų tam tikrą, įprastinę savo išvaizdą.



6 pav. Radarų montavimo ir jų detekcijų zonos [40]

Norint pagerinti AT gebėjimą aptikti objektus artimiausioje aplinkoje, reikalinga naudoti ir **ultragarsinius jutiklius**. Ultragarso jutikliai veikia skleisdami aukšto dažnio akustines bangas ir priima grįžtamas bangas atgal. Laikas, kurio reikia akustinėms bangoms pasiekti objektą ir grįžti nustato objekto atstumą. Galimi jutikliai, galintys aptikti kliūtis nuo kelių centimetrų iki 15 metrų. Tačiau autonominėse transporto priemonėse jie paprastai naudojami trumpo nuotolio objektų aptikimui, parkavimo pagalbai ir aklosios zonos aptikimui [41]. Ultragarso sujungimas su LIDAR ir radaro duomenimis gali labai sumažinti akliasias transporto priemonę supančias vietas. Ultragarso jutiklius gali slopinti nešvarumų ir dalelių kaupimasis ant jutiklio paviršiaus, todėl gali būti gaunami nepakankamai teigiami rezultatai.

Ultragarso jutikliai paprastai integruojami į priekinį ir galinį transporto priemonės bamperį, kaip parodyta 7 paveiksle. Ultragarso jutiklių žiūrėjimo kampas yra santykinai ribotas, todėl jie geriausiai veikia tiesiogiai matant objektą.

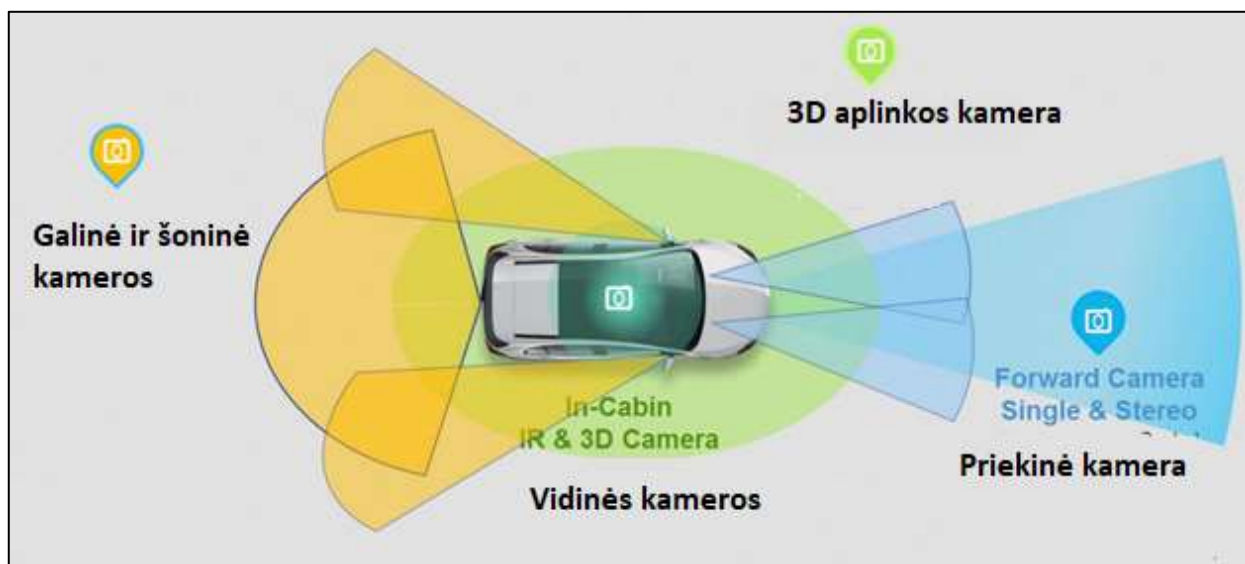


7 pav. Ultragarso jutiklių montavimo vietos automobiliuose [42]

Pridėjus **vaizdo kamerų** sistemas prie AT, jo galimybės gali būti dar labiau padidintos, nei suteikia tik LIDAR, radarų sistemos ir ultragarso jutikliai. Kameros paprastai yra daug pigesnės nei LIDAR ir radaro įrenginiai. Sujungdamos duomenis, kameros gali palaikyti kitas tris objektų aptikimo, sekimo, aklosios zonos aptikimo funkcijas. Su galimybe fiksuoti spalvų ir šviesos kontrastus, kameros suteikia galimybę autonomiams automobiliams aptikti eismo juostą, užfiksuoti tekstą ir informaciją ant ženklų bei aptikti kitus objektus aplinkoje [43]. Šie gebėjimai išplečia aptikimo ir navigacijos galimybes už LIDAR, radaro ir ultragarso jutiklių ribų.

Įprasti autonomiuose automobiliuose naudojamų kamerų tipai yra spalvoti, vienspalviai, ir grupės kamerų sistemos. Kamerų grupės sistemomis siekiama imituoti žmogaus regėjimą naudojant kelias kameras. Tai suteikia sistemai galimybę kurti 3D vaizdus, kuriuos galima apdoroti siekiant nustatyti objektų gylį ir atstumą.

Kadangi vaizdo kameros priklauso nuo aplinkos šviesos, fotografuojamų vaizdų kokybei įtaką daro gali paros laikas ir oro sąlygos. Įprastos kameros tvirtinimo vietos yra pavyzdžiui, priekinės ir galinės kameros, montuojamos atitinkamai už priekinio ir galinio langų, kad apsaugotų juos nuo išorės ar aplinkos mechaninio poveikio. Į priekį nukreiptos kameros yra taip pat būtinos eismo juostos aptikimui. Kameros, sumontuotos TP šonuose gali padėti aptikti ir sekti tose srityse esančius objektus. O kamerų įmontavimas į šoninius veidrodėlius gali padėti aptikti akląją zoną. 8 paveiksle parodytos kai kurios tipinės kamerų vietos ir jų teikiamos galimybės.



8 pav. Kamelių naudojimas autonominiuose automobiliuose [42]

Taigi anksčiau aptarti aplinką skenuojantys jutikliai yra vienas pagrindinių elementų autonominiame transporte. Be informacijos iš aplinkos, autonominiai automobiliai yra faktiškai negalimi. Toks automobilis tiesiog privalo turėti daugybę elektroninių jutiklių, sumontuotų taip, kad galėtų netrukdomai gauti informaciją apie automobilį supančią aplinką. Kadangi dalis pagrindinių jutiklių remiasi lazerio spinduliais, vaizdo kameros lešiais, ultragarsą skleidžiančiais ir kitais paviršiais, tai didelę reikšmę jų tikslumui daro tokių paviršių būklė. LIDAR pagrindinis trūkumas yra jo gebėjimas patikimai veikti esant oro sąlygoms, tokioms kaip lietus, rūkas, sniegas ar kietosios dalelės ore. Ultragarso jutiklių klaidų šaltinis yra oras, kuriuo sklinda akustinės bangos. Oro savybės, tokios kaip temperatūra ir drėgmė, gali turėti įtakos garso greičiui, o tai savo ruožtu turi įtakos jutiklio tikslumui. Verta pažymėti, kad kai kuriuose jutikliuose yra įmontuotas temperatūros kompensacijos mechanizmas, kuri padeda sumažinti temperatūros sukiamą klaidų šaltinį. Vaizdo kameros didžiausią įtaką daro įvairūs šviesos šaltiniai, spinduliuojantys šviesos srautą į kameros lešį. Taigi šioje vietoje net gi paros laikas turi įtakos tokių kamelių tiksliam veikimui.

Privaloma pažymėti, kad šiame tyrime į aplinkos išorės poveikius autonominiam automobiliui, tokius kaip oro sąlygos, dulkės, paros laikas, lietus ar sniegas nėra atsižvelgiama, nes tai padaryti su programine įranga PTV Vissim būtų komplikuota. Programinė įranga siūlo parametrų sprendimus, pasirenkant oro sąlygų variantus eismo srautą sudarantiems įprastiniams automobiliams. Tačiau kaip įvertinti autonominių automobilių daviklių paviršių būklę, užsiteršimą ar krintantį papildomą šviesos srautą į juos, kol kas yra neišpildoma užduotis.

Taigi šiame darbe yra priimama prielaida, kad visi autonominio transporto informacijos apie aplinkos objektus rinkimo jutiklių paviršiai yra švarūs ir pilnai funkcionuojantys.

3. Mikroskopinis transporto srautų tyrimas

Norint vizualizuoti AT poveikį dabartinei transporto sistemai, prieš įgyvendinant sprendimus realiame pasaulyje, mikroskopinis eismo modeliavimas yra plačiai naudojamas tyrimams atlikti. Kaip teigia Nilsson, modeliavimas yra plačiai įdiegta transporto sistemos tyrimo priemonė, kuri tiria kelis klausimus. Jis analizavo, kad palyginti su kitomis metodikomis, modeliavimo technika yra efektyvesnis ir greitesnis eismo duomenų gavimo būdas. Pastarieji keli dešimtmečiai buvo auksinis mikroskopinio eismo modeliavimo laikas [43].

Mikroskopiniai eismo modeliai apibūdina eismo srauto detales ir jame vykstančią jų sąveiką. Toks modeliavimas imituoja kiekvieną srauto transporto priemonės ir jos vairuotojo dalį kaip vieną vienetą. Tokių eismo modelių sukūrimas parodo atskirų automobilių geografinę padėtį ir judėjimo greitį.

Pirmieji mikroskopiniai eismo modeliai ir jų tyrimai buvo sukurti šeštajame dešimtmetyje. Tokiam dinaminiam modeliui sukurti naudojama tam tikra prielaidų strategija. Visų automobilių judėjimo lygtis yra apibrėžiama logika, kad kiekvienas transporto priemonės vairuotojas turi tam tikrą reakciją į kitų vairuotojų valdomas transporto priemones. Tokia lygtis sprendžiama darant prielaidą, kad transporto priemonių vairuotojai, siekdami išvengti eismo įvykių, visada laikosi iš anksto nustatytų kelių eismo taisyklių [44].

Taisyklėms pagrįsti yra du pagrindiniai teorijų tipai. Pirmasis yra pagrįstas idėja, kad kiekviena transporto priemonė turi išlaikyti teisingą saugų atstumą nuo prieš tai važiuojančios transporto priemonės. Šis saugus atstumas priklauso nuo dviejų vienas po kito einančių transporto priemonių greičių skirtumo. Šios teorijos vadinamos automobilio „sekimo“ teorijomis.

Antrasis tipas pagrįstas idėja, kad kiekviena transporto priemonė turi savo greitį. Savas greitis yra lygus norimam vairuotojo greičiui. Jei eismas mažas, šis greitis laikomas didžiausiu leistinu greičiu. Šis greitis mažėja didėjant eismo intensyvumui. Taigi transporto priemonės greitis priklauso nuo santykinės transporto priemonių padėties eisme [44].

Dažniausiai realūs eismo srautų tyrimai yra labai daug resursų reikalaujantys, sudėtingi, reikalaujantys daug laiko. Mikroskopinis eismo modeliavimas pasirodė esąs ypatingai tinkamas tokioms analizėms atlikti [45]. Visame pasaulyje naudojami mikroskopiniai eismo simulatoriai, skirti numatyti ir atvaizduoti AT charakteristikas dėl naudojimo paprastumo, galimybės įgyvendinti nerealius modelius ir kelių scenarijų valdymo galimybės. Dėl automatizavimo funkcijų, jutiklių įrangos ir vairavimo logikos įvairovės modeliavimo modeliai gali skirtis įvairiais būdais.

Mikroskopiniai eismo modeliavimo metodai priklauso nuo funkcijų, kurias transporto priemonės gali pasiūlyti šiandien arba ateityje, apimties [46]. Programinė įranga VISSIM yra populiarus mikroskopinio tyrimo įrankis iš PTV programų grupės, kuris gali būti naudojamas kaip itin platus simuliacijų atlikimo įrankis, sprendžiant įvairias transportavimo problemas. Šiuo metu visame pasaulyje tūkstančiai inžinierių ir tyrinėtojų naudoja PTV VISSIM, kad imituotų sudėtingas eismo problemas visame pasaulyje.

Bet kuriame eismo simulatoriuje vairavimo elgsenos parametrai vaidina lemiamą vaidmenį, atspindintį tikrovę modeliavimo scenarijuose. Didžiausias AT pranašumas prieš įprastines transporto priemones yra tas, kad toks transportas gali komunikuoti tarpusavyje ir keistis informacija bei gauti informaciją iš aplinkos bei infrastruktūros. Todėl sprendimų priėmimas tokiu atveju yra greitesnis,

lyginant su įprastinėmis transporto priemonėmis, kai reakcijos laikas priklauso nuo žmogaus. Šiuo atveju saugus atstumas tarp tokių transporto priemonių galėtų būti mažesnis. Mažesnis atstumas tarp dviejų automobilių, gali ženkliai padidinti kelių pralaidumą. Kiti pranašumai, tokie kaip sąveika su infrastruktūra, leidžia anksti įspėti apie avarijas, spūstis ar stichines nelaimes ir yra labai svarbus veiksnys efektyviai išnaudojant kelionės laiką. Šis elgesys turi atsispindėti simuliacijos modelyje, kad būtų galima suvokti, koks bus poveikis realiame pasaulyje [24].

Šis darbas siekia ištirti autonominių transporto priemonių įtaką, t. y. į žmogų panašių autonominių transporto priemonių, eismo srautui sankryžose. Todėl šiame darbe pagrindinė mintis yra ta, kad AT ateityje veiks kartu su žmogaus vairuojamomis transporto priemonėmis. Atsižvelgiant į skirtingus vairavimo modelius, t. y. agresyvų, normalų ir saugų, vairavimo elgsenos parametrai turi būti nustatyti autonominėms transporto priemonėms, atspindinčios tris skirtingus žmogaus vairavimo stilius. Transporto priemonės pasirinks iš leistino parametrų diapazono, kuriuo vadovausis dirbtinis programinis intelektas.

Remiantis ankstesniais mokslininkų tyrimais yra tikimasi, kad AT padidins eismo efektyvumą ir sumažins išmetamųjų teršalų kiekį bei energijos suvartojimą [24]. Kelionės laikas, vėlavimo laikas, transporto priemonių eilių ilgiai ir kiti tyrimai, naudojami tokiam eismo efektyvumo tyrimui atlikti [47], gali būti naudojami ir šio tyrimo eismo efektyvumo tyrimams.

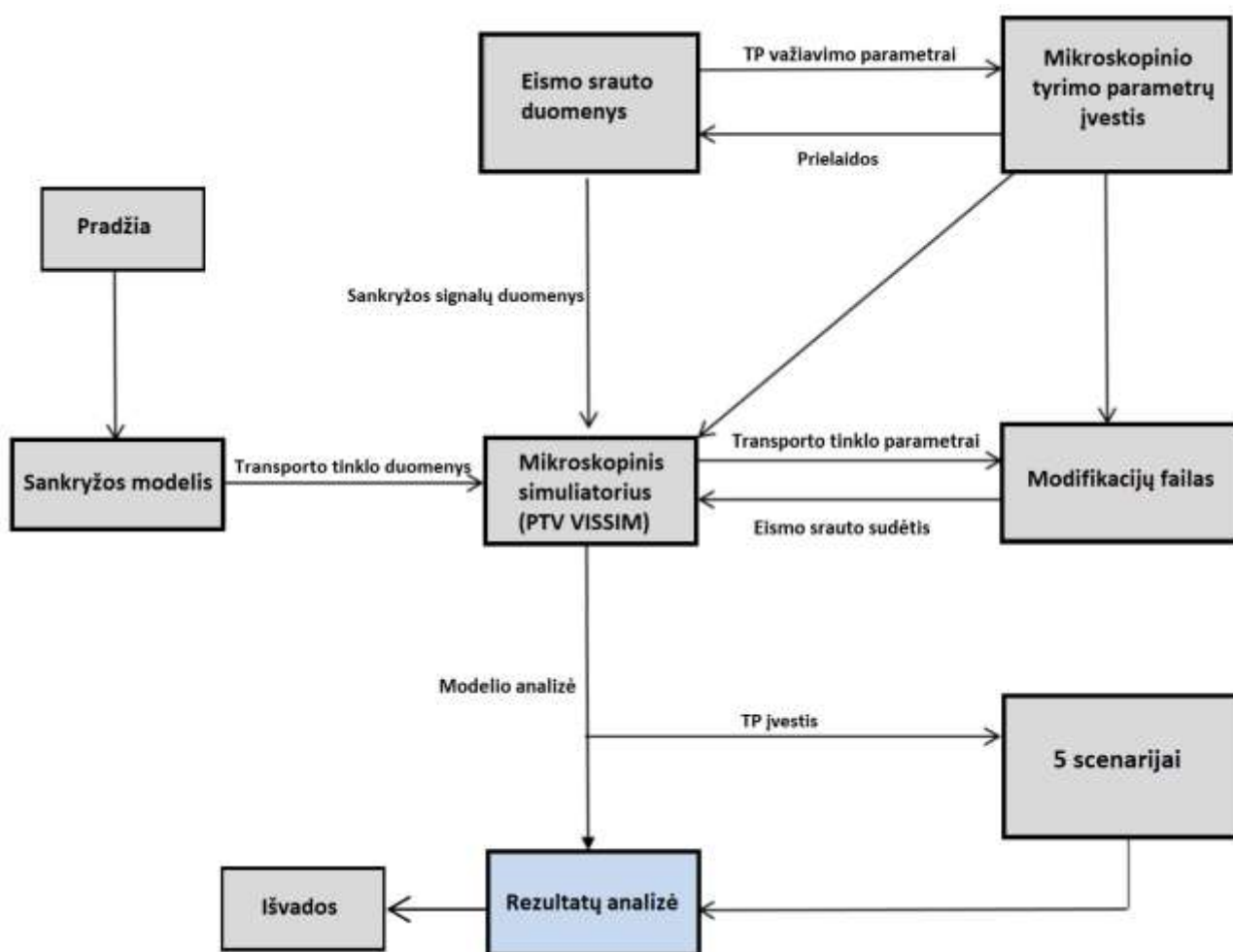
Taigi šio tyrimo rezultatai parodys, kaip į žmogaus vairavimo elgseną panašią logiką turintis AT įtakoja eismo srautą sankryžoje. Be to, naudojant jautrumo analizės platformą, bus vizualizuota AT vairavimo elgsenos parametrų sąveika eismo srautuose.

4. Tyrimo metodika

Šiame tyrime nagrinėjamas poveikis sankryžos pralaidumui ir transporto priemonių srautui. Sankryžų pralaidumo efektyvumo vertinimas atliktas naudojant naujausią PTV Vissim 2022 mikroskopinio modeliavimo programinę įrangą.

Prieš pradėdant AT modeliavimą, buvo atliktas dabartinio eismo srauto skaičiavimas, tradicinėms transporto priemonėms. Šiame skyriuje aprašomi mikroskopinio modeliavimo modelio kūrimas, signalų projektavimo kūrimas, palyginimo scenarijai, jautrumo analizės ir vertinimo metodai atlikti šiame tyrime.

Darbe pirmiausia yra reikalingi mikroskopinio modeliavimo įvesties duomenys, kurie apima sankryžų geometriją ir išdėstymą, eismo posūkio judesių skaičių, šviesoforų laikų duomenis ir vairavimo elgsenos parametrų duomenis autonominėms transporto priemonėms.

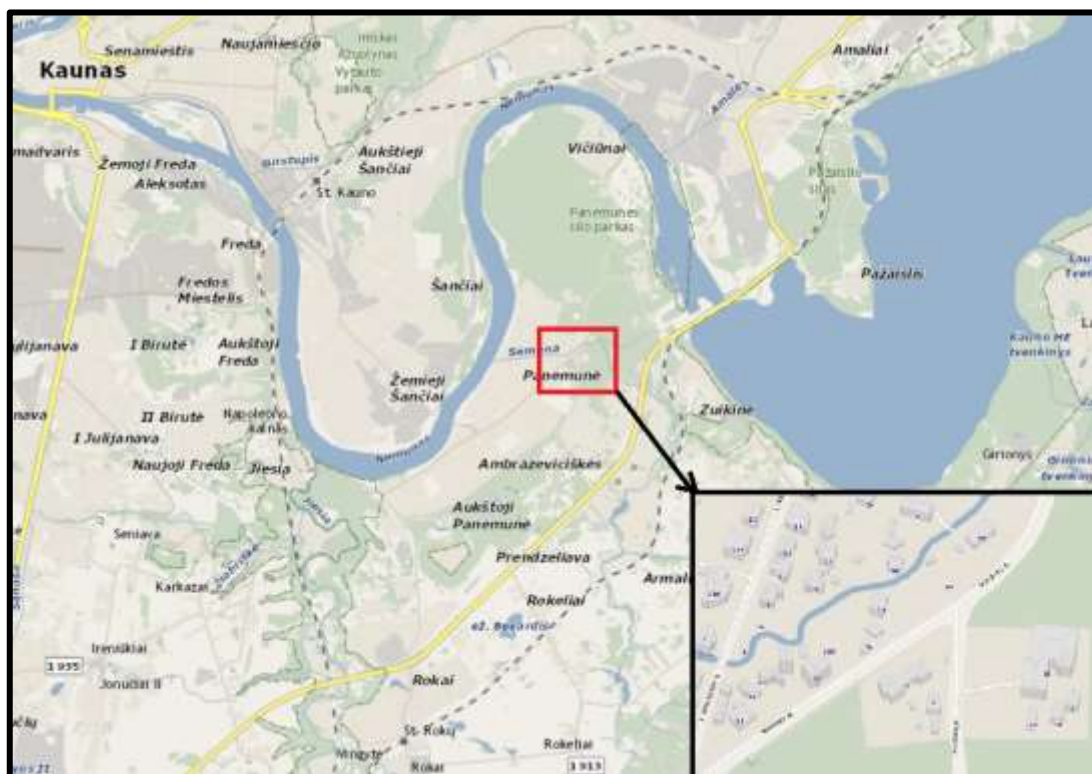


8 pav. Tyrimo eigos schema

Tyrimo eigos schema pavaizduota 8 paveiksle. Pirmiausia yra nustatoma sankryžos geometrija, sudaromas skaitmeninis modelis PTV Vissim programinėje įrangoje. Natūrinio būdu surinkti duomenys apie transporto srautus bei sankryžos šviesoforų valdymo signalus yra įvedami atliekant įrangos kalibravimą. Modelyje esančių transporto priemonių vairavimo elgsenos logikos tipai yra kuriami naudojant programos parametrus. Galiausiai yra atliekami patys simuliacijų tyrimai ir pateikiami rezultatai.

4.1. Sankryžų duomenys

Šiam tyrimui pasirinktos dvi sankryžos. Pirmoji yra šviesoforais nereguluojama trišalė sankryža. Ji yra Kauno mieste. Tai Panemunės mikrorajono dalies Vaidoto g. ir Kariūnų pl. sankryža. 9 paveiksle parodyta aptariama sankryža naudojant „Google“ žemėlapius. Taip pat buvo naudojama informacija iš „Maps.lt“ bei „Bing.com“ žemėlapių sistemų, renkant duomenis apie gatvių geometriją, išdėstymą, juostų skaičių.



9 pav. Kariūnų pl. ir Vaidoto gatvių sankryža

Sankryžos visomis kryptimis yra po vieną pagrindinę eismo juostą. Greičio apribojimas šioje vietoje atitinka standartinę greitį mieste 50 km/h. Ši sankryža ypatingai kiekvieną darbo dienos rytą būna ganėtinai apkrauta, nes čia susitinka ne tik vis didėjantis automobilių srautas atvykstantis nuo Vaišvydavos mikrorajono pusės, bet ir centro link, Kariūnų plentu, judančios transporto priemonės. Todėl rytais susidaro nemažos eismo spūstys, ypatingai iš Kariūnų plentos krypties.

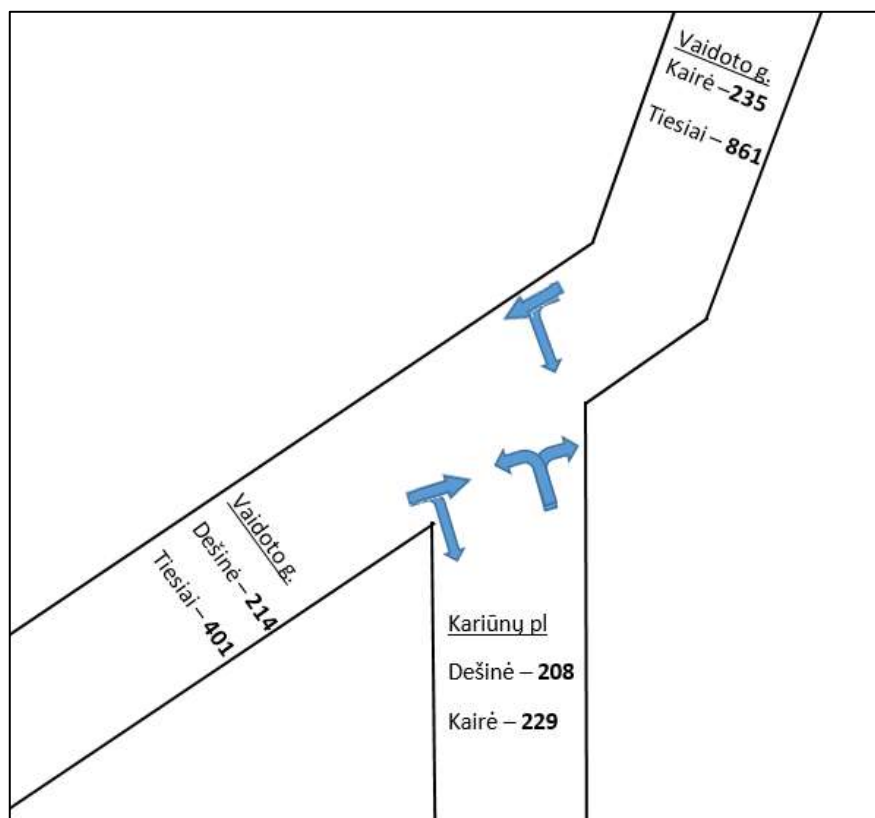


10 pav. Kariūnų pl. ir Vaidoto g. sankryžos geometrija

Eismo intensyvumui nustatyti, buvo pasirinktas rytinio piko laikas (07.30 – 08.30 val.) savaitės viduryje – trečiadienį 2022 m. kovo 23 d. Buvo suskaičiuoti per sankryžą važiuojantys automobiliai, neišskiriant viešojo transporto todėl, kad šiame sankryžos ruože nėra tokių viešojo transporto stotelių, kurios galėtų daryti įtaką eismo srautui, t. y. sustoti važiuojamomoje dalyje. Pėstieji tyrimo metu neturi įtakos, kadangi pėsčiųjų perėjos spūsčių metu būna atviros, o pačių pėsčiųjų šioje eismo dalyje pasitaiko retai.

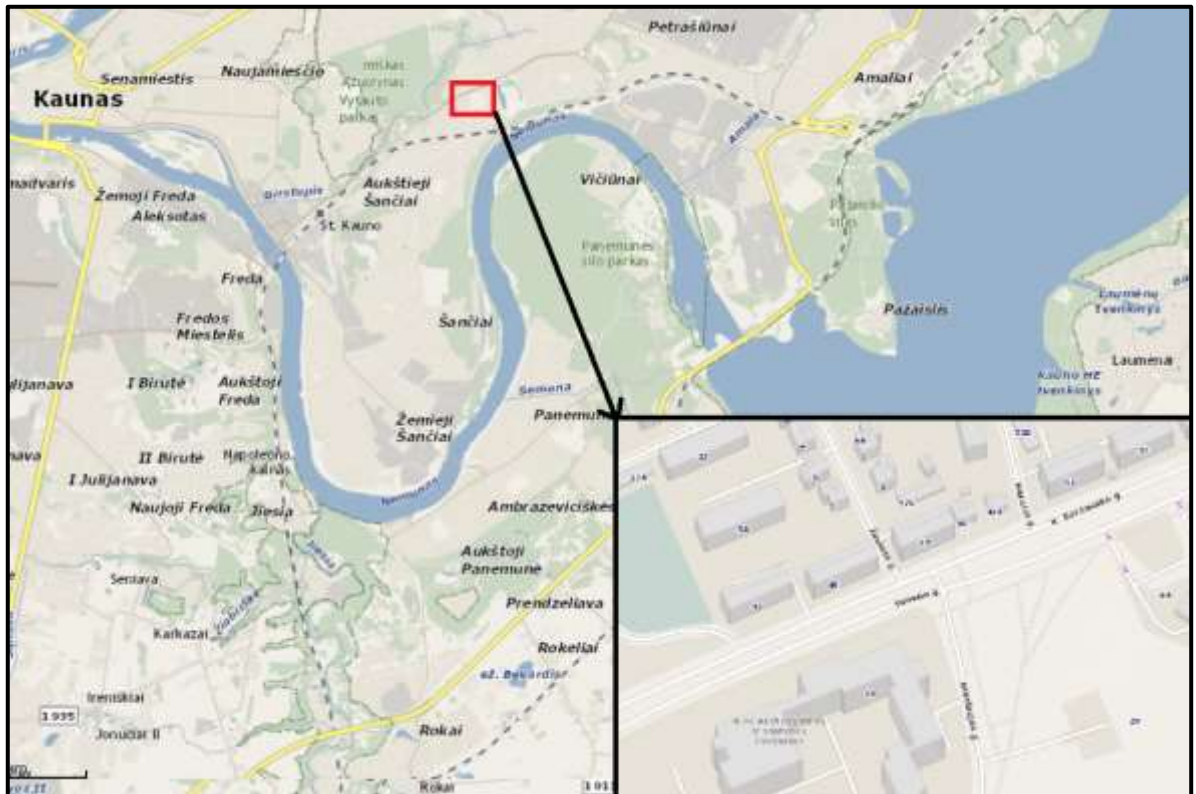
1 lentelė. Automobilių skaičius važiuojantis per Kariūnų pl. sankryžą

Eismo intensyvumas rytinio piko metu (07.30-08.30 val.)				
Kryptis	Viso automobilių	Automobiliai į kairę	Automobiliai į dešinę	Automobiliai tiesiai
Vaidoto g. link Vaišvydavos	615		214	401
Vaidoto g. link centro	1096	235		861
Kariūnų pl.	437	229	208	



11 pav. Transporto srauto duomenys Vaidoto g. ir Kariūnų pl. sankryža

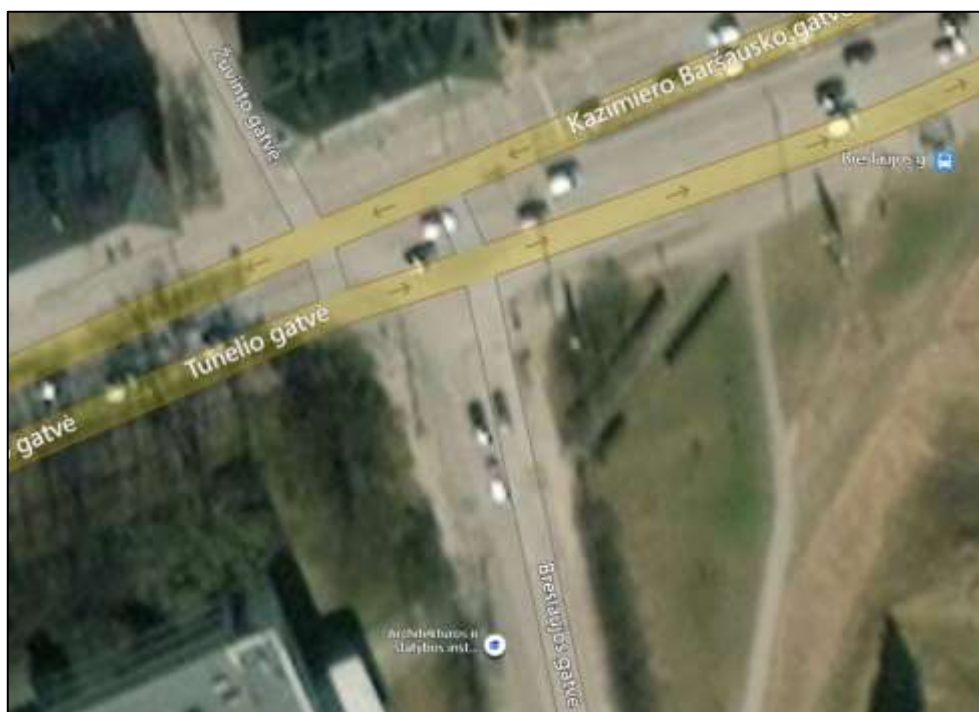
Antroji tyrime naudojama trišalė sankryža yra gerokai didesnė ir reguliuojama šviesoforais. Tai yra ganėtinai apkrauta miesto dalis, Baršausko, Breslaujos ir Tunelio gatvių sankryža. Kaip ir anksčiau minėtu atveju, naudojant „Google“ ir kitas žemėlapių internetines sistemas, 12 paveiksle parodyta aptariama sankryža. Reikia pažymėti, kad sankryžos ribose taip pat yra Žuvinto ir Naručios gatvės, tačiau įsukti į/ iš jų galima tik į/ iš Baršausko gatvės, todėl jų reikšmė eismo srautui yra labai nedidelė ir šiame tyrime į jas atsižvelgiama nebus.



12 pav. Breslaujos gatvės sankryža

Šioje sankryžoje Tunelio gatvė turi po dvi eismos juostas skirtas važiuoti ta pačia kryptimi, Baršausko g. turi atitinkamai po tris eismo juostas. Iš Breslaujos g. išvažiuoti galima dvejomis eismo juostomis, o įvažiuoti į ją viena eismo juosta. Kaip ir anksčiau minėtoje sankryžoje, taip ir šioje vietoje transporto priemonių greičio limitas yra standartinis miesto greitis – 50 km/h.

Breslaugos g. sankryžoje eismas gana intensyvus, nes ji skiria centrinę miesto dalį nuo Dainavos mikrorajono. Rytinio ir vakarinio piko metu eismas čia dar gerokai padidėja, kieno dėka atsiranda nemažos transporto priemonių spūstys.

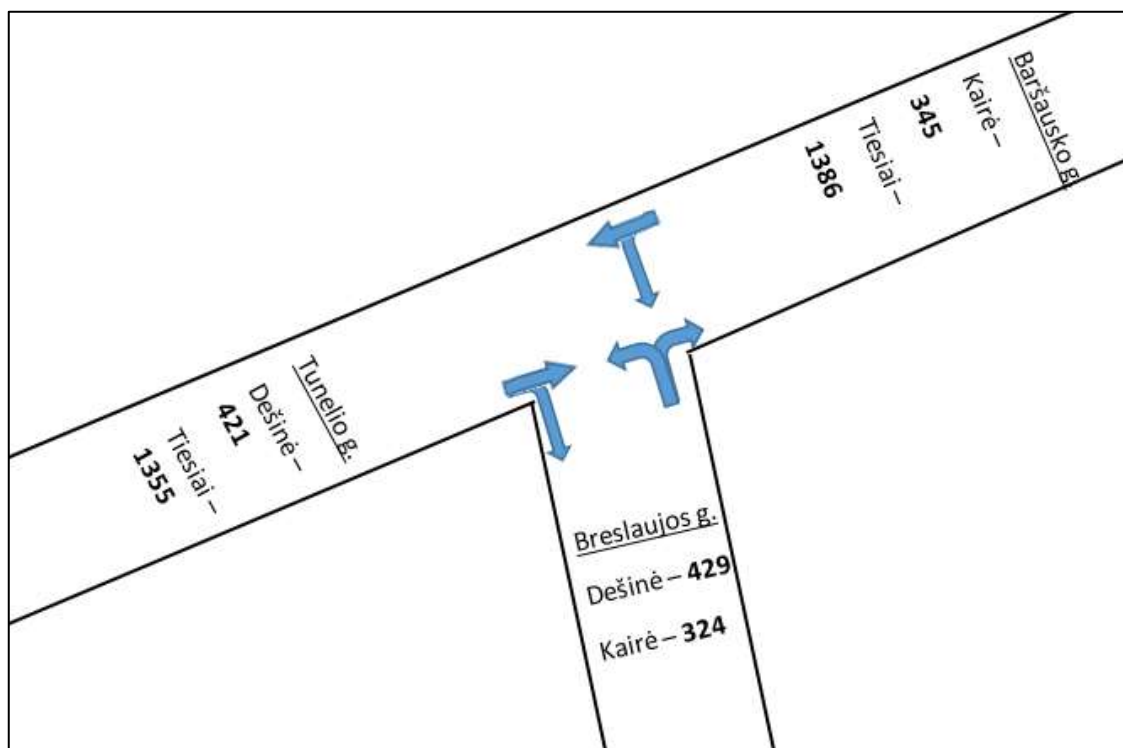


13 pav. Breslaugos sankryžos geometrija

Kaip ir anksčiau minėtu atveju, eismo intensyvumui nustatyti buvo pasirinktas rytinio piko laikas (07.30 – 08.30 val.) tik kitos savaitės viduryje – trečiadienį 2022 m. kovo 29 d. Čia vėl gi buvo skaičiuojami per sankryžą važiuojantys automobiliai, neišskiriant viešojo transporto todėl, kad šiame sankryžos ruože nėra tokių viešojo transporto stotelių, kurios galėtų daryti įtaką eismo srautui, t. y. sustoti važiuojamomoje dalyje. Pėstieji šiuo atveju taip pat nedaro jokios įtakos tyrimui, kadangi žalias šviesoforo signalas pėsčiųjų perėjose dega tada, kai transporto priemonių eismas ta kryptimi nevažiuoja. Sunkvežimiai kaip ir viešasis transportas yra įskaičiuoti į bendrą srautą.

2 lentelė. Automobilių skaičius važiuojantis per Breslaujos sankryžą

Eismo intensyvumas rytinio piko metu (07.30-08.30 val.)				
Kryptis	Viso automobilių	Automobiliai į kairę	Automobiliai į dešinę	Automobiliai tiesiai
Iš Tunelio g.	1776		421	1355
Iš Baršausko g.	1731	345		1386
Iš Breslaujos g.	753	324	429	



14 pav. Transporto srauto duomenys Breslaujos g. sankryža

4.2. Autonominių transporto priemonių vairavimo elgsena

Šiame tyrime yra naudojami autonominių automobilių elgsenos modeliai ir logika paremta Coexist („co-existence“, kas reiškia perėjimas nuo įprastų prie autonominių automobilių). Tai yra Europos Sąjungos finansuojamas projektas „Horizontas 2020“, skirtas sklandžiam perėjimui prie vis dažniau naudojamų autonominių transporto priemonių [48]. Jame yra sukurti tam tikri autonominių transporto priemonių važiavimo logikos modeliai, kurie pradėti įtraukti į PTV Vissim programinę įrangą nuo 11 – osios jos versijos, skirtą tirti eismo srauto ypatumus, naudojant autonominį transportą. Šis Coexist projektas pateikia keturis skirtingus vairavimo tipus autonominiams automobiliams: saugus bėginis autonominis transportas, atsargus AT, normalus AT ir agresyvaus tipo AT. Galų gale, kiekvienas šio AT tipas turi skirtingus vairavimo ypatumus, kaip parodyta 3 lentelėje. PTV Vissim programinės įrangos kūrėjai siūlo tyrimuose naudoti parametrus, kurie yra apibrėžti remiantis empiriniais tyrimais, bendro modeliavimo prielaidomis ir Coexist tyrimo duomenimis [49]. Programoje yra įdiegti autonominio transporto elgsenos ir vairavimo logikos parametrai, kurie yra gali būti naudojami mikroskopiniuose eismo tyrimuose.

Būtent todėl šiam tyrimui, autonominių automobilių elgsenos tipų pagrindinis duomenų šaltinis yra PTV Vissim 2022 programinė įranga ir Coexist projektas. Šiame poskyryje yra analizuojama transporto priemonių vairavimo logika, prielaidos, autonominio transporto vairavimo funkcijos, reakcija į sankryžų reguliavimo įrangą ir kiti ypatumai.

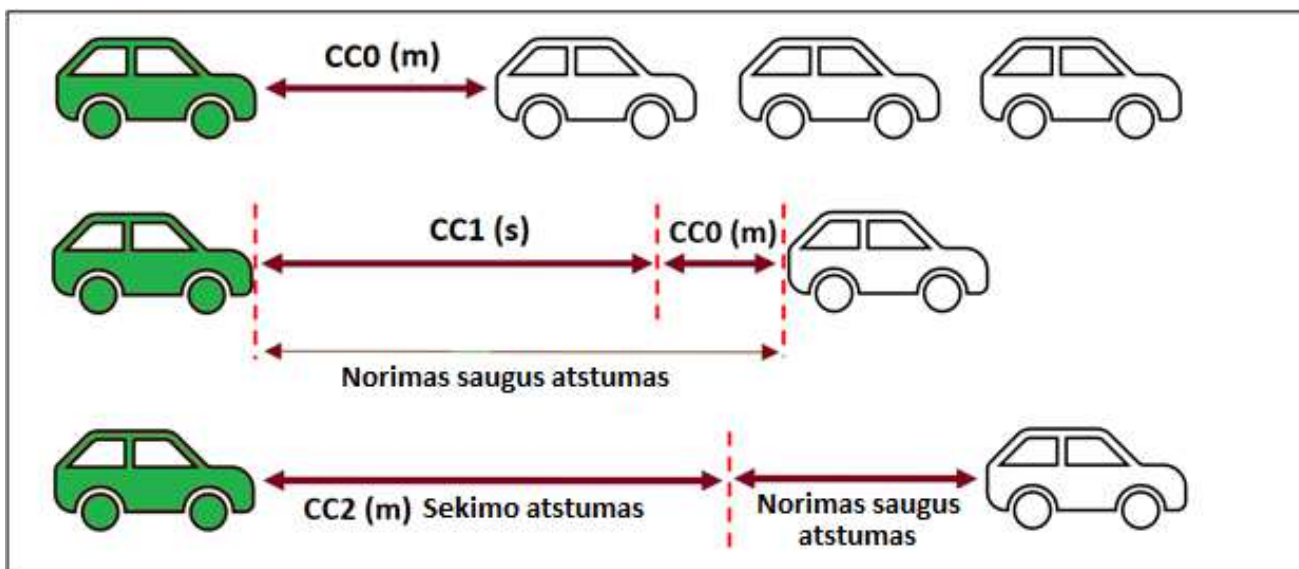
3 lentelė. Autonominių automobilių prielaidos pagal Coexist PTV Vissim

Autonominio transporto tipai pagal Coexist			
AT saugus bėginis	AT atsargus	AT normalus	AT agresyvus
<ul style="list-style-type: none"> ➤ Didelis sustojimo atstumas ➤ Dažniausia uždara aplinka ➤ Dideli tarpai ➤ Apibrėžtas maršrutas ➤ Nėra juostų ➤ Didelė fizinė atskirtis ➤ Visi signalai garantuoja saugumą 	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Didelis sustojimo atstumas ➤ Dideli tarpai ➤ Atsargus manevravimas 	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Tarpai kaip ir vairuotojo žmogaus tik su didesne atsarga 	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Mažesni tarpai, bet vis dar saugūs. ➤ Informacijos gavimas iš infrastruktūros ➤ Komunikacija tarp TP privaloma

Į naujausią PTV Vissim 2022 programinės įrangos versiją yra įtraukti autonominės transporto priemonės važiavimo paskui kitą automobilį modelio parametrai, kurie nurodyti 4 lentelėje, o 15 paveiksle vizualiai pavaizduoti šie atstumo parametrai, naudojami autonominio transporto važiavimo paskui kitą automobilį modelyje. Automobilio elgsenos parametrai pateikti 5 lentelėje.

4 lentelė. Prielaidos (vertės) važiavimui paskui kitą transporto priemonę iš sistemos PTV Vissim

Parametro Nr.	Parametras	Atsargus AT	Normalus AT	Agresyvus AT
CC0	Sustojimo atstumas (m)	1.50	1.50	1.00
CC1	Tarpo laiko pasiskirstymas (s)	1.5	0.9	0.6
CC2	Sekimo atstumas (m)	0	0	0
CC3	Laikas įvedimui „Važiavimui paskui“ (s)	-10	-8.00	-6.00
CC4	Neigiamas greičio skirtumas (m/s)	-0.10	-0.10	-0.10
CC5	Teigiamas greičio skirtumas (m/s)	0.10	0.10	0.10
CC6	Virpesių priklausomybė nuo greičio (1/(m*s))	0	0	0
CC7	Virpesių pagreitis (m/s ²)	0.10	0.10	0.10
CC8	Pagreitis iš vietos (m/s ²)	3.00	3.50	4.00
CC9	Pagreitis esant 80 km/h (m/s ²)	1.20	1.50	2.00



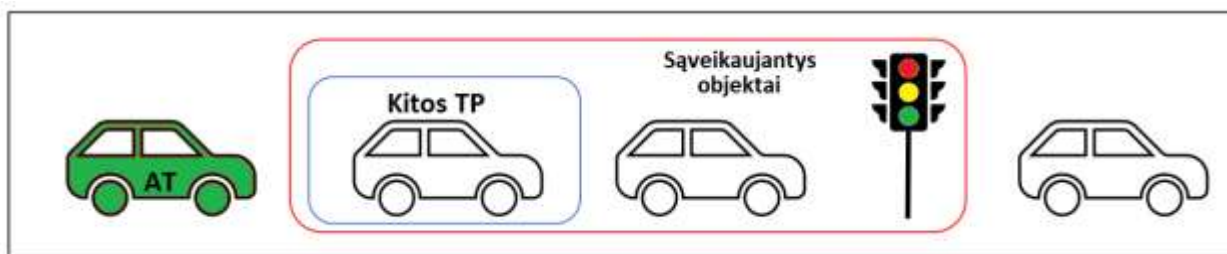
15 pav. Atstumo parametrai važiuojant paskui kitą transporto priemonę

5 lentelė. Autonominės TP elgsenos parametrai važiuojant paskui kitą transporto priemonę

Parametras	Atsargus AT	Normalus AT	Agresyvus AT
Atstumas iki priekyje važiuojančios TP			
Minimalus (m)	0	0	0
Maksimalus (m)	250.00	250.00	300.00
Sąveikaujantys objektai (vnt)	2	2	10
Sąveikaujanti TP	1	1	8
Atstumas tarp gale važiuojančios TP			
Minimalus (m)	0	0	0
Maksimalus (m)	150.00	150.00	150.00
Sustiprinta stabdymo distancija	Taip	Ne	Ne
Atstumas tarp statinių objektų (m)	0.50	0.50	0.50

Objektų su kuriais sąveikauja AT agresyvaus vairavimo modelyje skaičius yra 10, o atsargaus AT ir normalaus AT vairavimo modeliams – 2. Panašiai yra ir su kartu sąveikaujančiomis kitomis transporto priemonėmis atitinkamai 8 agresyvaus AT ir 1 naudojamas atsargaus bei normalaus AT vairavimo modeliams.

Norint suprasti sąveikaujančių objektų ir transporto priemonių skaičiaus prielaidą, 6 paveiksle parodytas PTV Vissim programinės įrangos naudojamas sąveikos transporto priemonių ir objektų modelio pavyzdys. 6 paveikslėlyje pateiktame pavyzdyje pavaizduoti 3 sąveikos objektai, skirti autonominėms transporto priemonėms ir 1 tokia pati sąveikaujanti transporto priemonė [49]. Šiame pavyzdyje AT gali susijungti su daugiausia trimis priekyje esančiais objektais ir gali tiesiogiai matyti tik pirmąją transporto priemonę.



16 pav. Atstumo parametrai važiuojant paskui kitą transporto priemonę

Eismo juostos keitimo logika

Autonominių transporto priemonių eismo juostos keitimo loginius duomenis galima rasti PTV Vissim 2022 programinės įrangos vairavimo elgsenos skyriuje, skirtuke „Lane Change“. Jie yra detalizuoti 6 lentelėje.

6 lentelė. Autonominio transporto eismo juostų keitimo elgsenos modelio parametrai

Parametras	Atsargus AT	Normalus AT	Agresyvus AT
Būtinasis eismo juostos keitimas (maršrutas)			
Maksimalus lėtėjimas			
Savas pagreitis (m/s ²)	-3.50	-4.00	-4.00
Transporto priemonė priešais (m/s ²)	-2.50	-3.00	-4.00
-1m/s ² atstumui			
Nuosavas (m)	80.00	100.00	100.00
Transporto priemonė priešais (m)	80.00	100.00	100.00
Sustojimo atstumas			
Nuosavas sustojimo atstumas (m)	-1.00	-1.00	-1.00
Transporto priemonės priešais (m)	-1.00	-1.00	-1.50
Laukimo laikas (s)			
Laukimo laikas (s)	60.00	60.00	60.00
Min. prošvaisa (priekyje/ gale) (m)	0.50	0.50	0.50
Į lėtesnę juostą, jei susidūrimo laikas viršija (s)	11.00	11.00	11.00
Saugaus atstumo mažinimo koeficientas	1	0.60	0.75
Didžiausias lėtėjimas stabdant kartu (m/s ²)	-2.50	-3.00	-6.00
Aplenkti sumažinto greičio zonas	Ne	Ne	Ne
Pažangus įsiliejimas į srautą	Taip	Taip	Taip
Transporto priemonių maršruto sprendimai žvelgia į priekį	Taip	Taip	Taip
Kooperatyvinis eismo juostos keitimas			
Kooperatyvinis eismo juostos keitimas	Ne	Taip	Taip
Didžiausias greičio skirtumas (km/h)	10.80	10.80	10.80
Maksimali susidūrimo trukmė (s)	10.00	10.00	10.00
Galinės šoninės padėties korekcija	Ne	Ne	Ne

Autonominio transporto elgsena atsižvelgiant į eismo reguliavimą šviesoforu

Kaip autonominės transporto priemonės reaguoja į šviesoforų signalus sankryžose PTV Vissim 2022 programinėje įrangoje galima matyti vairavimo elgsenos skyriuje, „Signal control“ skirtuke. Visi parametrai detalizuoti 7 lentelėje.

7 lentelė. Autonominio transporto elgsena šviesoforais reguliuojamose sankryžose

Parametras	Atsargus AT	Normalus AT	Agresyvus AT
Reakcija pasibaigus žaliai			
Elgsens mirksinčio žaliao signalo metu	Nuolatinis tikrinimas	Vienas sprendimas	Vienas sprendimas
Tikimybių veiksniai			
Alfa	1.59	1.59	1.59
Beta 1	-0.26	-0.26	-0.26
Beta 2	0.27	0.27	0.27
Reakcija pasibaigus raudonai			
Elgsens esant raudonam/ geltonam signalui	Sustoti (kaip ir raudonas signalas)	Sustoti (kaip ir raudonas signalas)	Sustoti (kaip ir raudonas signalas)
Sumažintas saugus atstumas arti sustojimo linijos			
Faktorius	1.00	1.00	1.00
Sustojimo sprendimo linijos pradžia (m)	100.00	100.00	120.00
Sustojimo sprendimo linijos pabaiga (m)	100.00	100.00	120.00

Autonominių transporto priemonių elgsenos modeliai artėjant prie mirksinčio žaliao šviesoforo signalo pateikti 7 lentelėje. Nuolatinis tikrinimas reiškia, kad transporto priemonė daro prielaidą, jog žalias signalas bus matomas dar dvi sekundes. Todėl vairuotojas nuolat sprendžia, ar toliau važiuoti, ar sustoti, atsižvelgdamas į transporto priemonės greitį tuo momentu. Vairavimo logika sako, kad automobilis turi sustoti, jeigu dviejų sekundžių bėgyje nespės pravažiuoti per mirksintį žalią šviesoforo signalą. Kitu atveju, automobilio kompiuteris turi priimti atitinkamą sprendimą, kertant sprendimo priėmimo liniją. Tikimybę, kad automobilis sustos ar ne užsidegus mirksinčiam žaliao šviesoforo signalui, remiantis PTV Vissim programos duomenimis [49], galima apskaičiuoti pagal 1 formulę:

$$p = \frac{1}{1 + e^{-\alpha - \beta_1 v - \beta_2 dx}} \quad (1)$$

kurioje, p – tikimybė, kad transporto priemonė sustos arba nesustos, esant mirksinčiam žaliao signalui; v – artėjančios prie sankryžos transporto priemonės greitis; dx – atstumas nuo dabartinės transporto priemonės vietos iki sustojimo linijos; α ir β – tikimybių faktoriai, nurodyti 7 lentelėje.

4.3. Palyginimo scenarijai

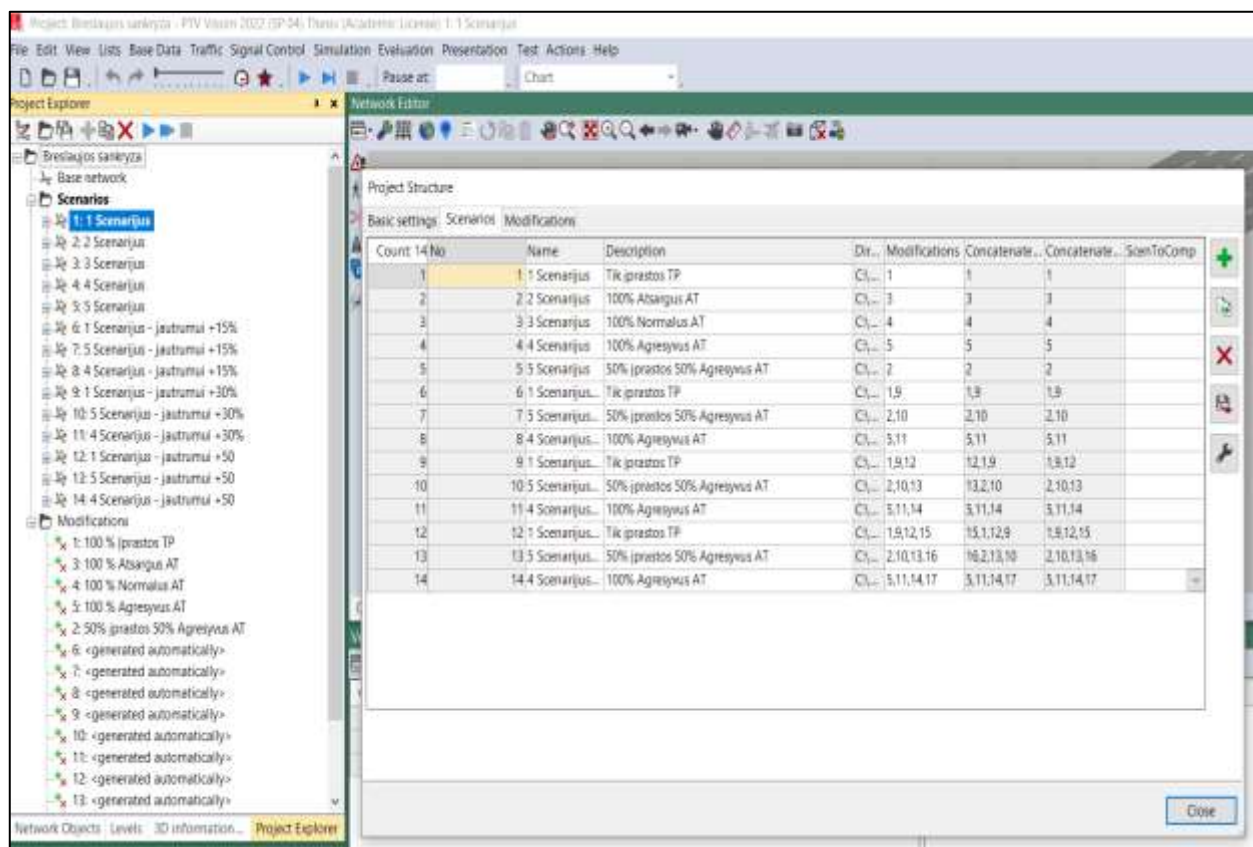
Šiame tyrime yra nagrinėjami penki skirtingi scenarijai. Pirmasis scenarijus yra sankryžos efektyvumo modeliavimas ir patikrinimas, kai eismo sraute yra tik įprastinės transporto priemonės. Antrasis scenarijus apima 100 % srauto transporto, kad jis yra autonominis, atsargaus tipo. Trečiajame scenarijuje eismo srautą sudaro tik normalaus tipo AT. Tuo tarpu ketvirtasis scenarijus imituoja sankryžos veikimo efektyvumą, kai eismo sraute yra tik agresyvaus tipo AT. Penktasis scenarijus yra tada, kai įprastos transporto priemonės yra sumaišytos su aukščiausio „intelektu“ autonominiu transportu, o eismo sraute yra 50 % įprastų transporto priemonių ir 50 % AT agresyvaus tipo. Toliau esančioje lentelėje apibendrinami vizualiai aprašyti scenarijai.

8 lentelė. Tyrimo scenarijai

Scenarijus	1	2	3	4	5
Aprašymas	100 % įprastinės transporto priemonės	100 % AT atsargaus tipo	100 % AT normalaus tipo	100 % AT agresyvaus tipo	50 % įprastinių, 50 % AT agresyvaus tipo

Analizuojamos situacijos yra įgyvendinamos naudojant scenarijų valdymą PTV Vissim 2022 programinėje įrangoje. Scenarijų valdymas suteikia galimybę palyginti skirtingas situacijas viename projekte ir lyginti kiekvieno scenarijaus rezultatus su pradiniu scenarijumi, kuris šiuo atveju bus įprastų transporto priemonių sumodeliuota situacija.

Ši programinė įranga taip pat turi 2 scenarijų valdymo būdus, iš kurių vienas yra vadinamas „netiesioginiu“, kai modifikuoti scenarijaus parametrus galima atsidarius kiekvieną atskirą atvejo langą. Antrasis yra „konstruktyvus“ būdas, kuriame modifikacijų skirtuke galima sukurti ir redaguoti scenarijų. Pradinis, bazinis scenarijus šiame tyrime yra pirmasis scenarijus, kai sankryžos modelio eismo sraute yra 100 % įprastų transporto priemonių. Bazinis scenarijus turi būti sumodeliuotas prieš kuriant kitus scenarijus. Sumodeliavus bazinį scenarijų, naudojant redagavimo įrankį, sumodeliuoti kitus scenarijus tampa daug paprasčiau. Visos atskiros sukurtų scenarijų modifikacijos yra išsaugomos skirtinguose failuose, kaip parodyta 17 paveiksle. Iš esmės vienintelis kiekvieno scenarijaus modifikavimo skirtumas yra transporto priemonių vairavimo elgsena, priklausanti nuo scenarijaus tikslo.



17 pav. PTV Vissim – scenarijų valdymas

Jautrumo analizė

Tyrimo pabaigoje papildomai yra atliekama sankryžos jautrumo analizė, siekiant išanalizuoti sankryžos efektyvumą, kai didėja eismo intensyvumas. Todėl laipsniškas srauto didinimas modeliavime yra atliktas prie modelio esamų apimčių pridėdant 15 %, 30 % ir 50 % kaip parodyta 9 ir 10 lentelėse.

9 lentelė. Transporto srauto padidėjimas Kariūnų pl. sankryžoje

Srauto padidėjimas (%)	Transporto srauto apimtis kiekvienai kryptiai			
	Vaidoto g. link centro	Kariūnų pl.	Vaidoto g. link Vaišvydavo	Viso
0 %	861	501	489	1851
15 %	990	576	562	2128
30 %	1119	651	636	2406
50 %	1291	751	733	2775

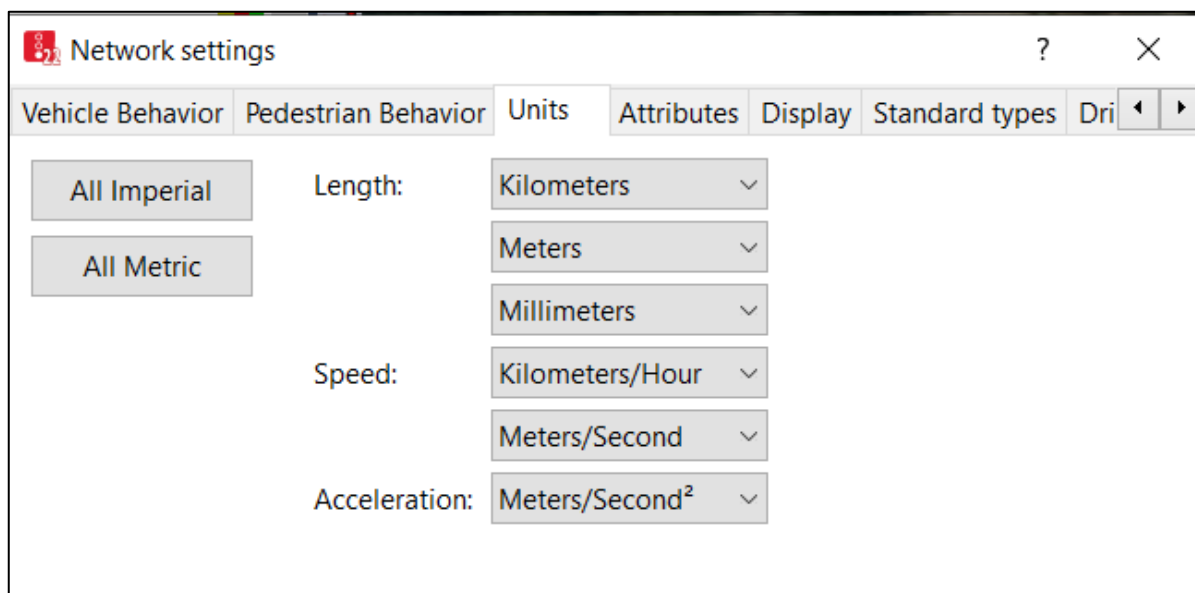
10 lentelė. Transporto srauto padidėjimas Breslaujos g. sankryžoje

Srauto padidėjimas (%)	Transporto srauto apimtis kiekvienai kryptčiai			
	Iš Baršausko į Tunelio g.	Breslaujos g.	Iš Tunelio į Baršausko g.	Viso
0 %	1731	753	1776	4260
15 %	1932	747	2011	4690
30 %	2184	845	2273	5302
50 %	2520	975	2623	6118

Jautrumo analizė buvo išbandyta su trimis pagrindiniais scenarijais, apibrėžtais šiame skyriuje, tai yra atveju, kai visą srautą sudaro tik įprastinės transporto priemonės, atveju, kai transporto sudėtis sraute yra tik agresyvaus tipo autonominis transportas ir atveju, kai eismo srautą sudaro mišrus transportas (50 % įprastinės transporto priemonės ir 50 % agresyvaus tipo autonominis transportas. Pagrindinės jautrumo analizės tikslas yra palyginti, kaip didėjantis eismo srautas gali santykinai paveikti pagrindinius scenarijus.

5. Mikroskopinis tyrimas

Šiame skyriuje yra aprašomas tiriamojo modelio procesas, t. y. nustatomi tinkami parametrai modeliuojamai sankryžai, eismo srautą sudarantiems automobiliams ir jų maršrutams. Taip pat yra pateikiami pagrindiniai sankryžų elementai, išdėstymas, kelių projekcijos, sumažinto greičio zonos ir konfliktinių zonų vietos. Visuose šio tyrimo modeliavimo modeliuose visi ilgio, greičio ir pagreičio parametrai pateikiami pagrindiniais SI sistemos vienetais kaip parodyta 18 paveiksle. Modeliavime, matuojant ilgį yra naudojami metrai ir kilometrai, o transporto priemonių greitį – kilometrai per valandą. Kadangi abi analizuojamos Kauno miesto sankryžos turi panašią tyrimo eigą, tai šiame skyriuje pagrindinis dėmesys bus skiriamas Breslaujos ir Baršausko gatvių sankryžai. Todėl Vaidoto g. ir Kariūnų pl. sankryžos tyrimo eigos paveikslai bus pateikiami prieduose.



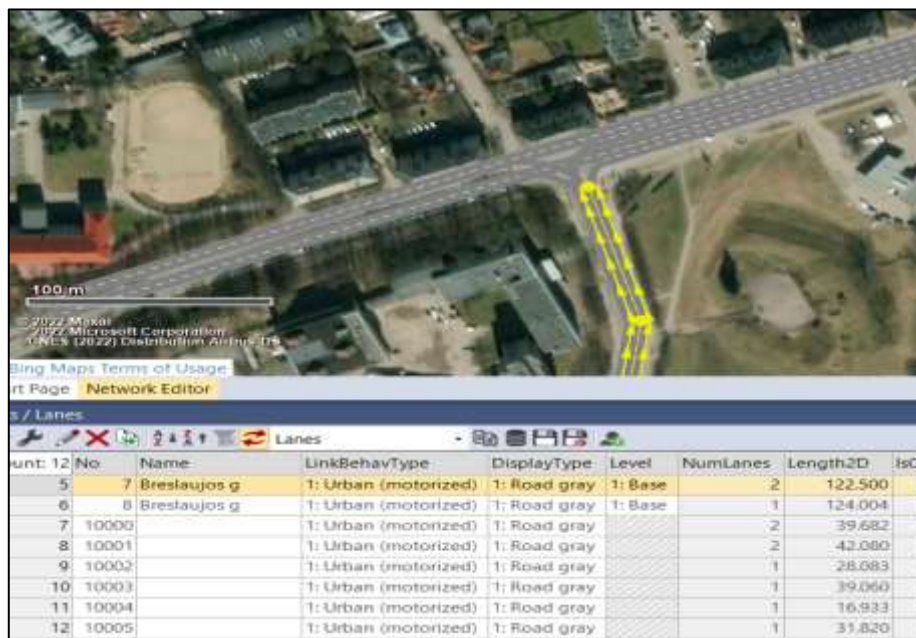
18 pav. Matavimo vienetų nustatymas PTV Vissim

Kuriant sankryžos modelį PTV Vissim programine įranga, kaip fono vaizdas buvo panaudota tiksli Breslaujos, Tunelio ir Baršausko gatvių sankryžos vietos ortofoto nuotrauka, pavaizduota 19 paveiksle, kur atsispindi visos sankryžos tikslus kelių tinklo išdėstymas.



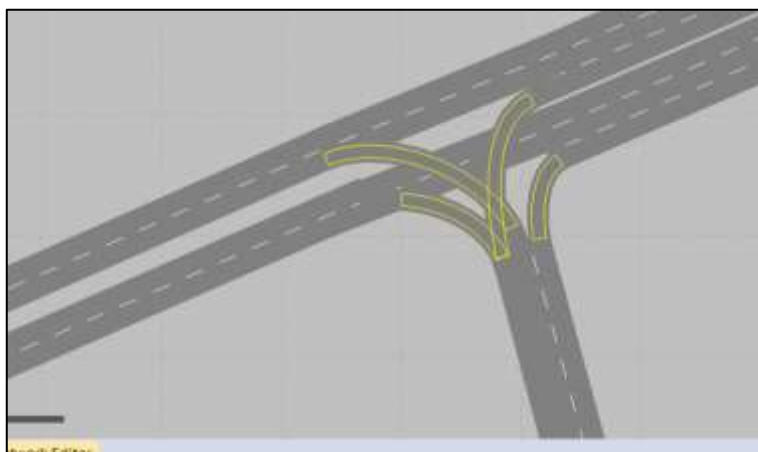
19 pav. PTV Vissim sukurtas sankryžos modelis skirtas tyrimui.

Visos šiame modelyje naudojamos sankryžos jungtys yra apibrėžtos kaip miesto (motorizuotos) elgsenos tipo (20 paveikslas). Vėliau parametruose bus apibrėžiamas kiekvienas scenarijus ir kokios transporto priemonės sudarys eismo srautą.



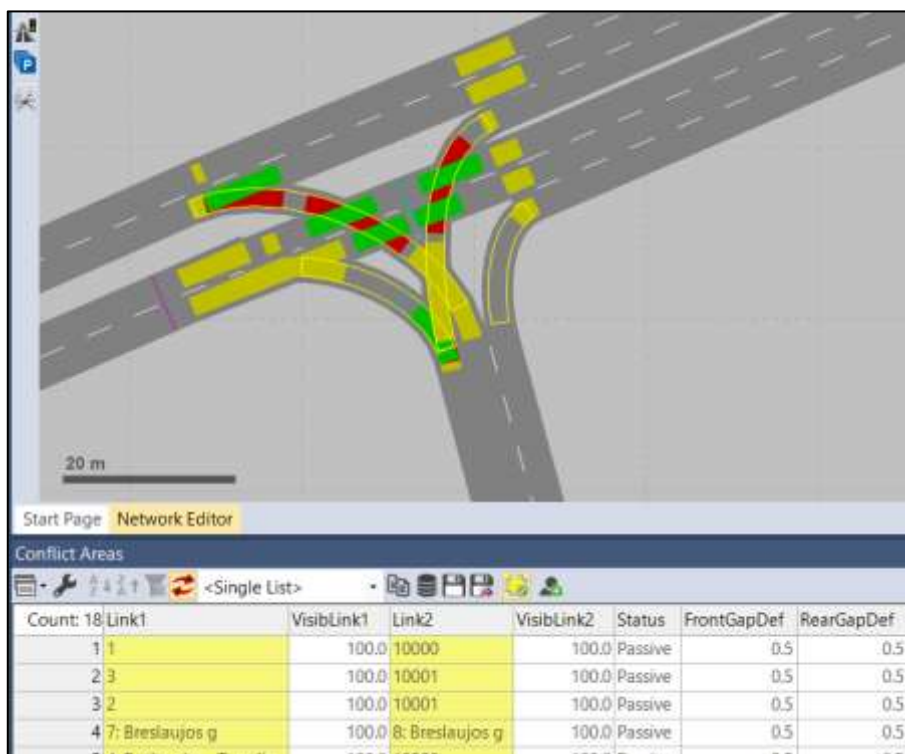
20 pav. PTV Vissim Breslaujos sankryžos jungčių tipai

Šiame tyrime yra panaudota sumažinto greičio zonų funkcija PTV Visim programinėje įrangoje. Dėl sumažinto greičio zonų, į šias zonas įvažiuojančios transporto priemonės priverčia sulėtinti greitį, o kai iš šios zonos išvažiuoja, tada transporto priemonės išibėgėja, kol išvažiavę iš sumažinto greičio zonų pasiekia buvusį greitį. Sumažinto greičio zonos buvo suprojektuotos laužtine forma, atkartojant transporto priemonės judesį sankryžoje į dešinę arba kairę kaip pavaizduota 21 paveiksle.



21 pav. Sumažinto greičio zonos Breslaujos sankryžoje

PTV Vissim konfliktinių zonų įrankis buvo naudojamas visose sankryžos vietose, kuriose persidengia skirtingų eismo srautų trajektorijos, todėl svarbu apibrėžti pagrindinių ir mažesnių srautų pirmumą. 22 paveiksle galima matyti žaliai pažymėtus pagrindinius srautus, kuriuose važiuojančios transporto priemonės neturi duoti kelio kitoms TP. Vadinasi, raudona spalva pažymėtos transporto priemonės eismo sraute turi sulėtinti greitį, kad įsitikintų, kad konfliktinėje zonoje nėra kitos transporto priemonės ir tik tada važiuoti.



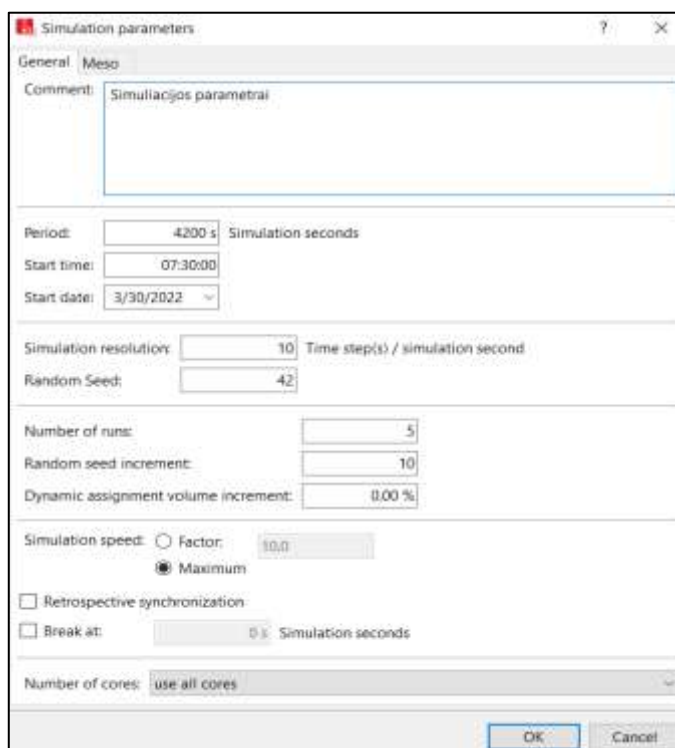
22 pav. Konfliktinės zonos Breslaujos sankryžos modelyje

5.1. Mikroskopinio tyrimo parametrai

Pagrindinis šio tyrimo tikslas yra įvertinti sankryžos veikimo efektyvumą pagal penkis skirtingus scenarijus rytinio piko metu, todėl simuliacijos laikotarpis buvo viena valanda, kur transporto priemonės į eismo tinklą patekdavo per pirmąsias 3600 simuliacijos sekundes. Prie nustatyto

simuliacijos laikotarpio buvo pridėtos papildomos 10 minučių (600 sekundžių) tam, kad eismo tinkle esančioms transporto priemonėms būtų suteikta užtekinai laiko tinkamai palikti visą tinklą.

Simuliacijos pradžios laikas 2022-03-30 buvo 7:30 val., toks pat, prie kokio ir buvo skaičiuojami esami eismo srautai. Simuliacijoje naudojama rezoliucija gali taip pat turėti įtakos transporto priemonių elgsenai ir jų sąveikai tinkle. PTV Vissim programoje galima pasirinkti, kad skiriamosios gebos diapazono reikšmė būtų sveikasis skaičius nuo 1 iki 20. Šiuo atveju pasirinkta reikšmė 10 (23 paveikslas), nes remiantis PTV Vissim naudojimo instrukcija, nuo 10 iki 20 svyruojanti vertė užtikrina sklandesnę transporto priemonių judėjimą [50].



23 pav. Tyrimo parametrai PTV Vissim

24 paveiksle pavaizduotas „Random seed“ nustatymas eismo srauto nustatyme, kuris turi tam tikros įtakos atlikto tyrimo rezultatams. Siekiant, kad tyrimo rezultatai būtų kuo tikslesni ir modeliuojant kiekvieną scenarijų, nustatyta, kad simuliacija turi būti vykdoma ne mažiau penkis kartus, su vis skirtinga šio parametro reikšme, kaip parodyta 10 lentelėje. Galiausiai yra apskaičiuojamas vidutinis visų penkių simuliacijų rezultatas, kuris turi padaryti kiekvienos simuliacijos rezultatus tikslesniais.

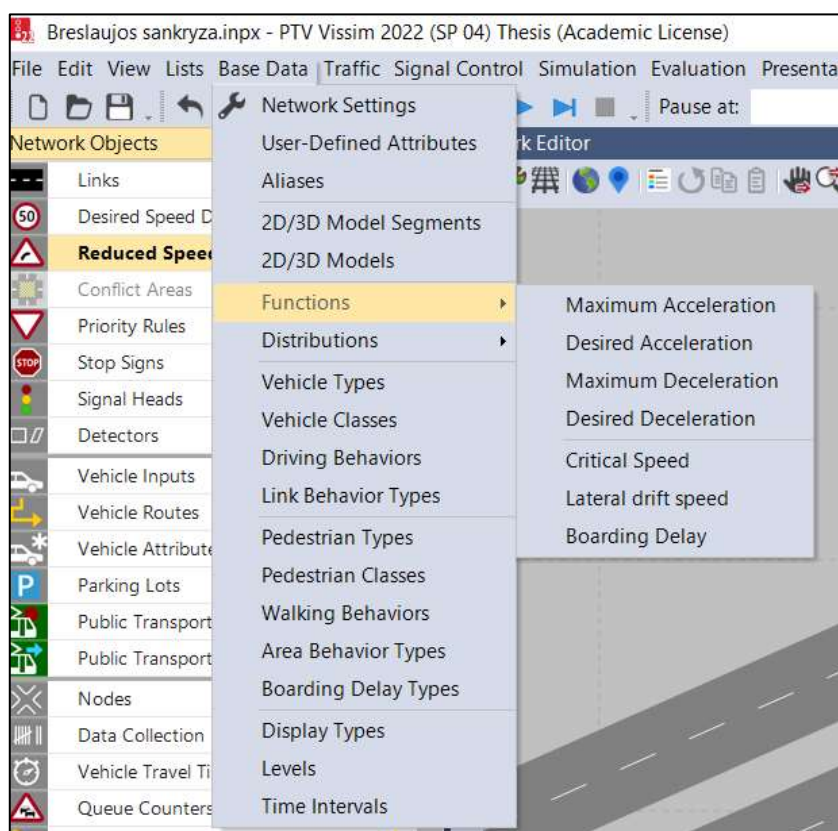
11 lentelė. Parametro „Random seed“ vienos simuliacijos pavyzdys

Simuliacijos Nr.	„Random seed“ reikšmė	Pradžios laikas	Pabaigos laikas (s)
1	42	0:00:00	4200
2	47	0:00:00	4200
3	52	0:00:00	4200
4	57	0:00:00	4200
5	62	0:00:00	4200

Šiame tyrime yra labai svarbu tinkamai pasirinkti naudojamas funkcijas tokias kaip transporto priemonės pagreitis ir lėtėjimas. Lygiai taip pat svarbu yra parinkti tinkamą transporto priemonės

tipą, transporto priemonės klasę ir vairavimo elgseną, kuri yra pasirinkta šio tyrimo eismo srauto analizei.

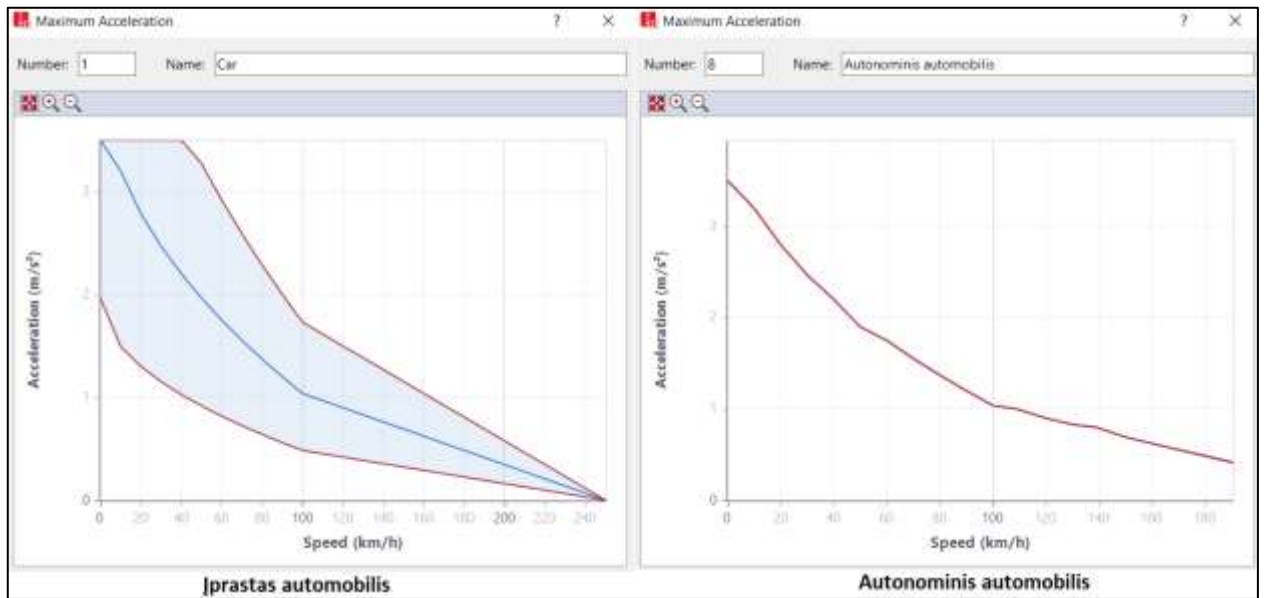
PTV Vissim programinės įrangos paketas suteikia galimybę pasirinkti norimą maksimalų ir norimą transporto priemonių pagreitį, kuris gali būti atitinkamai teigiamas arba neigiamas. Šiuos nustatymus, esant poreikiui, galima keisti, kaip pavaizduota 24 paveiksle.



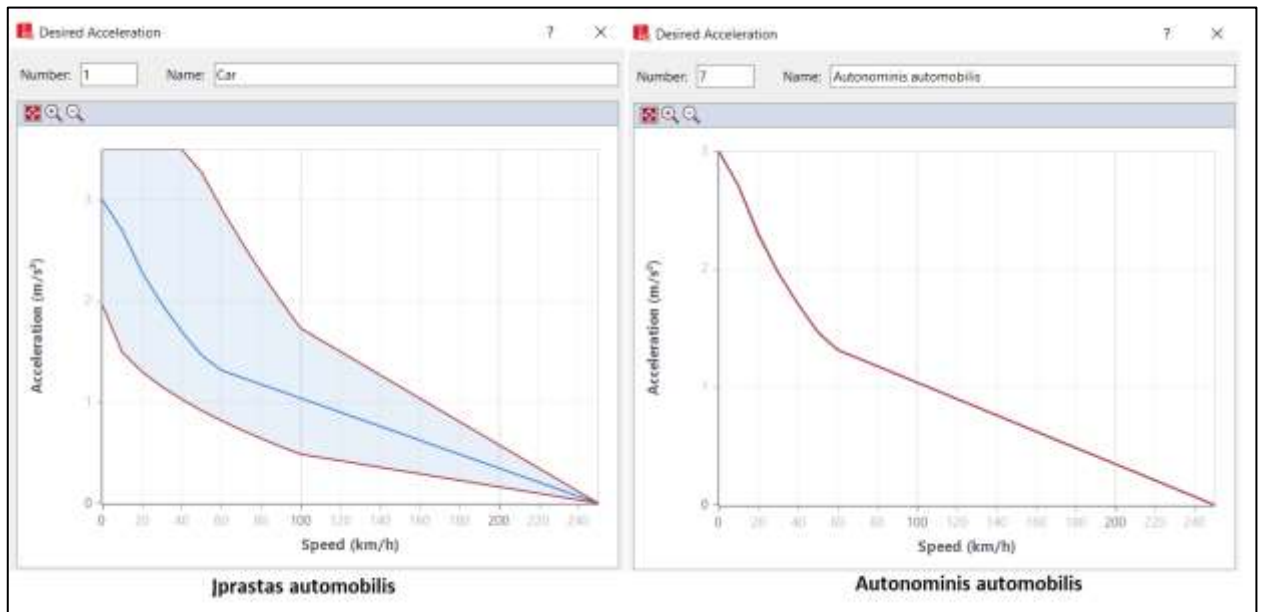
24 pav. Pagreičio parametrų keitimo meniu PTV Vissim

Pats pagreitis, ar jis būtų teigiamas ar lėtėjantis, kiekvienam žmogaus valdomam automobiliui., turi būti nustatomas atsitiktine tvarka, kaip ir yra realiame pasaulyje. Kaip parodyta 25 paveiksle, tai turėtų būti reikšmė tarp dviejų raudonų linijų. Horizontali skalė (abscisės) rodo transporto priemonės greitį, o vertikali skalė (ordinatės) – pagreičio reikšmę. Įprastas transporto priemonių grafikas 25 paveiksle, apibūdinantis pagreičio greičių funkcines reikšmes, turi tris kreives; vidurinė kreivė skirta vidutinėms reikšmėms, kur dvi ribinės kreivės apibrėžia pralaidumo reikšmes [50].

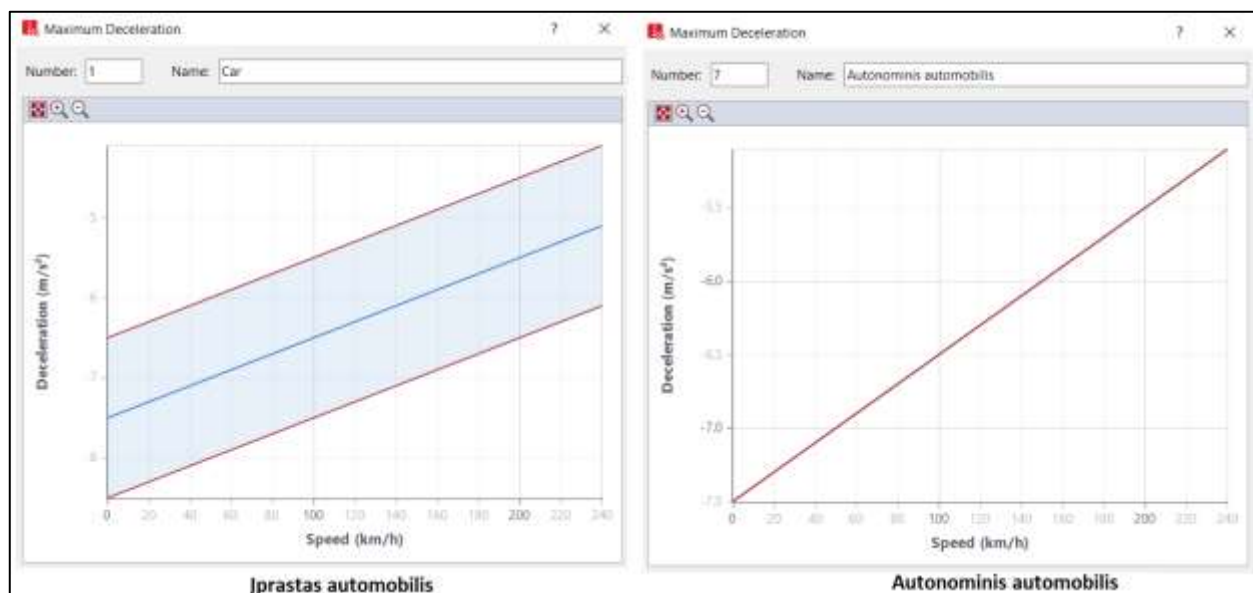
Atsižvelgiant į tai, kad autonominis transportas yra pilnai savarankiškas, tai jų tiek teigiamas, tiek neigiamas pagreitis gali būti pastovus. Todėl šiame tyrime yra daroma prielaida, kad autonominės transporto priemonės įsibėgėja ir lėtėja vienodai ir labai panašiai. Todėl šiame tyrime visi autonominiai automobiliai turi tą pačią kiekvieno nagrinėjamo parametro reikšmę, t. y. didžiausią pagreitį ir lėtėjimą ir norimus pagreičio ir lėtėjimo rodiklius (25 – 28 pav.). Ši prielaida apima tiek autonominius lengvuosius automobilius, tiek ir krovinius mikroautobusus, kurie specialiai nebus išskirti.



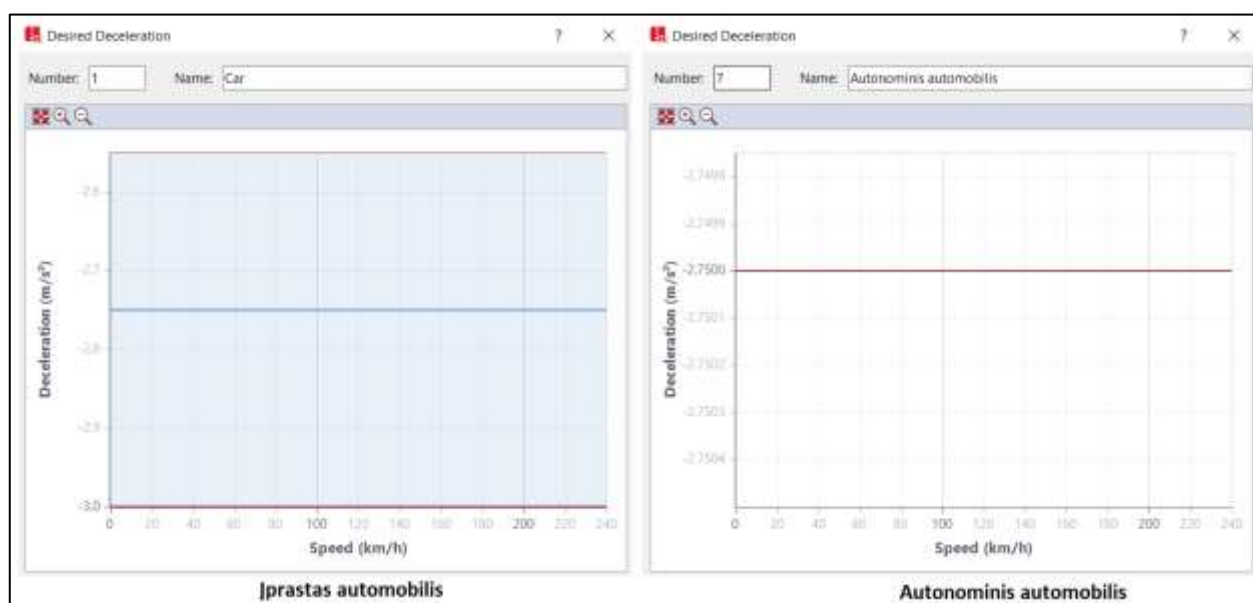
25 pav. Maksimalaus pagreičio prielaidos įprastam ir autonominiam automobiliui PTV Vissim



26 pav. Norimo pagreičio prielaidos įprastam ir autonominiam automobiliui PTV Vissim



27 pav. Maksimalaus lėtėjimo prielaidos įprastam ir autonominiam automobiliui PTV Vissim



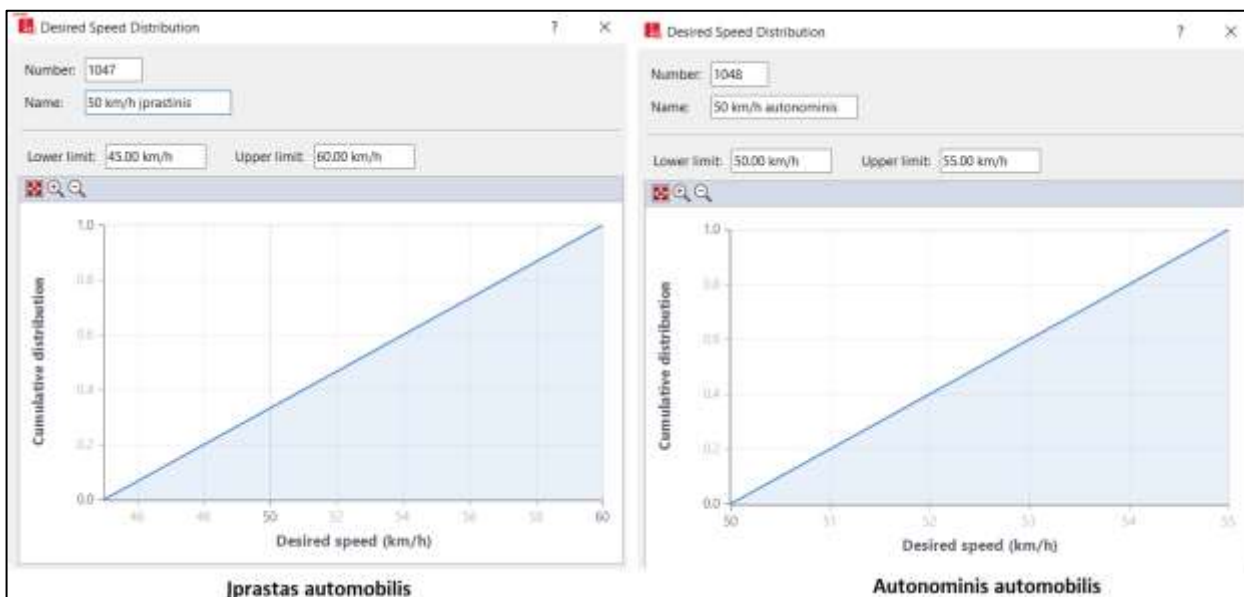
28 pav. Norimo lėtėjimo prielaidos įprastam ir autonominiam automobiliui PTV Vissim

Norimas transporto priemonės greitis yra kritinis parametras šiame tyrime, nes jis turi įtakos kelio pralaidumui ir transporto priemonės kelionės laikui. Jeigu nebus tokios situacijos, kad automobiliui reikėtų stabdyti dėl atsiradusio kito automobilio, kliūties ar šviesoforo signalo, automobilis turės judėti pasirinktu greičiu.

29 paveiksle galima matyti įprastinių ir automominių automobilių norimo greičio grafikus. Absisių ašis apibrėžia tikslius norimus transporto priemonių greičius, kai tuo tarpu ordinašių ašis apibrėžia procentinę išraišką lyginant su visomis transporto priemonėmis esančiomis sraute.

Šiam mikroskopiniam eismo srauto tyrimui norimas greičio pasiskirstymas įprastinėms transporto priemonėms yra pasirinktas taip, kad 10 % transporto priemonių turi važiuoti 45-50 km/h greičiu; dar 10 % transporto priemonių turi važiuoti 55-60 km/h greičiu. Taigi, didžioji srauto dalis, 80 % transporto priemonių, važiuos greičiu nuo 45 km/h iki 60 km/h.

Kalbant apie autonomines transporto priemones, yra daroma prielaida, kad šių transporto priemonių norimų greičių diapazonas bus daug mažesnis ir jie laikysis greičio apribojimo, priešingai nei dauguma žmonių, kurie taip akylai to nedaro. Todėl yra daroma prielaida, kad AT juda pastoviu greičiu nuo 50 km/h iki 55 km/h, kaip parodyta 29 paveiksle (autonominių automobilių kreivė).



29 pav. Greičio reikšmės įprastiniams ir autonominiams automobiliams

5.2. Automobilių tipai ir vairavimo elgsena

PTV Vissim programinė įranga suteikia galimybes apibrėžti transporto priemonių grupę, kai transporto priemonės yra su panašiomis techninėmis savybėmis pvz., autonominės transporto priemonės ir tada priskirti šias transporto priemones tam tikrai transporto priemonių klasei [50]. 30 paveiksle galima matyti šio tyrimo naudojamus automobilių tipus. Kiekvienas transporto priemonės tipas yra susietas su konkrečia funkcija, išsamiai apibrėžta anksčiau šiame skyriuje.

Tyrime naudojamos trys pagrindiniai transporto priemonių tipai, tai automobiliai, autobusai ir sunkvežimiai. Kitos transporto priemonės ir pėstieji tyrime nebus įskaičiuoti, nes pėsčiųjų eismas yra pilnai atitinkantis šviesoforų signalus ir neturi įtakos transporto priemonėms. Panaši situacija taip pat ir Vaidoto g. sankryžoje, pėsčiųjų perėja yra ties Kariūnų pl. kryptimi ir didelės įtakos nedaro, nes pėsčiųjų srautas čia visiškai minimalus.

31 paveiksle galima matyti, kad visiems tyrime naudojamiems transporto priemonių tipams yra naudojamos maksimalaus ir norimo pagreičio, maksimalaus lėtėjimo ir norimo lėtėjimo funkcijos.

Transporto priemonių klasės, naudojamos klasifikuojant kiekvieną transporto priemonės tipą, susieta su skirtingu vairavimo elgesiu, parodytos 32 paveiksle.

Vehicle Types					
Count:	No	Name	Category	Model2D3DDistr	ColorDistr1
1	100	prastas auto	Car	10: Car	1: Default
2	200	prastas sunkv	HGV	20: HGV	1: Default
3	300	prastas autobusas	Bus	30: Bus	1: Default
4	400	Atsargus autonom auto	Car	10: Car	1: Default
5	500	Atsargus autonom sunkv	HGV	20: HGV	1: Default
6	600	Atsargus autonom autobus	Bus	30: Bus	1: Default
7	700	Normalus autonom auto	Car	10: Car	1: Default
8	800	Normalus autonom sunkv	HGV	20: HGV	1: Default
9	900	Normalus autonom autobus	Bus	30: Bus	1: Default
10	10...	Agresyvus autonom auto	Car	10: Car	1: Default
11	11...	Agresyvus autonom sunkv	HGV	20: HGV	1: Default
12	12...	Agresyvus autonom autobus	Bus	30: Bus	1: Default

30 pav. Automobilių tipai PTV Vissim programoje

Vehicle type
?
×

No.:

Name:

Static

Functions & Distributions

Special

External Driver Model

Maximum acceleration:

Desired acceleration:

Maximum deceleration:

Desired deceleration:

Weight:

Power:

Occupancy:

31 pav. Skirtingų automobilių tipų funkcijos

Vehicle Classes / Vehicle types						
Count: 12	No	Name	VehTypes	UseVehTypeColor	Color	
1	10	Įprastas automobilis	100	<input checked="" type="checkbox"/>	■ (255, 0, 0, 0)	
2	20	Įprastas sunkvežimis	200	<input checked="" type="checkbox"/>	■ (255, 0, 0, 0)	
3	30	Įprastas autobusas	300	<input checked="" type="checkbox"/>	■ (255, 0, 0, 0)	
4	40	Atsargus autonomo autom	100	<input checked="" type="checkbox"/>	■ (255, 243, 12, 21)	
5	50	Atsargus autonomo sunkv	200	<input checked="" type="checkbox"/>	■ (255, 243, 12, 21)	
6	60	Atsargus autonomo autobu	300	<input checked="" type="checkbox"/>	■ (255, 243, 12, 21)	
7	70	Normalus autonomo autom	100	<input checked="" type="checkbox"/>	■ (255, 246, 245, 9)	
8	80	Normalus autonomo sunkv	200	<input checked="" type="checkbox"/>	■ (255, 246, 245, 9)	
9	90	Normalus autonomo autobu	300	<input checked="" type="checkbox"/>	■ (255, 246, 245, 9)	
10	100	Agresyvus autonomo autom	100	<input checked="" type="checkbox"/>	■ (255, 32, 246, 9)	
11	110	Agresyvus autonomo sunkv	200	<input checked="" type="checkbox"/>	■ (255, 32, 246, 9)	
12	120	Agresyvus autonomo autobu	300	<input checked="" type="checkbox"/>	■ (255, 32, 246, 9)	

32 pav. Automobilių klasės ir tipai programoje PTV Vissim

Transporto priemonių vairavimo elgsena

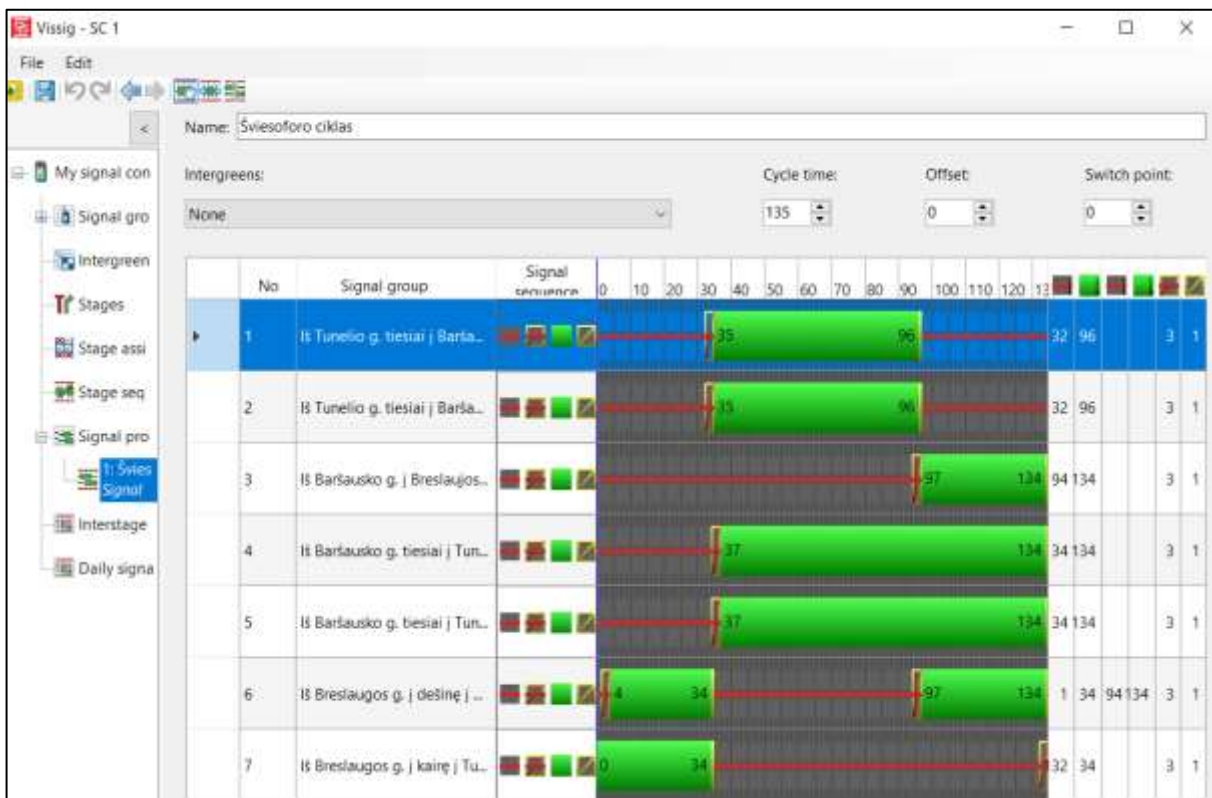
PTV Vissim programinėje įrangoje gali būti naudojami keli vairavimo elgsenos būdai tokie kaip važiavimas paskui kitą transporto priemonę, eismo juostos keitimas ir elgsena reaguojant į šviesoforų signalus. Autonominio transporto vairavimo elgsena programoje PTV Vissim yra pagrįsta važiavimo logika pagal 4-ame skyriuje minėto CoEXist projekto duomenis. 33 paveiksle parodytos šiuo metu PTV Vissim turimos AT vairavimo elgsenos kategorijos naudojamos šiame darbo tyrime.

Start Page Network Editor						
Driving Behaviors						
Count: 8	No	Name	NumInteractObj	StandDistIsFix	StandDist	CarFollowModType
1	1	Urban (motorized)	4	<input type="checkbox"/>	0.50	Wiedemann 74
2	2	Right-side rule (motorized)	2	<input type="checkbox"/>	0.50	Wiedemann 99
3	3	Freeway (free lane selection)	2	<input type="checkbox"/>	0.50	Wiedemann 99
4	4	Footpath (no interaction)	2	<input type="checkbox"/>	0.50	No interaction
5	5	Cycle-Track (free overtaking)	2	<input type="checkbox"/>	0.50	Wiedemann 99
6	101	AV cautious (CoEXist)	2	<input type="checkbox"/>	0.50	Wiedemann 99
7	102	AV normal (CoEXist)	2	<input type="checkbox"/>	0.50	Wiedemann 99
8	103	AV aggressive (CoEXist)	10	<input type="checkbox"/>	0.50	Wiedemann 99

33 pav. Vairavimo elgsenos logikos kategorijos PTV Vissim programoje

5.3. Sankryžos eismo reguliavimas šviesoforais

Atsižvelgiant į tai, kad Baršausko ir Breslaujos gatvių sankryža yra reguliuojama šviesoforų, žemiau pateikiami sankryžos reguliavimo įrenginių parametrai, kurie buvo nustatyti duomenų rinkimo dieną. Natūrinio būdu naudojant laikmatį, buvo išmatuotas kiekvieno šviesoforo signalo laikas. Gauta informacija buvo panaudoti programoje PTV Vissim sudarant šviesoforo ciklą sankryžose. Šviesoforo signalų valdymo tipas yra parinktas kaip fiksuoto laiko (34 paveikslas).



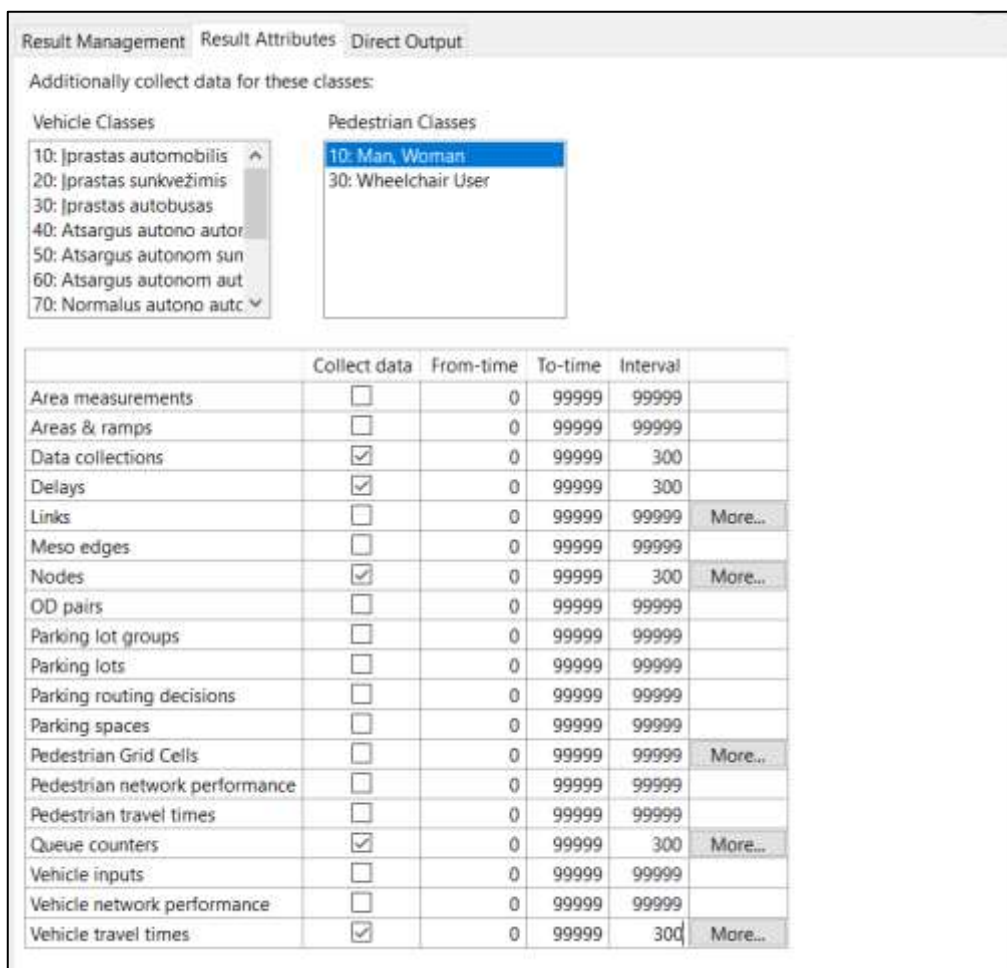
34 pav. Šviesoforų signalai Breslaujos sankryžoje

5.4. Vertinimo rodikliai

Pagrindiniai vertinimo rodikliai naudojami tyrime yra susiję su transporto priemonių kelionės laikais ir spūsčių ilgiais. Tyrime naudojami tokie programinės įrangos įrankiai kaip duomenų rinkimo linijos, automobilių kelionės laikų ir transporto priemonių eilių matavimo linijos.

Eilių vėlavimas, sustabdymo momentai ir transporto eilių ilgiai kaip ir kelionės laikas yra vertinami šiame tyrime. Tyrime kiekvieno parametro reikšmė turi būti užfiksuojama kas 300 sekundžių, kaip pavaizduota 35 paveiksle. Taigi, rezultatai yra matuojami po 5 minučių simuliacijos, kurios pačios bendras laikas yra parinktas 1 valandą ir 10 minučių (4200 sekundžių).

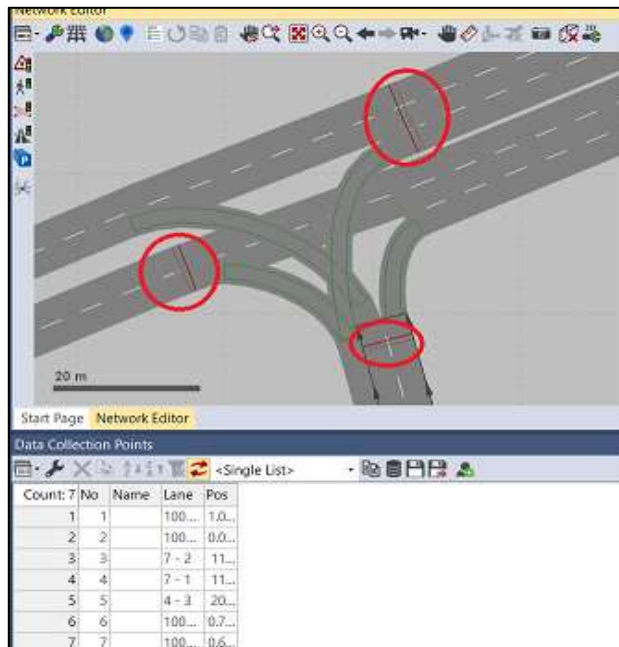
Taigi galutiniame šio tyrimo vertinime yra stebimi kiekvieno vertinimo parametro visų laiko intervalų vidutiniai rezultatai.



35 pav. Tyrimo vertinimo rodikliai PTV Vissim programoje

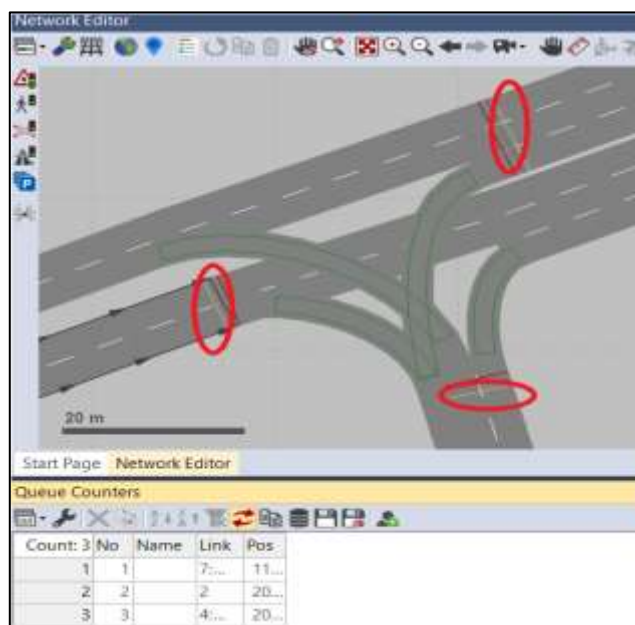
Duomenų rinkimas

Duomenų rinkimo taškai yra išdėstyti pačiose kelio juostose eismo dalyviams skaičiuoti. Naudojami indukcinės kilpos detektoriai. Šiame tyrime šie detektoriai yra naudojami fiksuoti kiekvienos eismo juostos eismo srauto apimčiai ir transporto priemonių kelionės laikui nustatyti, kaip parodyta 36 paveiksle. Šie detektoriai, taip pat, yra naudojami modelio patikimumui nustatyti. Privalu įsitikinti ar modelis teisingas ir kokia yra jo rezultatų paklaida lyginant su realia situacija gatvėse. Suskaičiuotos transporto priemonės kiekvienoje kryptyje bus palyginamos su gautais duomenimis natūriniu būdu, realiose sankryžose.



36 pav. Informacijos rinkimo taškai Breslaujos sankryžoje

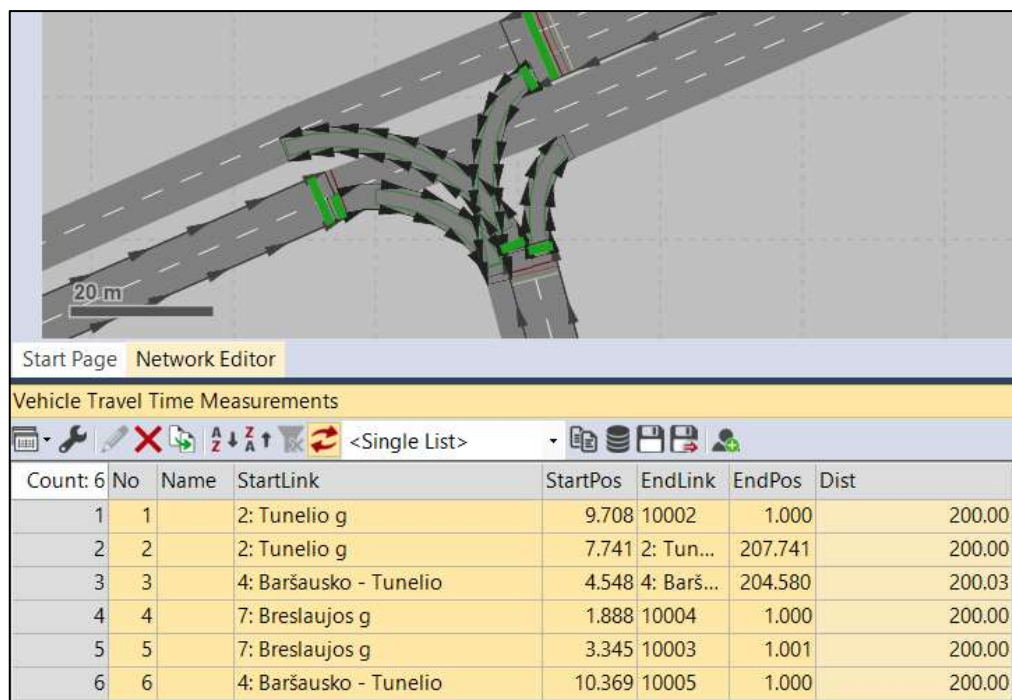
Prie kelio dangos yra pritvirtinti ir transporto eilių matuokliai, skirti matuoti eilių ilgį iš konkrečių vietų, kaip parodyta 37 pav. Eilės ilgis yra rezultatas, užfiksuotas ilgiu (metrais), o ne transporto priemonių skaičius eilėje. [50] Šis įrankis buvo naudojamas kuriant tyrimo modelį ir matuojant vidutinį visų transporto priemonių eilių ilgį.



37 pav. Transporto priemonių eilių matuokliai Breslaujos sankryžoje

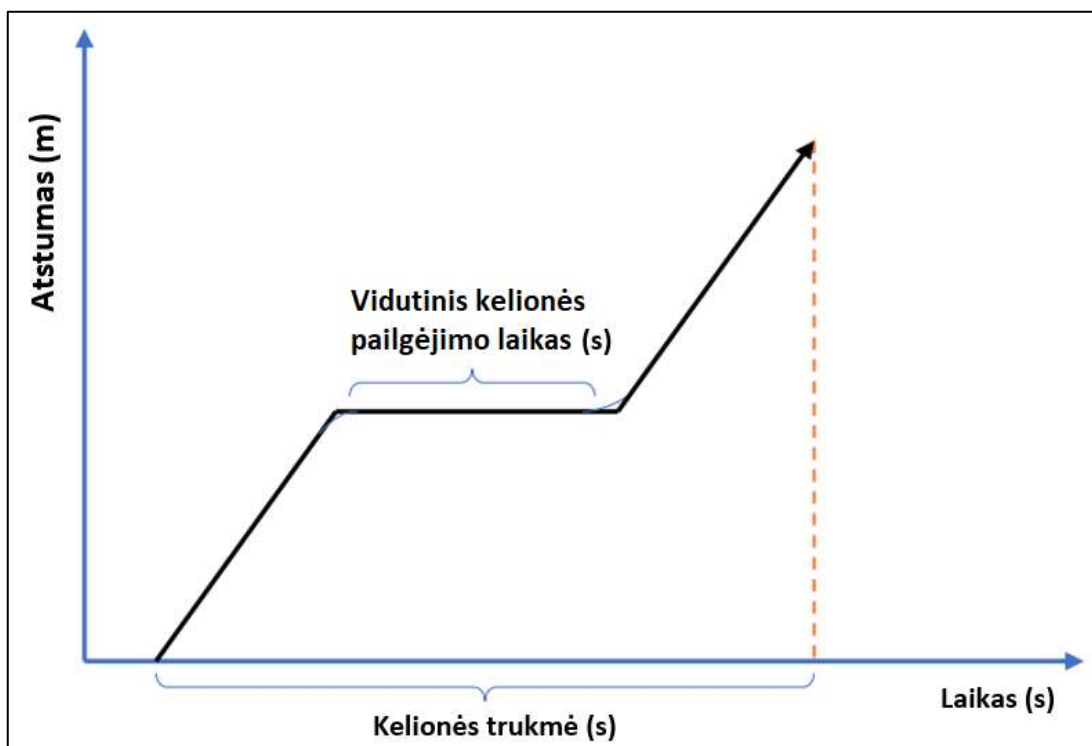
Transporto priemonių kelionės laiko matavimas yra sukurtas kiekvienai eismo juostai, pritvirtinant po du matavimo taškus kelyje; tai yra pradžios ir pabaigos matavimo taškai. Taigi PTV Vissim padeda matuoti transporto priemonės kelionės laiką (sekundėmis) tarp šių dviejų taškų, įskaitant transporto priemonės stovėjimo spūstyje laiką.

Reikia pabrėžti, kad šio tyrimo modeliuose transporto priemonių kelionės laikai yra matuojami 200 m ilgio kelio ruože, tai yra kiekvienoje sankryžos kryptyje, kaip parodyta 38 paveiksle.



38 pav. Automobilių kelionės laiko parametrai

Galiausiai, šio tyrimo vidutinė transporto priemonės kelionės trukmė ir vidutinis kelionės pailgėjimo laikas buvo išmatuoti naudojant transporto priemonės kelionės laiko įrankį PTV Vissim programinėje įrangoje. Laikas, kurį automobilis sugaišta nuvažiuoti nuo vieno taško iki kito yra laikomas vidutiniu kelionės laiku. Vidutinis laiko tarpas, kurį automobilis sugaišta sustojęs savo judėjimo kelyje yra vadinamas vidutiniu kelionės pailgėjimo laiku. 39 paveiksle yra pateikta aiškinamasis kelionės laiko grafikas.



39 pav. Vidutinis delsimas automobilio visos kelionės laike

6. Tyrimo rezultatai

Taigi, esamo realaus eismo srauto skaičiavimų modeliavimas yra atliktas naudojant realius sankryžų eismo srautų, geometrijos ir šviesoforų signalų laikų duomenis. Šiam tyrimui yra suformuluoti skirtingi modeliavimo scenarijai. Taip pat buvo atlikta sankryžų jautrumo analizė, sistemingai pridodant daugiau transporto priemonių visiems sankryžų eismo dalyvių posūkių kryptims pagal kiekvieną scenarijų. Kaip galima matyti 40 paveiksle, tyrimui užbaigti yra atliekamos simuliacijos. Šiame skyriuje pateikiami visi modeliavimo rezultatai iš visų scenarijų, suformuluotų ir aptartų ketvirtame skyriuje.

Šiame tyrime buvo modeliuojami penki scenarijai, kur kiekvienas scenarijus atspindi skirtingą vairavimo elgeseną. Nagrinėjami scenarijai:

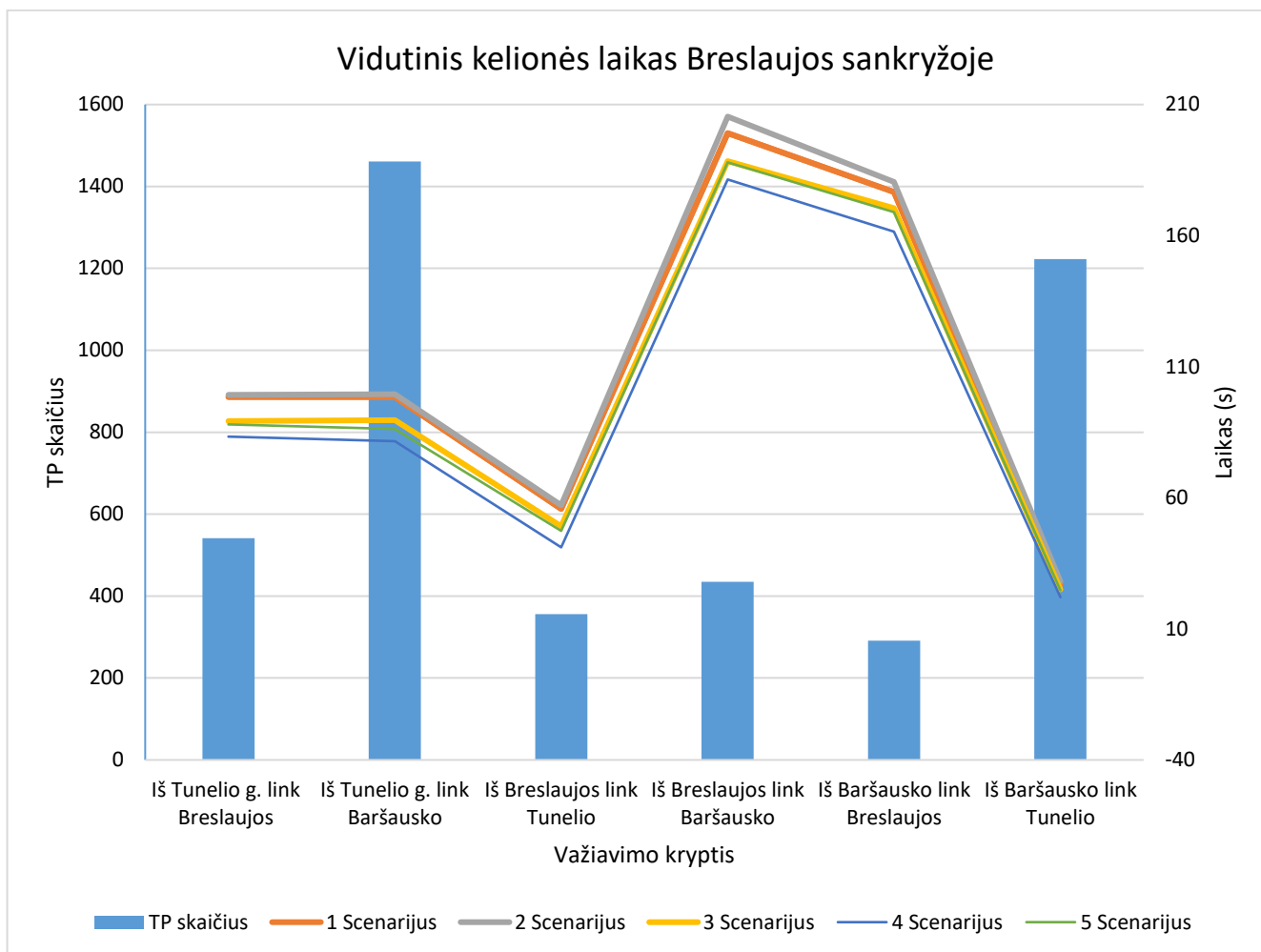
1. kai 100 % modelio transporto priemonių yra įprastos transporto priemonės;
2. kai 100 % transporto priemonių yra atsargus AT tipo;
3. kai 100 % transporto priemonių yra normalus AT tipo;
4. kai 100 % transporto priemonių yra agresyvus AT tipo;
5. kai 50 % transporto priemonių yra įprastos ir 50 % yra agresyvaus AT tipo.

Taigi 2, 3 ir 4 scenarijuose imituojamas trijų skirtingų autonominių transporto priemonių lygių poveikis eismo srautui. Penktasis scenarijus simuliuoja AT įtaką, kai tokios transporto priemonės eismo sraute yra sumaišomos su įprastomis transporto priemonėmis, kas būtų realiausiai tikėtina, kai AT taps plačiai prieinamu daugumai žmonių. Pirmasis scenarijus imituoja įprastų transporto priemonių elgesį sankyžose. Šiuose modeliavimuose naudojami realūs esami Kauno miesto sankryžų transporto priemonių duomenys, kurie buvo surinkti natūriniu būdu. Tyrime naudojami duomenys buvo surinkti įprastinę savaitę, trečiadienį, rytinio piko metu t. y. 07.30 – 08.30 val. laiko tarpe.

Šiame skyriuje yra vertinami pateikiami šių penkių scenarijų transporto priemonių vidutiniai kelionės, stovėjimo spūstyje ir kelionės pailgėjimo laikai, transporto srauto eilių ilgio modeliavimo rezultatai.



40 pav. Breslaujos sankryžos simuliacija PTV Vissim

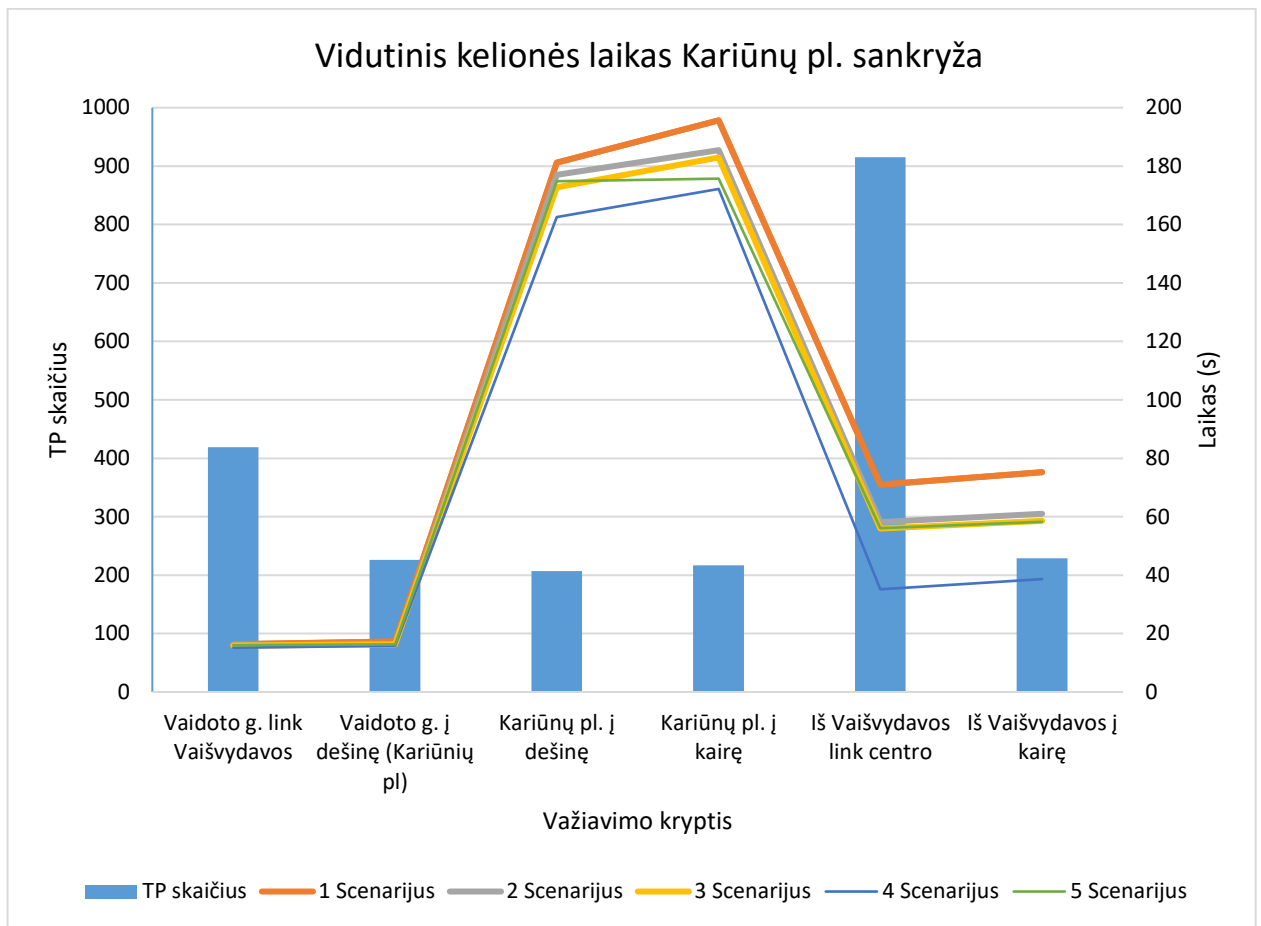


41 pav. Vidutinis kelionės laikas Breslaujos sankryžoje

Modeliavimo rezultatai 41 ir 42 paveiksluose rodo skirtingų scenarijų vidutinį kelionės laiką, kuris yra matuojamas nuo transporto priemonės įvažiavimo į sankryžos ruožą (200 m prieš sankryžą) iki kol transporto priemonė išvažiuoja iš šio ruožo (200 m už sankryžos).

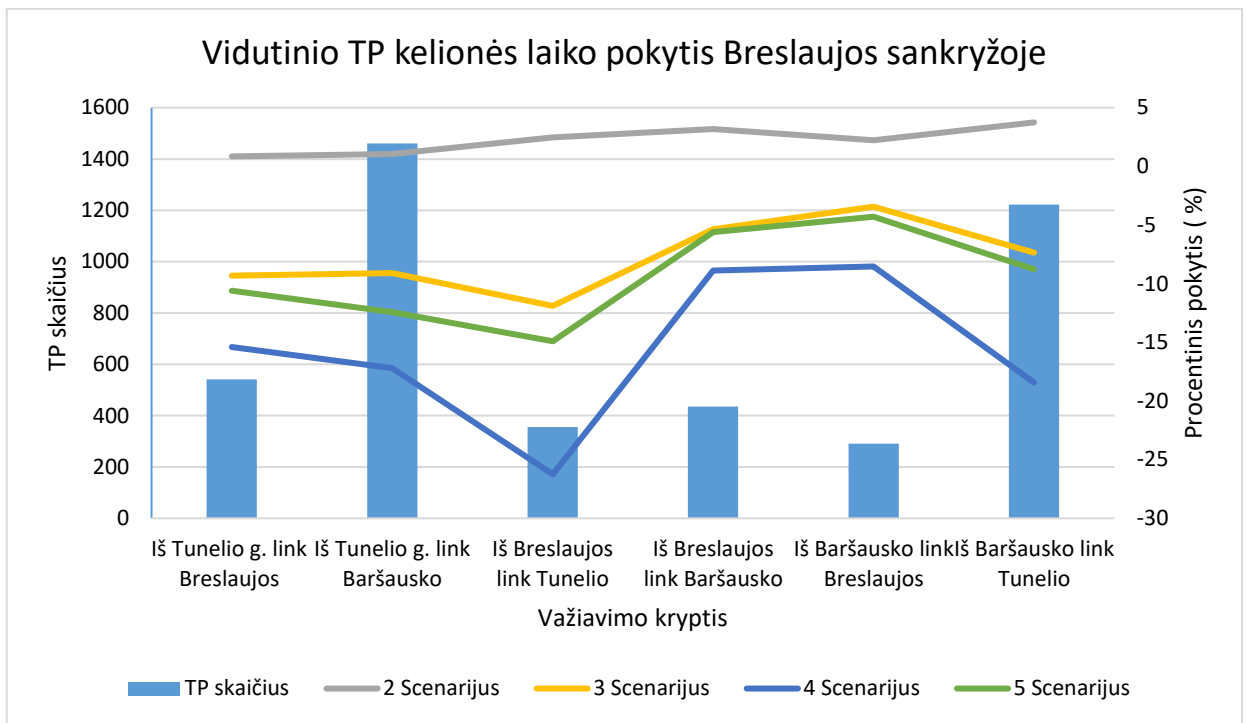
Taip pat, pateikiami ir 43 bei 44 paveikslai, kuriuose iškliai matoma, kad 3, 4 ir 5 scenarijuose transporto kelionės laikai sumažėja palyginti su originaliu, t. y. įprastų TP scenarijaus atveju (1 scenarijaus).

Verta pastebėti, kad Breslaujos ir Tunelio g. kryptimi 4 scenarijumi kelionės laikas sumažėja daugiau negu 25 procentais, kas sudaro 14,5 sekundės vienai transporto priemonei, o iš Kariūnų pl. kitoje sankryžose transporto priemonių kelionės laikas sumažėja net 15 sekundžių.

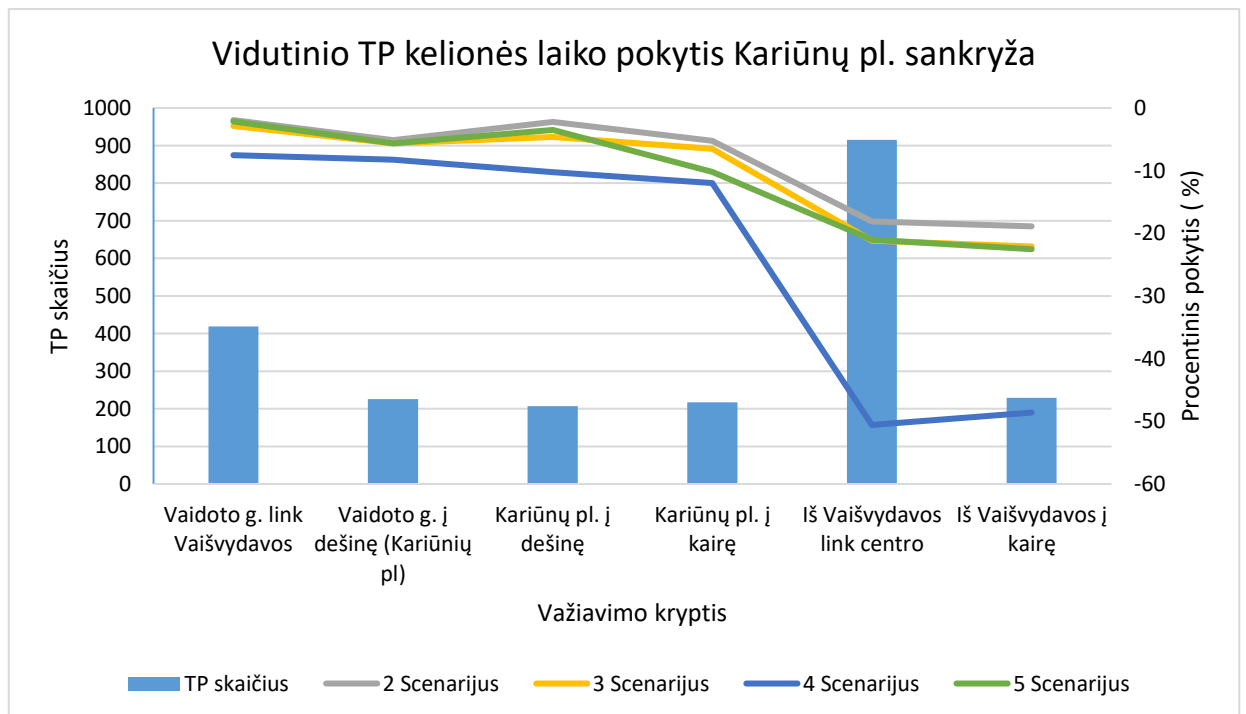


42 pav. Vidutinis kelionės laikas Kariūnų pl. sankryžoje

Vidutinio transporto priemonių kelionės laiko sankryžose grafikai rodo, kad autonominis transportas 3 ir 4 scenarijuose suteikia pranašumą prieš įprastines transporto priemones šiame tyrime, nes konkrečiai sankryžos srautus daro efektyvesnius. Taigi 5 scenarijuje, kur 50 procentų transporto priemonių yra įprastinės ir 50 procentų AT agresyvaus tipo, kitaip tariant, mišrios sudėties eismo srautas paveiksluose abiems nagrinėjamsi atvejais iki 15 procentų sumažina laiką, reikalingą įveikti sankryžą transporto priemonei.



43 pav. Vidutinio kelionės laiko pokytis procentais Breslaujos sankryžyje

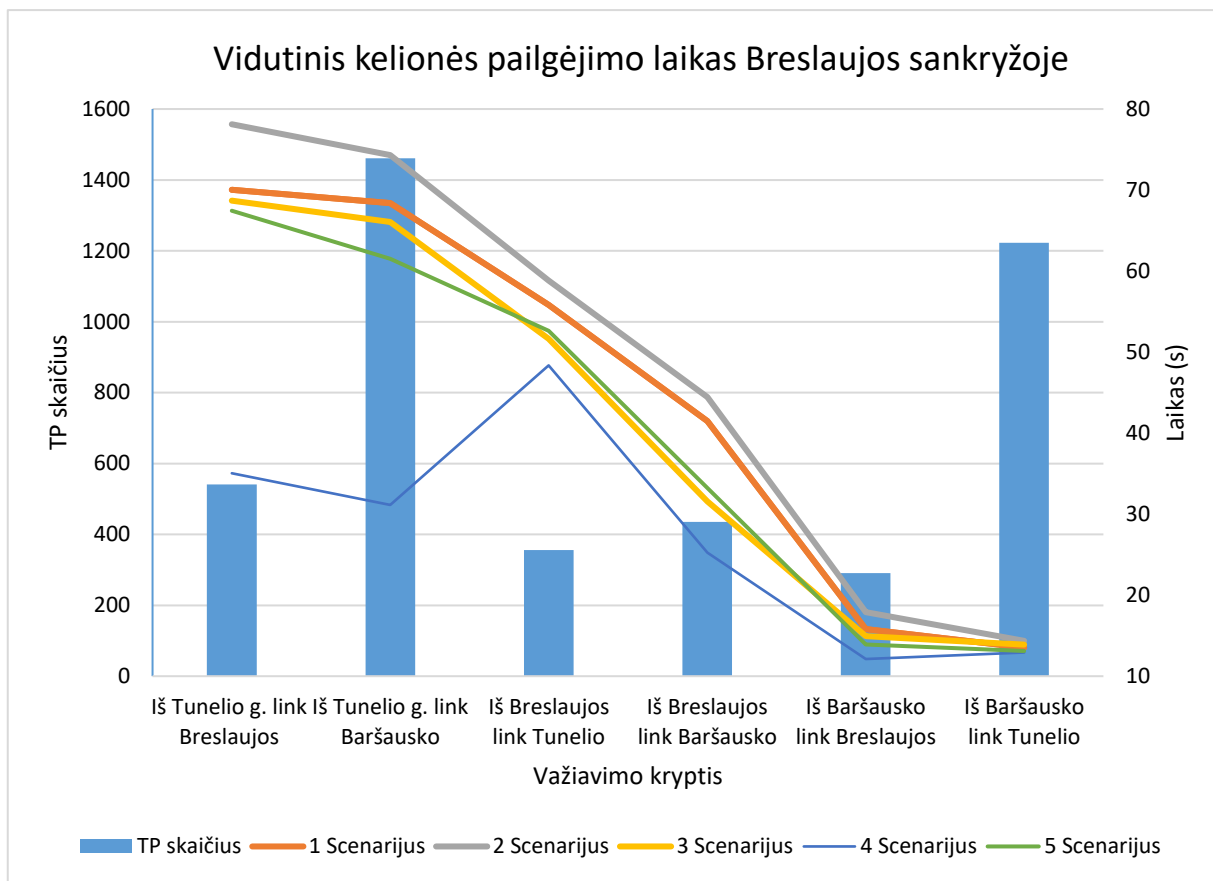


44 pav. Vidutinio kelionės laiko pokytis procentais Kariūnų pl sankryžyje

Pažvelgus į 45 paveikslą, galima matyti, nagrinėjamų scenarijų, vidutinį kelionės pailgėjimo laiką, kuris skaičiuojamas kaip skirtumas tarp idealaus numatyto laiko tarpo, per kurį transporto priemonės turi įveikti sankryžą ir faktinio laiko, per kurį buvo nuvažiuotas nustatytas atstumas sankryžoje.

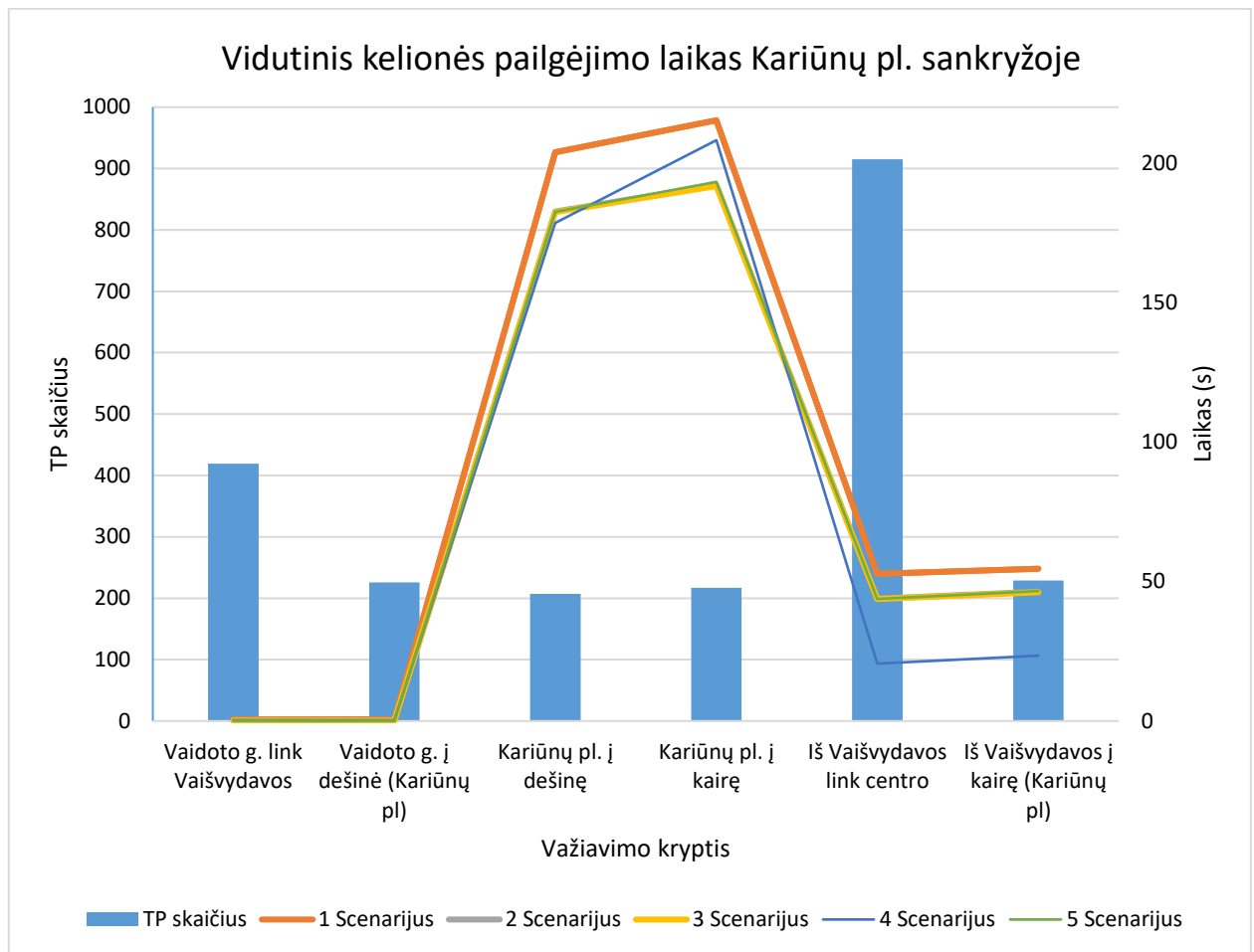
Galima pastebėti, kad didžiausias kelionės pailgėjimo laikas yra 2 scenarijuje, kur atsargaus tipo AT tik padidina šį laiką lyginant su įprastinėmis transporto priemonėmis. Ypatingai tai išryškėja Tunelio

ir Breslaujos g. kryptyje, kur keliaudami automobiliai sugaišta papildomas 8 sekundes, kai tuo tarpu 100 % autonominio transporto agresyvaus tipo sutaupo 35 sekundes laiko.



45 pav. Vidutinis kelionės pailgėjimo laikas Breslaujos sankryžoje

Žiūrint į Kariūnų pl. sankryžos situaciją 46 paveiksle matyti, kad AT visai neblogai susitvarko su užduotimis nereguliuojamoje sankryžoje, o ypatingai kryptyje iš Vaišvydavos į centrą, agresyvaus tipo AT sugeba sumažinti kelionės pailgėjimo laiką beveik 36 sekundėmis.

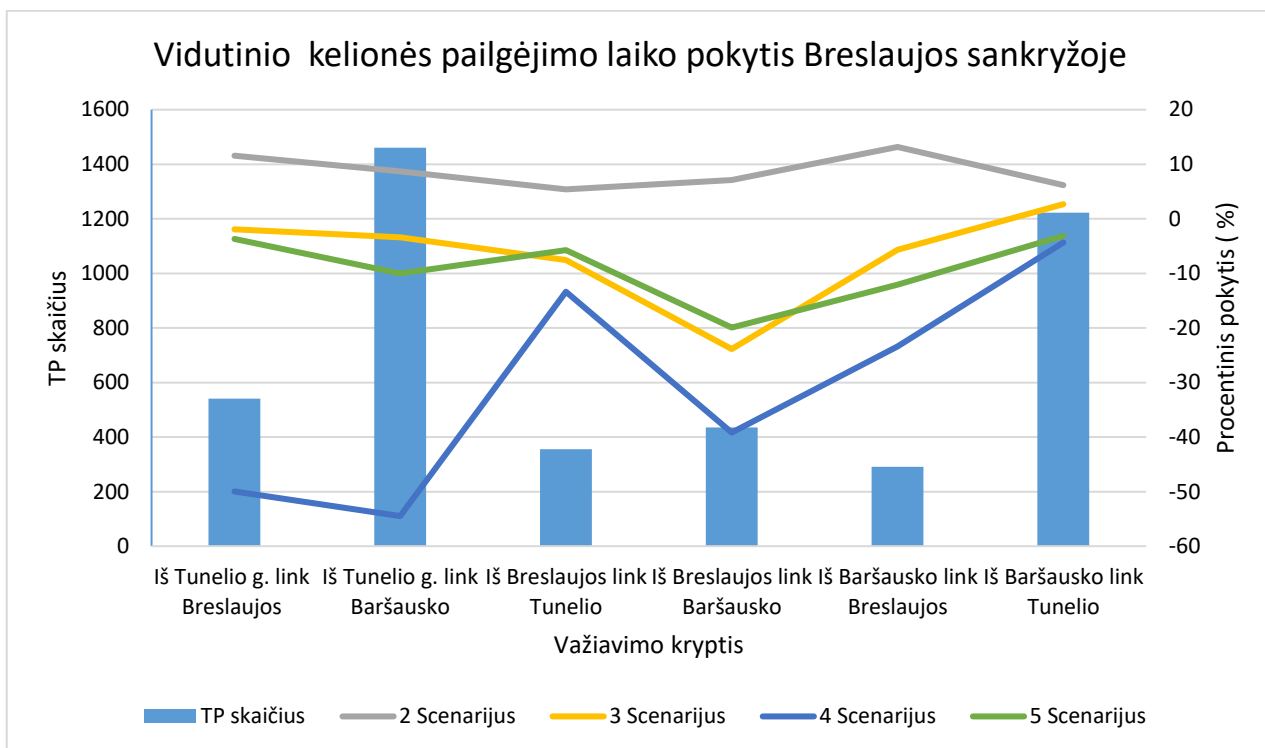


46 pav. Vidutinis kelionės pailgėjimo laikas Kariūnų pl. sankryžoje

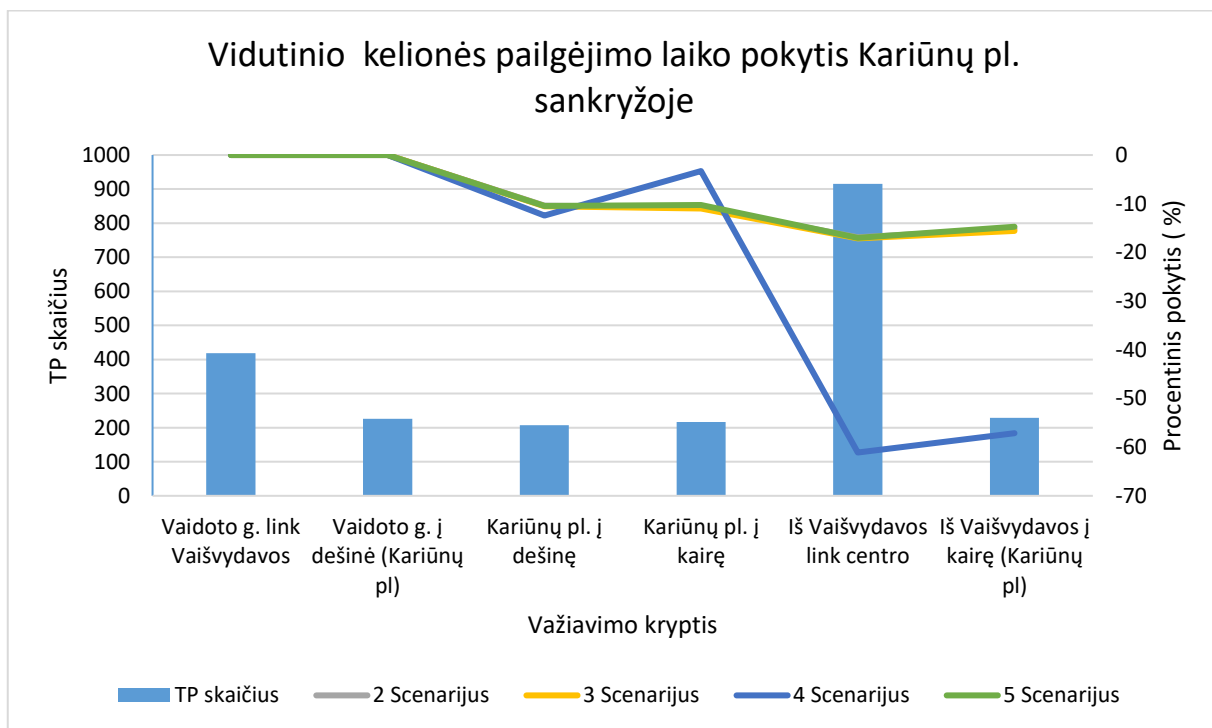
Nagrinėjant vidutinio kelionės pailgėjimo laiko pokyčio duomenis 47 paveiksle, iš karto pastebima, kad Breslaujos sankryžoje, kryptyje Tunelio – Baršausko g. yra daugiau negu 50 % sutrumpinamas kelionės pailgėjimo laikas, kas yra net 37 sekundės. Taip pat neblogas rezultatas ir kryptyje iš Breslaujos link Baršausko g. ir siekia beveik 35 %, taip sumažindamas nenaudingą eismui laiką. 5 scenarijus, kurio grafikas visas yra žemiau 0 ribos, rodo, kad mišri transporto sudėtis, susidedanti iš AT ir įprastinių automobilių kelionės pailgėjimo laikus mažina ir gerina eismo srauto laidumą.

Ilgesniame laikotarpyje AT gali sumažinti kelionės vėlavimą reguliuojamoje sankryžoje, kaip matyti iš 4 ir 5 scenarijų. Tačiau galima matyti, kad atsargus AT (2 scenarijus), tikėtina, dėl didesnių tarpų tarp transporto priemonių turi didžiausią transporto priemonių vėlavimo laiką palyginti su kitais scenarijais.

Stebint 48 paveiksle pavaizduotą Kariūnų pl. sankryžos grafiką, iš karto pastebima, kad virš 50 % pokytis pastebimas kryptyse iš Vaišvydavos, kur eismui tenka mažiausiai laiko stovėti. O kryptyje iš Vaidoto g. link Vaišvydavos pokyčio nėra, nes ten nėra ir jokio faktinio kelionės pailgėjimo.

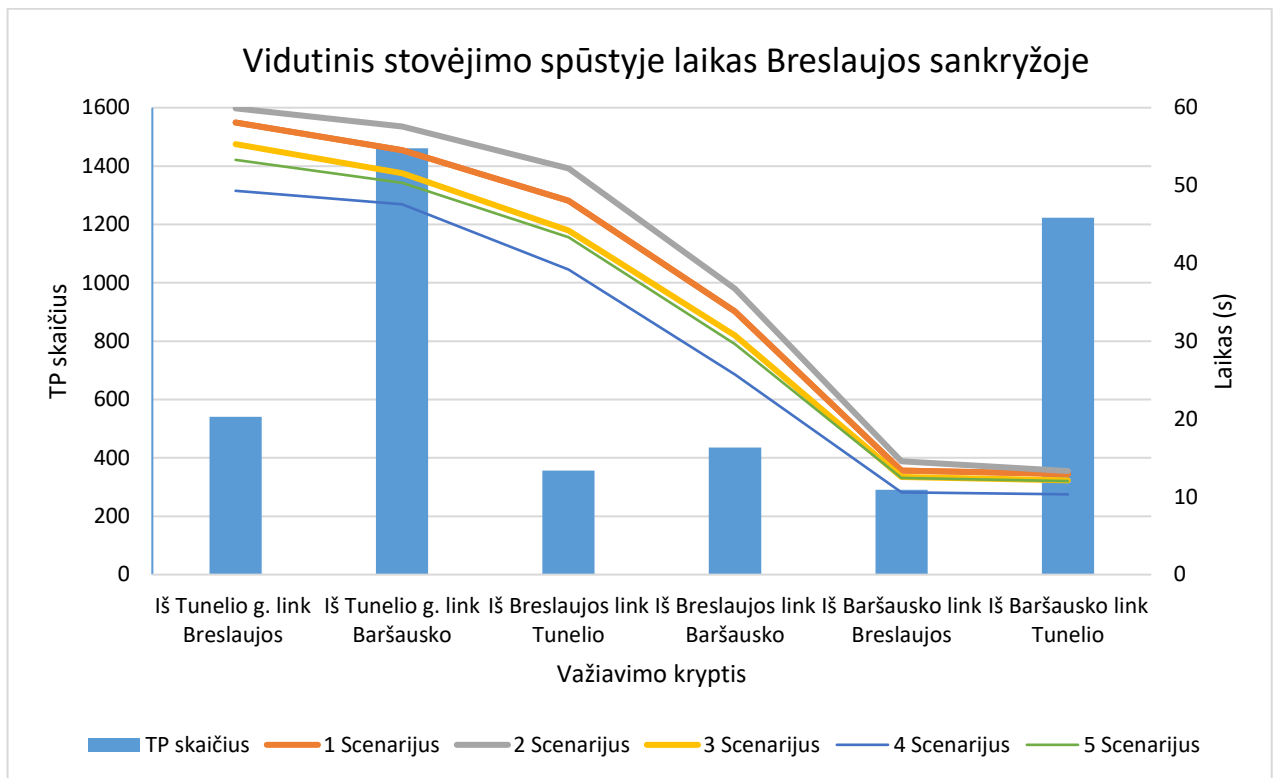


47 pav. Vidutinio kelionės pailgėjimo laiko pokytis Breslaujos sankryžoje



48 pav. Vidutinio kelionės pailgėjimo laiko pokytis Kariūnų pl. sankryžoje

49 paveikslo, Breslaujos g. sankryžos grafike, yra palyginamas kiekvieno scenarijaus vidutinis stovėjimo spūstyje laikas su baziniu scenarijumi, kuris yra 1 scenarijus. Pavyzdžiui, pagal 4 scenarijų važiuojant iš Tunelio g. link Baršausko g. pastebima, kad agresyvaus tipo AT vidutiniškai spūstyje praleis apie 47 sekundes, o tai yra beveik 13 % mažiau negu tuo atveju jeigu eismą sudaryti tik įprastinės transporto priemonės. Be to, pagal 3 scenarijų normalaus tipo AT sugeba sumažinti vidutinį laiką praleista eismo spūstyje maždaug 8 %.



49 pav. Vidutinis stovėjimo spūstyje laikas Breslaujos sankryžoje

Pažvelgus į 50 paveikslą, galima iš karto suprasti, kad AT turi didelį poveikį transporto priemonių stovėjimo laikui spūstyse, nes visi scenarijai (2-5 scenarijai) kuriuose yra AT turi ryškų laiko pranašumą prieš įprastines transporto priemones. Ypač 4 scenarijus, kur kryptyje iš Kariūnų pl. į dešinę pusę yra didžiausias laiko skirtumas nuo įprastinių transporto priemonių, 44 sekundžių skirtumas stovėjimo spūstyse.

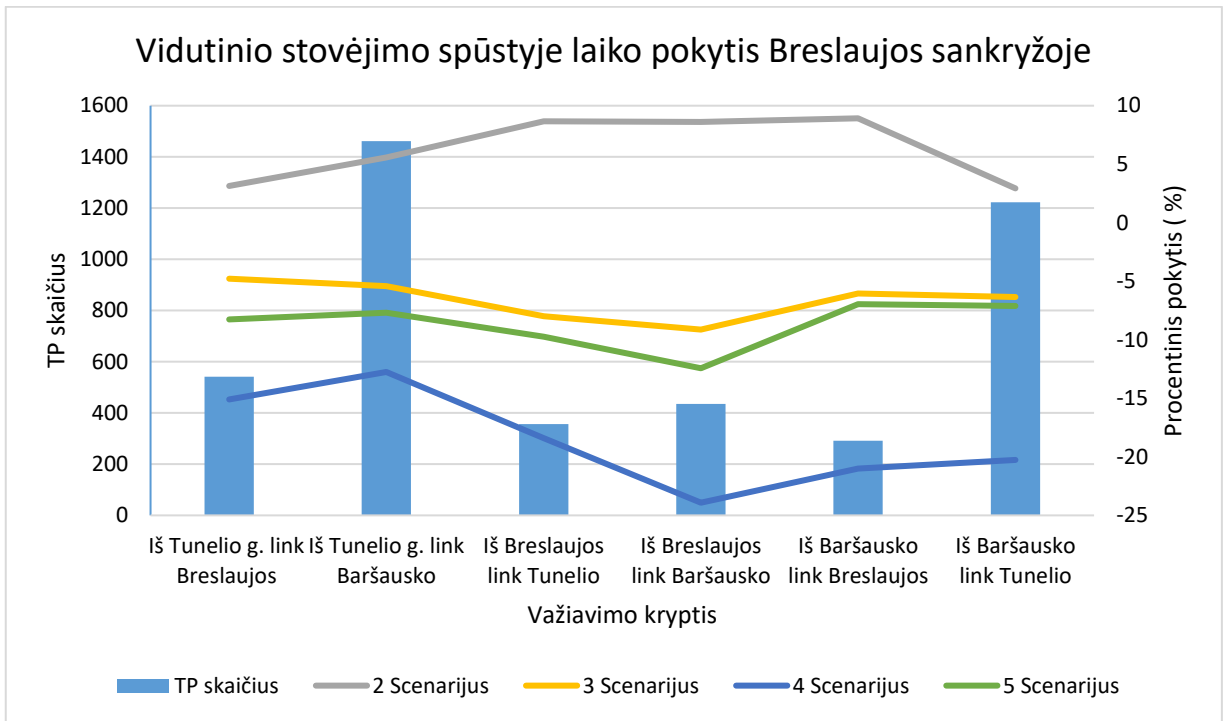


50 pav. Vidutinis stovėjimo spūstyje laikas Kariūnų pl. sankryžoje

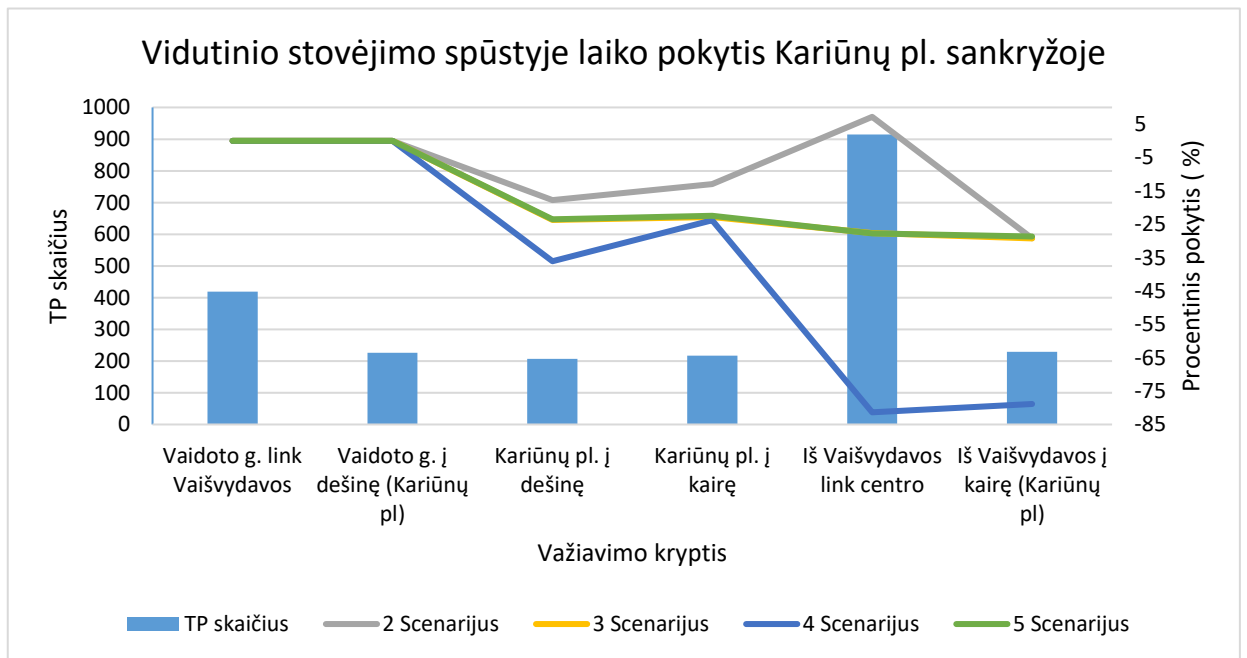
Be to, žiūrint į 50 paveikslą, scenarijaus su įprastais automobiliais ir AT, judėjimo kryptimi Breslaujos g. link Baršausko, vidutinis stovėjimo eilėje laikas sumažėjo daugiau negu 12 %, turint omenyje 24 % sumažėjimą, kai srautą sudaro 100 % AT.

Vienintelis, 2 – asis scenarijus yra nepalankus AT, kadangi jį sudaro atsargaus tipo AT, kuris palaiko didelius atstumus tarp eismo dalyvių, turi atsargius reakcijos laikus. Šiuo atveju, lyginant su tik įprastinėmis transporto priemonėmis, stovėjimo eilėje laikas išaugo 3-8 %, kaip galima matyti 51 paveiksle.

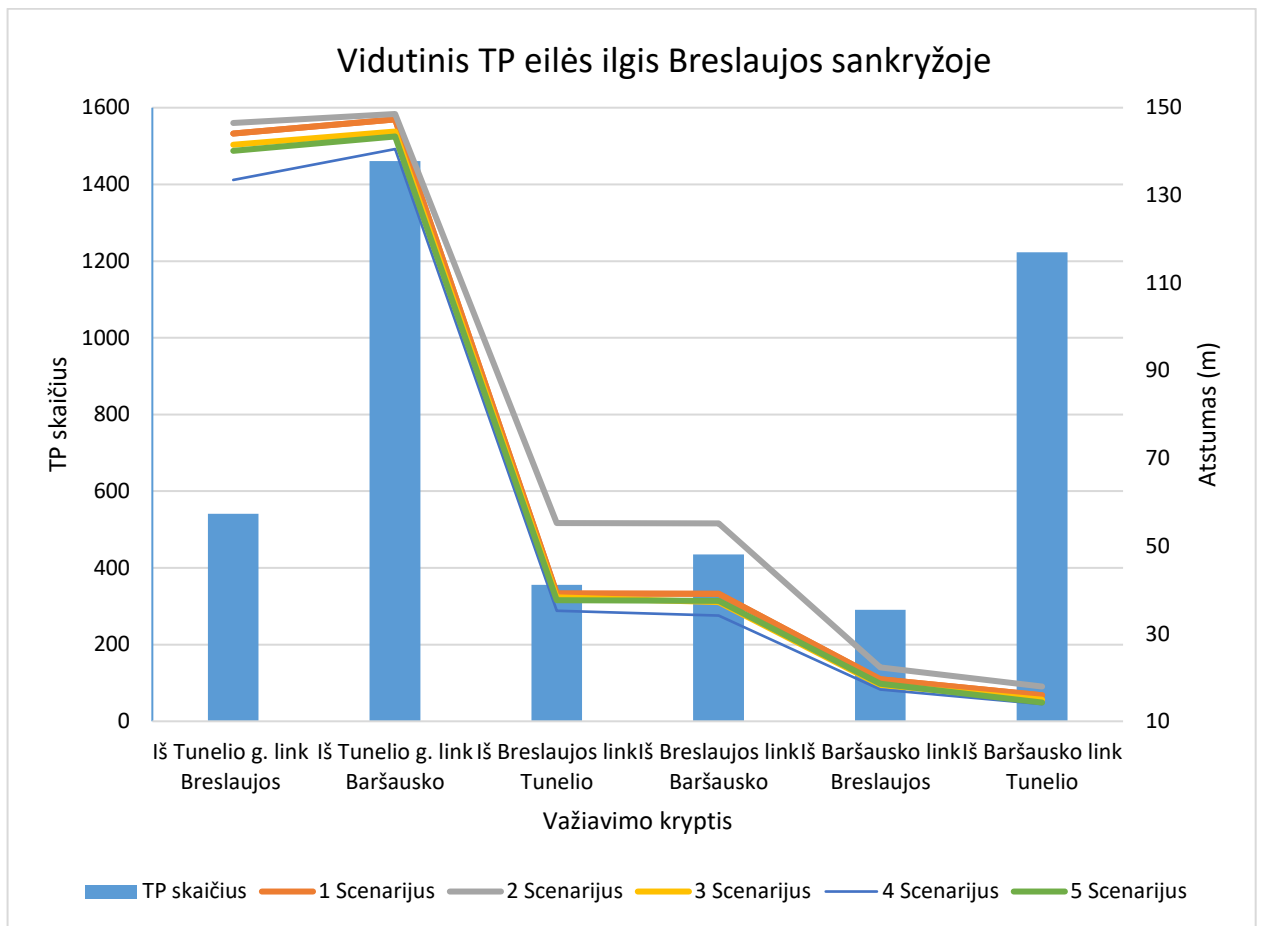
Mažiausiai vidutinis stovėjimo eilėje laikas kinta tose kryptyse, kuriose automobilių skaičius yra mažiausias. Tai galima paaiškinti, kad esant mažam eismo intensyvumui, nėra didelio efektyvumo naudojant normalaus ir agresyvaus tipo AT, palyginti su įprastomis transporto priemonėmis. Kaip pavyzdys, 200 automobilių Baršausko – Breslaujos gatvių kryptyje ir 1768 automobiliai Tunelio – Baršausko g. kryptyje. AT pranašumai tampa labiau atpažįstami, kai didėja eismo apimtys ir didėja transporto priemonių tarpusavio sąlyčiai. Kalbant apie Kariūnų pl. sankryžą, atsargus, normalus AT ir mišrus transporto srautas turi labai panašius pokyčio rezultatus, kur ryškiai išsiskiria



51 pav. Vidutinio stovėjimo spūstyje laiko pokytis Breslaujos sankryžoje



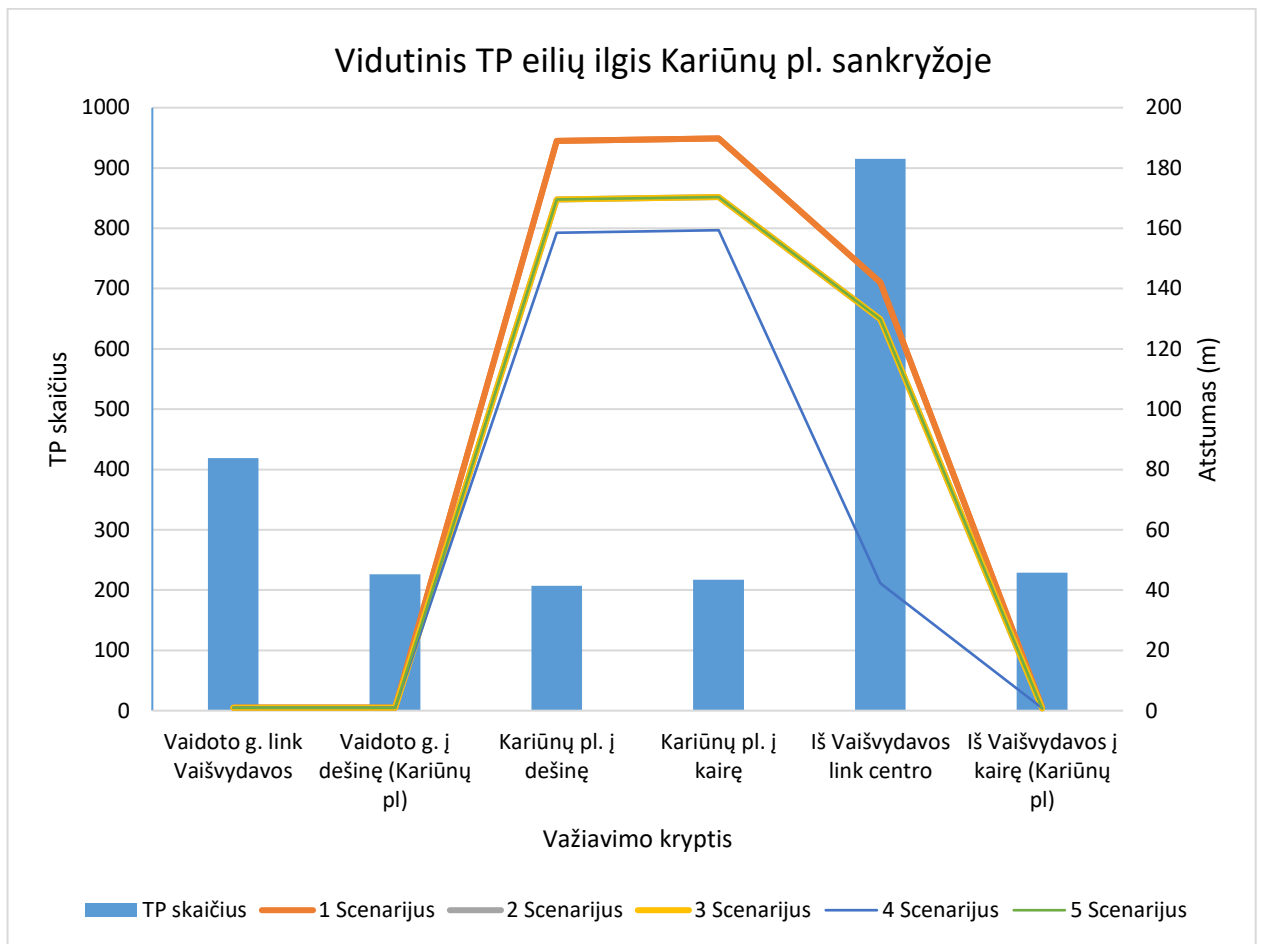
52 pav. Vidutinio stovėjimo spūstyje laiko pokytis Kariūnų pl. sankryžoje



53 pav. Vidutinis transporto priemonių eilės ilgis Breslaujos sankryžoje

53 ir 54 paveiksluose atsispindi vidutinis transporto priemonių eilių ilgis Breslaujos ir Kariūnų pl. sankryžose visais nagrinėjamais atvejais. Mažiausia automobilių eilė yra fiksuojama Baršausko – Tunelio g. kryptimi ir siekia apie 14 m ir visais scenarijuose išlieka panaši. Ilgiausia transporto spūsties eilė, kaip galima matyti iš pateikto grafiko, yra ten kur ir didžiausias automobilių srautas – kryptyje iš Tunelio į Baršausko g. ir siekia atitinkamai nuo 140 iki 148 metrų ilgio. Galima matyti, kad ir čia pakankamai neblogai AT susidoroja su šiuo iššūkiu, iškyrus atsargaus AT atveju, kurių atveju, automobilių eilės yra ilgiausios.

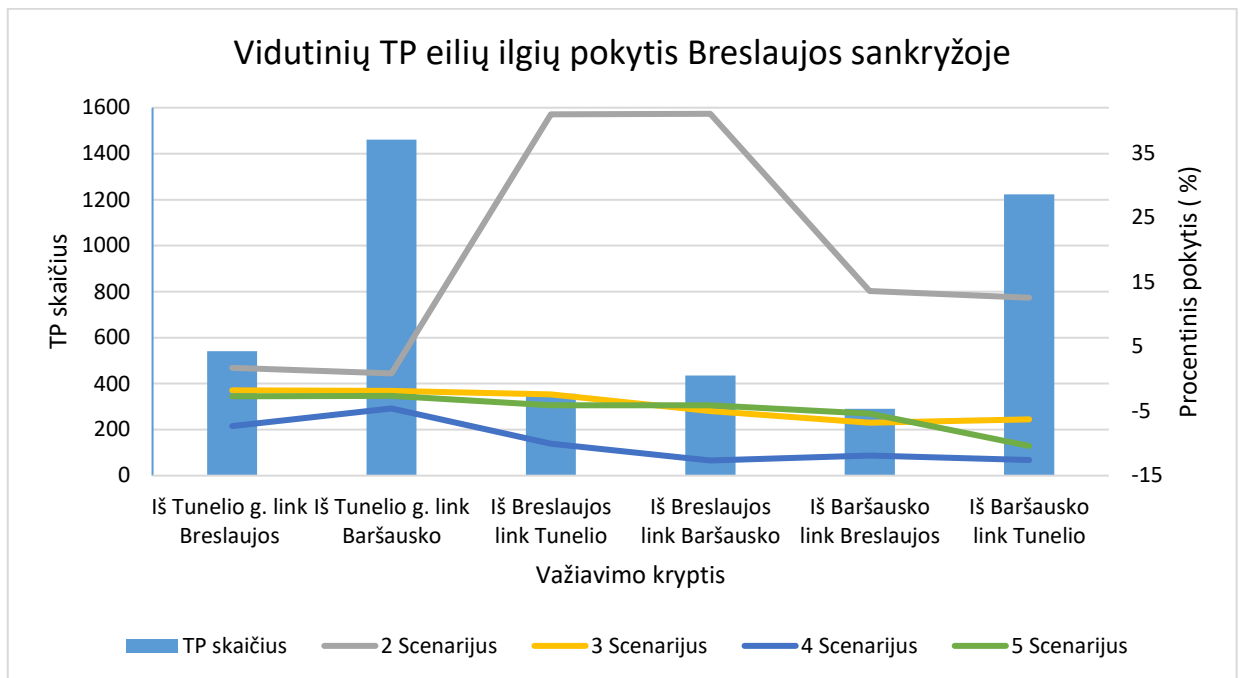
Šviesoforais nereguliuojamoje, Kariūnų pl. sankryžoje pastebima, kad agresyvaus tipo AT sudaro trumpiausias transporto priemonių eiles ir mažina spūsčių susidarymą, lyginant su įprastų automobilių eismo srautu. Kryptyje iš Vaišvydavos link centro įprastų automobilių srautas piko metu sudaro 142 m ilgio automobilių eilę, kai tuo tarpu 4 scenarijuje AT sudaro tik 42 m ilgio automobilių eilę.



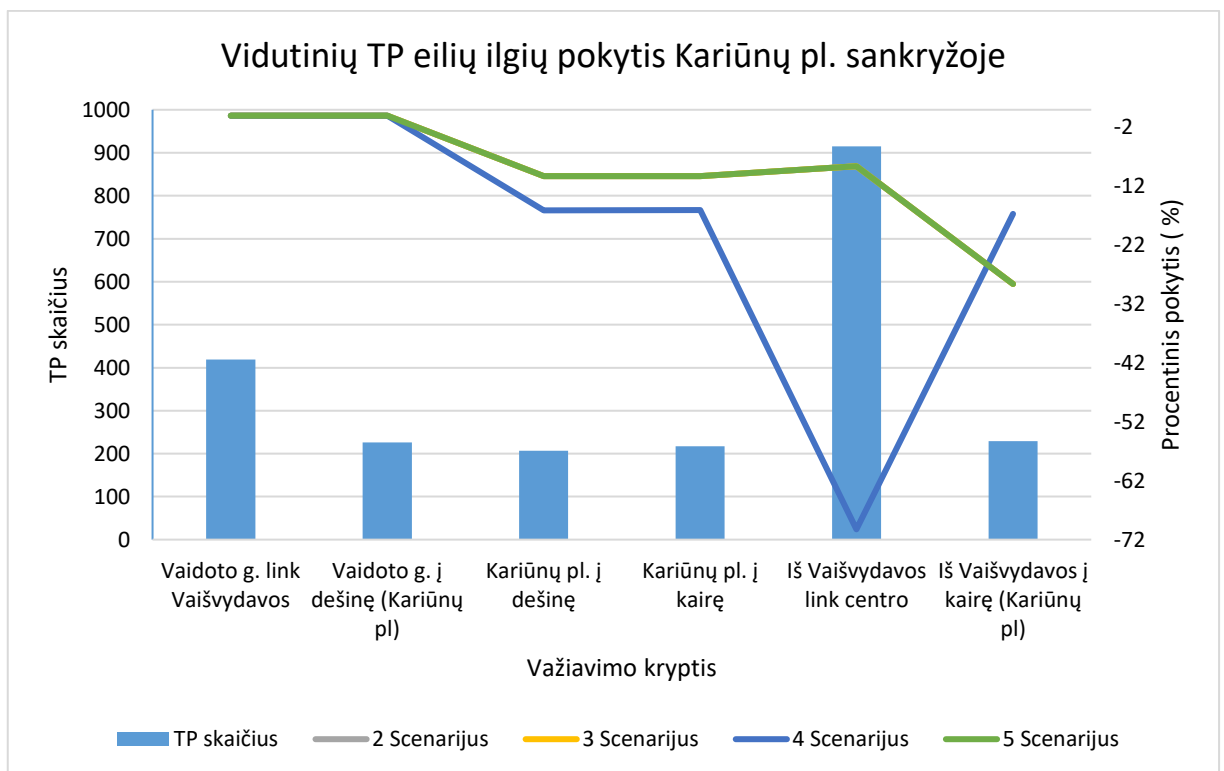
54 pav. Vidutinis transporto priemonių eilės ilgis Kariūnų pl. sankryžoje

Toliau pateiktuose 55 ir 56 paveiksluose galima matyti grafikus, rodančius vidutinio transporto priemonių eilių ilgio pokyčio rezultatus, išreikštus procentais. Didžiausi pokyčiai kaip matome iš grafiko 55 paveiksle, yra 2 scenarijaus, kur vien iš atsargaus tipo AT sudarytas eismo srautas iš Breslaujos gatvės, sukuria net 41 % ilgesnes transporto priemonių eiles ir dar kartą liudija, kad atsargaus tipo AT nesukuria galimybių sumažinti transporto priemonių spūstis, o tik jas padidina. Tačiau pažvelgus į agresyvaus tipo AT kreivę grafike, rezultatai matomi visai priešingi, kur visose kryptyse transporto priemonių eilių ilgiai yra sumažinami 5 – 12 procentų.

Kariūnų pl. sankryžos situacijoje, 4 scenarijus patvirtina agresyvaus tipo AT pranašumą prieš įprastines TP, kur geba sumažinti eiles spūstys 10 – 70 %. Įspudingas rezultatas atsispindi kryptyje iš Vaišvydavos link miesto centro, kur mažai trukdomas eismo srautas, judėdamas pastoviu greičiu, ir sinchronizuotai aukščiausio išmanumo lygmens AT atveju, gali ženkliai sumažinti eismo spūstis šioje nereguliuojamoje sankryžoje. Tiesa, šiuo atveju, šioje kryptyje, TP važiuoja tiesiai arba turi pasukti į kairę, prieš tai praleidžiant link Vaišvydavos vykstančias transporto priemones ir joms reikia tik informacijos, kad juos tos TP praleis, ką agresyvaus tipo AT sugeba padaryti.

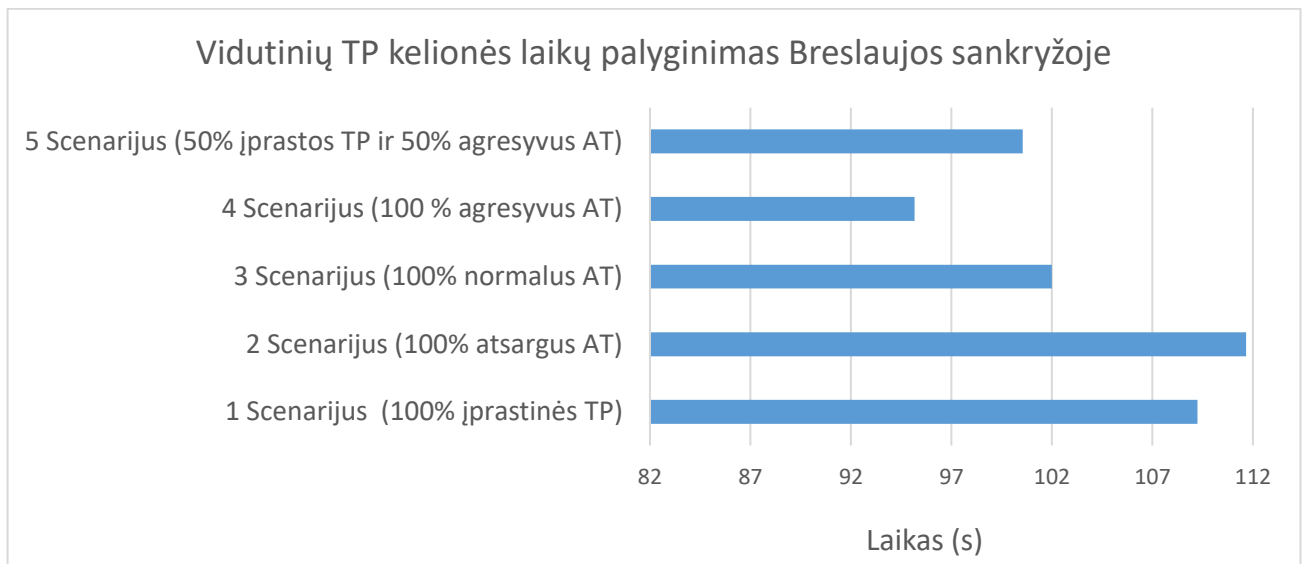


55 pav. Vidutinių transporto priemonių eilių ilgių pokytis Breslaujos sankryžoje



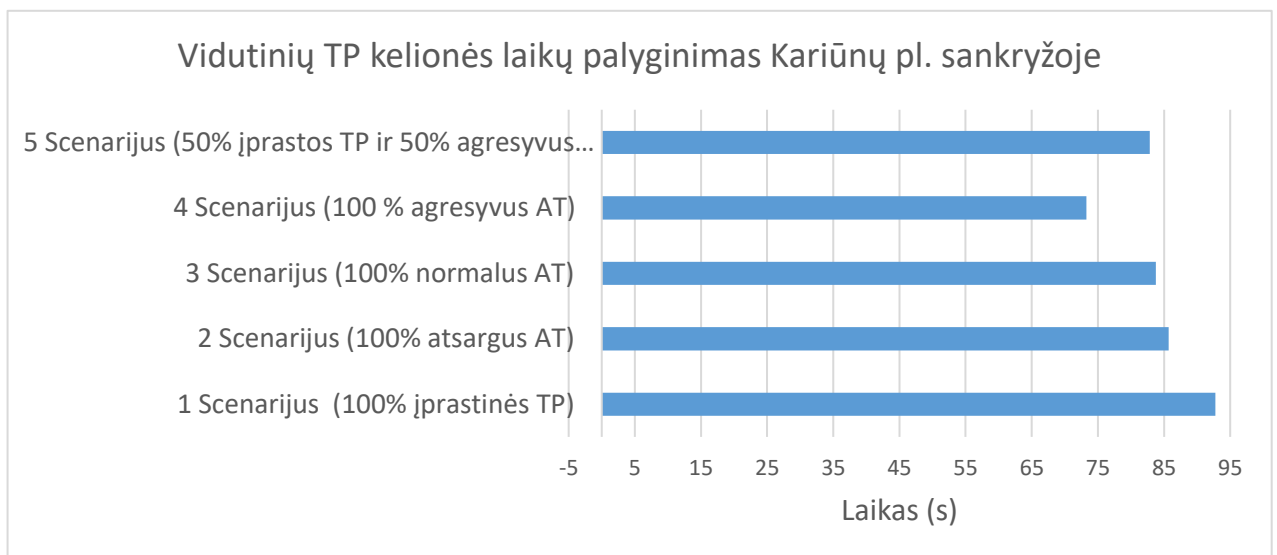
56 pav. Vidutinių transporto priemonių eilių ilgių pokytis Breslaujos sankryžoje

Toliau yra palyginami visų penkių nagrinėjamų scenarijų rezultatai vidutinio kelionės laiko, kelionės laiko pailgėjimo, stovėjimo laiko spūstyje ir transporto priemonių eilių ilgių atvejais. Taigi, 57 paveiksle galima matyti, kad Breslaujos sankryžoje mišri transporto priemonių sudėtis, kai eismo srautą sudaro 50 % įprastinės ir 50 % agresyvaus tipo AT suteikia galimybes sumažinti vidutinį kelionės per sankryžą laiką 9 sekundėmis, palyginti su vien iš įprastų automobilių sudarytu eismo srautu.



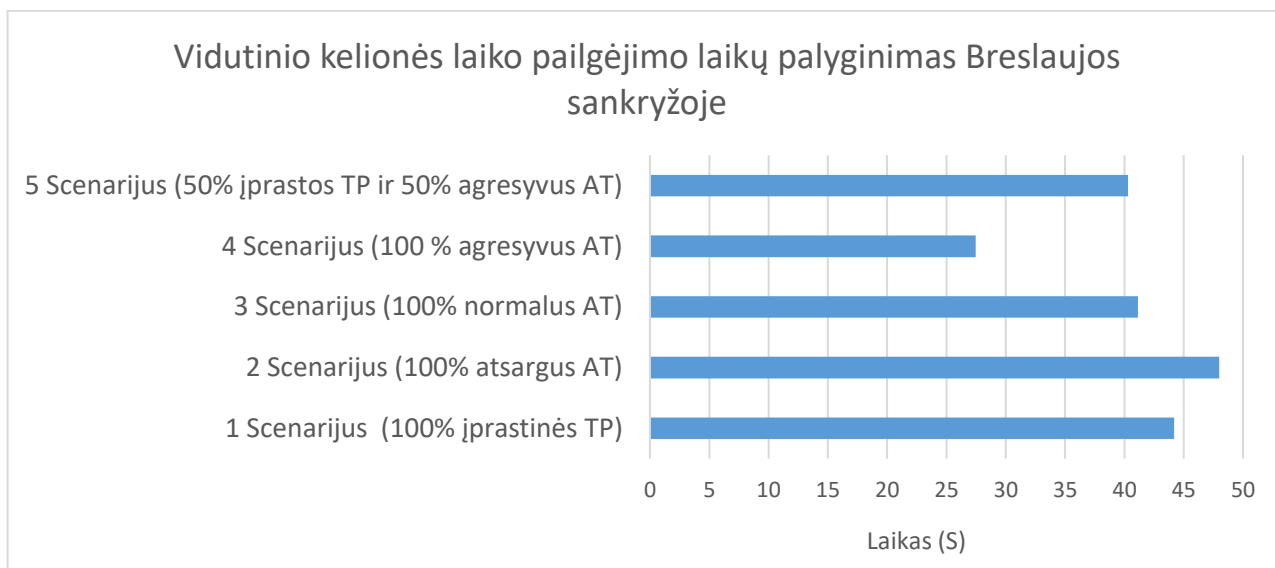
57 pav. Vidutinių transporto priemonių kelionės laikų palyginimas Breslaujos sankryžoje

Kariūnų pl., nereguliuojamoje sankryžoje, tokia transporto sudėtis 5 scenarijaus atveju suteikia galimybes 10 sekundžių sumažinti kelionės per sankryžą laiką, kas rodo labai gerą rezultatą.



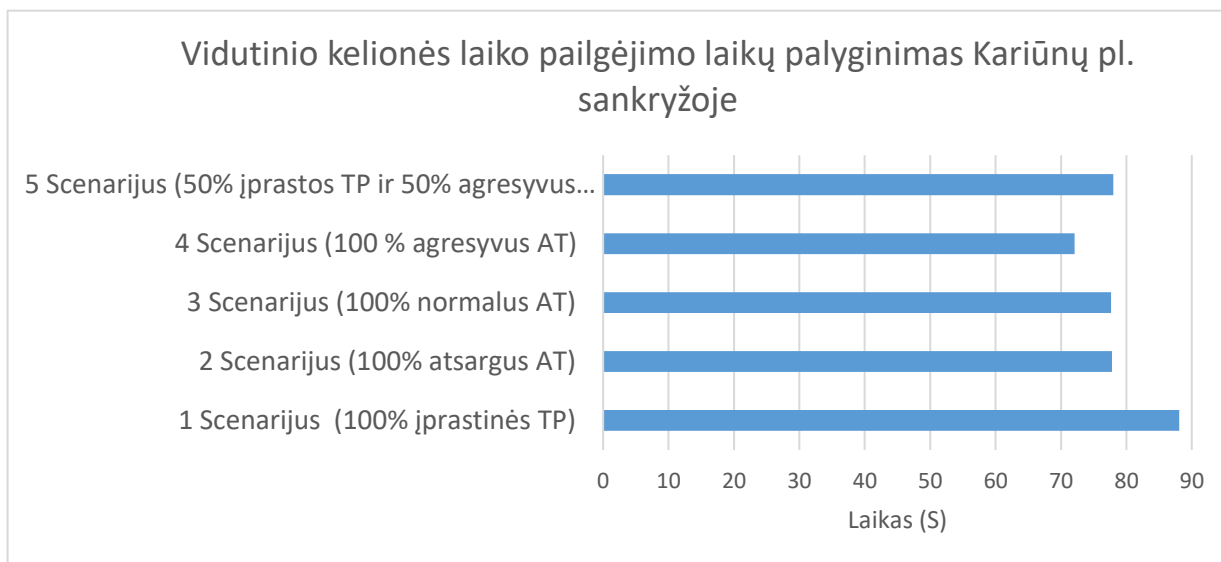
58 pav. Vidutinių transporto priemonių kelionės laikų palyginimas Kariūnų pl. sankryžoje

59 ir 60 paveiksluose yra matomi vidutinio kelionės laiko pailgėjimo laikų palyginimo grafikai. Čia ir vėl AT rodo neblogus rezultatus. 3, 4 ir 5 scenarijų atvejais, kai transporto sraute yra normalaus ir agresyvaus tipo AT sumažina kelionės laiko pailgėjimo laiką lyginant tik su įprastinėmis transporto priemonėmis valdomomis žmonių. Laikas sumažinamas 1 – 27 sekundėmis, kas realiu atveju ženkliai padidintų sankryžos pralaidumą.



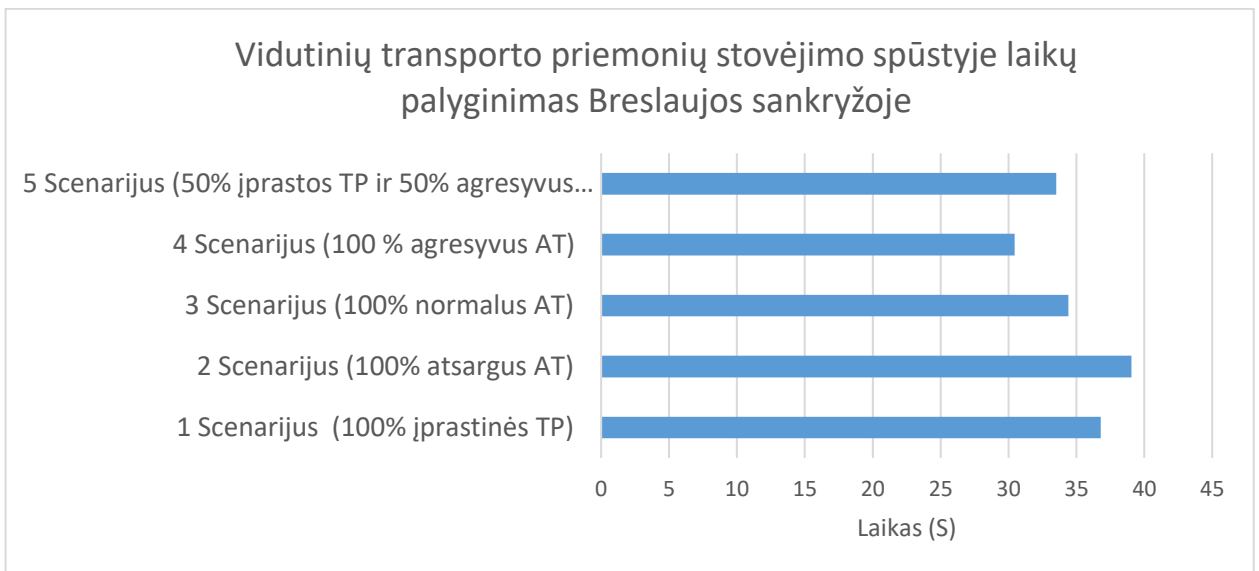
59 pav. Vidutinio kelionės laiko pailgėjimo laikų palyginimas Breslaujos sankryžoje

5 scenarijaus atveju, kuris yra labiausiai tikėtinas realiame pasaulyje, geresnis rezultatas yra pasiekiamas tik nereguliuojamojoje Kariūnų pl. sankryžoje, kur vidutinis TP kelionės laiko pailgėjimo laiko pokytis lyginant su 1 scenarijumi yra mažesnis ir siekia 10 s.



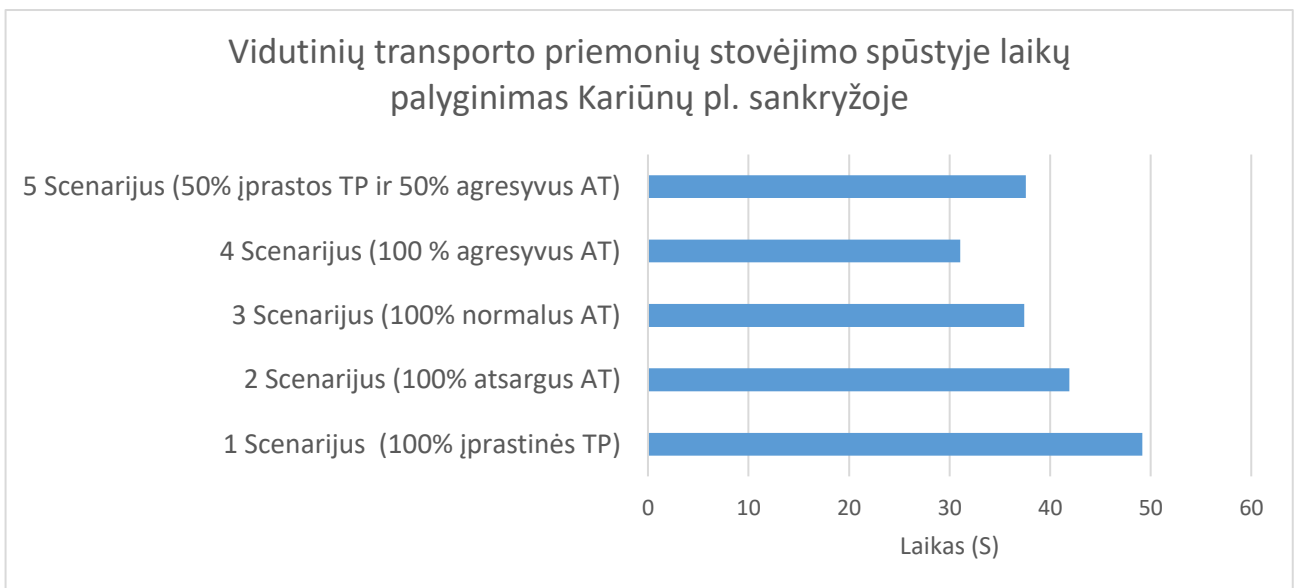
60 pav. Vidutinio kelionės laiko pailgėjimo laikų palyginimas Kariūnų pl. sankryžoje

61 paveiksle galima taip pat pastebėti, kad AT gali sumažinti ir transporto priemonių stovėjimo spūstyje laiką. Breslaujos sankryžoje 4 scenarijaus atveju yra sutaupoma daugiau negu 7 sekundės, kurios daug prisideda prie spūsčių mažinimo. 5 scenarijuje yra sutaupomos 4 sekundės. Šiame paveiksle taip pat matyti, kad atsargus AT tik padidina laiką praleistą spūstyje.



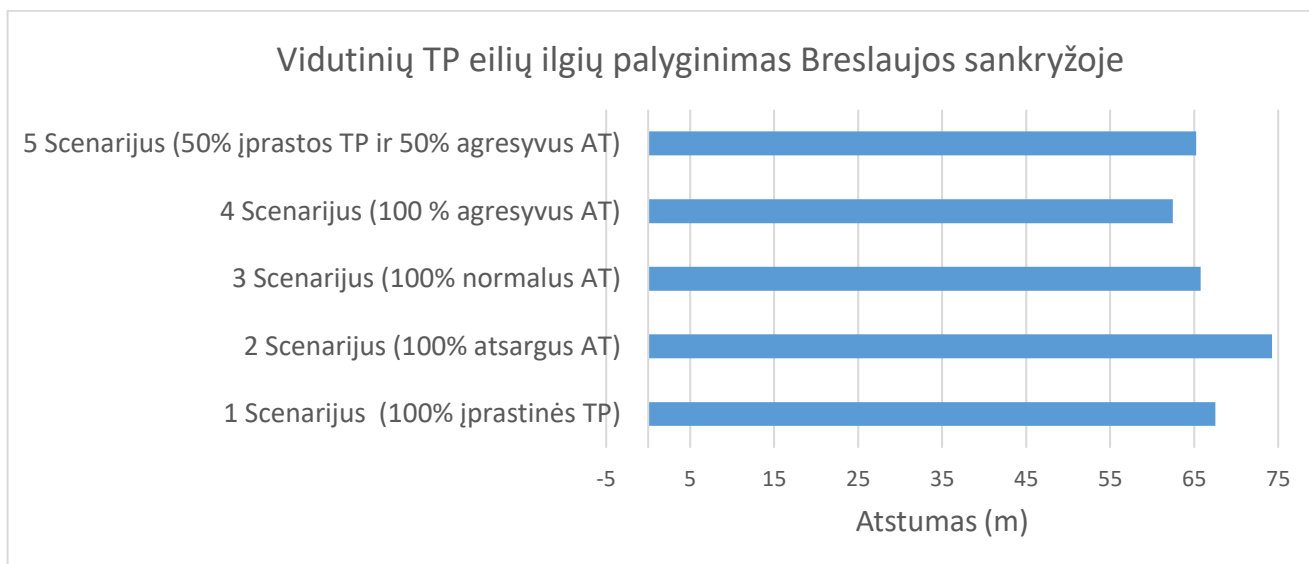
61 pav. Vidutinių transporto priemonių stovėjimo spūstyje laikų palyginimas Breslaujos sankryžoje

Kariūnų pl. sankryžoje, kaip matyti iš 62 paveikslo, 5 scenarijaus atveju, sutaupomos daugiau negu 12 sekundžių laiko praleisto spūstyje. Verta pažymėti, kad 4 scenarijuje sutaupomos net 18 sekundžių. Šiame paveiksle galima pastebėti, kad 2 scenarijaus atveju yra taip pat sutaupoma laiko lyginant su 1 scenarijumi.



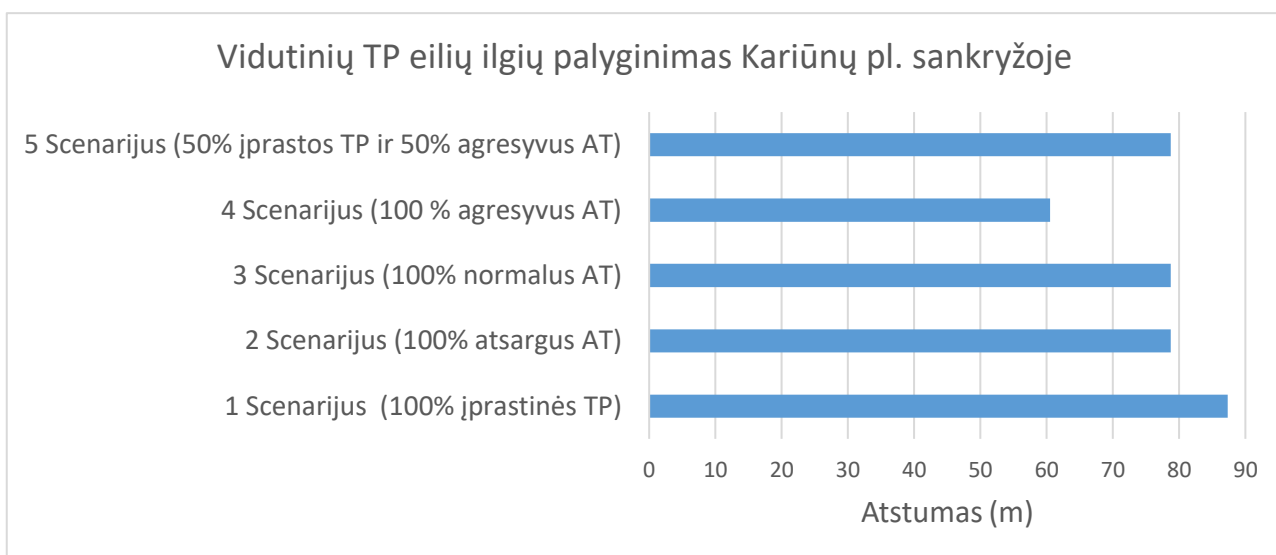
62 pav. Vidutinių transporto priemonių stovėjimo spūstyje laikų palyginimas Kariūnų pl. sankryžoje

63 paveiksle galima matyti, labai panašias tendencijas kaip ir kituose rodikliuose. Kalbant apie vidutinius transporto priemonių eilių ilgius, Breslaujos sankryžoje ženklaus eilių ilgio sumažėjimo nematyti. Vis dėl to, 4 scenarijaus atveju transporto priemonių eilių ilgis sumažėjo 5 metrais, kas taip pat gana geras rezultatas.



63 pav. Vidutinių transporto priemonių eilių ilgių palyginimas Breslaujos sankryžoje

Kariūnų pl. sankryžoje, kur nėra šviesoforų, agresyvaus tipo AT eismo sudėties atveju, automobilių eilių ilgis sumažėja net 27 metrais. Tai reiškia, kad šviesoforų nebūvimas leidžia labiau pasitelkti komunikaciją tarp AT ir vykdyti visą eismą sklandžiau.

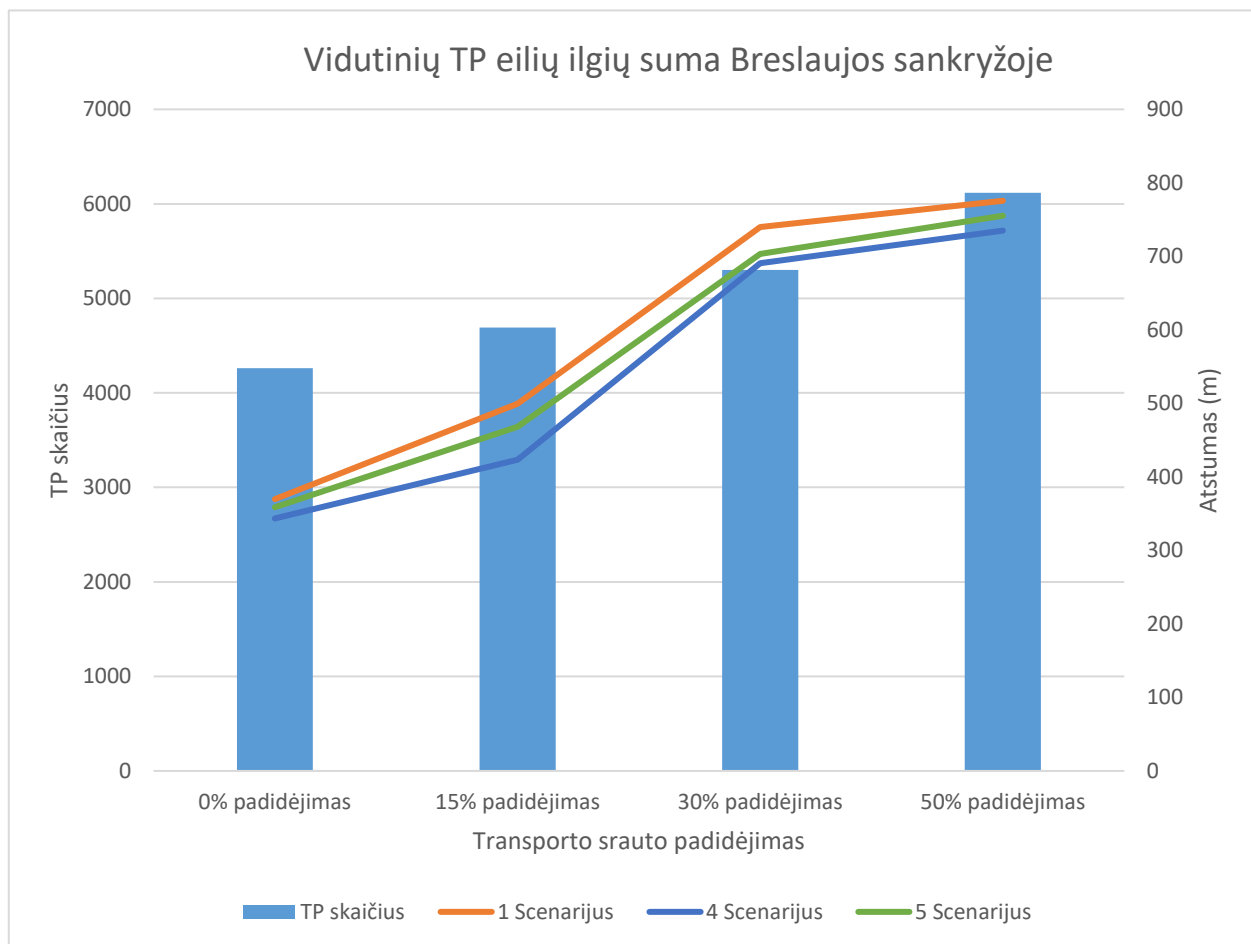


64 pav. Vidutinių transporto priemonių eilių ilgių palyginimas Kariūnų pl. sankryžoje

Tyrimo pabaigoje yra atliekama sankryžų jautrumo analizė. Šiam tyrimui labiausiai tinkama jautrumo analizė yra susijusi su vidutinių transporto priemonių eilių ilgių suma, kur yra skaičiuojami visose konkrečios sankryžos kryptyse esantys transporto priemonių eilių ilgiai, neišskiriant konkrečios judėjimo trajektorijos. 0 % padidėjimas tai yra bazinis TP skaičius sankryžoje, naudojamas viso tyrimo metu. Toliau transporto priemonių srautas sankryžos judėjimo trajektorijose yra padidinamas 15 %, 30 % ir galiausiai padidinamas 50 %. Stebimi labiausiai tinkami scenarijai tai 1 scenarijus kai visos TP sraute yra įprastinės, 4 scenarijus, kai 100 % TP yra agresyvaus tipo AT ir 5 scenarijus, kai eismo srautą sudaro mišrus transportas.

Breslaujos g. sankryžos atveju, kaip matome iš 65 paveikslo, didžiausias skirtumas susidaro padidinus eismo srautą 30 %. Automobilių eilių ilgiai padidėja apie 400 metrų, lyginant su baziniu scenarijumi.

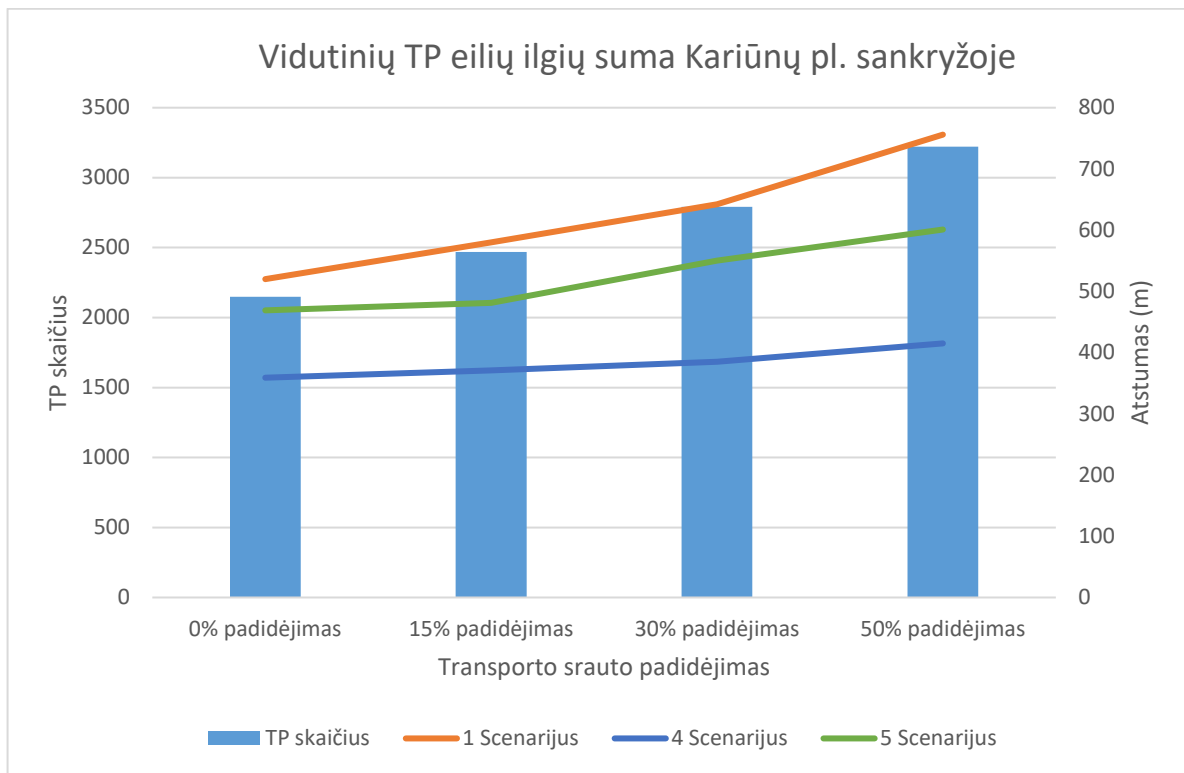
Padidėjimas srauto iki 50 % prideda visai nežymų atstumą, visais nagrinėjamaisiais scenarijais. Taigi, galime aiškiai matyti, kad AT didelio poveikio nepadaro, didėjant eismo srautui, nes padidinus srautą iki 50 %, TP eilių ilgis padidėja dvigubai.



65 pav. Jautrumo analizė Breslaujos sankryžoje

66 paveiksle atspindi Kariūnų pl. sankryžoje atlikti jautrumo analizė. Suskaičiuojami visi automobiliai važiuojantys per sankryžą visomis kryptimis, bei visose kryptyse susiformavusių transporto priemonių spūsčių (eilių) ilgiai. Jautrumo analizė rodo, kad tik nereguliuojamoje sankryžoje AT turi labai daug pranašumų prieš įprastines, žmogaus valdomas transporto priemones, nes didinant eismo srautą, TP eilių ilgiai didėja labai nežymiai, palyginus su 1 scenarijuje esančiomis įprastinėmis transporto priemonėmis. Agresyvaus tipo AT eilių ilgį padidino tik 16 %. Tai reiškia, kad AT gali ženkliai sumažinti eismo spūstis šviesoforais nereguliuojamose sankryžose.

Palyginimui 5 scenarijaus kreivė, kai srautą sudaro mišrios transporto priemonės, taip pat, nėra greitai kylanti į viršų didėjant srautui, kas rodo AT atsparumą transporto priemonių didėjančiams skaičiumi sankryžos eisme.



66 pav. Jautrumo analizė Kariūnų pl. sankryžoje

Vertinant sukurto modelio patikimumą, buvo suskaičiuotos visos transporto priemonės abejose sankryžose, kiekvienoje eismo juostoje, ir gauti rezultatai palyginami su gautais atliekant natūrinę informacijos rinkimą realiomis sąlygomis. Kariūnų pl. sankryžos atveju didžiausias neatitikimas yra fiksuojamas kryptyje iš Vaišvydavos link centro ir sudaro 6 %, o mažiausias neatitikimas, siekiantis tik 0,5 % – kryptyje iš Kariūnų pl. į dešinę. Bendras sankryžos eismo srauto neatitikimas siekia 4 %.

Atsižvelgus į Breslaujos g. sankryžos rezultatus, didžiausias neatitikimas su realiais matavimais tenka kryptiai Tunelio g. – Breslaujos g. ir siekia net 19 %, kai tuo tarpu mažiausias neatitikimas fiksuojamas Breslaujos – Baršausko g. kryptyje ir siekia tik 1,4 %. Bendras šios sankryžos eismo srauto neatitikimas yra 9,7 %. Taigi, atsižvelgiant į tokius rezultatus, verta pažymėti, kad šių modelių patikimumas yra pakankamas atliekant tyrimus su autonominėmis transporto priemonėmis.

Išvados

1. Vairuotojų sprendimų priėmimas ir nenuspėjamas bei įvairus jų reakcijos laikas įvairiose situacijose gerokai prisideda prie didesnio laiko praleisto spūstyse, o ypatingai sankryžose. Pilnai automatizuotos transporto priemonės leidžia joms važiuoti pastoviu norimu greičiu ir laikytis mažesnio saugaus atstumo nuo priešais važiuojančio automobilio. Todėl naudojant autonomines transporto priemones, žmogiškosios klaidos ir vėlavimai būtų sumažinti iki minimumo, kas padėtų pagerinti sankryžų efektyvumą, nes sumažintų laiką praleistą transporto spūstyse.
2. Mikroskopinių tyrimų rezultatai rodo, kad normalaus ir agresyvaus tipo AT minimaliai gali sumažinti – vidutinį transporto priemonių kelionės per sankryžą laiką 7-18 %, vidutinį kelionės pailgėjimo laiką 6-14 %, vidutinį stovėjimo spūstyje laiką 6-13 %, vidutinį transporto priemonių eilių ilgį 4-12 %. Todėl visi šie rezultatai gali reikšti, kad eismo spūstys miesto sankryžose sumažės, nes tendencijos yra tokios, kad AT skaičius pasaulyje tik didės.
3. Atliktas tyrimas taip pat atskleidė, kad pereinamuoju laikotarpiu, kai AT keliuose važinės kartu su įprastomis TP, tiek šviesoforais reguliuojamos tiek ir nereguliuojamos sankryžos bus efektyvesnės palyginti su eismo srautu, kai jame vyrauja tik įprastos TP. Tyrime gauti 5 scenarijaus rezultatai rodo, kad reguliuojamoje sankryžoje probleminės krypties vidutinis stovėjimo spūstyje laikas gali sumažėti daugiau negu 8 %, kas sudaro apie apie 8 sekundes, o nereguliuojamoje sankryžoje – 22 %, kas sudaro net 28 sekundes.
4. Šio tyrimo rezultatai taip pat rodo, kad didesnę efektyvumą ir atsparumą didėjančiam eismo srautui turi nereguliuojamos sankryžos, per jas važiuojant agresyvaus tipo AT. Vidutinių transporto eilių ilgių suma reguliuojamoje sankryžoje sumažėjo tik 5 m, lyginant su nereguliuojama sankryža, kai TP eilių ilgis sumažėjo 27 m. Eismo srauto didinimo iki 50 % atveju, reguliuojamoje sankryžoje transporto eilės išaugo dvigubai, lyginant tik su 16 % eilių ilgio išaugimu nereguliuojamos sankryžos atveju. Labai tikėtina, kad AT pamažu prasiskverbs į transporto rinką, o galiausiai įprastinių TP bus laipsniškai atsisakoma ir būtent tada išryškės visi AT pranašumai. Agresyvaus tipo AT suteikia didžiausią efektyvumą sankryžoms, nes gali reikšmingai sumažinti transporto eiles ir sutaupyti dalį laiko, skirtą joms įveikti.
5. Reikia pabrėžti, kad šis tyrimas yra pagrįstas tik kompiuterinio modeliavimo scenarijais, kurie simuliuoja realias eismo situacijas. Patys rezultatai labai priklauso nuo vairuotojų elgsenos prielaidų bei skirtingos automobilių važiavimo logikos, įtrauktos į modeliavimo algoritmus programinėje įrangoje. Todėl dėl šių priežasčių tyrimo rezultatus rekomenduojama vertinti kritiškai.

Literatūros sąrašas

1. EUROSTAT. *Population demography migration projections data*. [interaktyvus]. 2020 [žiūrėta 2022-02-05]. Prieiga per: <https://ec.europa.eu/eurostat/web/population-demography-migration-projections/population-projections-data>
2. U.S. DEPARTMENT OF TRANSPORTATION. *Beyond Traffic 2045: Trends and Choices*. [interaktyvus]. 2017 [žiūrėta 2022-02-05] US Department of Transportation. Prieiga per: <https://www.transportation.gov/policy-initiatives/beyond-traffic-2045-final-report>
3. VOELCKER John. *1.2 Billion Vehicles On World's Roads Now, 2 Billion By 2035*. [interaktyvus]. 2019 [žiūrėta 2022-02-05] Prieiga per: https://www.greencarreports.com/news/1093560_1-2-billion-vehicles-on-worlds-roads-now-2-billion-by-2035-report
4. WORLD HEALTH ORGANIZATION. *Road Traffic Injuries*. [interaktyvus]. 2021 [žiūrėta 2022-02-05] Prieiga per: <https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/road-traffic-injuries>
5. FEDERAL HIGHWAY ADMINISTRATION. *Reducing Non-Recurring Congestion*. [interaktyvus]. 2019 [žiūrėta 2022-02-05]. Prieiga per: https://ops.fhwa.dot.gov/program_areas/reduce-non-cong.ht
6. HAITAO and BARIBOONSOMSIN. *Field operational testing of eco-approach technology at a fixed-time signalized intersection*. [interaktyvus]. 15th International IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems. 2012 [žiūrėta 2022-02-05]. Prieiga per: <https://ieeexplore.ieee.org/document/6338888>
7. BOONMAN Xavier. *Sustainable Investments in the Road Network Considering the Introduction of Automated Vehicles*. [interaktyvus]. 2016 [žiūrėta 2022-02-06]. Prieiga per: <https://www.witpress.com/Secure/elibrary/papers/SDP18/SDP18061FU1.pdf>
8. ALMEIDA Correia, GONÇALO Homem. *Vehicle automation and transport system performance: Introduction to transport and urban planning in the developed world*. [interaktyvus] 2016 [žiūrėta 2022-02-10]. Prieiga per: <https://zh.booksc.eu/book/64752181/65a2pe>
9. MORANDO, TIAN, TRUONG. *Studying the Safety Impact of Autonomous Vehicles Using Simulation-Based Surrogate Safety Measures*. [interaktyvus]. Journal of Advanced Transportation, Australia, 2018 [žiūrėta 2022-02-10]. Prieiga per: <https://www.digitaltrends.com/cars/history-of-self-driving-cars-milestones>
10. LIU Y, DENG W, WU D. *Research and Simulation on Cooperative Adaptive Cruise Control Vehicles Based on PTV VISSIM*. [interaktyvus]. 19th COTA International Conference of Transportation Professionals, China, 2019 [žiūrėta 2022-02-10]. Prieiga per: https://assets.researchsquare.com/files/rs-1523660/v1_covered.pdf?c=1649688189
11. BOHM F, HÄGER K. *Introduction of Autonomous Vehicles in the Swedish Traffic System. Effects and Changes Due to the New Self-Driving Car Technology*. [interaktyvus]. 2015 [žiūrėta 2022-02-10]. Prieiga per: <https://www.semanticscholar.org/paper/Introduction-of-Autonomous-Vehicles-in-the-Swedish-Bohm-H%C3%A4ger/ea2be6805b2adaba043df516e132f1289ce103cb>
12. DELOITTE. *What's ahead for fully autonomous driving. Consumer opinions on advanced vehicle technology*. [interaktyvus]. 2015 [žiūrėta 2022-02-10]. Prieiga per:

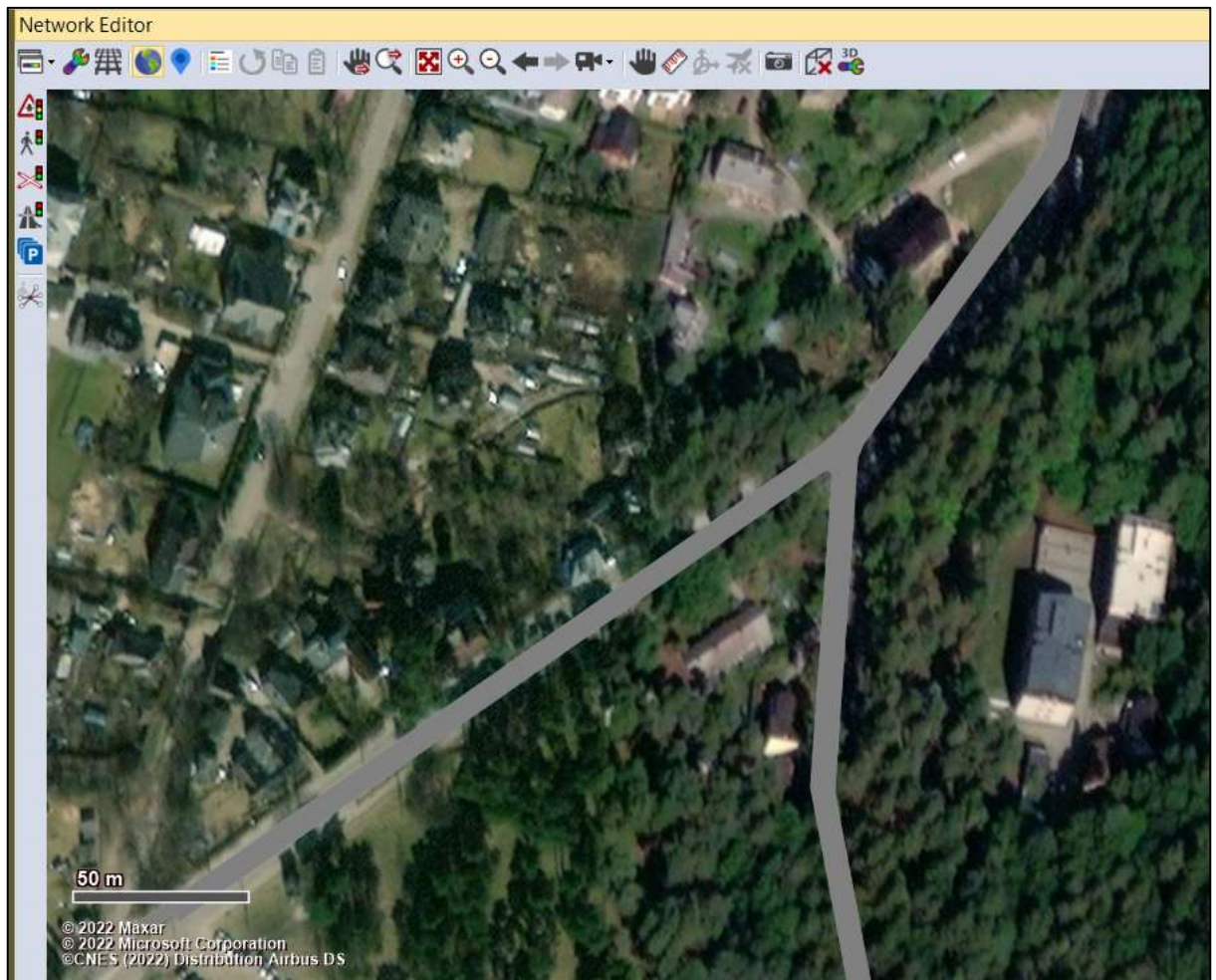
- <https://www2.deloitte.com/content/dam/Deloitte/us/Documents/manufacturing/us-manufacturing-consumer-opinions-on-advanced-vehicle-technology.pdf>
13. ALONSO R. M., CIUFFO B, MAKRIDIS M, THIEL C. *The r-evolution of driving: from Connected Vehicles to Coordinated Automated Road Transport (C-ART) Part I*. [interaktyvus]. 2017 [žiūrėta 2022-02-10]. Prieiga per: <https://publications.jrc.ec.europa.eu/repository/handle/JRC106565>
 14. MOTAMEDIDEHKORDI N, KRAUSE S, HOFFMANN S, BUSCH F, HARTMANN M, VORTISCH P. *Impact of Automated Vehicles on Capacity of the German Freeway Network*. [interaktyvus]. 2017 [žiūrėta 2022-02-10]. Prieiga per: https://www.researchgate.net/publication/320868890_Impact_of_Automated_Vehicles_on_Capacity_of_the_German_Freeway_Network
 15. MILLMAN R. *Connected cars report: 125 million vehicles by 2022, 5G coming*. [interaktyvus]. 2018 [žiūrėta 2022-02-12]. Prieiga per: <https://internetofbusiness.com/worldwide-connected-car-market-to-top-125-million-by-2022>
 16. OONK, M., SVENSSON J. *Roadmap: Automation in Road Transport*. [interaktyvus] Working Group Automation in Road Transport, funded by the European Commission, DG Connect, 2013 [žiūrėta 2022-02-11]. Prieiga per: <https://pb1lib.org/book/2837270/529843>
 17. SAE INTERNATIONAL. *About SAE International*. [interaktyvus]. 2019 [žiūrėta 2022-02-11]. Prieiga per: <https://www.sae.org/about/>
 18. SAE INTERNATIONAL. *Surface vehicle recommended practice*. [interaktyvus]. 2018 [žiūrėta 2022-02-11]. Prieiga per: https://wiki.unece.org/download/attachments/128418539/SAE%2520J3016_202104.pdf?Fapi%3Dv2&usg=AOvVaw0C5Ha0sTFiMbS7P3bgGwF6
 19. DARKO AMOLIKA GRZYBOWSKA VIRDIS. TRAVIS WALLER. *Sensitivity analysis on a dynamic coupling model for V2V communication distance control*. [interaktyvus] 2018 [žiūrėta 2022-02-20]. Prieiga per: <https://www.sae.org/news/press-room/2018/12/sae-international-releases-updated-visual-chart-for-its-%E2%80%9Clevels-of-driving-automation%E2%80%9D-standard-for-self-driving-vehicles>
 20. EUROPEAN COMMISSION. *On the road to automated mobility: An EU strategy for mobility of the future*. [interaktyvus]. Communication from the commission to the european parliament, the council, the european economic and social committee, the committee of the regions. Brussels, 2018 [žiūrėta 2022-02-20]. Prieiga per: <https://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=COM:2018:0283:FIN:EN:PDF>
 21. VOLVO. *What is autonomous driving?* [interaktyvus]. 2019 [žiūrėta 2022-02-15]. Prieiga per: <https://www.volvocars.com/en-kw/own/own-and-enjoy/autonomous-driving>
 22. TESLA. *Autopilot*. [interaktyvus]. 2019 [žiūrėta 2022-02-15]. Prieiga per: https://www.tesla.com/it_IT/autopilot
 23. WAYMO. *Technology*. [interaktyvus]. 2019 [žiūrėta 2022-02-20]. Prieiga per: <https://waymo.com/tech>
 24. MONTEMERLO, M., DAHLKAMP, H., STAVENS, D., ARON, A., DIEBEL, J. *Stanley: The robot that won the DARPA Grand Challenge*. [interaktyvus]. Journal of field Robotics, 23(9), 2006 [žiūrėta 2022-02-20]. Prieiga per: <http://robots.stanford.edu/papers/thrun.stanley05.pdf>

25. ANDERSON, JAMES ir kiti. *Autonomous vehicle technology: A guide for policymakers*. [interaktyvus]. Rand Corporation, 2014 [žiūrėta: 2022-02-23]. Prieiga per: <https://news.stanford.edu/news/2005/october12/stanleyfinish-100905.html>
26. TOMTOM INTERNATIONAL. *Traffic Index*. [interaktyvus]. 2017 [žiūrėta 2022-02-20]. Prieiga per: https://www.tomtom.com/en_gb/trafficindex/
27. UNITED NATIONS, DEPARTMENT OF ECONOMICS AND SOCIAL AFFAIRS, POPULATION DIVISION. *World Urbanization Prospects: The 2014 Revision*. [interaktyvus]. 2014 [žiūrėta 2022-02-21]. Prieiga per: <https://www.un.org/en/development/desa/publications/2014-revision-world-urbanization-prospects.html>
28. CHEN, L. ENGLUND, C. *Cooperative Intersection Management - A Survey*. [interaktyvus]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, Vol. 17, No. 2, 2016 [žiūrėta 2022-02-24]. Prieiga per: <https://www.semanticscholar.org/paper/Cooperative-Intersection-Management%3A-A-Survey-Chen-Englund/634aa5d051512ee4b831e6210a234fb2d9b9d623>
29. RB. *Highway Capacity Manual Traffic flow parameters*. [interaktyvus]. Washington Transportation Research Board, National Research Council, 2008 [žiūrėta 2022-02-25]. Prieiga per: https://sjnavarro.files.wordpress.com/2008/08/highway_capacital_manual.pdf
30. GENDE M. *Using connected vehicle technology to implement a pay for priority system at signalized intersections*. [interaktyvus]. 2015 [žiūrėta 2022-02-26]. Prieiga per: https://tigerprints.clemson.edu/all_theses/2235
31. GOODALL, NOAH J. *Traffic Signal Control with Connected Vehicles*. [interaktyvus]. University of Virginia, 2013 [žiūrėta 2022-02-27]. Prieiga per: <https%3A%2F%2Flibraetd.lib.virginia.edu%2Fdownloads%2Fz316q1903%3Ffilename%3D%2FTraffic%20Signal%20Control%20with%20Connected%20Vehicles%20Electronic%20Version.pdf&usg=AOvVaw0s6Gtg86rMFj2jh88ZwB-A>
32. LEE, JOYOUNG, BYUNGKYU P. AND ILSOO Y. *Cumulative travel-time responsive realtime intersection control algorithm in the connected vehicle environment*. [interaktyvus]. Journal of Transportation Engineering 139.10, 2013 [žiūrėta 2022-03-02]. Prieiga per: <https://ascelibrary.org/doi/abs/10.1061/%28ASCE%29TE.1943-5436.0000587>
33. TIAPRASERT, KAMONTHEP ir kiti. *Queue Length Estimation Using Connected Vehicle Technology for Adaptive Signal Control*. [interaktyvus]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 16.4, 2015 [žiūrėta 2022-03-02]. Prieiga per: <https://www.semanticscholar.org/paper/Queue-Length-Estimation-and-Platoon-Recognition-for-Tiaprasert/280c2daf1ac6817e8c389dcb07f14142b60cf79>
34. NILSSON L. *Behavioural research in an advanced driving simulator-experiences of the VTI system*. 37(9), 1993 [žiūrėta 2022-03-04]. Prieiga per: <https://onlinepubs.trb.org/onlinepubs/conferences/2011/RSS/2/Nilsson,L.pdf>
35. PARK B, QI H. *Development and Evaluation of a Procedure for the Calibration of Simulation Models*. [interaktyvus]. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, No. 1934, Washington DC, 2005. [žiūrėta 2022-03-10]. Prieiga per: <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.461.7667&rep=rep1&type=pdf>
36. VELODYNE. *LiDAR Products*. [interaktyvus]. 2017 [žiūrėta 2022-03-15]. Prieiga per: <http://velodynelidar.com/products.html>

37. VELODYNE. *User Data Point Cloud 2*. [interaktyvus]. 2017 [žiūrėta 2022-03-20]. Prieiga per: <http://velodynelidar.com/hdl-64e.html>
38. AUTOLIV. *Radar Systems - the sound of safety*. [interaktyvus]. 2017 [žiūrėta 2022-03-15]. Prieiga per: <https://www.autoliv.com/ProductsAndInnovations/ActiveSafetySystems/Pages/RadarSystems.aspx>
39. LAPEDUS M. *Here Comes High-Res Car Radar*. [interaktyvus]. 2017 [žiūrėta 2022-03-20]. Prieiga per: <https://semiengineering.com/here-comes-high-res-car-radar/>
40. HIKITA M. *An introduction to ultrasonic sensors for vehicle parking*. [interaktyvus]. 2010 [žiūrėta 2022-03-21]. Prieiga per: <http://www.newelectronics.co.uk/electronics-technology/an-introductionto-ultrasonic-sensors-for-vehicle-parking/24966/>
41. PARKING NETWORK. *Our Newest Innovation: Ultrasonic Sensor Parking Availability Technology*. [interaktyvus]. 2018 [žiūrėta 2022-03-25]. Prieiga per: <https://www.parking-net.com/parking-news/inrix/ultrasonic-sensor-parking-availability-technology>
42. ORS A. *RADAR, camera and LiDAR for autonomous cars*. [interaktyvus]. 2017 [žiūrėta 2022-03-25]. Prieiga per: <https://blog.nxp.com/automotive/radar-camera-and-lidar-for-autonomous-cars>
43. HELBING D. AND TILCH B. *Generalized force model of traffic dynamics*. 2020 [žiūrėta 2022-03-25]. Prieiga per: <https://journals.aps.org/pre/abstract/10.1103/PhysRevE.58.133>
44. ARCHER, JACKSON, LONGSTREET. *Potential impacts of connected-autonomous vehicles on congestion and safety: a look at Austin, Texas*. [interaktyvus]. 2017 [žiūrėta 2022-03-26]. Prieiga per: <https://repositories.lib.utexas.edu/handle/2152/62648>
45. SUKENNIK P. *Micro simulation guide for automated vehicles*. [interaktyvus]. 2018 [žiūrėta 2022-03-27]. Prieiga per: <https://www.h2020-coexist.eu/wp-content/uploads/2018/11/D2.5-Micro-simulation-guide-for-automated-vehicles.pdf>
46. ATKINS. *Research on the impacts of connected and autonomous vehicles on traffic flow. Stage 2: Traffic Modelling and Analysis*. [interaktyvus]. Technical Report, 2016 [žiūrėta 2022-03-28]. Prieiga per: 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
47. GROVES, ADAM. *Preparing the Transition to Automated Vehicles*. [interaktyvus]. Coexist - A European Union funded Horizon 2020 Project. 2018 [žiūrėta 2022-04-05] https://mva.maryland.gov/safety/Documents/MD-CAV_PTV-Groves.pdf
48. SUKENNIK, PETER. *Micro-Simulation Guide for Automated Vehicles*. [interaktyvus] Deliverable 2.5 – Micro-Simulation Guide. 2018 [žiūrėta 2022-04-05]. Prieiga per: <https://www.h2020-coexist.eu/wp-content/uploads/2018/11/D2.5-Micro-simulation-guide-for-automated-vehicles.pdf>
49. PTV GROUP. *PTV VISSIM User Manual*. [interaktyvus], [žiūrėta 2022-04-07]. Prieiga per: <http://cgi.ptvgroup.com/visionSetups/en/>

Priedai

1 priedas. Mikroskopinio tyrimo simuliacijos paveikslai



1.1 pav. Kariūnų pl. sankryžos geometrija

Network Editor

50 m

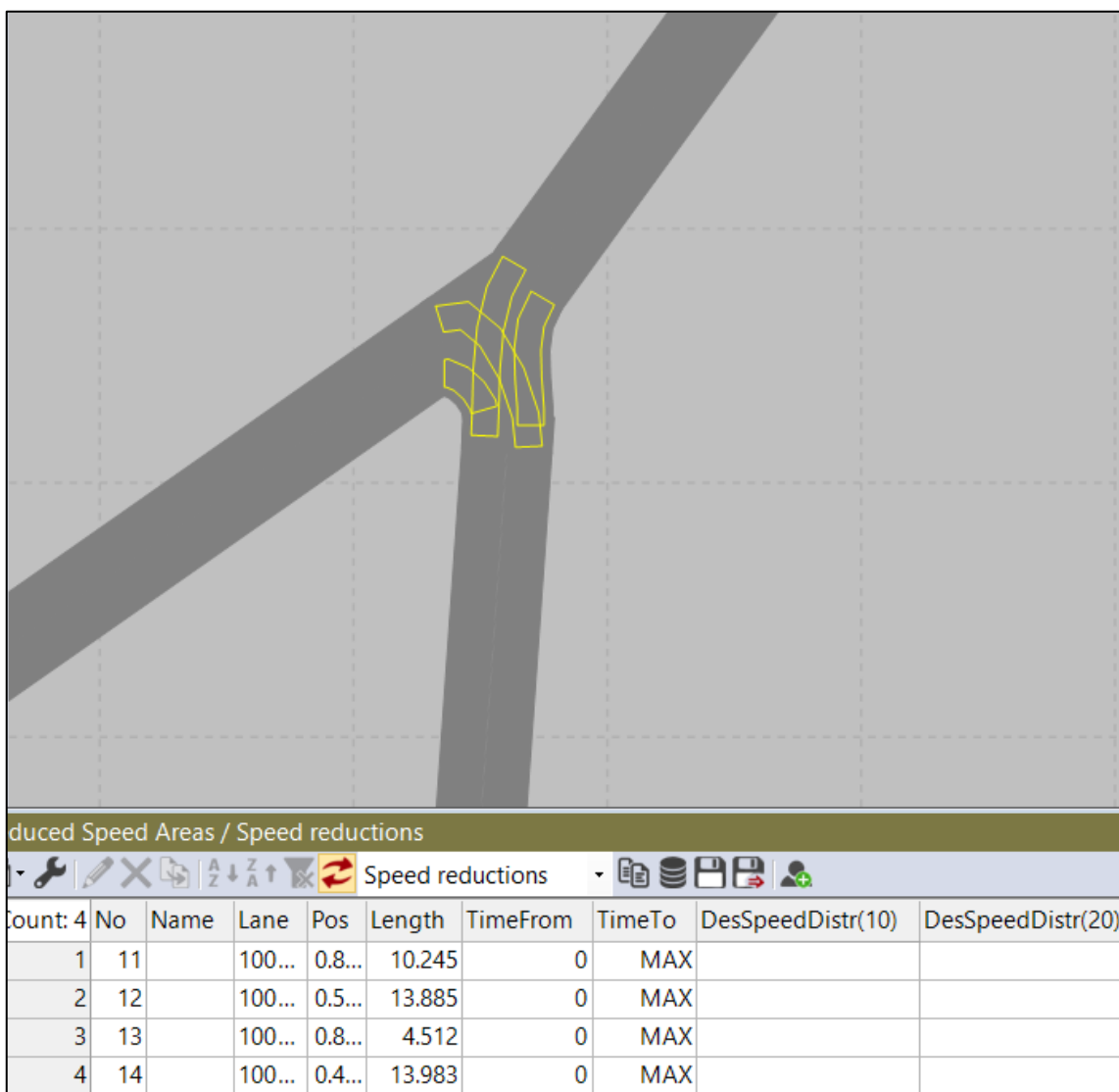
© 2022 Maxar
© 2022 Microsoft Corporation
© CNES (2022) Distribution Airbus DS

Bing Maps Terms of Usage

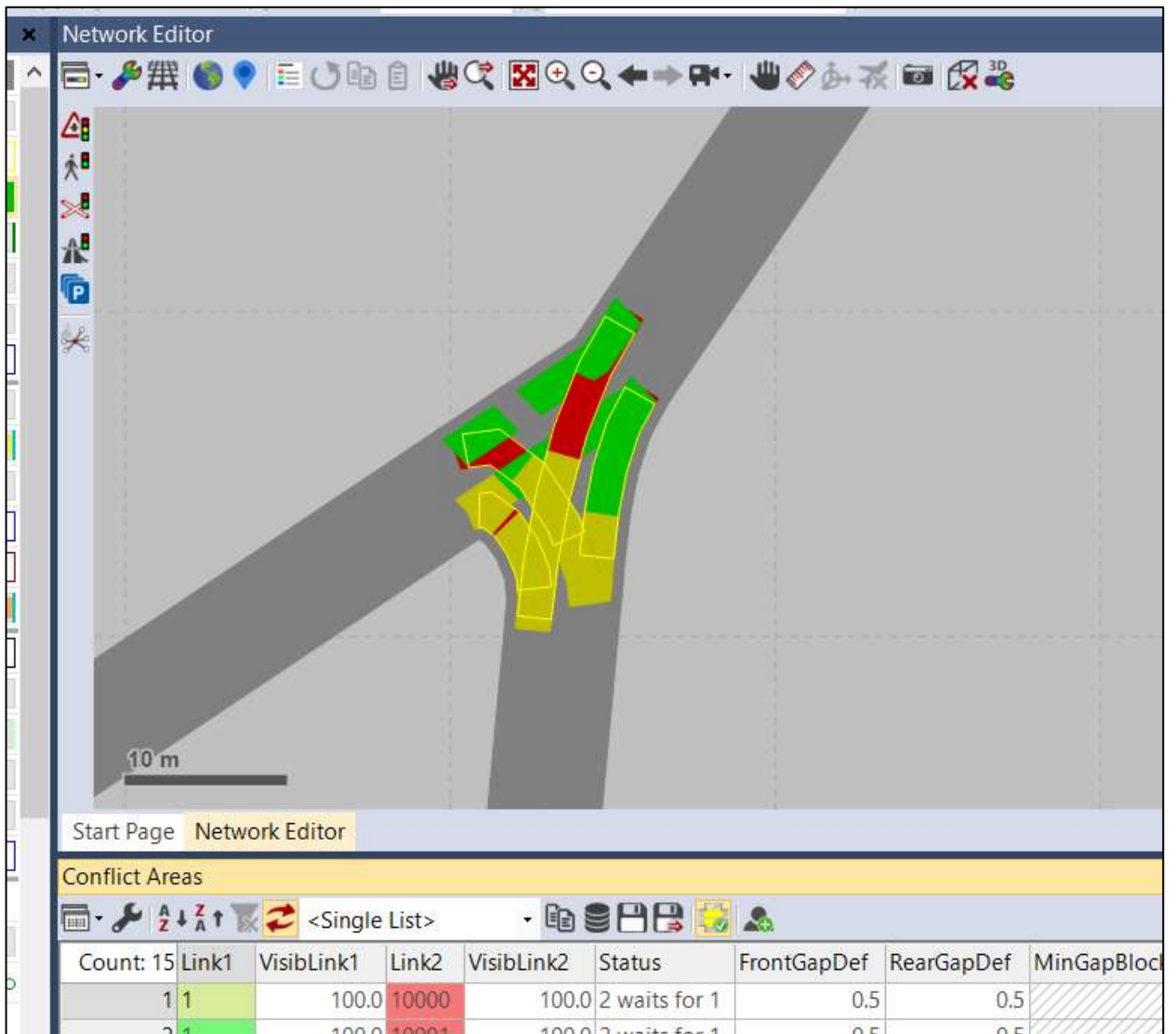
Links / Lanes

Count	No	Name	LinkBehavType	DisplayType	Level	NumLanes	Length2D	IsConn	Fr	Cour
1	9		1: Urban (motorized)	1: Road gray	1: Base	1	240.286	<input type="checkbox"/>		
2	10		1: Urban (motorized)	1: Road gray	1: Base	1	236.752	<input type="checkbox"/>		
3	12		1: Urban (motorized)	1: Road gray	1: Base	1	212.701	<input type="checkbox"/>		
4	13		1: Urban (motorized)	1: Road gray	1: Base	1	218.640	<input type="checkbox"/>		
5	15		1: Urban (motorized)	1: Road gray	1: Base	1	207.812	<input type="checkbox"/>		
6	16		1: Urban (motorized)	1: Road gray	1: Base	1	208.529	<input type="checkbox"/>		
7	10016		1: Urban (motorized)	1: Road gray		1	14.214	<input checked="" type="checkbox"/>	9	

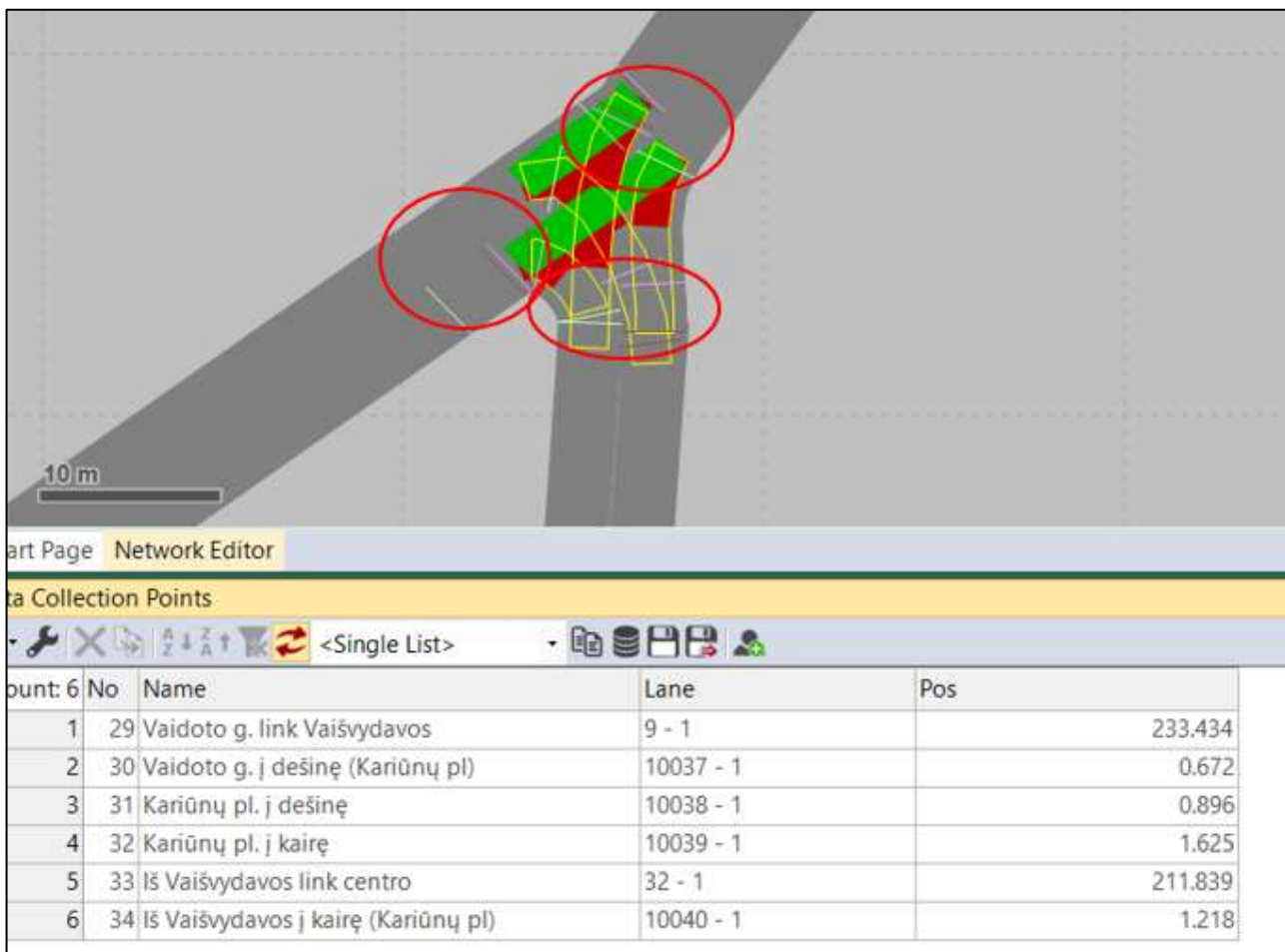
1.2 pav. PTV Vissim kariūnų pl. sankryžos jungčių tipai



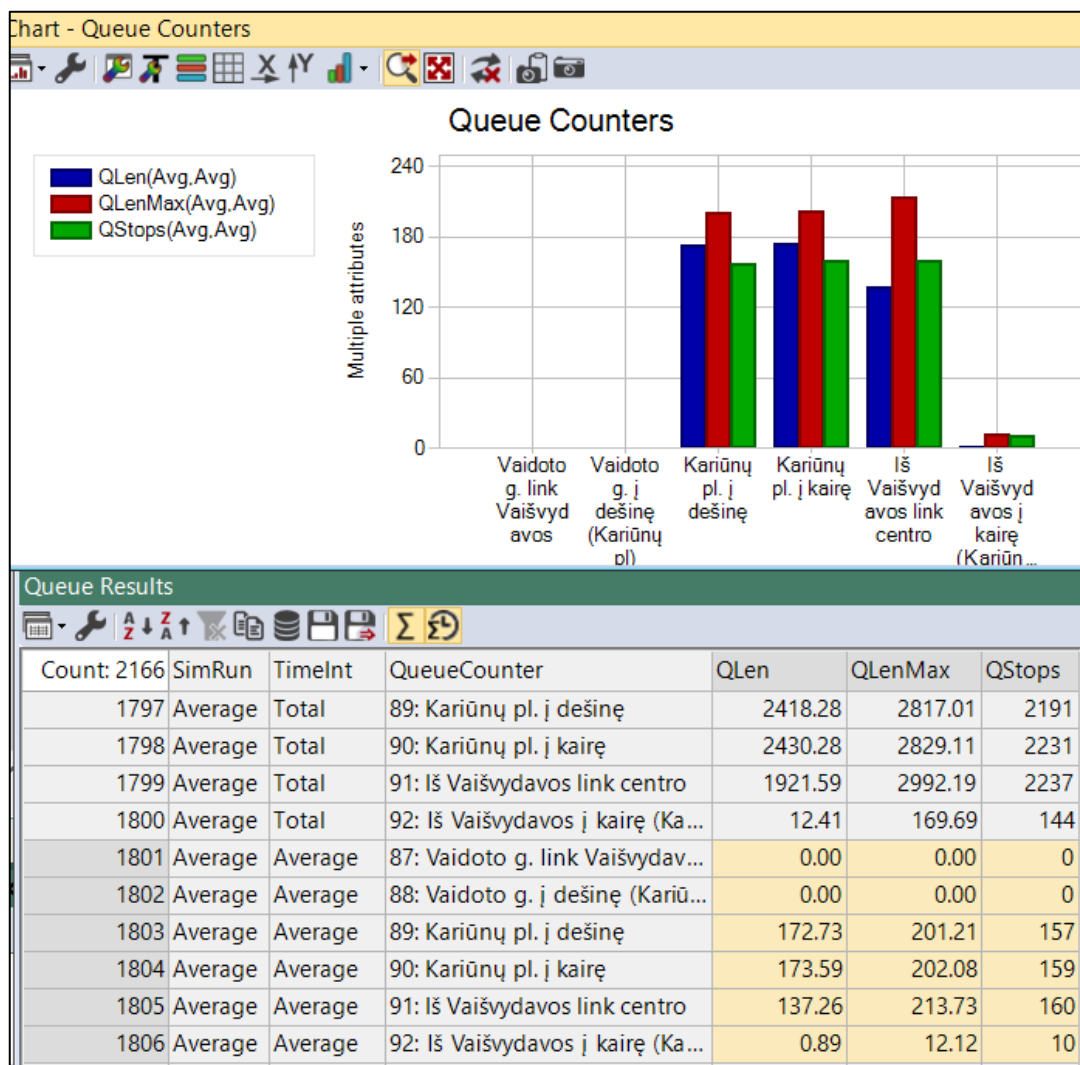
1.3 pav. Sumažinto greičio zonos Kariūnų pl. sankryžoje



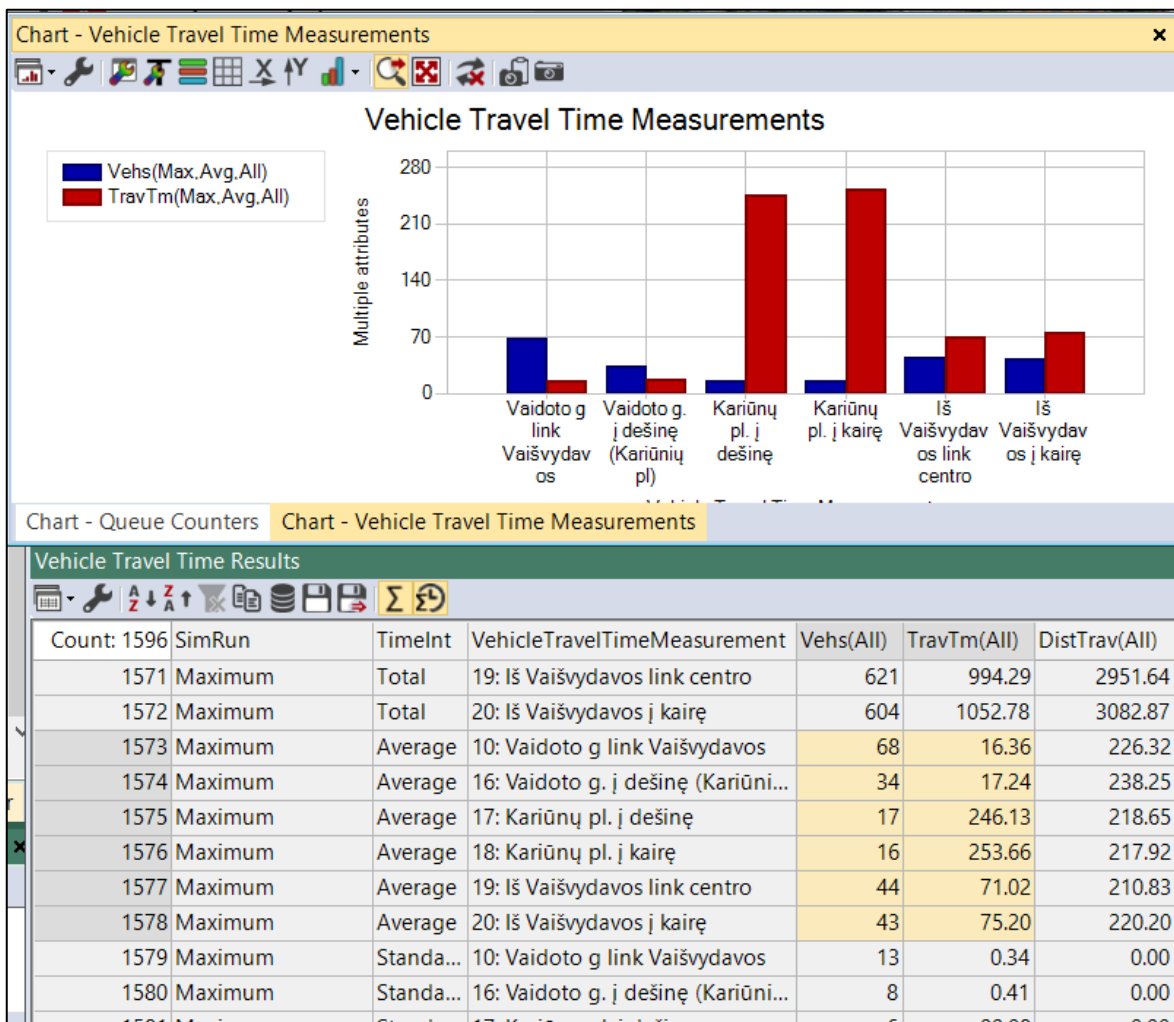
1.4 pav. Konfliktinės zonos Kariūnų pl. sankryžos modelyje PTV Vissim.



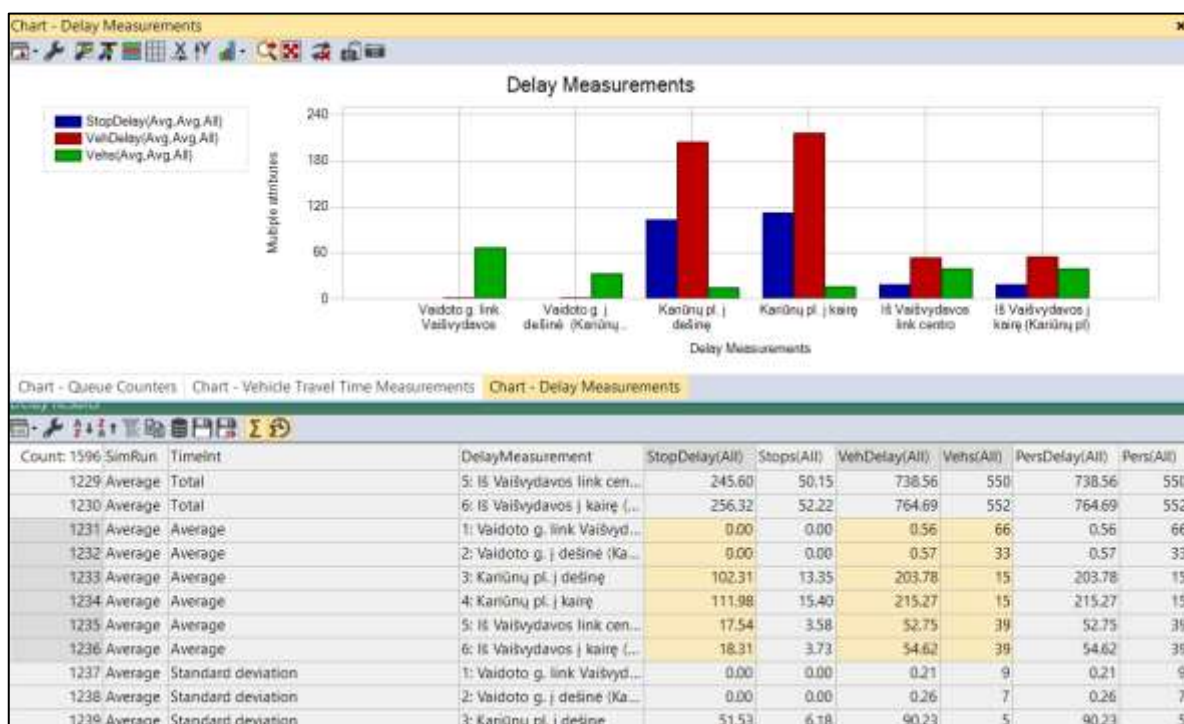
1.5 pav. Informacijos rinkimo taškai Kariūnų pl. sankryžoje PTV Vissim



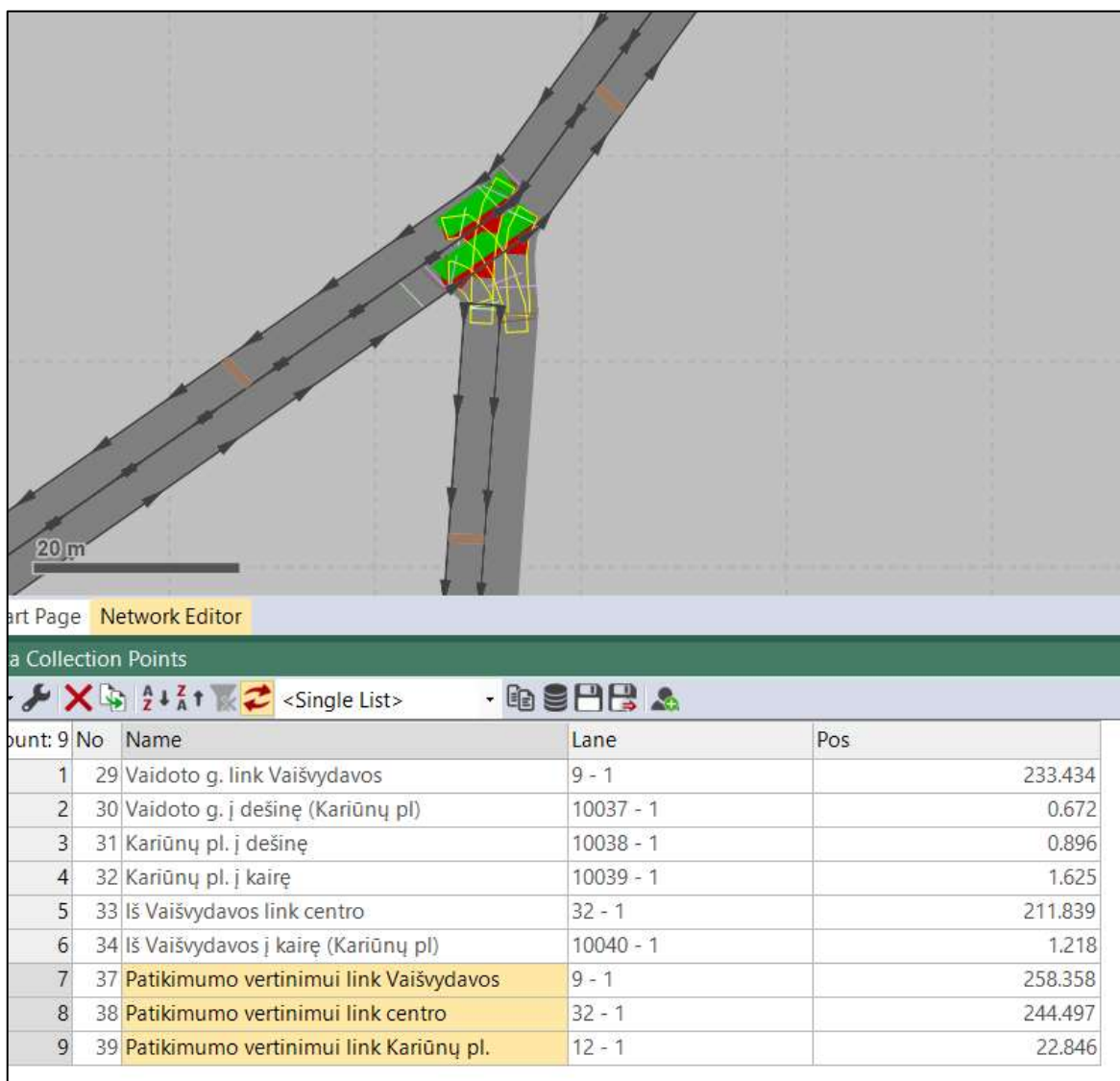
1.6 pav. Pirminiai Kariūnų pl. sankryžos TP eilių simuliacijos rezultatai PTV Vissim



1.7 pav. Pirminiai Kariūnų pl. sankryžos TP kelionės laiko rezultatai PTV Vissim



1.8 pav. Pirminiai Kariūnų pl. sankryžos TP stovėjimo spūstyse simuliacijos rezultatai PTV Vissim



1.9 pav. Papildomi informacijos rinkimo taškai modelio patikimumui vertinti



1.10 pav. Simuliacija PTV Vissim Kariūnų pl. sankryža