



Kauno technologijos universitetas
Mechanikos inžinerijos ir dizaino fakultetas

**Automobilio padangų slėgio pokyčio poveikio riedėjimo
pasipriešinimui tyrimas**
Baigiamasis magistro projektas

Tomas Keturakis
Projekto autorius

Doc. Robertas Keršys
Vadovas

Kaunas, 2026



Kauno technologijos universitetas
Mechanikos inžinerijos ir dizaino fakultetas

Automobilio padangų slėgio pokyčio poveikio riedėjimo pasipriešinimui tyrimas

Baigiamasis magistro projektas
Transporto priemonių inžinerija (6211EX021)

Tomas Keturakis

Projekto autorius

Doc. Robertas Keršys

Vadovas

Doc. Ramūnas Skvireckas

Recenzentas

Kaunas, 2026



Kauno technologijos universitetas
Mechanikos inžinerijos ir dizaino fakultetas
Tomas Keturakis

Automobilio padangų slėgio pokyčio poveikio riedėjimo pasipriešinimui 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 (-usi);
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.

Tomas Keturakis

Patvirtinta elektroniniu būdu



Kaunas technologijos universitetas
Mechanikos inžinerijos ir dizaino fakultetas

Magistro baigiamojo projekto užduotis

Išduota studentui (-ei) – Tomas Keturakis

1. Projekto tema

Automobilio padangų slėgio pokyčio poveikio riedėjimo pasipriešinimui tyrimas

(Lietuvių kalba)

Research on the Effect of Changes in Car Tire Pressure on Rolling Resistance

(Anglų kalba)

2. Projekto tikslas ir uždaviniai

Tikslas: ištirti automobilio padangų slėgio pokyčio įtaką riedėjimo pasipriešinimui.

Uždaviniai:

1. Atlikti literatūros analizę padangų gamybos, slėgio pokyčio jų eksploatacijos metu tematikomis
2. Išanalizuoti jau atliktų tyrimų teigiamus ir neigiamus aspektus
3. Atlikti automobilio padangų slėgio ir oro temperatūros pokyčių eksploatacijos metu tyrimą
4. Atlikti padangų kontakto ploto įtakos riedėjimo pasipriešinimo koeficientui tyrimus
5. Parengti atliktų tyrimų išvadas ir gautų rezultatų analizę

3. Pagrindiniai reikalavimai ir sąlygos

Tyrimas turi būti atliekamas visais metų laikais, realiomis padangų eksploataavimo sąlygomis, stengiantis įvertinti skirtingų oro sąlygų įtaką bei gauti tikslesnius rezultatus.

4. Papildomi reikalavimai projektui, ataskaitai ir jos priedams

Netaikoma

Projekto autorius

Tomas Keturakis

(Vardas, Pavardė)

2026-02-15

(Data)

Projekto vadovas

Robertas Keršys

(Vardas, Pavardė)

2026-02-15

(Data)

Krypties studijų
programų vadovas

Artūras Keršys

(Vardas, Pavardė)

2026-02-15

(Data)

Keturakis, Tomas. Automobilio padangų slėgio pokyčio poveikio riedėjimo pasipriešinimui tyrimas. Magistro baigiamasis projektas / vadovas doc. Robertas Keršys; Kauno technologijos universitetas, Mechanikos inžinerijos ir dizaino fakultetas.

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

Reikšminiai žodžiai: slėgis, padanga, temperatūra, pokytis

Kaunas, 2026. 77 p.

Santrauka

Šiame baigiamajame magistro projekte atliekama lengvojo automobilio naudojamų padangų slėgio pokyčio poveikio riedėjimo pasipriešinimui analizė. Šios temos ir atliekamų tyrimų aktualumas grindžiamas didėjančia tvarumo klausimo svarba kasdieniniame žmonių gyvenime bei ekologiniais aspektais. Bendras darbo tikslas yra nustatyti lengvojo automobilio padangų slėgio kitimo priklausomybę nuo kelionės metu įveikiamo atstumo, bei dėl to susidarantį riedėjimo pasipriešinimo pokyčius. Siekiant gauti darbo rezultatus, taikyti skirtingų metodų tyrimai. Padangos slėgio ir oro temperatūros matavimo realiomis eksploatacinėmis sąlygomis pagalba buvo siekiama nustatyti slėgio bei oro temperatūros pokyčių tendencijas transporto priemonės eksploatavimo metu. Atliektais padangos kontakto ploto tyrimais buvo siekiama nustatyti slėgio įtaką padangos kontaktiniam paviršiui su kelio danga. Tyrime taip pat atsižvelgta į galimas papildomas automobilio apkrovas bei jų poveikį gaunamiems rezultatams. Siekiant didesnio rezultatų tikslumo, tyrimai kurių tiksliai rezultatų vertės nustatyti buvo sudėtingiau, pakartoti keletą kartų, taip galutiniam vertinimui pateikiant visų atliktų bandymų vidurkių vertes. Tačiau padangos pėdsako tyrimai, fiksavimui pasitelkiant kalkinį popierių buvo atliekami po vieną bandymą. Kadangi gaunami rezultatai buvo aiškiai fiksuoti bei lengvai įvertinamos gaunamos vertės. Atliktas padangų slėgio ir oro temperatūros tyrimas parodė, jog realiomis eksploatacinėmis sąlygomis šių parametrų vertės kinta. Jų pokyčio reikšmės yra nežymiai koreliuojančios tarpusavyje. Padangų slėgio įtakos kontakto pėdsako plotui tyrimų gauti rezultatai parodė tendenciją, jog transporto priemonės padangoje esančio slėgio vertei mažėjant, didėja padangos deformacija, todėl pastebimas padangos pėdsako ploto augimas. Didėjantis kontaktinio paviršiaus plotas lemia didesnę riedėjimo pasipriešinimo koeficiento reikšmę, tai sąlygoja mažėjančią transporto priemonės efektyvumą. Priešinga tendencija nustatyta bandymų metu, padangų slėgį padidinus virš gamintojo rekomenduojamų verčių. Kontaktinio paviršiaus plotas sumažėjo, tuo pačiu sumažindamas ir padangos riedėjimo pasipriešinimo koeficientą. Efektyvumo atžvilgiu toks rezultatas galėtų būti vertinamas kaip teigiamas, tačiau padangų eksploatavimas su per dideliu slėgiu vis tiek yra laikomas ne tvarių ir nesaugių elgesiu. Padangų slėgio bandymais buvo tirta ir papildomos apkrovos padangoms daroma įtaka. Bandymo metu išsiaiškinta, jog papildoma apkrova gali turėti įtakos padangos eksploatacijai, kadangi jos pridėjimas naudojant žiemos sezonui skirtas padangas turėjo aiškia įtaką kontaktinio paviršiaus ploto vertės išaugimui. Taigi po atlikto padangų slėgio ir oro temperatūros pokyčio tyrimo, galima daryti išvadas, jog padangų slėgio vertės kinta tiek automobiliui stovint, tiek eksploatavimo metu, o jų pasikeitimai gali turėti įvairiapusių rezultatų. Todėl galima vairuotojams rekomenduoti prieš planuojant ilgesnes išvykas automobiliu, pasitikrinti padangose esančio slėgio vertes taip sumažinant tikimybę kelionėje ilgesnį atstumą važiuoti eksploatacijai netinkamai pripūstomis padangomis.

Keturakis, Tomas. Research on the Effect of Changes in Car Tire Pressure on Rolling Resistance. Master's Final Degree Project/supervisor assoc. prof. Robertas Keršys; Faculty of Mechanical Engineering and Design, Kaunas University of Technology.

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

Keywords: pressure, tyre, temperature, effect.

Kaunas, 2026. 77 p.

Summary

This final master's degree project analyzes the impact of tire pressure changes on rolling resistance in passenger cars. The relevance of this topic and the research being conducted stems from the growing importance of sustainability in everyday life and ecological contexts. The overall goal of the work is to determine how tire pressure in passenger cars depends on the distance covered during the trip and on the resulting changes in rolling resistance. To obtain the results of the work, dynamic and several static studies of different methods were conducted. Using dynamic tire pressure and temperature measurements under real operating conditions, the aim was to determine trends in pressure and temperature changes during vehicle operation. The static studies of the tire contact area were carried out to determine the influence of pressure on the contact surface of the tire with the road surface. The study also accounted for potential additional vehicle loads and their impact on the results. To improve the accuracy of the results, studies whose exact values were difficult to determine were repeated several times, yielding average values for the final assessment. However, static tire footprint studies, using tracing paper for recording, were performed one test at a time. Since the results were clearly recorded, the values were easy to evaluate. A dynamic study of tire pressure and temperature showed that these parameters vary under real operating conditions. The values of their change are slightly correlated. The study on the influence of static tire pressure on the contact patch area showed that as vehicle tire pressure decreases, tire deformation increases, resulting in a noticeable increase in the tire footprint area. An increased contact surface area results in a higher rolling resistance coefficient, which decreases vehicle efficiency. The opposite trend was observed during testing when tire pressure was increased beyond the manufacturer's recommended values. The contact surface area decreased, thereby reducing the tire's rolling resistance coefficient. In terms of efficiency, such a result could be viewed as positive, but operating tires with excessive pressure is still considered unsustainable and unsafe behavior. Static tire pressure tests also investigated the effect of additional load on tires. During the test, it was found that additional load can affect tire operation, as adding it to tires intended for the winter season clearly increased the contact surface area. Thus, after studying tire pressure and temperature changes, it can be concluded that tire pressure varies both when the car is stationary and during operation, and these changes can have various effects. As a result, it is recommended that drivers check tire pressure before planning long car trips, thereby reducing the likelihood of driving long distances on overinflated tires.

Turinys

Lentelių sąrašas	7
Paveikslų sąrašas	8
Santrumpų ir terminų sąrašas	10
Įvadas.....	11
1. Padangos.....	12
1.1. Padangos sudėtis.....	12
1.2. Gamybos proceso kokybės užtikrinimas	15
1.2.1. Dirbtinio intelekto pritaikymas gamybos įmonėse.....	16
1.2.2. Medžiagų parinkimas	16
1.2.3. Priežiūros numatymas	17
1.2.4. Iššūkiai.....	17
1.3. Skaitmeninis dvynys.....	17
1.4. Padangų matmenys	18
1.5. Padangos vienodumo tyrimas.....	20
1.6. Slėgio matavimo padangose sistemų apžvalga.....	21
1.6.1. Tiesioginė TPMS sistema.....	22
1.6.2. Netiesioginė TPMS sistema	22
1.7. Skirtingų padangų slėgio matavimo sistemų palyginimas	23
1.8. Esminiai veiksniai	25
1.9. Padangų slėgio pokyčio įtaka vairavimui.....	26
1.10. Riedėjimo pasipriešinimas.....	30
2. Atliktų tyrimų analizė	33
2.1. Slėgio pokyčio įtaka degalų sąnaudoms.....	33
2.1.1. Tyrimo eiga ir gauti rezultatai	34
2.1.2. Tyrimo išvados	35
2.2. Padangų slėgio įtaka transporto priemonės keliamam triuškmui	35
2.2.1. Tyrimo eiga ir gauti rezultatai	36
2.2.2. Tyrimo išvados	36
2.3. Padangos riedėjimo pasipriešinimo priklausomybė nuo kontakto pėdsako parametrų.....	36
2.3.1. Tyrimo eiga ir gauti rezultatai	37
2.3.2. Tyrimo išvados	38
3. Automobilio padangų slėgio pokyčio poveikio riedėjimo pasipriešinimui tyrimas.....	39
3.1. Tyrimo tikslas.....	39
3.2. Tyrimo metodika	39
3.2.1. Įranga naudoti tyrimams atlikti	39
3.2.2. Padangų slėgio ir temperatūros pokyčio tyrimas eksploatacinėmis sąlygomis.....	40
3.2.3. Padangų slėgio ir oro temperatūros pokyčio tyrimo rezultatai.....	41
3.2.4. Kontakto ploto tyrimas pėdsaką fiksuojant skaldos pagalba.....	47
3.2.5. Padangos pėdsako tyrimas fiksuojant kalkiniu popieriumi	51
3.2.6. Padangų kontakto ploto tyrimas su papildoma apkrova.....	53
3.3. Tyrimų rezultatų analizė.....	57
3.4. Bendri tyrimų rezultatai.....	67
Išvados	73
Informacijos šaltinių sąrašas	74

Lentelių sąrašas

1 lentelė. Padangos sudėtis [3]	13
2 lentelė. Padangos gaminio medžiagų procentinė sudėtis [5]	14
3 lentelė. Padangų apkrovos koeficientai [10]	19
4 lentelė. Maksimalus leistinas greitis [10].....	20
5 lentelė. Eismo įvykių statistika [21].....	26
6 lentelė. Dėl transporto priemonių techninės būklės Lietuvoje 2019-2021 m. įvykusių mirtinų eismo įvykių kitimas [22]	26
7 lentelė. Tyrimo metu gauti rezultatai [32]	34
8 lentelė. Tyrimo automobilio parametrai.....	39
9 lentelė. Slėgio matavimo prietaiso parametrai	39
10 lentelė. Tyrimo statistika.....	41
11 lentelė. Priekinės padangos nereguliuojamo skaldos aukščio bandymas.....	48
12 lentelė. Galinės padangos nereguliuojamo skaldos aukščio bandymas	48
13 lentelė. Priekinės padangos reguliuojamo skaldos aukščio bandymas	49
14 lentelė. Galinės padangos reguliuojamo skaldos aukščio bandymas	50
15 lentelė. Priekinės ašies padangų matavimo rezultatai	52
16 lentelė. Galinės padangos tyrimo rezultatai	56
17 lentelė. Priekinės padangos vertikalaus aukščio sumažėjimas.....	58
18 lentelė. Galinės padangos vertikalaus aukščio sumažėjimas	59
19 lentelė. Priekinės padangos priklausomybių parametrai	59
20 lentelė. Priekinės padangos riedėjimo pasipriešinimas	60
21 lentelė. Galinės padangos riedėjimo pasipriešinimas.....	61
22 lentelė. Priekinės padangos riedėjimo pasipriešinimo grafiko analizė	61
23 lentelė. Galinė padangos riedėjimo pasipriešinimo koeficiento grafiko analizė.....	62
24 lentelė. Priekinės padangos riedėjimo pasipriešinimo jėga.....	63
25 lentelė. Galinės padangos riedėjimo pasipriešinimo jėga	63
26 lentelė. Priekinės padangos riedėjimo pasipriešinimo jėgos priklausomybės nuo slėgio grafiko analizė	64
27 lentelė. Galinės padangos riedėjimo pasipriešinimo jėgos priklausomybės nuo slėgio grafiko analizė	65
28 lentelė. Galinės padangos su apkrova riedėjimo pasipriešinimo koeficiento grafiko analizė.....	66
29 lentelė. Galinės padangos su apkrova riedėjimo pasipriešinimo jėgos grafiko analizė	67
30 lentelė. Ploto vertės pokyčiai kelionės metu	68
31 lentelė. Riedėjimo pasipriešinimo koeficiento kitimo grafiko analizė.....	69
32 lentelė. Kontakto ploto vertės pokyčiai kelionės metu	71
33 lentelė. Riedėjimo pasipriešinimo lentelė	72

Paveikslų sąrašas

1 pav. Padangos sandara [5].....	14
2 pav. Padangos sudėtis [5].....	14
3 pav. Padangos gamybos procesas [6].....	15
4 pav. Skaitmeninio dvynio technologijos palyginimas [8].....	18
5 pav. Padangos matmenys [9]	19
6 pav. Padangos nevienodumo diagrama [11]	20
7 pav. Vienodumo bandymo mašina [13]	21
8 pav. TPMS sistemos jutiklis [15].....	22
9 pav. Mercedes Benz S320 bandymo ratų sukimosi kampinio greičio priklausomybė nuo važiavimo laiko, suveikus slėgio kontrolės sistemai. Važiavimo greitis – 70 km/val. [18]	24
10 pav. Mercedes Benz CLS ratų sukimosi kampinio greičio priklausomybė nuo važiavimo laiko, suveikus padangų slėgio kontrolės sistemai. Važiavimo greitis – 70 km/val. [18].....	24
11 pav. Nissan Qashqai ratų sukimosi kampinio greičio priklausomybė nuo važiavimo laiko, suveikus padangų slėgio kontrolės sistemai. Važiavimo greitis – 70 km/val. [18].....	25
12 pav. Padangos slėgio ir oro temperatūros priklausomybė [19].....	25
13 pav. Eksploatuojamų padangų slėgio verčių nuokrypis [23]	27
14 pav. a) slėgio trūkumas b) per didelis slėgis c) tinkamas slėgis [21].....	28
15 pav. Padangos dilimas esant slėgio trūkumui [27].....	28
16 pav. Padangos dilimas esant slėgio pertekliui [27]	29
17 pav. Tinkamo slėgio padangos nusidėvėjimas [27]	29
18 pav. „BMW“ markės automobilio padangų slėgio lipdukas.....	30
19 pav. Veiksniai darantys įtaką padangos kontaktui su kelio danga [28]	30
20 pav. Histerizės grafikas [29]	31
21 pav. Greičio priklausomybė nuo riedėjimo laiko [29]	32
22 pav. Riedėjimo pasipriešinimo priklausomybė nuo važiavimo greičio [29]	32
23 pav. Tyrime naudotas modelis [32].....	33
24 pav. Akustinis automobilio keliamo triukšmo tyrimas vėjo tunelyje [39].....	35
25 pav. Vidutinės triukšmo lygio vertės esant skirtingiems padangų slėgiams [37]	36
26 pav. Bandymų standas [38].....	37
27 pav. a) Pėdsako nuotrauka b) Pėdsako ilgis c) Pėdsako plotis [38].....	37
28 pav. a) vertikalaus aukščio pokyčio b) pėdsako ilgio c) pėdsako pločio priklausomybės nuo padangos apkrovos prie skirtingų slėgio verčių [38].....	38
29 pav. Riedėjimo pasipriešinimo jėgos priklausomybė nuo a) suplokštėjimo b) pėdsako ilgio c) pėdsako pločio [38]	38
30 pav. Slėgio matavimo jutiklis [39]	39
31 pav. Ruletė	40
32 pav. Padangų slėgio ir oro temperatūros vertės kelionės pradžioje	40
33 pav. Padangų slėgio ir oro temperatūros vertės kelionės pabaigoje.....	40
34 pav. Tyrimo duomenų pavyzdys	41
35 pav. Padangų slėgio pokyčių verčių skirtumas	42
36 pav. Procentinis padangų slėgio skirtumų pasiskirstymas	42
37 pav. Padangos oro temperatūros pokyčių pasiskirstymo dažnis	43
38 pav. Procentinis padangos oro temperatūros pokyčio pasiskirstymas	43
39 pav. Padangų slėgio priklausomybė nuo oro temperatūros.....	44

40 pav.	Padangų slėgio pokyčio priklausomybė nuo oro temperatūros pokyčio.....	44
41 pav.	Slėgio pokyčio priklausomybė nuo kelionės atstumo	45
42 pav.	Slėgio pasikeitimų dažnis nuo kelionės atstumo.....	45
43 pav.	Oro temperatūros pokyčių priklausomybė nuo nuvažiuoto atstumo.....	46
44 pav.	Padangų oro temperatūros pokyčių priklausomybė nuo nuvažiuoto atstumo.....	46
45 pav.	Automobilinė elektrinė pompa [41]	47
46 pav.	Bandymo eiga.....	47
47 pav.	Matavimo standas.....	49
48 pav.	Priekinės žieminės padangos skaldos bandymų rezultatų palyginimas	50
49 pav.	Galinės žieminės padangos skaldos bandymų rezultatų palyginimas	51
50 pav.	Gautų rezultatų pavyzdys	52
51 pav.	Priekinės ašies padangų bandymo su kalke palyginimas	53
52 pav.	Galinės ašies padangų bandymo su kalke palyginimas.....	53
53 pav.	Galinės padangos apkrautos 70 kg svoriu ploto priklausomybė nuo slėgio	54
54 pav.	Galinės vasarinės padangos kontakto ploto kitimas.....	55
55 pav.	Galinės žieminės padangos kontakto ploto kitimas	55
56 pav.	Galinės padangos rezultatų palyginimas su apkrova ir be	56
57 pav.	Priekinės padangos vertikalaus aukščio sumažėjimo priklausomybė nuo slėgio	59
58 pav.	Priekinės padangos pasipriešinimo koeficiento kitimas.....	61
59 pav.	Galinės ašies riedėjimo pasipriešinimo koeficiento priklausomybė	62
60 pav.	Priekinės padangos riedėjimo pasipriešinimo jėgos priklausomybės nuo slėgio grafikas... 64	
61 pav.	Galinės padangos riedėjimo pasipriešinimo jėgos priklausomybės nuo slėgio grafikas..... 65	
62 pav.	Galinės padangos su apkrova riedėjimo pasipriešinimo koeficiento priklausomybė..... 66	
63 pav.	Galinės padangos riedėjimo pasipriešinimo jėgos palyginimas su apkrova ir be	66
64 pav.	Priekinės padangos ploto pokyčio grafikas.....	67
65 pav.	Galinės padangos ploto pokyčio grafikas.....	68
66 pav.	Priekinės padangos riedėjimo pasipriešinimo koeficiento kitimas	69
67 pav.	Galinės padangos riedėjimo pasipriešinimo koeficiento kitimas	69
68 pav.	Kontakto ploto priklausomybė nuo slėgio.....	70
69 pav.	Galinės padangos kontakto ploto kitimas nuo slėgio	70
70 pav.	Priekinės padangos riedėjimo pasipriešinimo koeficiento kitimas	71
71 pav.	Galinės padangos riedėjimo pasipriešinimo kitimas	71

Santrumpų ir terminų sąrašas

Santrumpos:

Bar - barai

Pr. – priekinė.

Gal. – galinė.

TPMS – tire pressure monitoring system.

Įvadas

Kelių eismo saugumas priklauso nuo daug skirtingų aspektų, įvairiai darančių įtaką tiek transporto priemonėms, tiek jų vairuotojams. Vieni iš šių aspektų gali būti kontroliuojami, kiti iš dalies, tretį įvyksta nenumatyta. Prie iš dalies kontroliuojamų faktorių lemiančių kelių eismo saugumą galima priskirti ir padangas bei eksploataavimo metu jose vykstančius procesus. Transporto priemonių savininkai, vairuotojai gali pasirinkti jų gamintoją, dalinai keisti rekomenduojamus jų matmenis. Tačiau vienas aspektas, kurio kitimo dažnai nėra vertinama, yra transporto priemonės padangose esantis slėgis. Jo reikšmės gali kisti dėl išorinio mechaninio poveikio padangai, oro sąlygų ir vairavimo stiliaus. Netinkamai sureguliuotas padangų slėgis gali daryti įtaką degalų sąnaudoms bei tuo pačiu pagreitinti padangų nusidėvėjimą, paveikti automobilio valdymo savybes. Jeigu didesnės degalų sąnaudos transporto priemonės vairuotojo ir keleivių saugumui įtakos neturi, tai kiti atsiradę šalutiniai veiksniai gali tiesiogiai lemti avarinės situacijos susidarymą, o blogiausiu scenarijumi ir tragiškas pasekmes turinčius įvykius.

Aktualumas – tvarumo bei ekologijos klausimams vis dažniau skambant viešojoje erdvėje, siekis padidinti transporto priemonių efektyvumą įgyja didesnę reikšmę. Vienas esminių faktorių galinčių tai padaryti yra padangų riedėjimo pasipriešinimo mažinimas, tokiu būdu ilginant jų tarnavimo laiką bei mažinant CO₂ pėdsaką gamtoje.

Naujumas – šio tyrimo metu siekiama surinkti duomenis realiomis transporto priemonės eksploataavimo sąlygomis, kurie vėliau galėtų būti pritaikyti dirbtinio intelekto modelio skirtu padangų parametrų kitimo numatymo modelio apmokinimui.

Tyrimo objektas – lengvojo automobilio padangos ir jose vykstantys slėgio bei oro temperatūros pokyčio procesų priklausomybė.

Tikslas: iširti automobilio padangų slėgio pokyčio įtaką riedėjimo pasipriešinimui.

Uždaviniai:

1. Atlikti literatūros analizę padangų gamybos, slėgio pokyčio jų eksploatacijos metu tematikomis
2. Išanalizuoti jau atliktų tyrimų teigiamus ir neigiamus aspektus
3. Atlikti automobilio padangų slėgio ir oro temperatūros pokyčių eksploatacijos metu tyrimą
4. Atlikti padangų kontakto ploto įtakos riedėjimo pasipriešinimo koeficientui tyrimus
5. Parengti atliktų tyrimų išvadas ir gautų rezultatų analizę.

1. Padangos

1.1. Padangos sudėtis

Didžioji dalis eisme dalyvaujančių transporto priemonių, kontaktą su kelio paviršiumi išlaiko per dažniausiai iš gumos sudarytus gaminius – padangas. Seniausi pasaulyje žinomi tokio gaminio pavyzdžiai su guma neturėjo nieko bendro. Padangos vaidmenį atlikdavo metalinės juostos, tvirtinamos ant medinių vežimų ratų, su pagrindine užduotimi sutvirtinti rato konstrukciją, ją apspaudžiant metalu bei sumažinti konstrukcijos dilimą riedėjimo skirtingais kelio paviršiais metu. Metalinės juostos būdavo kaitinamos krosnyje, tada dedamos ant rato konstrukcijos ir atvėsintos. Šio proceso metu metalas susitraukdavo standžiai apspausdamas medinę rato konstrukciją. Tokio tipo ir paskirties padangos buvo sėkmingai naudojamos XV ir XVI amžiuose. Pirmasis pneumatinės padangos konstrukcijos panaudojimas užfiksuotas tik 1887 metais. Tai padarė škotas John'as Boyd'as Dunlop'as [1], siekdamas sumažinti diskomfortą savo sūnui važinėjant prastos kokybės kelio dangomis. Vis dėlto vėliau šio išradimo patentas nebuvo priskirtas jam, kadangi pirminį gamybos procesą 1845 metais užpatentavo taip pat škotas Robert'as William'as Thomson'as.

Žvelgiant iš padangos kaip gaminio konstrukcinės perspektyvos, gamyboje naudojamose žaliavose vis dar galima surasti metalo. Nors forma ir jo paskirtis per laiką yra smarkiai pakitusi. Šiuolaikinių lengvųjų automobilių naudojamų padangų dizainas yra kompleksiškas, sudėtingas struktūrinis kūrinys, sudarytas iš grupės įvairių elementų, tokių kaip: guma, plienas ar tekstilė. Visos šios medžiagos bendram gaminiui suteikia iš anksto gamintojo numatytą saugumui užtikrinti reikalingų savybių rinkinį. Tos savybės gali būti tokios kaip: padangos forma, standumas, stiprumas, vibracijos slopinimas, šilumos ir elektrostatiškų krūvių išsklaidymas. Gamintojai tikisi, jog kiekviena iš gamybos linijos išėjusi padanga veiks pagal projektavimo metu numatytas gaminio darbinės specifikacijas; būtent todėl medžiagų pasirinkimas ir jų kokybė yra ne mažiau svarbūs aspektai, kartu su padangos gamybos technologijomis. Padangos yra transporto priemonės dalis, atliekanti nenuginčijamai vieną svarbiausių vaidmenų siekiant užtikrinti vairuotojo bei keleivių saugumą, todėl jų gamybos proceso kokybės užtikrinimas ir taikomų reikalavimų atitikmens vertinimas visame procese laikomi kertiniais gero gaminio pamatais. Įvairūs pažeidimai gamybos metu dažniausiai gali atsirasti dviejų skirtingų medžiagų sąlyčio taškuose ir yra skirstomi į vidinius, išorinius, šoninės sienelės, protektoriaus paviršiaus arba briaunos pažeidimus. Padanga yra vientisa sistema, dažniausiai jungianti beveik dvidešimt skirtingų elementų, kurie turi įtakos automobilio valdymui [2]. Priklausomai nuo padangos naudojimo paskirties, ji gali būti gamybos proceso metu sutvirtinama eile skirtingų elementų, tokių kaip: izoliaciniai įdėklai, padangos šoninės sienelės sutvirtinimai ir kitokio tipo protektorius. Pabaigus padangos projektavimo, dokumentacijos rengimo bei prototipų kūrimo etapus, prasideda nauji procesai. Jų metu pradedama ruošti komponentus, reikalingus gamyboje. Gamintojui siekiant į rinką išleisti aukščiausios klasės ir kokybės padangas, visos medžiagos turi būti kruopščiai parenkamos pagal joms numatytas fizines bei chemines savybes, storį, dydį ir kt. Projektavimo specifikacijų privalo būti laikomasi kiekvienoje gamintojo gamykloje, tik tokiu būdu galima užtikrinti, jog skirtingose vietose pagamintos to pačio tipo padangos turės vienodas eksploatacines savybes. Pagrindiniai padangos gaminį sudarantys komponentai, jų medžiagos bei paskirties aprašymai pateikiami 1 lentelėje.

1 lentelė. Padangos sudėtis [3]

Elementas	Medžiaga	Aprašymas
Vidinė danga	Sintetinė butilo guma	Didelis atsparumas rūgštims, bazėms. Sumažina oro pralaidumą ir apsaugo vidines padangos dalis nuo vandens ir deguonies poveikio.
Tekstilės korpusas	Tekstilės audinys, sudarytas iš 1,0-1,5 mm storio kordo gijų	Struktūra leidžianti padangai išlaikyti formą esant vidinėms apkrovoms. Perkelia apkrovas greitėjimo, stabdymo ar važiavimo posūkyje metu.
Viela	Guma dengta viela	Užtikrina padangos tinkamą laikymąsi ant ratlankio. Trinties pagalba perduoda išilgines veikiančias jėgas.
Užpildas	Sintetinė guma	Užtikrina aukštą sienelės standumą, važiavimo komfortą, valdomumą ir padangos ilgaamžiškumą.
Šoninė sienelė	Guma dengta nailono arba aramido viela	Apsaugo padangą nuo trinties ir aplinkos veiksnių, tokių kaip: UV spinduliai, temperatūros svyravimai, cheminiai junginiai.
Diržai	Gumos mišinys turintis nusidėvėjimą stabdančių priemaišų	Suteikia padangai tvirtumo. Išlaiko protektorių, apsaugo nuo gilių korpuso pažeidimų, sumažina riedėjimo pasipriešinimą.
Protektorius	Mišinys kurio viena iš pagrindinių sudedamųjų dalių yra suodžiai	Užtikrina manevringumą, sukibimą, mažina nusidėvėjimą, mažina skleidžiamą garsą važiavimo metu.

Nors pasaulyje padangas gaminančių įmonių dabar jau yra daug, tačiau pagrindinio gaminio struktūra beveik visais atvejais išlieka standartinė. Viršutinis lengviausiai matomas padangos sluoksnis sudarytas iš specialaus gumos mišinio. Viena didžiausių transporto priemonių padangų gamintojų įmonių „Continental“ tiksliai aprašo savų padangų gamybos procesą [4]. Dažniausiai šiuolaikinių automobilių padangos guma yra sudaryta iš 25 skirtingų komponentų, iš kurių maždaug pusę sudaro įvairios gumos rūšys.

Pirminė rūšis yra natūrali guma, gaunama iš specialiai atrinktų medžių auginamų didelėse plantacijose. Nurinkta žaliava yra apdirbama rūgštimi, nuplaunama vandeniu ir sandėliuojama rulonų pavidalu. Antra rūšis - sintetinė guma, sukuriama pasinaudojant skirtingų cheminių elementų maišymu tarpusavyje tam pritaikytose laboratorijose. Gamybos metu tiek natūralios kilmės, tiek dirbtinė guma yra tiksliai pjaustoma dalimis, sveriami bei maišoma su kitais komponentais pagal standartus atitinkančias instrukcijas. Būtent iš šių dviejų gumų mišinio sudaromas padangos raštas - grioveliai. Giliau yra dedamas sustiprintas gumos sluoksnis 1 paveiksle pažymėtas numeriu 2, taip siekiant geriau apsaugoti padangą nuo galimų išorinių pažeidimų. Sekantis dedamas vientisas sustiprintas apsauginis sluoksnis, numeris 3. Norint pagerinti stabilumą dedami du platūs pagrinde iš plieno sudaryti sluoksniai „kordas“, numeris 4. Jam pagaminti didžioji dalis medžiagų yra naudojama ir rūbų pramonėje, tokios kaip: viskozė, nailonas, polisteris, aramidas. Žinoma didžioji dalis šios padangos sudedamųjų dalių yra gaunama iš metalo pramonės. Ši gamybos pramonės atšaka aprūpina gamintojus didelio stiprumo plienu. Kitas padangos sudedamąsias dalis galima matyti 1 paveiksle.

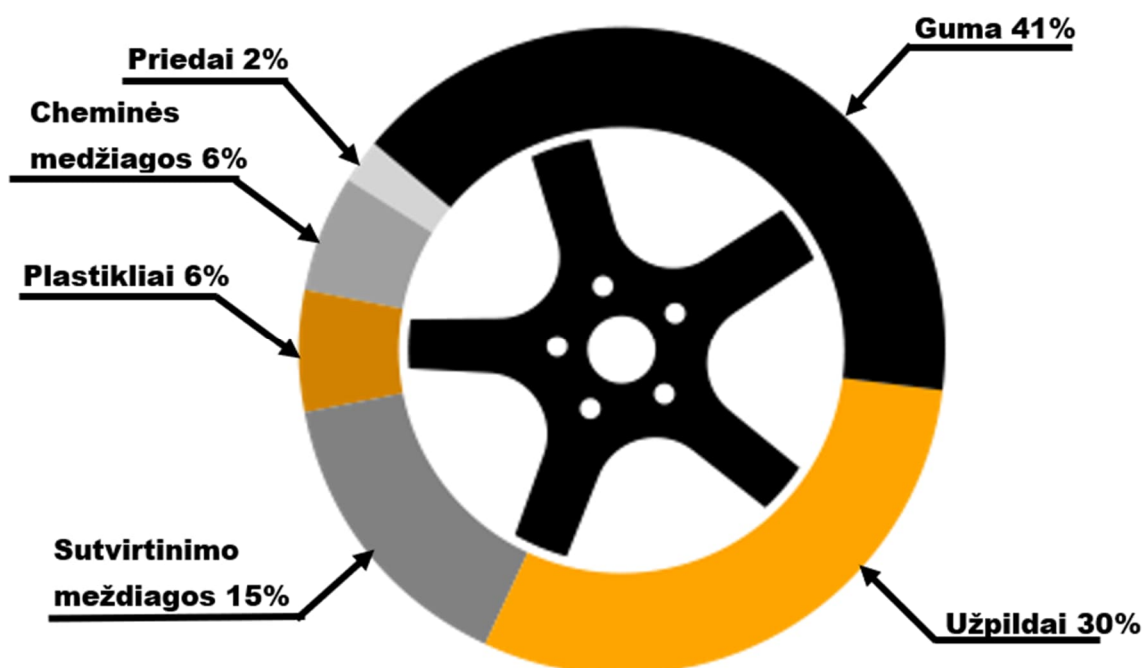


1 pav. Padangos sandara [5]

5 numeriu paveiksle žymimas sustiprintas korpusas, taip pat padedantis išlaikyti padangos stabilumą. Paskutinė sudedamoji dalis 6 numeriu pažymėta metalinė viela, apsauganti padangą, jeigu susiklosčius nepalankioms aplinkybėms, vairuotojas yra priverstas tęsti kelionę su išsileidusia padanga. Taigi bendrai transporto priemonių padangose naudojamas medžiagas perteikiant procentine išraiška gaunama (2 lentelė ir 2 pav.):

2 lentelė. Padangos gaminio medžiagų procentinė sudėtis [5]

Sudedamoji dalis	Kiekis padangoje procentais
Guma (natūrali ir sintetinė)	41 %
Užpildai (anglis, silikonas, kreida ir kt.)	30 %
Sutvirtinimo medžiagos (plienas, poliesteris, viskozė, nailonas)	15 %
Plastikliai (alyvos, dervos)	6 %
Cheminės medžiagos vulkanizacijai (siera, cinko oksidas ir kt.)	6 %
Nusidėvėjimą mažinantys priedai ir kitos cheminės medžiagos	2 %

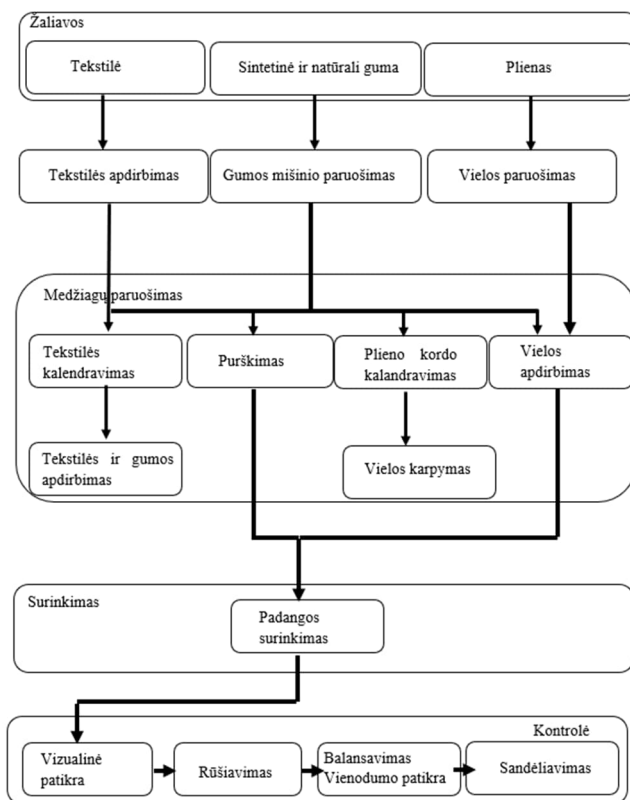


2 pav. Padangos sudėtis [5]

Taip pat svarbu paminėti faktą, kad transporto priemonių padangų sudėtis yra stipriai priklausoma ir nuo norimos pagaminti padangos tipo, bei eksploataavimo periodo. Jeigu visos padangos būtų gaminamos vienodai, pavyzdžiui vasarinio mišinio modeliai, temperatūrai nukritus žemiau 7°C, prarastų savo savybes ir sukietėtų. Norint to išvengti, gamintojai siūlo padangas pagamintas iš kitokio tipo mišinio kurios yra atsparios ekstremaliems oro sąlygų svyravimams, geriau žinomos kaip – žieminės arba universalios. Tyrimo metu bus siekiama nustatyti abiejų tipų: vasarinių ir žieminių padangų slėgio pokyčius nuo aplinkos temperatūros bei vairavimo tipo.

1.2. Gamybos proceso kokybės užtikrinimas

Kokybiškų sudedamųjų gaminio dalių parinkimas yra tik vienas iš dviejų svarbiausių aspektų visame gamybos procese. Antrasis kertinis faktorius yra gamintojo gebėjimas užtikrinti kokybę viso gamybos proceso metu. Tam skirtingos įmonės taip pat pasitelkia įvairių veikimo principų bei analizių metodus. Kaip nurodoma Marcin Tamborski, Izabela Rojek ir Dariusz Mikolajewski parengtame straipsnyje pavadinimu „Revolutionizing tire quality control: AI’s impact on research, development and real life applications“ [6] padangų gamybos procesas apibūdinamas 3 paveiksle:



3 pav. Padangos gamybos procesas [6]

Pirmasis žingsnis visame gamybos procese yra jau aptartų tinkamų gaminio sudedamųjų dalių pasirinkimas. Tai įgyvendinus sekantys gamybos proceso žingsniai yra žaliavų apdirbimas: guma bei įvairios kitos cheminės medžiagos sumaišomos tarpusavyje, iš plieno pagaminama viela, apdirbami naudojami tekstilės produktai. Gaminiai praėjus visus gamybos proceso etapus pereinama į paskutinį – kontrolės patikros etapą. Šiame žingsnyje padanga yra apžiūrima, atliekant pirminę vizualinę pagaminto produkto patikrą. Ilgą laiką ši patikra buvo vykdoma gamyklos darbuotojams mechaniškai apžiūrint ir įvertinant pagaminimo kokybę. Tačiau tobulėjančios technologijos dabar suteikia galimybę pasitelkti dirbtinio intelekto algoritmus [7]. Skaitmeninė grafika, kuri remiasi giluminio

mokymosi metodu, leidžia gamintojams nustatyti tiriamojame padangoje esančius tokius gamybinius defektus kurie anksčiau naudotos vizualinės darbuotojo patikros metodu būtų tiesiog nepastebimi, kaip pavyzdys: oro burbuliukai šlyties vaizduose. Tokia kokybės užtikrinimo sistema naudoja slenkančio lango pagrindu veikiančius hibridinius konvoliucinius neuroninius tinklus. Jų pagalba gauti šlyties vaizdai padalijami į atskirus regionus, taip siekiama nustatyti burbuliukų sukeltus defektus [7], o tada pasitelkiami dar greitesni tinklų modeliai burbuliukų defektams surasti pačiuose padangų šlyties vaizduose bei nustatyti. Tokių metodų naudojimas leidžia gamintojams sumažinti klaidingų atvejų skaičių iki 18%. Tačiau tai nėra vienintelis transporto priemonės padangų defektų tipas kuris gali atsirasti gamybos proceso metu. Kitos galimos jų variacijos dirbtinio intelekto gali likti nepastebėtos arba interpretuojamos neteisingai. Tai rodo, jog šis gamybos kokybės kontrolės įrankis kol kas negali būti laikomas visiškai patikimu metodu defektų aptikimui ir siekiant didesnio patikimumo jis reikalauja daugiau laiko kūrimo ir tobulinimo procesams.

Alternatyvų susidariusių burbuliukų nustatymo metodą pradėjo taikyti Taivano valstybėje įsikūręs padangų gamintojas [8]. Šiuo naujuoju metodu galimi gamybos defektai klasifikuojami į šešias skirtingas kategorijas, o gaunami padangų vaizdai yra iš anksto programiškai apdorojami siekiant padidinti rečiau pastebimų defektų matomumą. Taip pat naujasis metodas yra unikalus tuo, jog turi gebėjimą mokytis iš ankstesniuose modeliuose nepastebėtų defektų bei fiksuoti juos programos atmintyje. Tokios galimybės leidžia gamintojui pasiekti 98% gamybos defektų aptikimo tikslumą. Vienas iš pagrindinių straipsnio [8] tikslų yra siekis parodyti jau esamus ir plačiai naudojamus padangų gamybos sferoje kokybės užtikrinimo metodus, bet tuo pačius ir apžvelgti galimas dirbtinio intelekto panaudojimo perspektyvas.

1.2.1. Dirbtinio intelekto pritaikymas gamybos įmonėse

Viena didžiausių ir žinomiausių lengvųjų ir sunkiasvorių transporto priemonių padangų gamybos kompanija „Continental Tires“ jau dabar pasitelkia dirbtinio intelekto galimybes, jog užtikrintų savo gaminių kokybę. Atsiradusios galimybės yra išnaudojamos įvairiais metodais, nuo jau aprašytos gaminių patikros, naujų technologijų ir procesų paieškos iki esamų produktų stiprybių bei silpnybių analizės, siekiant pagerinti jų kokybę. Pasitelkiami dirbtinio intelekto galimybes, gamyklos inžinieriai gali optimizuoti gaminių parametrus, tokius kaip: naudojamas protektoriaus raštas, mišinio sudėtis ar netgi pačios padangos konstrukcija. Dirbtinio intelekto integracija į gamybos bei projektavimo procesus sudaro palankias sąlygas greitesnėms iteracijoms bei užtikrintesnių sprendimų priėmimams.

Tačiau „Continental Tires“ nėra vienintelė padangų gamybos sferos milžinė, jau siekianti pritaikyti dirbtinio intelekto teikiamas galimybes savo procesams optimizuoti. Ši technologija kitokiais pritaikymo būdais, tačiau jau vis plačiau yra naudojama ir kito gerai žinomo padangų gamybos koncerno „Michelin“. Čia yra pasitelkiamas mašininis mokymasis, siekiant patobulinti esamus produktų kūrybos procesus. Turint didelius kiekius duomenų apie produktus, pasitelkusi dirbtinį intelektą, kompanija gali analizuoti ir išgauti vertingiausią informaciją. Siekdama didžiausio įmanomo gautų rezultatų tikslumo, įmonė stengiasi didinti turimų duomenų kiekį, rinkdama jau esamų klientų atsiliepimus apie jų naudojamus gaminius.

1.2.2. Medžiagų parinkimas

Lengvųjų automobilių padangų sudėtinės detalės jau aptartos anksčiau, tačiau straipsnyje [7] taip pat apžvelgiama ir galimybė, pasitelkiant dirbtinio intelekto galimybes, optimizuoti jų pasirinkimo

procesą. Ši naujovė suteikia gamintojams galimybę tirti įvairius skirtingus medžiagų derinius, optimizuoti jau esamų kūrinių sudėties formules, nekuriant realaus gaminio prototipo. Kaip teigiama Lundo universiteto mokslininkų [7], pasitelkiant naujausius dirbtinio intelekto metodus gumos bei atraminių paviršių analizei atlikti, pavyko suprasti sąveikas iki mikroskopinio lygio. Tai leido sukurti naujus gumos mišinius, pasižyminčius geresnėmis padangos veikimo esminėmis savybėmis, tokiomis kaip: atsparumas dilimui, mažesnis pasipriešinimas riedėjimo metu bei geresnis sukibimas su kelio paviršiumi.

1.2.3. Priežiūros numatymas

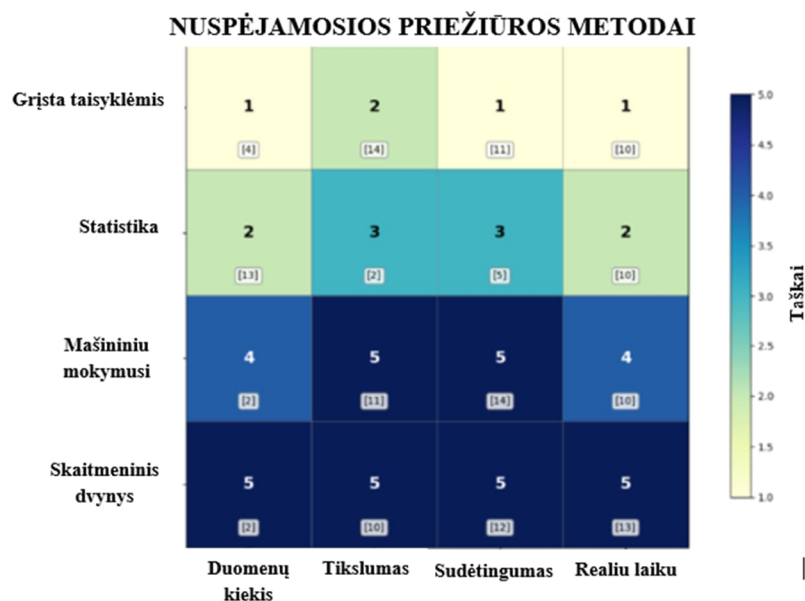
Naujos technologijos įgalina gamintojus kurti labiau nuspėjamas padangų priežiūros strategijas. Nuolat yra kaupiama informacija apie pagrindinius padangų parametrus kaip: slėgis, temperatūra, nusidėvėjimas. Dirbtinio intelekto algoritmai geba padėti numatyti kuriuo metu vairuotojui reikėtų atlikti planinę techninę apžiūrą arba pasikeisti naudojamų padangų komplektą nauju. Taip sprendžiami naudojimo efektyvumo bei ekologijos klausimai. Kadangi apie galimą per didelį gaminio nusidėvėjimą yra žinoma iš anksto ir prevencinis jo pakeitimas nauju gali padėti sumažinti galimo nelaimingo atsitikimo galimybę. Taip išvengiant galimų prastovų, dėl techninio transporto priemonės gedimo gabenant krovinį.

1.2.4. Iššūkiai

Dabartinis dirbtinio intelekto technologijų išsivystymo lygis atneša gamintojams didelį kiekį informacijos bei įžvalgų kartu sukurdamas ir naujus iššūkius. Naujausių sistemų diegimas ir integravimas į jau esančias gamybos linijas dažniausiai kainuoja brangiai, dėl privalomų gamybos pertraukų, sistemų pakeitimų. Tačiau netgi ir naujausios technologijos kol kas turi skirtingų apribojimų. Siekiant išgauti tiksliausius rezultatus, įvesties duomenys privalo būti išsamūs ir visiškai tikslūs.

1.3. Skaitmeninis dvynys

Viena iš sparčiausiai tobulėjančių technologijų greta dirbtinio intelekto, vis dažniau pritaikoma ne tik civilinės inžinerijos sferoje, bet ir gamybinėje inžinerijoje. Ši technologija suteikia galimybę koreguoti parametrus, modeliuoti skirtingas galimas situacijas realiuoju laiku. Tokia modernios dalių priežiūros galimybė sumažina galimų netikėtų defektų atsiradimą bei palengvina detalių priežiūrą. Moderniausia šios sistemos versija vis dažniau yra pritaikoma ir dabar. Jos veikimo principas grindžiamas iš įvairių skirtingo tipo jutiklių surenkama informacija, kurią sparčiausiai galima apdoroti su jau aptarta dirbtinio intelekto pagalba. Išanalizavus visus gaunamus duomenis, sistema geba vartotojui pranešti apie galimas problemas, šiuo atveju padangoje, taip sutaupant vairuotojo laiką kuris galėtų būti paskirtas paprastai vizualinei padangos apžiūrai.



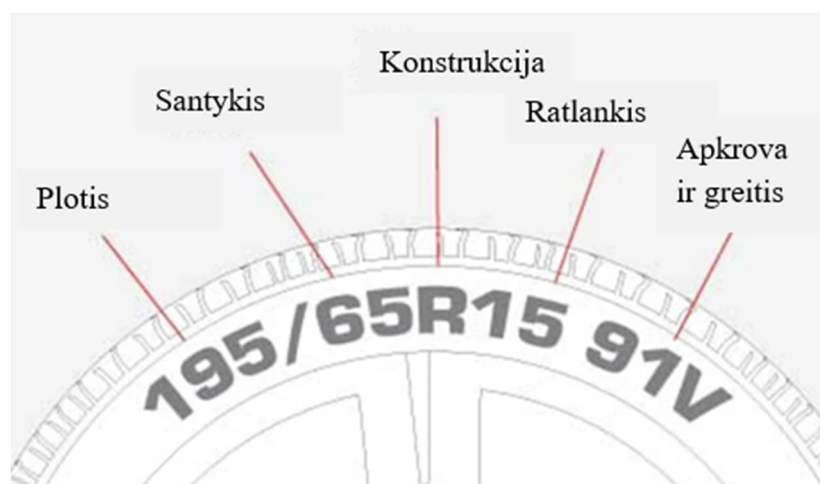
4 pav. Skaitmeninio dvynio technologijos palyginimas [8]

Skaitmeninio dvynio technologijos pritaikymas aprašytas ir E. Imane, E. B. Abdellah, M. Ramadany bei A. Ouadrhiri straipsnyje „AI-Driven Predictive Maintenance for Intelligent Tires: A Real-Time Digital Twin Framework“ [23]. Straipsnyje taip pat pateikiamas jau naudojamų priežiūros planavimo sistemų palyginimas su skaitmeninio dvynio technologija (4 pav.). Visi metodai lyginami keturiose skirtingose kategorijose: reikalingu duomenų kiekiu, nustatymo tikslumu, sudėtingumu bei galimybe vertinti rezultatus realiuoju laiku. Kiekvienas iš šių aspektų galėjo būti vertinamas maksimaliu 5 balų įvertinimu. Kaip galima matyti iš pavaizduotų rezultatų priežiūros sistema paremta taisyklėmis anot straipsnio autorių yra vertinama kaip prasčiausias variantas. Geresnis įvertinimas autorių suteiktas statistiniam priežiūros metodui. Kai detalių priežiūra, aptarnavimas, keitimai atliekami atsižvelgiant į jau turimą statistinę informaciją.

Kaip pateikiama nagrinėjamame straipsnyje [8], atliktas tyrimas „Continental“ padangų gamybos įmonėje parodė, jog paprastų kokybės užtikrinimo metodų integracija į jau veikiančią gamybos sistemą yra lengvesnė, tačiau gamykloje įdiegus skaitmeninio dvynio technologiją pastebimas gerokai padidėjęs galimų gaminių defektų išankstinis numatymas. Tokie atnaujinimai ypatingai svarbūs jeigu siekiama įsodiegti naujausias galimas kokybės užtikrinimo priemones. Norint turėti patikimiausią padangų gamybos kontrolės sistemą, dirbtinis intelektas privalo būti pastoviai atnaujinamas, jog galėtų prisitaikyti prie besikeičiančių gaminių konstrukcijų, sudedamųjų dalių, medžiagų ar eksploatacinių reikalavimų.

1.4. Padangų matmenys

Kitas svarbus aspektas tyrimo atlikimui yra įvertinti transporto priemonės naudojamų padangų matmenys. Standartiškai gamintojų priimta, jog visa informacija apie padangų matmenis užrašoma ant išorinės padangos sienelės (5 pav.).



5 pav. Padangos matmenys [9]

Pirmasis skaičius nurodo naudojamos padangos plotį, kaip 5 paveiksle parodytu atveju 195 mm. Antrasis skaičius yra padangos aukštis. Tačiau jisai išreiškiamas procentine dalimi, skirtingai nuo pločio, kuris iš karto yra rašomas milimetrais. Padangos aukštis apskaičiuojamas:

$$h = \frac{(195 \cdot 65)}{100} = 126,75 \text{ mm.} \quad (1)$$

Paskutinis užrašė nurodomas skaičius nurodo padangos konstrukcinį tipą, dažniausiai radialinis, bei privalomo naudoti ratlankio dydį, šiuo atveju 15 colių.

Likę ženklai transporto priemonės savininką informuoja apie apkrovos koeficientą, šiuo atveju 91. Šis skaičius nurodo maksimalų galimą padangos apkrovimą. Visi galimi lengvųjų automobilių padangų apkrovimo koeficientai yra nurodomi žemiau pateiktoje 3 lentelėje.

3 lentelė. Padangų apkrovos koeficientai [10]

Apkrovos koeficientas					
Apkrovos koeficientas	Apkrova, kg	Apkrovos koeficientas	Apkrova, kg	Apkrovos koeficientas	Apkrova, kg
65	290	77	412	89	580
66	300	78	425	90	600
67	307	79	437	91	615
68	315	80	450	92	630
69	325	81	462	93	650
70	335	82	475	94	670
71	345	83	487	95	690
72	355	84	500	96	710
73	365	85	515	97	730
74	375	86	530	98	750
75	387	87	545	99	775
76	400	88	560	100	800

Raidė užrašyta paskutinėje vietoje po apkrovos indekso informuoja transporto priemonės savininką apie galimą maksimalų leistiną greitį, kuriuo automobiliui judant gamintojas dar gali užtikrinti tinkamas padangos darbinės charakteristikas. Maksimalios šio rodiklio galimos reikšmės nurodomos 4 lentelėje.

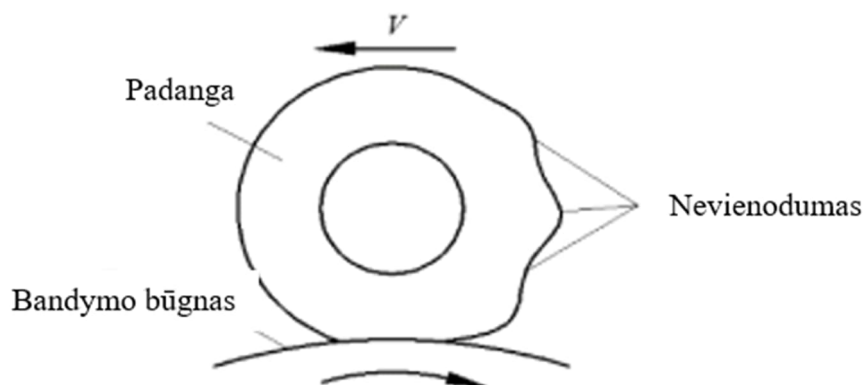
4 lentelė. Maksimalus leistinas greitis [10]

Žymėjimas	Leistinas greitis	Žymėjimas	Leistinas greitis
Q	Iki 160 km/val	H	Iki 210 km/val
R	Iki 170 km/val	V	Iki 240 km/val
S	Iki 180 km/val	W	Iki 270 km/val
T	Iki 190 km/val	Y	Iki 300 km/val

Kaip galima matyti iš informacijos pateiktos 4 lentelėje keliuose vykstančiame eisme gali būti dalyvių, kurių naudojamų padangų gamintojo maksimalus leistinas greitis negali viršyti 160 km/val ribos, jeigu norima vairuoti užtikrintai žinant, jog visos automobilio sistemos veikia gamykliškai nustatytose saugumo ribose.

1.5. Padangos vienodumo tyrimas

Kiek svarbus greičio faktorius vertinant saugumą per transporto priemonės padangų prizmę parodo tyrimas [11]. Sparčiai vystantis ir tobulėjant automobilių pramonei, senesnių transporto priemonių našumas nebeatitinka šių dienų vairuotojų poreikių komforto, valdomumo atžvilgiu. Todėl gamintojai labai didelį dėmesį teikia padangų tiekėjams, kadangi būtent jų tiekiamo produkto pagalba galima padidinti transporto priemonės našumą, komfortą ir stabilumą. Automobiliui važiuojant dideliu greičiu, padangos pradeda netolygiai deformuotis, todėl keičiasi radialinių, šoninių bei tangentialinių jėgų balansas, vadinamas padangos nevienodumu. Jeigu automobilio padanga važiavimo metu dėl susidarančių jėgų nesugeba išlaikyti savo formos, vairuotojas gali pradėti vibracijas, o tai sumažina transporto priemonės manevringumą, komfortą, bei padidina rizikas sugadinti kitus važiuoklės elementus. Siekiant išsiaiškinti ribines transporto priemonės judėjimo greičio vertes, padangų gamintojai atlieka vienodumo bandymus, kurių tikslas yra įsitikinti, kad faktinė matavimo vienodumo parametro paklaida yra leistinose tolerancijos ribose, tik tokiu būdu galima užtikrinti padangos kokybę eksploataavimo metu.



6 pav. Padangos nevienodumo diagrama [11]

Susidarantys padangos nevienodumai grafiškai pateikiami 6 paveiksle. Galima matyti, jog formą padanga praranda priešingoje judėjimui pusėje. Kai transporto priemonė važiuoja, nevienoda masė sukelia dinaminį bei statinį disbalansą, todėl padanga sukdamasi generuos banguojančias jėgas bei momentus. Šių jėgų dydžiai yra susiję su masės, formos bei standumo disbalansais. Tokios nesubalansuotos jėgos, sukimosi plokštumoje lemia radialinių, tangenintinių bei šoninių jėgų atsiradimą, kas sąlygos padangos deformavimąsi ir padangai praradus savo pirminę formą važiavimo metu gali atsirasti transporto priemonės vibracijos bei siūbavimai.

Siekiant to išvengti gamintojai savo sukurtoms padangoms atlieka vienodumo bandymus. Tai reiškia, jog padangos yra tikrinamos dėl galimo nevienodo dydžio, masės ar jėgos vienetams veikiant tam tikroms slėgio, apkrovų ar greičio sąlygoms. Kaip rašoma *Meng Du, Pengfei Sun, Shuiting Zhou, Hongwu Huang ir Jie Zhu* [11] parengtame straipsnyje, padangų vienodumo bandymas atliekamas naujai pagamintą padangą sukant didelio greičio bandymo mašinoje. Kintamosios srovės elektros servo variklis suka būgną ir perduoda padangai tam tikros vertės apkrovas. Tam, kad padanga riedėtų, naudojamas nuolatinės srovės variklis kuris palaiko būgno sukimosi greitį pastovų. Jutikliai sumontuoti ant būgno bei padangos velenų. Kai padangos velenas apsisuka vieną ratą, jutiklis tolygiai paskirsto 1024 impulsus. Kiekvienas sumontuotas jutiklis išmatuoja jėgos bei sukimo momento svyravimus. Prie bandymų mašinos prijungtas kompiuteris registruoja kiekvieno jutiklio užfiksuotas išėjimo vertes, kol surenkami visi duomenys. Naudojant didelio greičio vienodumo bandymo mašiną, būgno paviršius pasitelkiamas skirtingų kelio dangos paviršių imitavimui. Bandymo mašina pavaizduota 7 paveiksle.



7 pav. Vienodumo bandymo mašina [13]

1.6. Slėgio matavimo padangose sistemų apžvalga

Vienas esminių faktorių, lemiančių padangų geometrijos pakitimus važiavimo bei stovėjimo metu, dėl išorinės aplinkos veiksnių, rato viduje atsirandantys slėgio pokyčiai. Šiuolaikiniuose automobiliuose šio parametro sekimui naudojamos įvairios skirtingos technologijos. Plačiausiai paplitęs variantas padangų slėgio fiksavimui: TPMS – (tyre pressure monitoring system) tai sistema skirta pastoviam padangų slėgio fiksavimui, bei nuokrypių nustatymui. Šis metodas yra atskirai skirstomas į dvi šakas [14]:

- tiesioginė TPMS;
- netiesioginė TPMS.

1.6.1. Tiesioginė TPMS sistema

Esminis šių dviejų tipų skirtumas – slėgio matavimo priemonės. Tiesioginio tipo TPMS sistema remiasi transporto priemonės ratlankyje sumontuoto belaidžio daviklio (8 pav.) perduodamais duomenimis.



8 pav. TPMS sistemos jutiklis [15]

Tokio tipo jutiklis į vairuotojo informacinį skydelį geba perduoti ne tik informaciją apie kiekvienoje individualioje padangoje esantį slėgį, bet ir pačios padangos oro temperatūros rodiklius. Tačiau kaip nurodoma Yu Shimming straipsnyje [16], tiesioginės slėgio matavimo sistemos naudoja bevielės antenas. Straipsnio autorių teigimu, šios antenos yra jautrios pašalinių elektros prietaisų skleidžiamiems signalų trikdžiams. Ko pasėkoje vairuotojo gaunamos padangų slėgio vertės gali būti iškraipomos. Be jau anksčiau aprašyto tiesioginės padangų slėgio matavimo sistemos trūkumo, ši sistema turi ir kitų privalumų bei trūkumų:

Privalumai:

- slėgis nėra išskaičiuojamas, o pamatuotas tiesiogiai jutiklio, esančio padangos viduje;
- nėra veikiamas tokių veiksnių, kaip rato sukimasis, ar padangų kaita;
- paprasta kalibracija, pasikeitus transporto priemonės ratams;
- baterijos ilgaamžiškumas, užtikrina mažą keitimo tikimybę;
- gali būti įmontuotas net ir į atsarginį automobilio ratą;

Trūkumai:

- brangesnis variantas nei netiesioginė TPMS sistema;
- nors kalibracija paprasta, tam atlikti gali reikti specialios įrangos;
- nors baterija vertinama kaip ilgaamžė, ji beveik netaisoma ir išsekimo atveju keičiamas turi būti visas jutiklis;
- patentuotos sistemos apsunkina darbą servisams bei naudotojams;
- galimi jutiklių pažeidimai padangų montavimo metu.

1.6.2. Netiesioginė TPMS sistema

Senesnių metų automobilių arba naujesnių paprastesnės komplektacijos modeliuose tiesioginė TPMS sistema nėra naudojama. Padangų slėgis fiksuojamas netiesioginiu metodu pasitelkiant keletą skirtingų automobilyje esančių daviklių ir tik pagal iš jų gautus parametrus, išskaičiuojamas galimas

kiekvienos padangos slėgis. Tokio tipo sistemos veikimas paremtas rato greičio sensoriaus bei anti-blokavimo sistemos bendru panaudojimu. Šie paminėti jutikliai matuoja kiekvieno automobilio rato apsisukimų dažnį ir pagrindiniame kompiuteryje vertes lygina tarpusavyje bei kitais automobilio parametrais kaip greitis. Pagal rato apsisukimų dažnį kompiuteris geba interpretuoti transporto priemonės rato dydį, tokiu atveju nustačius vertės nukrypimus nuo tikėtinos reikšmės kompiuteris priima išvadą, jog klaidingas vertes fiksuojančio rato padangoje galimas slėgio trūkumas. Tokią sistemą tyrinėjo ir mokslininkai [17]. Šiam tyrimui atlikti buvo pasitelkta *Matlab* bei *Simulink* programiniai paketai. Šiose programose mokslininkai suprojektavo netiesioginės padangų slėgio matavimo sistemos modelį. Nustatė, jog vidinis padangos slėgis turi pasikeisti daugiau nei 30% nuo numatytosios arba gamintojo nurodytos standartinės slėgio reikšmės, jog automobilis skydelyje vairuotojui praneštų apie galimą slėgio praradimą padangose. Tačiau apart nustatyto netikslumo, mokslininkai išvelgė privalumą, jog informaciją apie padangų slėgį galima perduoti realiuoju laiku, neturint ir platformos apribojimų, kas suteikia galimybę informaciją siųsti į mobilųjį įrenginį. Tai pabrėžiama kaip esminis netiesioginės padangų slėgio matavimo sistemos pranašumas lyginant su analogine sistema aprašyta aukščiau. Be jau išvardintų privalumų ir trūkumų tokio tipo slėgio matavimo sistema taip pat pasižymi:

Privalumai:

- nebrangi sistema;
- lengvesnė priežiūra bei įdiegimas;
- paprastesnė sistema nei analogas;

Trūkumai:

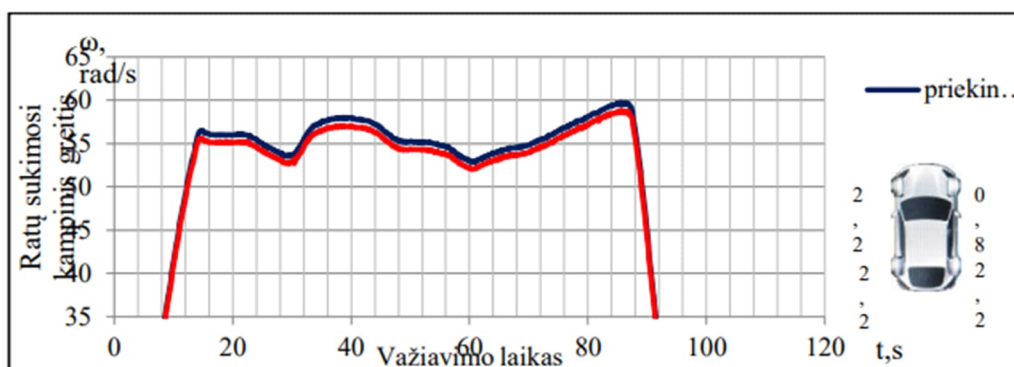
- gali atsirasti netikslumų jei pasikeistų ratų matmenys;
- netikslumai gali atsirasti dėl nevienodai nusidėvėjusių padangų;
- turi būti nustatyta iš naujo kas kartą pripūtus padangas;
- po kiekvieno padangų keitimo reikalingas nustatymas.

1.7. Skirtingų padangų slėgio matavimo sistemų palyginimas

Tiesioginės ir netiesioginės padangų slėgio matavimo sistemų rezultatų skirtumai aprašomi Vaidoto Gvozdo, Sauliaus Nagurno, Vido Žuraulio ir Vytenio Surblio straipsnyje „Lengvųjų automobilių padangų slėgio kontrolės sistemų tyrimas“ [18]. Straipsnyje aprašomas atliktas tyrimas palygina tiesioginės ir netiesioginės lengvųjų automobilių padangų slėgio matavimo sistemų efektyvumus. Tyrimas buvo atliekamas lengvuosius automobilius bandant kelyje. Bandymuose panaudoti automobiliai: *Mercedes Benz S320* (2007), *Mercedes Benz CLS* (2008) bei *Nissan Qashqai* (2018) visi su sumontuotomis skirtingos padangų slėgio matavimo sistemomis. *Mercedes* gamintojo modeliuose buvo naudota netiesioginė slėgio sistema, vertes nustatanti per ABS sistemos jutiklius, o *Nissan* gamintojo modelyje sumontuota tiesioginė padangų slėgio matavimo sistema, kuri vertes matuoja per specialius jutiklius sumontuotus rato ventiliuose.

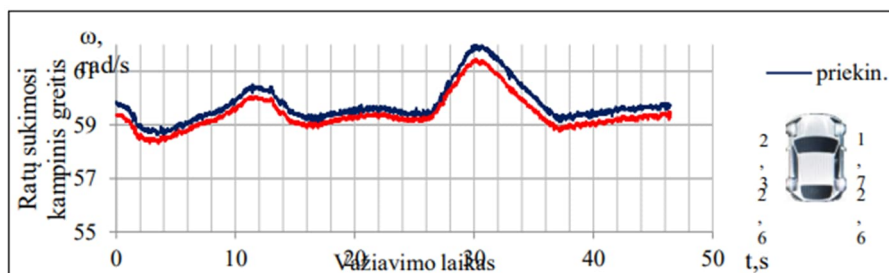
Eksperimento metu buvo atlikinėjami konkretūs bandymai, kurių tikslas buvo nustatyti padangų slėgio vertes, kurias pasiekus sureaguos padangų slėgio kontrolės sistemos. *Mercedes Benz S320* automobilis buvo eksploatuojamas su 255/35 R20 priekinės ašies bei 295/30 R20 galinės ašies padangomis. Padangų slėgis buvo mažinamas po 0,2 bar nuo gamintojo nustatytos standartinės reikšmės. Kiekvienas bandymas atlikinėjimas dvejais skirtingais važiavimo greičiais: 50 km/val. bei

70 km/val. Pastebėta, jog automobilio slėgio sistema suveikė tik sumažinus pradinę vertę 1,4 bar priekiniame dešiniame rate.



9 pav. Mercedes Benz S320 bandymo ratų sukimosi kampinio greičio priklausomybė nuo važiavimo laiko, suveikus slėgio kontrolės sistemai. Važiavimo greitis – 70 km/val. [18]

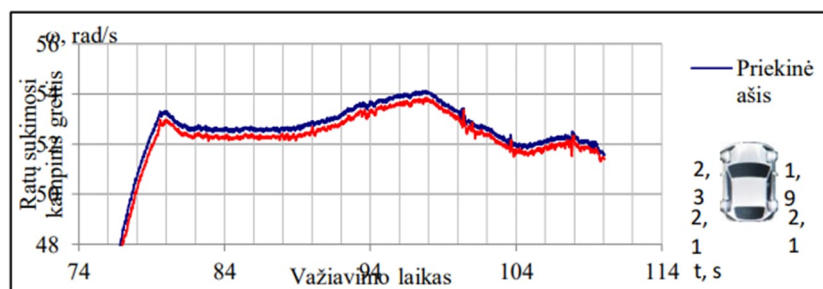
Bandymą atlikus su kitu Mercedes Benz kompanijos automobiliu, kurio padangos: 245/40 R18 bei 275/35 R18 slėgiai jose taip pat buvo mažinami 0,2 bar dydžiu. Naudojamų greičių vertės tokios pačios. Užfiksuota, jog automobilio padangų slėgio matavimo sistema, trūkumą užfiksavo slėgi sumažinus 0,6 bar nuo pradinės padangos slėgio vertės (9 pav.).



10 pav. Mercedes Benz CLS ratų sukimosi kampinio greičio priklausomybė nuo važiavimo laiko, suveikus padangų slėgio kontrolės sistemai. Važiavimo greitis – 70 km/val. [18]

Iš 9 ir 10 paveikslų ir straipsnyje aprašyto bandymo rezultatų, galima matyti, kad net ir to paties gamintojo netiesioginės automobilių padangų slėgio matavimo sistemos, kritines vertes fiksuoja skirtingas, esant skirtingiems naudojamų padangų dydžiams.

Tačiau tyrime buvo naudojamas ir trečiasis automobilis Nissan Qashqai (11 pav.), su jame sumontuota tiesiogine padangų slėgio nustatymo sistema. Šis automobilis bandymuose buvo naudojamas su 215/60 R17 dydžio priekinėmis ir galinėmis padangomis, kaip ir kitais bandymais slėgis rate buvo mažinamas 0,2 bar dydžiu, o bandymas atliekamas važiuojant 50 km/val. ir 70 km/val. greičiais. Tyrimo metu nustatyta, jog Nissan gamintojo tiesioginė padangų slėgio matavimo sistema, per mažą padangos slėgį nustatė esant 0,4 bar sumažėjimui nuo gamintojo rekomenduojamos reikšmės. Tai yra tiksliausia vertė lyginant su kitais dvejais bandyme dalyvavusiais automobiliais.

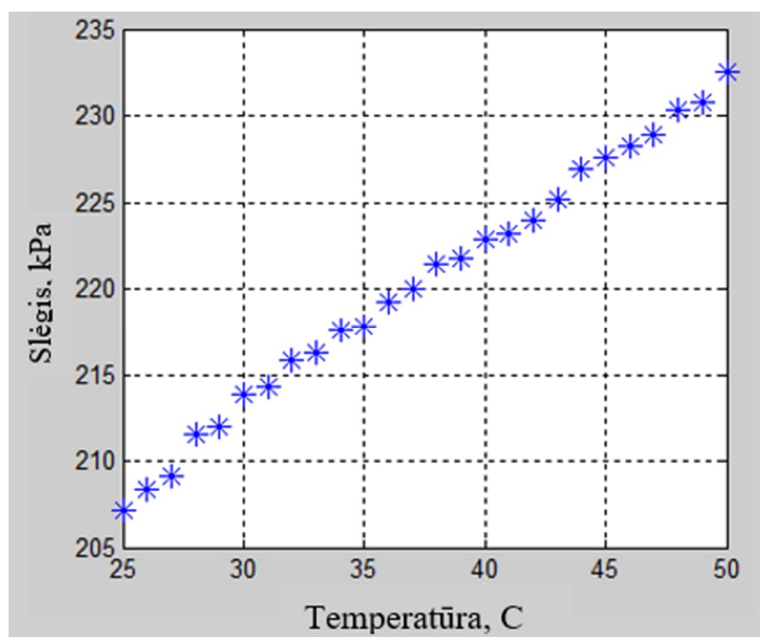


11 pav. *Nissan Qashqai* ratų sukimosi kampinio greičio priklausomybė nuo važiavimo laiko, suveikus padangų slėgio kontrolės sistemai. Važiavimo greitis – 70 km/val. [18]

Atlikus tyrimą, straipsnio autoriai padarė išvadas, kad *Nissan* gamintojo siūloma tiesioginė padangų slėgio matavimo sistema yra efektyvesnė. Turinti didesnę suveikimo tikslumą nei netiesioginė *Mercedes Benz* gamintojo sistema, tačiau norint tai patvirtinti, reikalingi papildomi tyrimai, naudojant žemo profilio padangas su tiesiogine slėgio matavimo sistema. Taip pat teigiama, jog to paties gamintojo automobilių parodytas skirtingas maksimalus galimas slėgio sumažinimas gali būti įtakojamas skirtingo tipo padangų. Tai reiškia, jog naudojant žemesnio profilio padangas, slėgio matavimo sistema gali suveikti vėliau.

1.8. Esminiai veiksniai

Guma kaip ir kitos medžiagos dėl aplinkos sąlygų kaitos keičia savo savybes. Automobiliui judant iš pradinio taško į galutinį, ratuose vyksta daugiausia kaitos procesų. Transporto priemonei judant padangos patiria įvairias apkrovas, tiek judėjimo pradžioje, tiek stabdant judėjimą. Jos deformuojasi, kyla jų temperatūra bei viduje esančio oro temperatūra. Kadangi didžioji dalis kasdieniauose automobiliuose naudojamų padangų yra be kamerų ir tiesiog pripildytos oru, keičiantis padangos temperatūrai kinta ir oro slėgis esantis padangos viduje. Vertinant „Continental“ įmonės straipsniu [19] lauko temperatūrai sumažėjus 10°C, padangos viduje esantis slėgis gali pakisti nuo 0,07 iki 0,14 atmosferos (12 pav.).



12 pav. Padangos slėgio ir oro temperatūros priklausomybė [19]

Šį „Continental“ įmonės tyrimą galima pagrįsti ir kitos kompanijos atliktu eksperimentu. Jau 2013 metais, Švedijoje aprašytame moksliniame darbe [19] buvo teigiama, kad tyrimo metu nustatyta, jog skirtingų gamintojų padangos darbinę temperatūrą dažniausiai pasiekia praėjus nuo 10-20 min. darbo pastoviam režime. Kita kompanija „Tiretrack.com“, įmonė kurios specializacija yra ratų bei padangų pardavimas, atliko tyrimą kurio tikslas buvo nustatyti kaip padangos temperatūra kinta laiko prizmėje. Gauti rezultatai taip pat parodė, jog slėgio kitimas pastovus vyksta pirmas 20 ciklo minučių, kurių metu buvo pastebimas 0,067 atm didėjimas kas 5 min. Praėjus minėtam laiko tarpui ciklas nusistovi ir ryškesni slėgio pokyčiai tampa pastebimi tik 20 min intervalu. Tačiau reikia paminėti, kad šis faktorius ypatingai svarbus, atsižvelgiant į tai, kad didžioji dalis vairuotojų dažniausiai ir važiuoja trumpus atstumus. Remiantis 2019 metais „CV-Online“ tinklalapyje publikuotos apklausos [20] duomenimis, 48% šalies gyventojų savo darbo vietą dažniausiai pasiekia automobiliu, o jų nuvažiuojamas atstumas svyruoja tarp 6-10 km, kas šiuolaikinėmis eismo sąlygomis sudaro apie 20 min kelionės trukmės. Vertinant jau aprašyto tyrimo rezultatu, galima teigti, jog tokios kelionės metu, automobilio padangoje slėgis pakinta kiek daugiau nei 0,25 atm. Toks slėgio pokytis nuo standartinės reikšmės jau galėtų iššaukti klaidos pranešimą vairuotojui.

1.9. Padangų slėgio pokyčio įtaka vairavimui

Kitame autorių publikuotame tyrime [21] nurodoma statistika, kurios duomenys parodo eismo įvykių priežasčių pasiskirstymą (5 lentelė).

5 lentelė. Eismo įvykių statistika [21]

Metai	Eismo įvykių	Kuriuos sukėlė transporto priemonės gedimas	Padangų gedimas	Procentinė dalis
2003	78 630	525	266	51
2004	75 365	493	242	49
2005	72 054	492	247	50
Viso:	226 049	1510	755	50

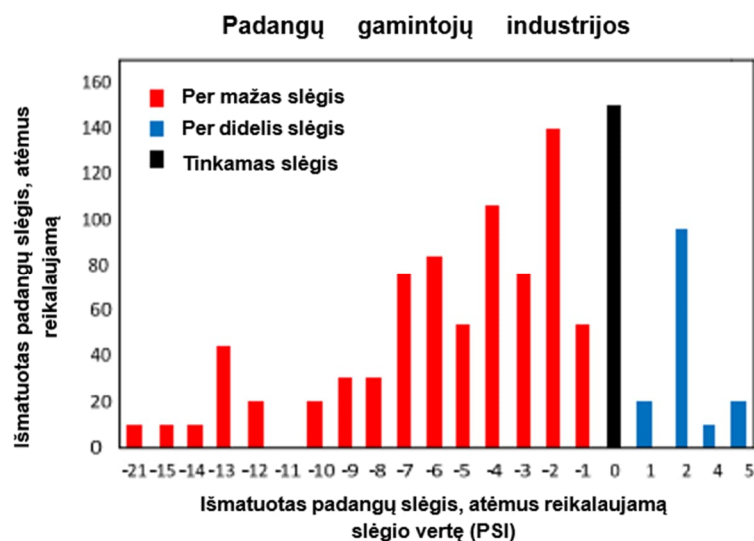
Kaip galima matyti pateiktoje statistikoje, duomenys rinkti Australijoje, kas antras įvykstantis eismo įvykis yra susijęs su transporto priemone, kuri yra eksploatuojama vairuotojui naudojant jau netinkamos būklės padangas. Panaši statistika, bet jau Lietuvos keliuose įvykusių eismo įvykių, aprašoma Edgardo Naidičo ir Justo Bražiūno straipsnyje „Žūčių Lietuvos keliuose dinamika ir priežastys“ [22]. Čia autoriai pateikia lentelę, kurioje nurodoma kiek mirtinų eismo įvykių užfiksuota 2019-2021 metų eigoje, kurių pagrindinis veiksnys buvo techniškai netvarkingas automobilis ar jo komponentai (6 lentelė).

6 lentelė. Dėl transporto priemonių techninės būklės Lietuvoje 2019-2021 m. įvykusių mirtinų eismo įvykių kitimas [22]

Eismo įvykių priežastys	2019 m.	2020 m.	2021 m.
Padangų būklė	0	1	0
Protektoriaus rašto gylis	6	0	1
Techniniai gedimai eksploatacijos metu	5	2	1
Netinkamos padangos esamam metų laikui	3	1	0

Eismo įvykių priežastys	2019 m.	2020 m.	2021 m.
Transporto priemonės perdirbimas	1	0	1
Neskirta dalyvauti viešajame eisme	0	0	1
Neatitiktis reikalavimams	1	3	1
Padangų amžius	2	0	1
Iš viso:	18	7	6

Kaip galima matyti iš pateiktos statistikos, eismo įvykių kurių lemiamas faktorius buvo susijęs su transporto priemonės padangomis skaičius nuo 11 eismo įvykių 2019 metais per 2 metų laikotarpį sumažėjo iki 3. Pokytis matomas ryškus, nors vertės ir nėra statistiškai didelės, tačiau kai nurodoma, jog tai yra dalyvio mirtimi pasibaigusiu eismo įvykių statistika, tai reiškia 8 išsaugotas gyvybes.



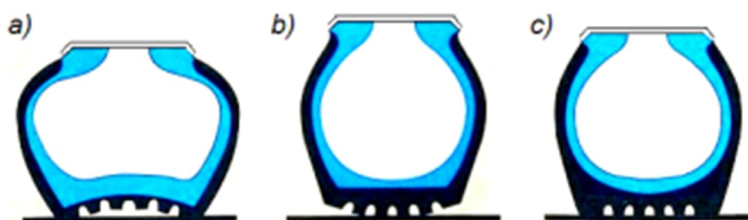
13 pav. Eksploatuojamų padangų slėgio verčių nuokrypis [23]

Jeigu netinkamas padangų slėgis yra tokia dažna eismo nelaimių priežastis, klausimas koks kiekis vairuotojų eksploatuoja savo transporto priemones kiekvieną dieną net nesusimąstydami, kad būtent šis važiuoklės komponentas užtikrinantis vairavimo kokybę ir saugumą, gali būti išsiderinęs. Tokio atlikto tyrimo rezultatai pateikiami 13 paveiksle. Nors dauguma tikrintų padangų slėgio vertės ir atitiko gamyklinius reikalavimus, labai panašiam skaičiui padangų nustatytas daugiau nei 3 PSI slėgio trūkumas, kas atitiktų 0,207 bar slėgio. Antroje vietoje pagal netinkamą slėgio kiekį galima matyti, kad nustatyta 4 PSI arba 0,28 bar trūkumas, tokio kiekio slėgio tyrimo duomenimis trūko net daugiau negu 100 bandyme dalyvavusių automobilių padangų. Labai panašus kiekis matomas ir priešingoje pusėje. Kai slėgis padangose yra per didelis nei gamykliškai numatytas padangos eksploatavimo instrukcijose.

Tinkamo transporto priemonės padangų slėgio svarba yra geriausiai atvaizduojama per geometrinę padangos formą. Būtent padangos yra vienintelis ir kertinis sąlyčio taškas tarp automobilio kėbulo bei važiuojamosios kelio dangos [24]. Taigi, tai sąlygoja, jog tinkama jų būklė daro didelę įtaką vairuotojo vairavimo stabilumui ir transporto priemonėje esančių keleivių saugumui. Dažniausiai pasitaikantis techninis gedimas tiesiogiai susijęs su eksploatuojamomis transporto priemonės padangomis yra jų sproginimas. Šį veiksni sąlygoja per didelis kontaktinio padangos paviršiaus

nusidėvėjimas, remiantis [25], tai nutinka dėl eksploatacijos metu pripūsto netinkamo slėgio padangose. Teisingai pasirinkta padangų slėgio reikšmė kelionės metu pagerina kelis aspektus: transporto priemonės valdomumą, stabdymo kelio sumažėjimą bei sumažina degalų sąnaudas. Kaip teigiama tyrime [26], jeigu transporto priemonės slėgis padangose yra sumažinamas 0,2 bar reikšme, tai lemia 1% išaugusias automobilio degalų sąnaudas bei 10% trumpesnį padangos eksploatavimo laikotarpį. Jeigu nuo gamintojo rekomenduojamos slėgio vertės nukrypstama 0,4 bar, degalų sąnaudų augimas siekia 2%, o padangos eksploatavimo laikotarpis sutrumpėja 30%. Paskutinė tyrime nustatyta vertė yra 0,6 bar mažesnis slėgis negu nurodyta rekomendacijose. Toks pokytis lemia 4% padidėjimą degalų sąnaudų pjūvyje, 45% padangos eksploatavimo laikotarpio sutrumpėjimą bei stipriai išaugusią negrįžtamų padangos deformacijų riziką.

Kitame tyrime [21] nustatyta padangų oro temperatūros priklausomybė nuo joje esančio slėgio. Kaip galima matyti, pagal tyrimo metu sudarytą diagramą [21]. Kylant padangos slėgiui beveik identiška keičiasi ir padangos oro temperatūra. Nors šis pokytis skaitine išraiška neatrodo žymus, tačiau tyrimo metu stengtasi nustatyti kokią įtaką jis gali turėti automobilio degalų sąnaudoms. Jeigu kinta padangos slėgis, tuo pačiu keičiasi ir geometrija (14 pav.).



14 pav. a) slėgio trūkumas b) per didelis slėgis c) tinkamas slėgis [21]

Skirtingos padangos deformacijos dėl slėgio pertekliaus ar jo nebuvimo turi įtakos ne tik automobilio valdomumui, degalų sąnaudoms, bet ir pačių padangų nusidėvėjimui. Šį veiksni patvirtina ir dviejų didžiausių padangų gamintojų atliktas tyrimas [27]. Kaip galima matyti iš 14 paveikslo, esant slėgio trūkumui padangoje, paviršiaus plotas esantis kontakte su keliu padidėja. Tačiau ir pats padangos paviršius pasidaro ne plokščias, o išgaubtas. Vidurinė protektoriaus dalis praranda kontaktą su keliu, pradedamas pastebėti netolygus padangos nusidėvėjimas šoninėse kraštinėse 15 paveikslas



15 pav. Padangos dilimas esant slėgio trūkumui [27]

Taip netolygiai dylant padangai, prastėja jos darbinės savybės, mažėja sukibimas bei didėja avarijos rizika.

Kitas atvejis lemiantis prastėjančias padangos darbinės charakteristikas gali būti slėgio perteklius padangoje (14 pav. b). Esant per dideliui slėgiui, padangos ir kelio kontaktinis paviršiaus plotas smarkiai sumažėja. Tai lemia prastesnį transporto priemonės sukibimą, blogesnį valdomumą bei netolygų padangos dilimą (16 pav.).



16 pav. Padangos dilimas esant slėgio pertekliui [27]

Kadangi padangos paviršius išsilenkia, didžiąją laiko dalį su keliu kontaktą išlaiko tik centrinė protektoriaus vieta, ko pasekoje kaip matoma 16 paveiksle ji nusidėvi labiausiai. Tokiu būdu blogindama savo charakteristikas bei bendrą transporto priemonės valdomumą.



17 pav. Tinkamo slėgio padangos nusidėvėjimas [27]

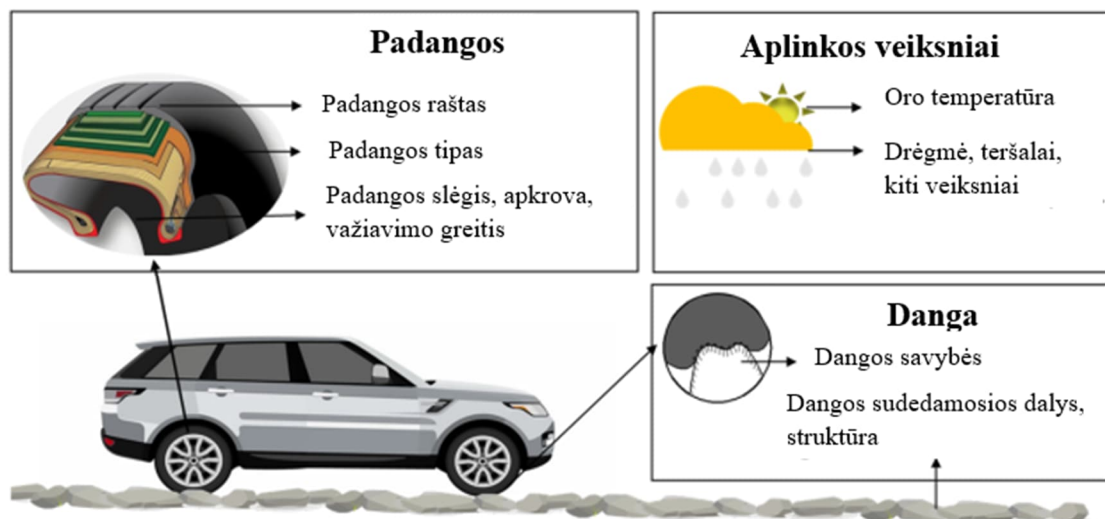
Kaip galima matyti pateiktame 17 paveiksle vairuotojui eksploatuojant tinkamai pripūstą automobilio padangą, jos protektoriaus nusidėvėjimas yra tolygus, bendras paviršiaus plotas išlaiko pastovų sąlytį su kelio danga taip užtikrindamas geriausias padangos darbinės savybes bei saugiausią kelionę.

Kiekvieno automobilio gamintojas išleisdamas transporto priemonę iš gamyklos nurodo rekomendacinius padangų parametrus kuriais eksploatacijos metu vairuotojas yra atsakingas vadovautis, jeigu nori tinkamo automobilio naudojimo.

Tyre Size	Front (bar)	Rear (bar)	Load Capacity	Tyre Size	Front (bar)	Rear (bar)
205/50 R 17 93 W 205/55 R 16 91 V 225/45 R 17 91 W 225/50 R 16 92 W	2,1	2,5	max. 3 people	225/40 ZR 18 225/45 ZR 17	2,1	2,5
195/65 R 15 91 0,T,H M+S 205/50 R 17 93 0,T,H M+S 205/55 R 16 91 0,T,H M+S 205/60 R 15 91 0,T,H M+S 225/45 R 17 91 0,T,H M+S 225/50 R 16 92 0,T,H M+S	2,3	2,7	max. 3 people	245/40 ZR 17 255/35 ZR 18	2,5	3,0
T 115/90 R 16 92 M	4,2	4,2	constant	T 125/80 R 15 96 M	4,2	4,2

18 pav. „BMW“ markės automobilio padangų slėgio lipdukas

Tačiau toks informacinis lipdukas (18 pav.) nurodo optimalųjį slėgį padangose, bet kaip ir minėta anksčiau šis kriterijus transporto priemonės kelionės metu dėl įvairių veiksnių gali kisti. Esminiai galimi veiksniai darantys įtaką automobilio kontakto su kelio paviršiumi įvardijami 19 paveiksle.



19 pav. Veiksniai darantys įtaką padangos kontaktui su kelio danga [28]

Kelionių metu įvertinti visus faktorius kurie nuolat keičiasi kaip: kelio danga, oro temperatūra, drėgmė ar teršalai yra sudėtinga. Tačiau eilę veiksnių tokių kaip: pasirenkamas padangas, jų tipą, raštą, slėgį ar važiavimo greitį, transporto priemonės vairuotojas gali kontroliuoti. Būtent šių veiksnių daroma įtaka automobilio riedėjimo pasipriešinimo koeficientui ir bus siekiama iširti atliekant statinius bei dinامينius bandymus tolimesniame darbe.

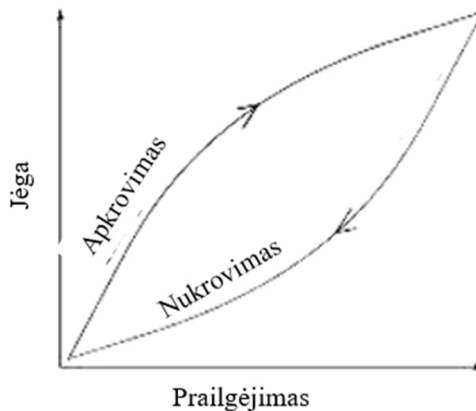
1.10. Riedėjimo pasipriešinimas

Transporto priemonei judėti erdvėje kliudo aibė skirtingų faktorių. Viena didžiausių jėgų sukeliančių pasipriešinimą transporto priemonės judėjimo metu yra oro pasipriešinimas, būtent mažinant šį veiksnių automobilių kūrimo procese, labai didelį vaidmenį atlieka aerodinamika bei jos elementai. Skirtingos oro angos, kampų užapvalinimas, aerodinamines savybes pagerinti galinčios apdailos detalės padeda transporto priemonių gamintojams sumažinti oro pasipriešinimą automobilio judėjimo

metu. Trintis arba pasipriešinimas padangos riedėjimui taip pat be galo svarbus faktorius, lemiantis ne tik automobilio valdomumą, bet ir variklio darbui suvartojamą degalų kiekį.

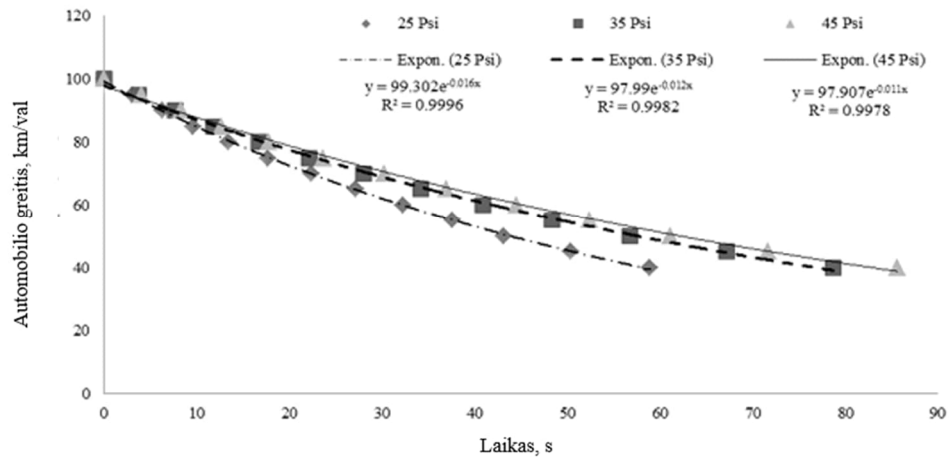
Riedėjimo pasipriešinimas – tai padangos ir paviršiaus su kuriuo judėjimo metu ji kontaktuoja sąveikos charakteristika. Dažniausiai apibūdinama koeficientu f . Šio koeficiento reikšmės augimas stipriai koreliuoja su automobilio kuro sąnaudų didėjimu kelionės metu. Transporto priemonės padangos riedėjimo pasipriešinimas gali būti apibūdinamas kaip energijos kiekis kurį padanga sunaudoja siekiant padengti tam tikrą kelio atkarpą. Koeficiento matavimo vienetas išreiškiamas Nm/m. Šis koeficientas gali būti apibūdinamas kaip išilginė jėga reikalinga norint paridenti apkrautą transporto priemonės padangą pastovių greičiu. Didžiausią įtaką šio koeficiento reikšmei turi tokie veiksniai kaip: kelio dangos tipas, jos būklė, transporto priemonės važavimo greitis, oro slėgis pripūstas naudojamose padangose, oro temperatūros pokyčiai judant kelio paviršiumi, naudojamų padangų parametrai.

Kaip minėta anksčiau, padangos slėgis daro įtaką ne tik padangos darbinėms savybėms, tačiau ir jos formai. Pakitus šiai vertei, padangos kontaktinio paviršiaus plotas gali padidėti. Dėl mažesnės nei rekomenduojama slėgio vertės padangoje, išorinės sienelės neatlaiko automobilio keliamos savito svorio apkrovos ir pradeda bliūkšti bei deformotis. Šių veiksnių poveikis aprašomas *Apiwat Suyabodha* atliktame tyrime [29]. Kaip teigiama straipsnio autoriaus „riedėjimo pasipriešinimo jėga yra apibrėžiama kaip energijos nuostoliai dėl padangos deformacijos“. Riedėjimo metu transporto priemonės padanga pastoviai sukasi, taip yra suspaudžiama bei deformuojama. Tačiau prasisukus, bei dingus veikiančiai apkrovai, padangos forma grįžta į savo pradinę būseną. Histerizės nuostoliai vaizduojami 20 paveiksle esančios figūros plotu.



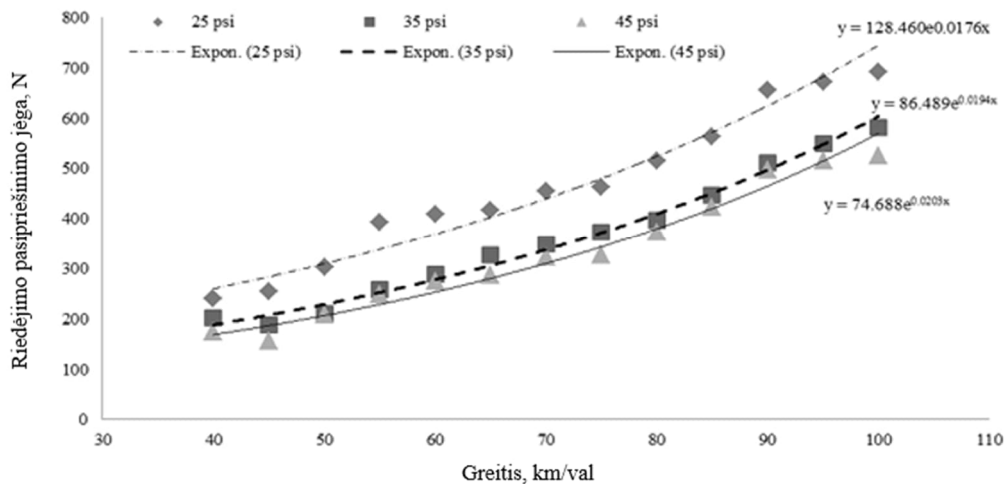
20 pav. Histerizės grafikas [29]

Taigi straipsnio autorius slėgio įtaką riedėjimo pasipriešinimo jėgai tyrė realiomis sąlygomis. Taip padangos paviršius plokštėja ir plečiasi. Šį efektą siekta atvaizduoti ištirti ir darbe atliktame tyrime. Autorius bandymui pasitelkė lengvąją transporto priemonę, su mechanine pavarų dėže, sveriančia 1560 kg, bei eksploatuojama su 215/70/R15 modelio padangomis. Tyrimo metu buvo atliekami bandymai ant lygaus asfalto dangos paviršiaus. Siekiant tiksliausių įmanomų rezultatų be pašalinių veiksnių įtakos buvo pasirinktos oro sąlygos, kai vėjo greitis buvo lygus 0 metrų per sekundę. Taip panaikinant galimo papildomo aerodinaminio pasipriešinimo tikimybę. Pačio tyrimo rezultatai buvo fiksuojami transporto priemonei įsibėgėjus iki 110 km/val greičio, įjungus neutralią pavarą ir lėtėjant iki 40 km/val. Lėtėjimo trukmė buvo fiksuojama prie skirtingų pripūsto transporto priemonės padangų slėgio verčių.



21 pav. Greičio priklausomybė nuo riedėjimo laiko [29]

Kaip galima matyti iš tyrimo autoriaus pateikiamų duomenų 21 paveiksle, didžiausias pokytis pastebimas esant mažiausiai slėgio vertei padangose. Tai paaiškinama tuo, jog prie tokios reikšmės padangos kontaktinio paviršiaus plotas yra didžiausias, kas lemia išaugusį riedėjimo pasipriešinimo jėgos reikšmę. Ši priklausomybė vaizduojama 22 paveiksle.



22 pav. Riedėjimo pasipriešinimo priklausomybė nuo važiavimo greičio [29]

Pagal pateiktą grafiką (22 pav.) galima matyti, jog didžiausias riedėjimo pasipriešinimo jėgos augimas buvo pastebėtas padangas eksploatuojant su mažiausia nustatyta slėgio verte. Šiuo atveju ir skirtumas tarp kitų bandymo reikšmių matomas didžiausias. Tokie bandymo rezultatai įrodo, jog eksploatuojamų padangų pripūsto slėgio vertė daro įtaką važiavimo charakteristikoms. Nepasirinkus teisingos padangų slėgio vertės, kelionės metu dėl vykstančių procesų, pasikeitus padangų slėgio vertei gali suprastėti vairavimo charakteristikos, ko pasekoje transporto priemonė gali tapti sunkiau kontroliuojama bei reakcijos į vairuotojo veiksmus mažiau nuspėjamos.

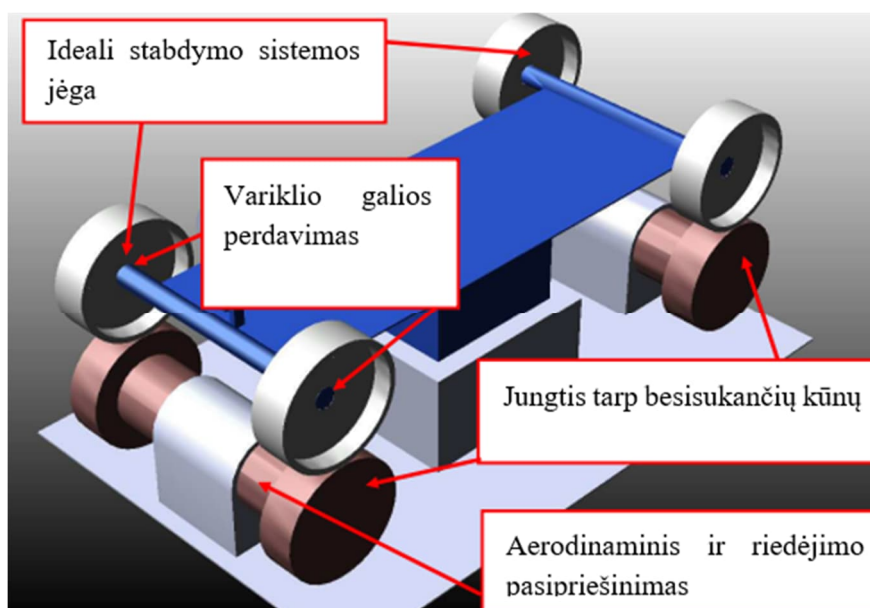
2. Atliktų tyrimų analizė

2.1. Slėgio pokyčio įtaka degalų sąnaudoms

Visa transporto priemonių dinamika tiriama bei analizuojama automobilio, vairuotojo bei aplinkos sąveika, per susidarančias apkrovos reakcijas. Literatūros šaltiniuose transporto priemonės dinamika nagrinėjama šiais aspektais: išilgine, šonine ir vertikalia dinamikomis. Būtent išilginė dinamika yra skaitoma atsakinga už automobilio energijos suvartojimą. Ją sąlygoja aerodinaminis pasipriešinimas, trintis bei jėgos.

Netinkamas transporto priemonės vairuotojo pasirinktas pradinis padangų slėgis, kelionės eigoje turi įtakos ne tik automobilio valdomumui, stabdymo savybėms, bet ir keleivių komfortui. Taip pat pasikeitęs slėgis daro įtaką automobilio degalų sunaudojimui ir padangų dilimui [30]. Kaip teigia [31] straipsnio autoriai, tinkamai pasirinktos vairuotojo transporto priemonės padangų slėgio vertės padeda kelionės metu išlaikyti jų optimalias darbinės savybes, taip pat tinkamą degalų ekonomiją.

Straipsnyje [32] aprašytas autorių atliktas tyrimas, kurio rezultatams gauti buvo pasitelktos kompiuterinės skaičiavimo bei simuliacijos programos: Matlab, Simulink bei Adams. Šiame tyrime rezultatai nebuvo lyginami su realiomis sąlygomis gautais rezultatais. Tačiau bandyme naudotas modelis vaizduojamas 23 paveiksle:



23 pav. Tyrime naudotas modelis [32]

Šiam tyrimui atlikti sukurtas modelis (23 pav.) paremtas dinamometrinio stendo pagrindu, tai padaryta todėl, jog tokį bandymų modelį vėliau būtų galima panaudoti kitiems eksperimentiniams vertinimams atlikti. Kaip minima straipsnio autorių [32] atliktame tyrime, į transporto priemonės pakabos poveikį rezultatams nėra atsižvelgiama, taip siekiant supaprastinti skaičiavimo modelį. Kaip galima matyti eksperimentiniame bandyme naudojamas transporto priemonės modelis susideda iš dviejų ritinių, kurių paskirtis yra išilginės poslinkio inercijos imitavimas. Ant jų sumontuoti keturi cilindrai, atitinkantys automobilio ratus. Šį modelį eksperimento autoriai sukūrė CAD programinės įrangos pagalba bei perkėlė į „Adams“ programinės įrangos aplinką, kurioje buvo sudėtos jungtys leidžiančios modelio ratams judėti.

2.1.1. Tyrimo eiga ir gauti rezultatai

Kaip minima tyrimo autorių [32] su visomis bandyme pasirinktomis transporto priemonės padangų slėgio vertėmis, automobilio našumas išliko beveik nepakitęs. Kadangi nustatytą 12 km ilgio maršrutą modelis įveikė per standartinį reikalaujamą laiko tarpą. Tyrėjų gauti rezultatai pateikiami 7 lentelėje. Pagal surašytas vertes galima matyti priklausomybę, kuri taip pat aprašyta ir Reza N. Jazaro knygoje „Vehicle Dynamics. Theory and Application“ [33], jog eksploatuojant transporto priemonę su per mažai slėgio pripūstomis padangomis, pastebimas degalų sąnaudų padidėjimas. Kadangi anot autoriaus, esant tokioms sąlygoms didesnė dalis transporto priemonės svorio teks ne vidinėje konstrukcijos dalyje esančiam slėgiui, o pačiai padangos išorinei konstrukcijai. Tai lemia išaugusį padangos paliekamą pėdsaką, ko pasėkoje susidaro didesnė trintis su kelio paviršiumi bei išsiskiria daugiau šilumos. Šie faktoriai gali sumažinti padangos našumą iki 25% tuo pačiu sutrumpindami ir galimą jos tarnavimo laiką [32]. Taip pat straipsnio autorius padarė išvadą, jog transporto priemonių valdomumas bei stabilumas suprastėja, jeigu naudojamos padangos nėra pripūstos rekomenduojamomis slėgio vertėmis.

7 lentelė. Tyrimo metu gauti rezultatai [32]

Slėgio pokytis, bar	Padangų slėgis, bar	Degalų sąnaudos, ml	Vidutinės degalų sąnaudos l/100 km
+0,3	3,30	678,1	17,69
+0,28	3,28	682,5	17,56
+0,21	3,21	685,7	17,50
+0,14	3,14	689,5	17,40
+0,07	3,07	695,0	17,26
Standartinė reikšmė	3,00	702,2	17,09
-0,07	2,93	708,2	16,94
-0,14	2,86	707,8	16,95
-0,21	2,79	714,8	16,79
-0,28	2,72	720,4	16,65
-0,3	2,70	729,9	16,44

Kaip galima matyti iš 6 lentelėje pateiktų rezultatų, didesnis negu gamintojo nurodytas standartinis padangos vidinis slėgis lėmė degalų sutaupymą. Nors reikšmė ir nėra žymi, kiek mažiau nei 50 ml, tačiau tai buvo sąlygota mažesnio kontaktinio padangos paviršiaus ploto su kelio danga. Esant didesnei nei numatyta slėgio vertei, padangų deformacija mažėja, ko pasėkoje tai nulemia ir mažesnius histerezės nuostolius [33]. Taip pat, kaip jau paminėta anksčiau, per didelis slėgis padangoje lemia sumažėjusį pėdsaką, todėl automobilį pasidaro sunku valdyti, nes mažesnis kontaktinio paviršiaus plotas liečiasi su kelio danga. Išaugusi slėgio reikšmė taip pat padidins ir bendrą karkaso standumą, tai lems sąlyčio ploto santykinį sumažėjimą, kas sumažins galimą šoninio slydimo kampą [34].

Anot straipsnio autoriaus [34] įprastomis eksploatavimo sąlygomis, važiuojant su pripūstu rekomenduojamu padangų slėgiu, beveik 95% automobilio svorio tenka padangose esančiam vidiniam slėgiui ir tik likusieji 5% yra laikomi padangos konstrukcinės dalies – šoninių sienelių. Jeigu kelionės metu išlaikoma tokia sąlyga, padangos paliekamas pėdsakas yra tinkamame sąlytyje su keliu.

Padangos riedėjimo pasipriešinimas šiuo atveju nėra padidėjęs, todėl taip yra išvengiama galimo perkaitimo, degalų sąnaudų padidėjimo ar nepageidautinų negrįžtamų padangos konstrukcinių deformacijų.

2.1.2. Tyrimo išvados

Taigi atlikus tyrimą pasinaudojant [32] aprašyta metodika, kai simuliacija yra atliekama skaičiavimams naudojant hečbeko, turinčio 1,0 l darbinio tūrio Otto ciklo benzininį variklį modelį. Autoriai priėjo išvadą, jog transporto priemonės padangose pripūstas slėgis, turi tiesioginės įtakos automobilio degalų sąnaudų pokyčiui. Jeigu vertė viršija gamintojo nustatytą rekomenduojamą slėgio reikšmę ir tokia padanga yra eksploatuojama, transporto priemonės degalų sąnaudos sumažėja. Tai įvyksta dėl to, kad padidėjęs padangos standumas sumažina sąlyčio su kelio danga plotą. Tokių situacijų tyrimų autoriai vairuotojams rekomenduoja vengti, kadangi mažesnis padangos plotas sąlygoja ir prastesnes automobilio valdomumo charakteristikas, dėl prastesnio ratų sukibimo su kelio danga.

2.2. Padangų slėgio įtaka transporto priemonės keliamam triukšmui

Vidaus degimo bei kitomis priemonėmis varomi automobiliai yra sudaryti iš daugelio skirtingų sistemų ir komponentų. Juos sudaro svarbiausias mechanizmas: variklis, pavaros, sankaba, stabdžių sistema, pakabos ir išmetimo elementai. Daugelis judančių konstrukcijos dalių yra pagrįsti guoliais ir vienu ar kitu atveju yra triukšmą keliantys elementai [37]. Kitas aspektas kuris kaip teigiama tyrimo autorių [38] taip pat kinta keičiantis pripūsto slėgio padangoje vertei yra automobilio važiavimo metu sukiamas triukšmas. Būtent ratų ir kelio paviršiaus sąveika yra vienas iš pagrindinių eismo keliamų triukšmo šaltinių. Tai galima matyti ir pateiktoje iliustracijoje (24 pav.) kurioje automobilis yra bandomas vėjo tunelyje bei matuojama vietos keliančios didžiausią triukšmą lygį bandymo metu. Galima matyti, jog labiausiai triukšmas yra koncentruotas aplink priekinę automobilio ašį. Tai sąlygoja ne tik dirbančio variklio keliamas triukšmas tačiau ir naudojamų padangų sąlytis su kelio danga.



24 pav. Akustinis automobilio keliamo triukšmo tyrimas vėjo tunelyje [39]

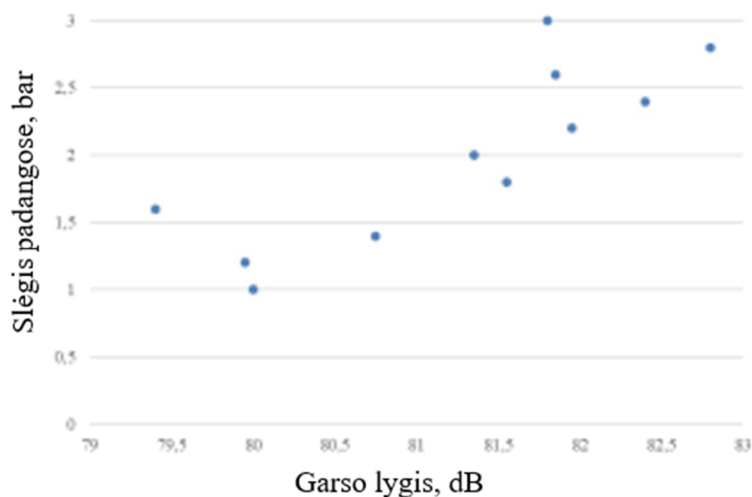
Siekdami išsiaiškinti kontakto keliamo triukšmo dydį tyrimo autoriai pasirinko septynias skirtingų tipų: žieminės, vasarines padangas bei vieną tarpinio tipo padangą, kurios tame pačiame regione, buvo bandomos vienodomis sąlygomis.

2.2.1. Tyrimo eiga ir gauti rezultatai

Tyrimas buvo atliekamas keičiant eksploatuojamų padangų slėgį pagal iš anksto nustatytą diapazoną: nuo 1 iki 3 bar. Visi rezultatai buvo fiksuojami pagal nustatytus tokiems tyrimams keliamus reikalavimus. Pasirinkta tyrimo lokacija buvo 500 m ilgio asfaltuota kelio atkarpa. Visi matavimai buvo atlikti esant tokioms aplinkos sąlygoms kurios mažiausiai būtų galėjusios daryti įtakos tyrimo rezultatams. Taip pat buvo nustatytos tyrimo charakteristikos kaip:

- lauko temperatūra turėjo būti tarp 6 ir 20°C;
- kelio danga turėjo būti sausa;
- tiriamųjų automobilių eksploatuotų padangų protektoriaus gylis turėjo viršyti 4 mm ribą.

Pats tyrimas buvo atliekamas transporto priemonei įsibėgėjus iki 60 km/val greičio ir vairuotojui išjungus variklį, likus 20 m atstumui iki matavimo taško. Matavimo prietaisas buvo padėtas 1-1,5 m atstumu nuo automobilio trajektorijos. Kiekvieno bandymo rezultatai buvo užfiksuojami.



25 pav. Vidutinės triukšmo lygio vertės esant skirtingiems padangų slėgiams [37]

Kaip galima matyti iš pateikto grafiko (25 pav.) garso lygio priklausomybė nuo slėgio padangose vertės yra aiškiai didėjanti ir artima tiesinei. Kuo pripūsto slėgio vertė padangose tyrimo metu buvo mažesnė, tuo bandomos padangos sukeldavo mažesnę triukšmą automobiliui pravažiuojus pro matavimo tašką. Tačiau autoriams didinant slėgio vertę, išaugo ir sukeliama triukšmo lygis.

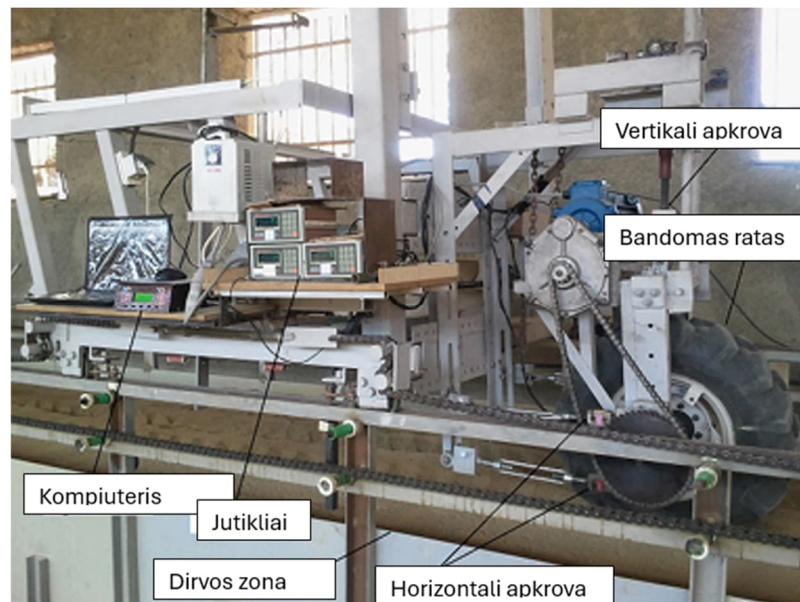
2.2.2. Tyrimo išvados

Taigi remiantis atliktu tyrimu, autoriai padarė išvadą, jog mažinant slėgį padangose, tuo pačiu sumažinamas ir transporto priemonės judėjimo metu keliamas triukšmo lygis. Kaip garsiausios nustatytos esančios vasaros sezono metu eksploatuojamos padangos, žiemos sezono – tyliausios. Bendras skirtumas viršijo 3 dB.

2.3. Padangos riedėjimo pasipriešinimo priklausomybė nuo kontakto pėdsako parametrų

Siekiant palyginti atliekamų tyrimų rezultatus su jau esamais bandymais, reikia išnagrinėti kitus gautus rezultatus. Tyrimas kuriame buvo stebima padangos pėdsako ilgio, pločio, vertikalaus aukščio pokyčio įtaka riedėjimo pasipriešinimui buvo aprašytas Ispaniškame žurnale autorių: Parviz'o Tomaraee, Aref'o Mardani, Arash'o Mohebbi ir Hamid'o Taghavifar'o [38]. Autoriai darbe nagrinėję

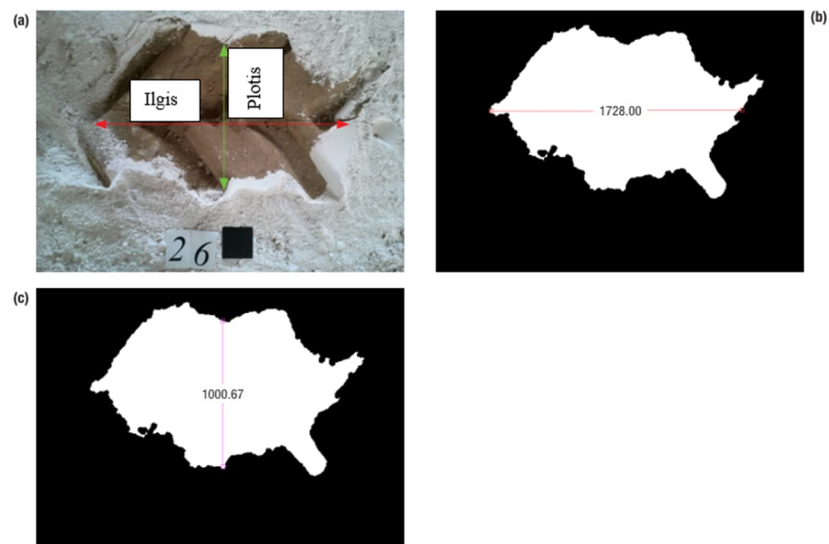
problema kai sunkiasvorės transporto priemonės padanga riedėdama birios dangos paviršiumi, pasirinkus netinkamą slėgį patiria didesnę riedėjimo pasipriešinimą. Tyrimas buvo atliktas pasitelkus stendą (26 pav.).



26 pav. Bandymų stendas [38]

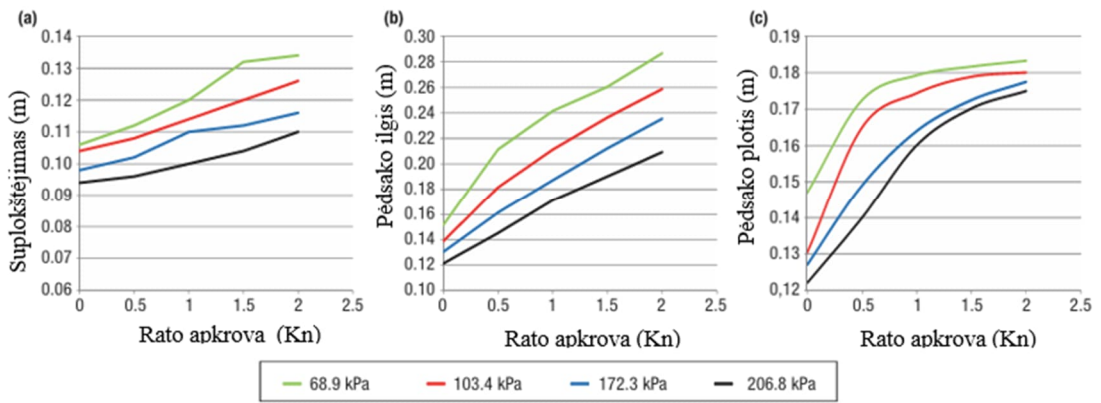
2.3.1. Tyrimo eiga ir gauti rezultatai

Padanga apkraunama ir spaudžiama į dirvos zoną. Tada pakėlus padangą, fiksuojamas dirvoje likęs įspaustas pėdsakas (27 pav.). Aukštos raiškos kamera jis fotografuojamas ir kompiuterinės programinės įrangos pagalba matuojami pėdsako parametrai.



27 pav. a) Pėdsako nuotrauka b) Pėdsako ilgis c) Pėdsako plotis [38]

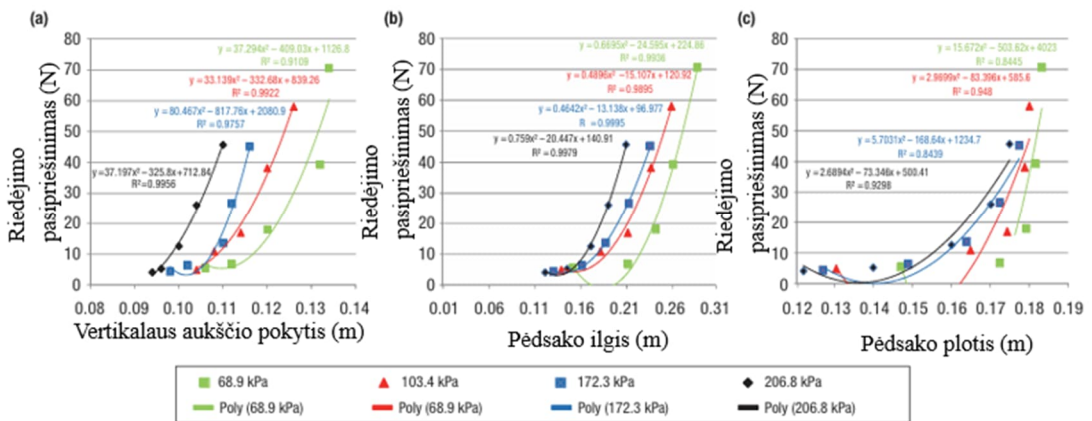
Atlikus bandymus ir užfiksavus rezultatus, tyrimo autoriai sudarė grafines jų priklausomybes (28 pav.).



28 pav. a) vertikalaus aukščio pokyčio b) pėdsako ilgio c) pėdsako pločio priklausomybės nuo padangos apkrovos prie skirtingų slėgio verčių [38]

Kaip galima matyti iš autorių pateikiamų grafinių priklausomybių su visais padangoje pripūstais slėgiais kintant rato apkrovai visi matuojami parametrai didėdavo. Jeigu padangos vertikalus aukščio pokyčio arba kitaip suplokštėjimo, bei pėdsako ilgio grafikuose dar galima įžvelgti tiesines šių verčių priklausomybes.

Kita autorių ieškota priklausomybė taip pat buvo tyrime atvaizduota grafine forma. Tai riedėjimo pasipriešinimo jėgos priklausomybė nuo tų pačių trijų parametrų: vertikalus aukščio sumažėjimo, pėdsako ilgio, pėdsako pločio. Gauti grafikai vaizduojami 29 paveiksle.



29 pav. Riedėjimo pasipriešinimo jėgos priklausomybė nuo a) suplokštėjimo b) pėdsako ilgio c) pėdsako pločio [38]

Kaip galima matyti pagal autorių pateiktas grafines rezultatų priklausomybes, visos jos yra arčiausiai polinominių. Tačiau taip pat visos rodo aiškią tendenciją to, jog riedėjimo pasipriešinimo jėgos vertė kinta, didėjant trims nustatytiems parametrams.

2.3.2. Tyrimo išvados

Taigi pagal atliktą tyrimą galima matyti, jog padangos slėgio vertė turi aiškią įtaką visiems esminiams padangos parametrams. Kurių verčių kitimas daro įtaką ir pagrindiniam parametru: riedėjimo pasipriešinimo jėgai.

3. Automobilio padangų slėgio pokyčio poveikio riedėjimo pasipriešinimui tyrimas

3.1. Tyrimo tikslas

Ištirti lengvojo automobilio padangose vykstančių slėgio pokyčių daromą įtaką riedėjimo pasipriešinimo koeficientui.

3.2. Tyrimo metodika

Visiems tyrimams atlikti buvo naudojama viena transporto priemonė (8 lentelė):

8 lentelė. Tyrimo automobilio parametrai

Kriterijaus pavadinimas	Reikšmė	Matavimo vienetai
Automobilio modelis:	BMW F30	-
Masė	1455	kg
Priekinės ašies padangos	225/40/R18	-
Galinės ašies padangos	245/40/R18	-

Automobilio visi pagrindiniai parametrai galintys turėti įtakos tyrimų rezultatams standartiniai, pagal gamyklinius nustatymus.

3.2.1. Įranga naudoti tyrimams atlikti

Tyrimų atlikimui naudota skirtinga matavimo įranga, priklausomai nuo siekiamo išmatuoti parametro. Vienas pagrindinių parametrų kurio pokytis buvo matuojamas daugiausia kartų yra padangos viduje esančio oro temperatūros bei slėgio vertės. Šiems parametrams gauti, buvo naudojami išorinio tipo matavimo prietaisai kurių specifikacijos nurodomos 9 lentelėje, o išvaizda 30 paveiksle.

9 lentelė. Slėgio matavimo prietaiso parametrai

Kriterijus	Reikšmė
Gamintojas	Leepee
Modelis	28627
Svoris	96 g
Veikimo temperatūros	-30°C ~ 70°C
Slėgio matavimo paklaida:	±0,2 bar



30 pav. Slėgio matavimo jutiklis [39]

Kituose tyrimuose taip pat buvo naudojama ruletė, kurios padalos vertė standartinė 1 mm (31 pav.).



31 pav. Ruletė

Taip pat matavimams atlikti buvo naudojamas slankmatis.

3.2.2. Padangų slėgio ir oro temperatūros pokyčio tyrimas eksploatacinėmis sąlygomis

Viso projekto metu buvo atlikta grupė skirtingų tyrimų. Pirmasis iš jų yra transporto priemonės padangų slėgio ir oro temperatūros parametrų stebėjimas ir fiksavimas automobiliui dalyvaujant eisme realiomis eksploatacinėmis sąlygomis. Daugumos kasdienių kelionių metu, buvo stebimos ir pasižymimos pradinės slėgio ir oro temperatūrų reikšmės transporto priemonės padangose kelionės pradžioje, kai šios reikalingos vertės jau buvo laikomos nusistovėjusiomis. Kadangi tik pradėjus kelionę matavimo sistemai buvo reikalingas laiko tarpas informacijai iš jutiklių gauti. Taip pat buvo fiksuojamos galutinės padangų slėgio ir oro temperatūros vertės kiekvienos kelionės pabaigoje. Šio tyrimo duomenų fiksavimo pavyzdžiai yra pateikiami 32 ir 33 paveiksluose.



32 pav. Padangų slėgio ir oro temperatūros vertės kelionės pradžioje



33 pav. Padangų slėgio ir oro temperatūros vertės kelionės pabaigoje

Pažymėtina, jog šio tyrimo rezultatus buvo siekiama fiksuoti kiek įmanoma ilgesnį laiko tarpą tam, kad tyrimo pabaigoje būtų galima palyginti skirtingais metų laikais vykstančius oro temperatūros bei slėgio pokyčius transporto priemonės padangose. Tačiau pažymėtina kadangi tyrimui buvo pasirinkta naudoti išorinio tipo matavimo prietaisus, reikia paminėti, jog visos užfiksuotos padangos slėgio bei oro temperatūros matavimų vertės negali būti laikomos absoliučiai tiksliomis. Taip yra dėl to, kad išorėje esantis jutiklis kelionių metu nuolatos veikiamas daugelio skirtingų veiksnių, tokių kaip: tiesioginė saulės spindulių įtaka jutiklio korpusui dėl jo tamsios spalvos gali daryti įtaką rodomam padangos oro temperatūros rezultatui. Nuolatinis oro srautas automobiliui judant, stabdžių komponentų šiluminė spinduliuotė yra veiksniai galintys nulemti galutinių rezultatų netikslumus bei turėti įtaką vienokiems ar kitokiems nuokrypiais nuo realių verčių.

3.2.3. Padangų slėgio ir oro temperatūros pokyčio tyrimo rezultatai

Atlikus padangų slėgio ir oro temperatūros pokyčio tyrimą gauti rezultatai suvedami į lentelę (34 pav.).

Data	Oro temp. C	Nuvažiuotas atstumas, km	Priekinė kairė		Priekinė dešinė		Galinė kairė		Galinė dešinė			
			Slėgis, Bar	Temperatūra, C	Slėgis	Temperatūra	Slėgis	Temperatūra	Slėgis	Temperatūra		
2025-01-15	1,5	11	2,4	0,1	2	2,4	2	2,4	1	2,4	2	
	2		2,5		6	2,6	6	2,5	5	2,6	4	
	2		2,4		2	2,4	3	2,4	2	2,4	2	
	2		2,6		7	2,6	7	2,6	6	2,5	0,1	6
2025-01-17	4	13,3	2,4	0,2	4	2,4	5	2,4	4	2,4	5	
	4		2,6		9	2,5	10	2,6	8	2,7	0,3	10
	3		2,4		3	2,4	3	2,4	3	2,4	0,3	3
	3		2,7		10	2,6	11	2,7	11	2,7	0,3	10
2025-01-20	1	11	2,4	0,1	1	2,4	1	2,3	1	2,4	1	
	1		2,5		7	2,5	6	2,5	8	2,5	0,1	7
	0		2,3		1	2,4	0	2,4	1	2,4	0,2	1
	-0,5		2,5		7	2,6	6	2,5	8	2,6	0,2	8
2025-01-21	0	11	2,4	0,1	1	2,4	1	2,3	1	2,4	1	
	0,5		2,5		6	2,5	7	2,5	8	2,5	0,1	7
	1		2,3		1	2,4	0	2,4	1	2,4	0,2	1
	1		2,5		8	2,6	7	2,5	8	2,6	0,2	8
2025-01-22	0,5	11	2,3	0,1	0	2,4	1	2,3	1	2,3	1	
	0,5		2,4		5	2,5	5	2,5	6	2,4	0,1	5
	1		2,3		1	2,4	1	2,4	1	2,4	0,1	1
	1		2,5		6	2,5	6	2,5	7	2,5	0,1	6
2025-01-23	0	11	2,3	0,2	0	2,3	1	2,3	1	2,3	0	
	0,5		2,5		6	2,5	7	2,5	5	2,5	0,2	6
	2		2,4		2	2,4	2	2,4	2	2,4	0	2
	2,5		2,4		4	2,4	5	2,4	4	2,4	0	3
	3		2,4		4	2,4	3	2,4	4	2,4	0,3	4
3,5	13,7	2,6		10	2,6	9	2,7	10	2,7	10		

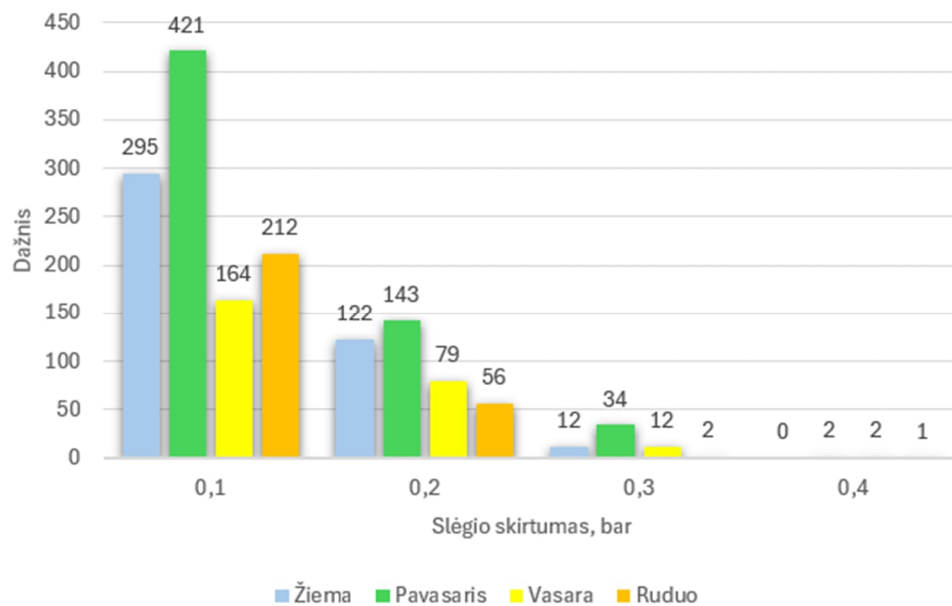
34 pav. Tyrimo duomenų pavyzdys

Viso per daugiau nei vienų kalendorinių metų laikotarpį kurį buvo atliekamas šis tyrimas buvo fiksuota statistika (10 lentelė):

10 lentelė. Tyrimo statistika

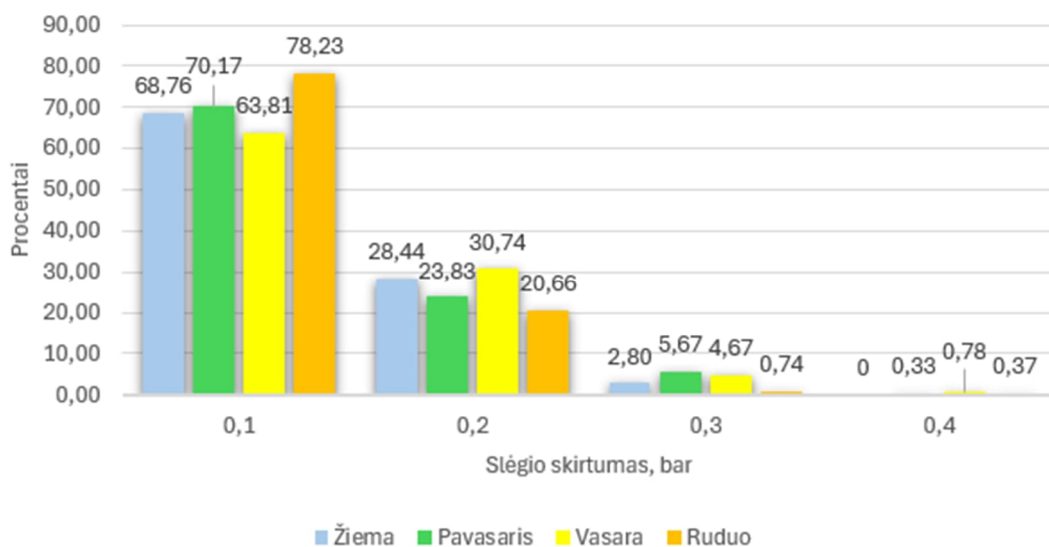
Kelionių skaičius	Didžiausias fiksuotas padangos slėgis, bar	Mažiausias fiksuotas padangos slėgis, bar	Didžiausia fiksuota padangų oro temperatūra, °C	Mažiausia fiksuota padangų oro temperatūra, °C	Didžiausias padangų oro temperatūros pokytis, °C	Didžiausias padangų slėgio pokytis, bar
463	2,9	2,0	40	-17	15	0,4

Kaip galima matyti atliktas kelionių skaičius siekia netoli pusę tūkstančio. Dėl tyrimo metu buvusių skirtingų metų laikų galima pastebėti didelį skirtumą tarp užfiksuotų mažiausios ir didžiausios padangų oro temperatūros reikšmių. Taip pat didelis skirtumas pastebimas ir tarp padangos slėgio verčių. Galima matyti, kad kelionės pradžioje buvo fiksuota netgi 2,0 bar slėgio vertė, tai yra 0,4 bar mažiau nei turėtų būti gamintojo nustatyta reikšmė. Todėl norint palengvinti duomenų pateikinimą apibendrinimas pateikiamas skaičiuojant skaitinį verčių pasiskirstymą (35 pav.).



35 pav. Padangų slėgio pokyčių verčių skirtumas

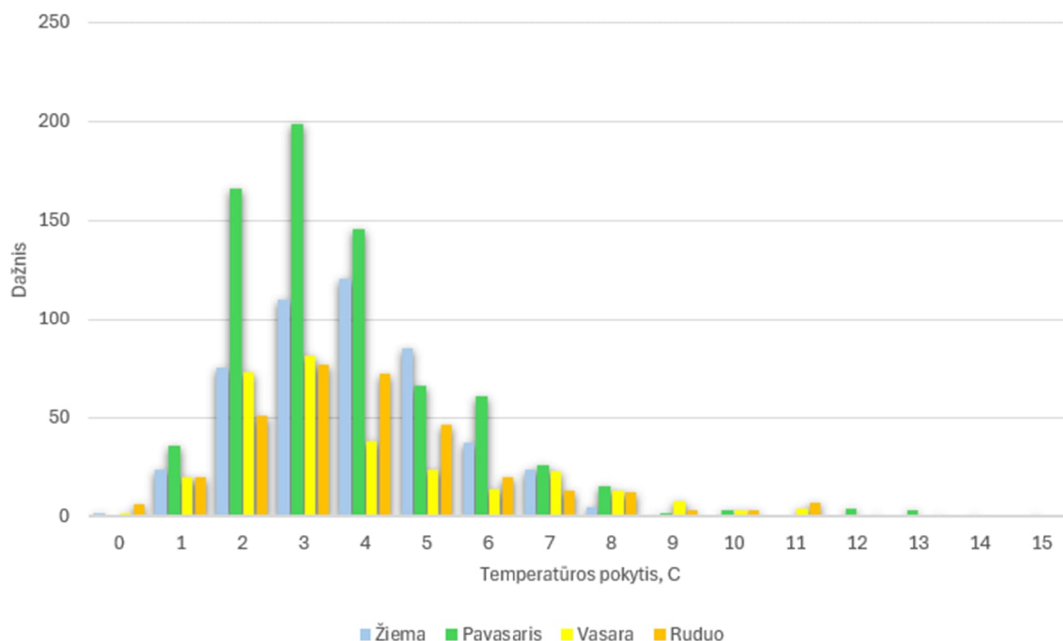
Kaip matoma iš grafiko, dažniausiai slėgis kelionių metu kito 0,1 bar dydžiu. Tačiau pastebėtina, jog tyrimas buvo atliekamas ilgą laiko tarpą, tačiau tai lėmė, kad rezultatų fiksuotų tam tikru metų laiku kiekis yra didesnis. Todėl slėgio skirtumų dažnio pasiskirstymas išreiškiamas procentine išraiška nuo bendro sezono metu fiksuoto duomenų kiekio (36 pav.):



36 pav. Procentinis padangų slėgio skirtumų pasiskirstymas

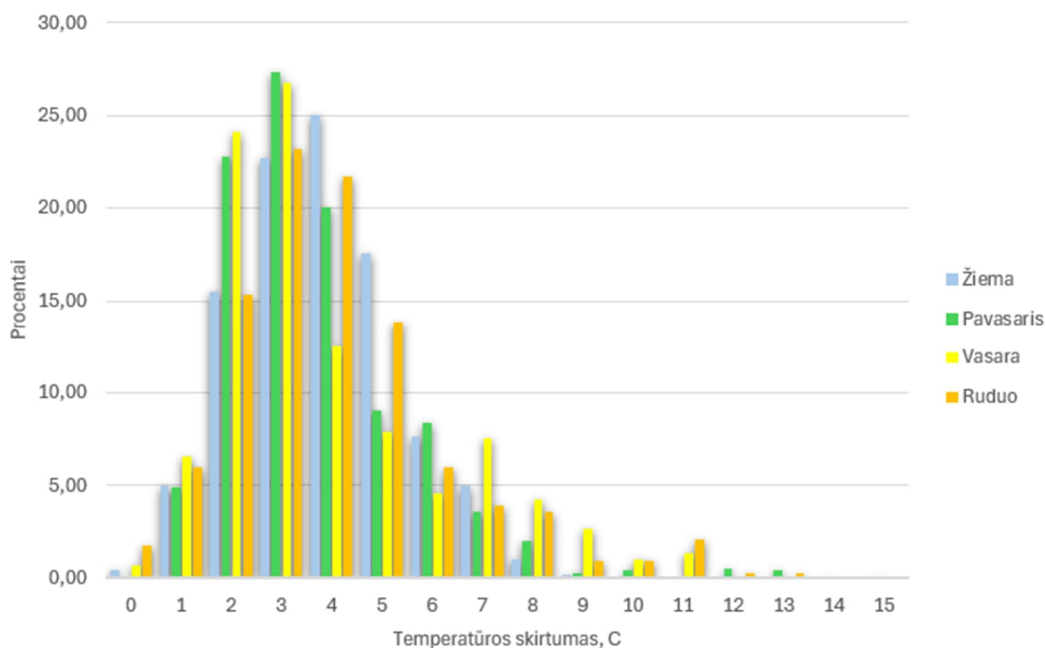
Perskaičius rezultatus pastebima, jog vasaros laikotarpiu slėgio pokyčiai 0,2 bar buvo pastebimi dažniausiai. Taip pat ir 0,4 bar pokytis vasaros laikotarpiu buvo pastebėtas dažniausiai kartu su pavasario sezonu.

Antrasis stebėtas parametras tyrimo metu buvo padangos oro temperatūros rodiklis (37 pav.).



37 pav. Padangos oro temperatūros pokyčių pasiskirstymo dažnis

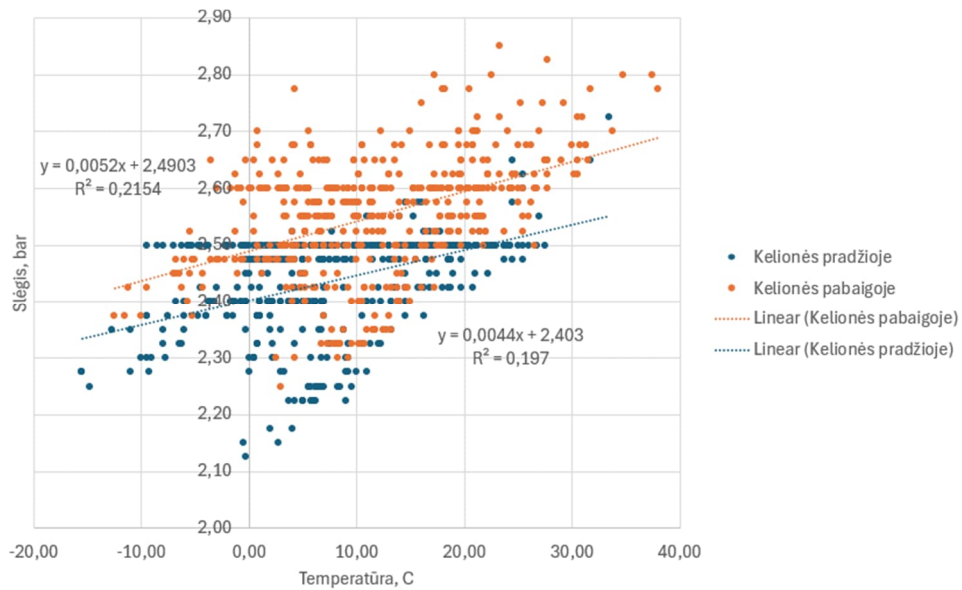
Iš grafiko galima matyti, kad dažniausias oro temperatūros vertės pokytis buvo 3°C. Tačiau pažymėtina, jog šie rezultatai yra sąlygojami didžiausio fiksuotų kelionių skaičiaus pavasario metu. Kadangi rezultatų fiksavimo laikotarpis apėmė 2025 ir 2026 metų pavasario laikotarpius. Siekiant aiškesnio bendro vaizdo temperatūrų pasiskirstyme, rezultatai taip pat perskaičiuojami į procentines vertes (38 pav.):



38 pav. Procentinis padangos oro temperatūros pokyčio pasiskirstymas

Kaip galima matyti iš tyrimo rezultatų statistikos daugiau nei ketvirtadalis visų rezultatų fiksuotų pavasario ir vasaros metų laikotarpiais oro temperatūros rodiklių pokytis siekė 3°C. Aukštesnės temperatūros pokyčių reikšmės dažniausia taip pat buvo fiksuojamos šilčiausiu metų laiku. Apie 7,5% visų vasaros laikotarpiu fiksuotų temperatūros rezultatų buvo 7°C.

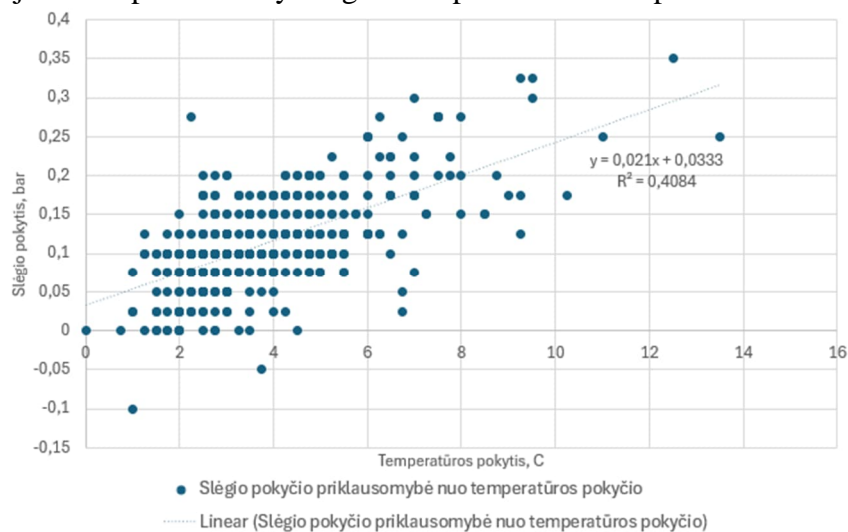
Tyrimo metu taip pat nagrinėta padangose vykstantys slėgio ir oro temperatūros verčių pokyčiai. Iš visų kelionių metu fiksuotų visų transporto priemonės ratų rezultatų išvedus vidurkius, sudarytas priklausomybės grafikas (39 pav.).



39 pav. Padangų slėgio priklausomybė nuo oro temperatūros

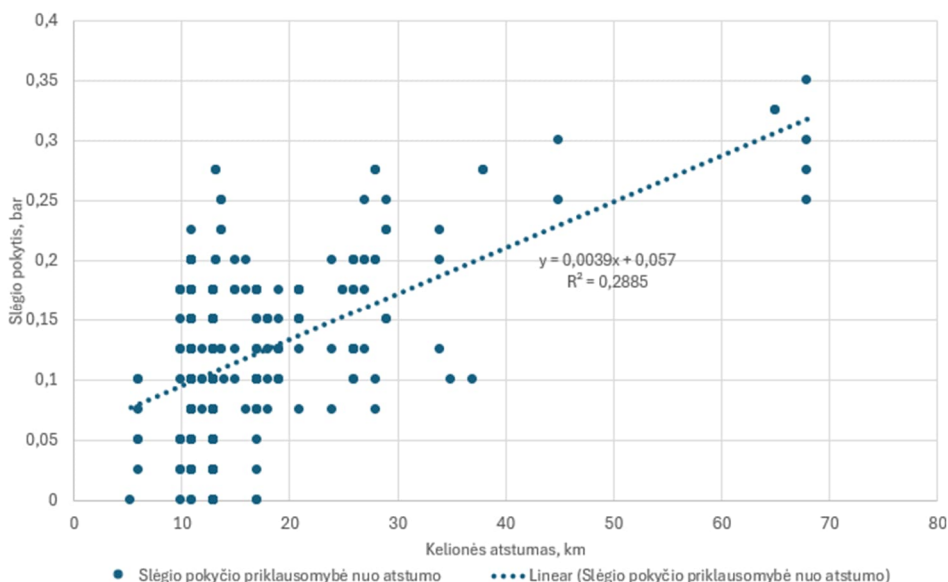
Gauti rezultatai grafiškai aiškiai parodo tendenciją, jog kelionės pradžioje fiksuotos padangų slėgio vertės labai retais atvejais būdavo aukštesnės nei 2,5 bar. Taip pat aiškiai matoma tendencija jog kelionės metu padangose esančio oro temperatūros bei slėgio vertės kinta ir kyla. Oranžine spalva pažymėtų duomenų taškai visais atvejais grafike yra aukščiau mėlynųjų, kurie vaizduoja padangos slėgio ir oro temperatūros vidutines vertes kelionių pradžioje. Tai atsispindi ir grafikos tendencijų kreivėse. Rezultatų užfiksuotų kelionės pabaigoje kreivė yra aiškiai aukščiau, taip reiškia jog ir fiksuotos reikšmės tyrimo metu kelionės pabaigoje būdavo didesnės. Vertinant rezultatų sklaidą, galima teigti jog abiejų priklausomybių fiksuoti koreliacijos koeficientai yra vidutiniški: kelionės pradžioje – 0,444, kelionės pabaigoje – 0,464.

Taip pat atliekant tyrimo duomenų analizę buvo vertinama ir padangų oro temperatūros bei slėgio pokyčių koreliacijos. Šios priklausomybės grafikas pateikiamas 40 paveiksle.



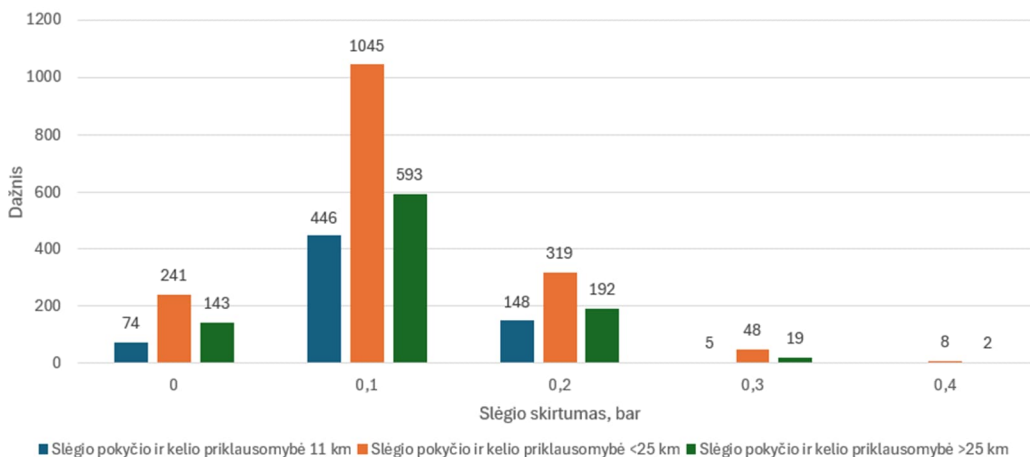
40 pav. Padangų slėgio pokyčio priklausomybė nuo oro temperatūros pokyčio

Kaip galima matyti iš pateikto rezultatų grafiko didelė dalis fiksuotų verčių vidurkių yra susikongravusios nuo 3 iki 6 °C oro temperatūros pokytį, bei 0 – 0,2 bar slėgio verčių pokytį. Bendras fiksuotas šių reikšmių koreliacijos koeficientas 0,639. Tai parodo jog augant slėgio ar oro temperatūros parametrui, kitas kintamasis taip pat turi tendenciją didėti. Šį aspektą galima pastebėti ir iš grafike nubrėžtos tiesės (40 pav.). Kadangi tyrimo metu yra siekiama išsiaiškinti pokyčius vykstančius automobiliui riedant, svarbu įvertinti jų priklausomybę nuo kelionės metu įveikiamo atstumo (41 pav.).



41 pav. Slėgio pokyčio priklausomybė nuo kelionės atstumo

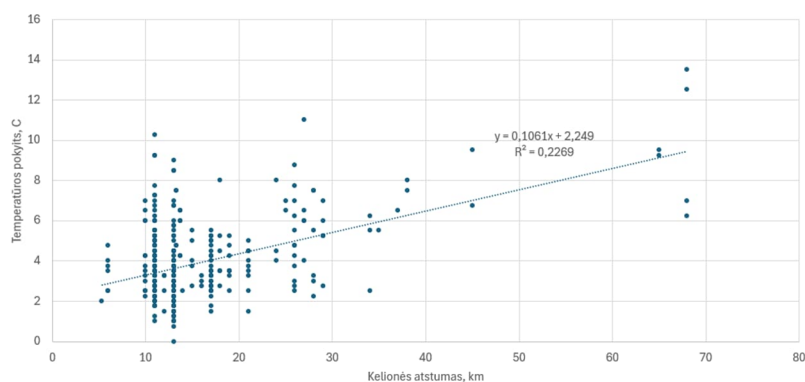
Pagal grafiką galima pastebėti jog didžiausia rezultatų reikšmių koncentracija išlieka tarp 10 ir 20 km atstumo. Tai paaiškinama, kadangi didžioji dalis kelionų buvo fiksuotos važiuojant nuo namų iki darbo vietos. Tačiau taip pat matoma jog kelionės atstumui išaugus, padidėja ir slėgio pokyčio reikšmės. Bendras fiksuojamas šių kintamųjų koreliacijos koeficientas – 0,537. Vidutinio stiprumo, nors pagal grafiką atrodo jog vertės pasiskirsto plačiai, tačiau reikia įvertinti, kad dalis rezultatų persidengia vieni su kitais, kadangi atstumas didžiojoje dalyje kelionių buvo įveikiamas toks pat. Kitas svarbus aspektas kurį buvo siekiama ištirti atliekant šį bandymą yra padangų slėgio pokyčio priklausomybė nuo lengvojo automobilio nuvažiuojamo kelio (42 pav.).



42 pav. Slėgio pasikeitimų dažnis nuo kelionės atstumo

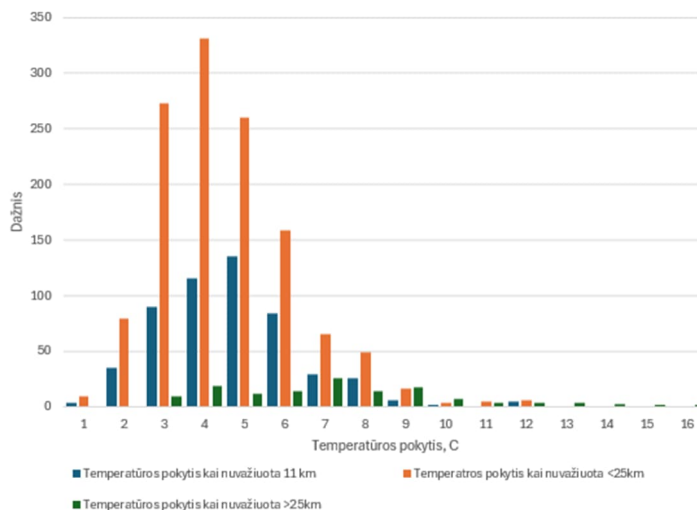
Iš gautų grafiko reikšmių galima pastebėti, jog tyrime daugiausia kelionių kuriose būtų fiksuoti duomenys atlikta kai atstumas neviršijo 25 km. Ši vertė buvo pasirinkta kaip trumpos kelionės atitikmuo. Atstumas labiausiai apibūdinantis keliones kurios retai kada išeina iš miesto ribų. Kita pasirinkta duomenų grupė yra tikslinė, kai kelionės atstumas siekė apie 11 km. Ši rezultatų grupė buvo išskirta todėl nes didžiausia dalis visų fiksuotų kelionių buvo vykdoma vienu maršrutu kurio ilgis yra 10,9 km. Pažymėtina, jog rezultatų imtyje šios dvi grupės persidengia, taip dubliuodamos rezultatus. Trečioji grupė grafike pasirinkta atspindėti ilgesnio nuotolio keliones. Jų imtis mažiausia. Tačiau net ir joje galioma pastebėti jog buvo fiksuota didesnių slėgio pokyčių nei dažniausiai pasitaikantys 0,1 ir 0,2 bar.

Kadangi tyrimas buvo atliktas sekant du padangų parametrus: slėgį ir oro temperatūrą. Grafiškai atvaizduojami ir fiksuoti temperatūros pokyčių priklausomybė nuo nuvažiuoto atstumo kelionės metu:



43 pav. Oro temperatūros pokyčių priklausomybė nuo nuvažiuoto atstumo

Iš pateikto priklausomybės grafiko (43 pav.) galima pastebėti jog rezultatų išsidėstymas savo forma yra gana artimas slėgio pokyčio grafikui (41 pav.). Toks panašumas yra paaiškinamas, kadangi vertės buvo fiksuotos tų pačių kelionių metu. Kitas aspektas yra grafikų koreliacijos koeficientas, šiuo atveju jo vertė 0,476. Tai vidutinio stiprumo ryšys tarp šių dviejų reikšmių, neženkliai silpnesnis nei slėgio ir įveikiamo atstumo grafiko atveju. Kadangi tyrimo metu siekiama įvertinti padangų oro temperatūros pokyčio priklausomybę nuo įveikiamo atstumo, tikslinga vertinti ir šių pokyčių pasiskirstymo dažnį (44 pav.)



44 pav. Padangų oro temperatūros pokyčių priklausomybė nuo nuvažiuoto atstumo

Kaip galima matyti pagal pateikto 44 paveikslo duomenis kaip ir slėgio skirtumų atveju daugiausia fiksuotų rezultatų yra kai buvo nuvažiuot mažiau nei 25 km. Tokių kelionių metu matoma aiški tendencija, kad oro temperatūros reikšmės pakisdavo dažniausiai nuo 3 iki 5 °C. Ilgesnių kelionių pokyčių vertės fiksuotos mažesnės, tačiau tai gali būti siejama ir su tuo, jog tokių kelionių kiekis viso tyrimo metu buvo sąlyginai nedidelis.

3.2.4. Kontakto ploto tyrimas pėdsaką fiksuojant skaldos pagalba

Antrasis projekto tyrimas buvo atliekamas automobiliui esant statinėje padėtyje. Pasinaudojant mašinine oro pompa (45 pav.) buvo reguliuojamos slėgio vertės transporto priemonės padangose.



45 pav. Automobilinė elektrinė pompa [41]

Tyrimui atlikti buvo pasirinktas 1,2 – 2,8 bar slėgio verčių intervalas, vertinant, jog gamintojo rekomenduojamas eksploatuojamų padangų slėgis nurodomas 2,4 bar. Nustačius tinkamą slėgio vertę, automobilis hidraulinio keltuvo pagalba būdavo nuleidžiamas ant kieto pagrindo išpiltos ir išlygintos skaldos dangos (46 pav.).



46 pav. Bandymo eiga

Skaldos frakcijos dydis buvo pasirinktas 2 mm, taip siekiant bandymo metu išgauti kiek įmanoma aiškesnį padangos paliekamą pėdsaką. Automobilio ratas buvo pilnu svoriu pastatomas ant paruoštos dangos taip, kad visas svoris persikeltų nuo hidraulinio keltuvo transporto priemonės važiuoklės komponentams. Po keletos minučių, automobilis vėl būdavo pakeliamas, polietileno plėvelės danga su skaldele atsargiai ištraukiama ir atliekamas padangos palikto pėdsako matavimas. Tyrimo metu

buvo atsižvelgiama į du parametrus: pėdsako ilgį bei plotį. Su kiekviena pasirinkta slėgio verte bandymas buvo kartojamas 3 kartus taip siekiant gauti tikslesnius rezultatus. Kiekvieno bandymo rezultatas buvo užrašomas duomenų faile (11 lentelė).

11 lentelė. Priekinės padangos nereguliuojamo skaldos aukščio bandymas

Slėgis, bar	Bandymo nr. 1 metu fiksiuoti padangos pėdsako parametrai:			Bandymo nr. 2 metu fiksiuoti padangos pėdsako parametrai:			Bandymo nr. 3 metu fiksiuoti padangos pėdsako parametrai:		
	Ilgis, m	Plotis, m	Plotas, m ²	Ilgis, m	Plotis, m	Plotas, m ²	Ilgis, m	Plotis, m	Plotas, m ²
1,2	0,191	0,205	0,0307	0,193	0,207	0,0314	0,196	0,206	0,0317
1,4	0,186	0,201	0,0294	0,188	0,203	0,0300	0,191	0,201	0,0302
1,6	0,181	0,198	0,0281	0,182	0,199	0,0284	0,184	0,197	0,0285
1,8	0,178	0,192	0,0268	0,179	0,196	0,0276	0,180	0,191	0,0270
2,0	0,174	0,189	0,0258	0,175	0,192	0,0264	0,177	0,186	0,0259
2,2	0,170	0,184	0,0246	0,171	0,186	0,0250	0,171	0,182	0,0244
2,4	0,166	0,179	0,0233	0,168	0,181	0,0239	0,164	0,178	0,0229
2,6	0,161	0,176	0,0223	0,163	0,177	0,0227	0,160	0,173	0,0217
2,8	0,155	0,172	0,0209	0,159	0,174	0,0217	0,156	0,171	0,0210

Galinės padangos bandymų rezultatai taip pat pateikiami 12 lentelėje:

12 lentelė. Galinės padangos nereguliuojamo skaldos aukščio bandymas

Slėgis, bar	Bandymo nr. 1 metu fiksiuoti padangos pėdsako parametrai:			Bandymo nr. 2 metu fiksiuoti padangos pėdsako parametrai:			Bandymo nr. 3 metu fiksiuoti padangos pėdsako parametrai:		
	Ilgis, m	Plotis, m	Plotas, m ²	Ilgis, m	Plotis, m	Plotas, m ²	Ilgis, m	Plotis, m	Plotas, m ²
1,2	0,200	0,232	0,0364	0,195	0,231	0,0354	0,196	0,229	0,0353
1,4	0,197	0,229	0,0354	0,195	0,228	0,0348	0,197	0,226	0,0350
1,6	0,182	0,225	0,0322	0,183	0,224	0,0322	0,184	0,222	0,0321
1,8	0,175	0,221	0,0304	0,172	0,220	0,0297	0,179	0,218	0,0306
2,0	0,167	0,217	0,0285	0,168	0,214	0,0282	0,167	0,213	0,0279
2,2	0,164	0,212	0,0273	0,165	0,209	0,0271	0,166	0,209	0,0272
2,4	0,162	0,209	0,0266	0,165	0,206	0,0267	0,166	0,204	0,0266
2,6	0,163	0,205	0,0262	0,160	0,201	0,0253	0,162	0,200	0,0254
2,8	0,16	0,2	0,0251	0,155	0,198	0,0241	0,156	0,197	0,0241

Tyrimo eigoje buvo priimtas sprendimas įvertinti ir skaldos dangos storio galimą įtaką bandymo rezultatams. Siekiant tai padaryti, tyrimo metodika buvo patobulinta, vietoje mažai kontroliuojamo kiekvieno bandymo metu skaldos storio ant polietileno plėvelės. Buvo naudotas specialiai šiam tyrimui pasigamintas stendas (47 pav.).



47 pav. Matavimo stendas

Jo veikimo principas apibūdinamas paprastai: stendo šonuose įklijuotos 6 mm storio kartono juostelės. Tarpas tarp jų yra paliktas pakankamai platus, kad jame tilptų plačiausia tyrime matuojama transporto priemonės padanga, šio tyrimo atveju 245 mm. Centrinė stendo dalis pripildoma eksperimente naudojama 2 mm frakcijos skaldele. Siekiant, jog skalda būtų pasiskirsčiusi tolygiai, naudojama 400 mm pločio glaistymo darbams skirtas įrankis. Jo pagalba, nenaudojant perteklinės jėgos į stendo paviršių, nuo vieno stendo galo buvo braukiama 6 milimetrų storio juostelių viršutinėmis briaunomis. Tokiu metodu skaldos storis kiekvieno bandymo metu buvo išlaikomas artimas pastoviai 6 mm vertei. Bandymo eiga buvo išlaikoma tokia pati kaip ir pirminėje tyrimo dalyje. Automobilis pakeliamas, pasinaudojant oro kompresoriaus pagalba nustatoma tyrimui reikalinga atlikti slėgio vertė padangoje, skaldos sluoksnis yra išlyginamas, jog visame paviršiuje būtų tolygus storis. Stendas padedamas po pakeltu transporto priemonės ratu. Automobilis lėtai nuleidžiamas, taip padangai išspaudžiant pėdsaką dangoje. Važiuklei nusistovėjus, automobilis vėl yra pakeliamas, stendas ištraukiamas, bei atliekami susidariusio padangos kontaktinio paviršiaus matavimai. Gauti rezultatai užrašomi bandymų lentelėje (13 ir 14 lentelės), su kiekviena slėgio intervalo verte atliekant tris bandymus.

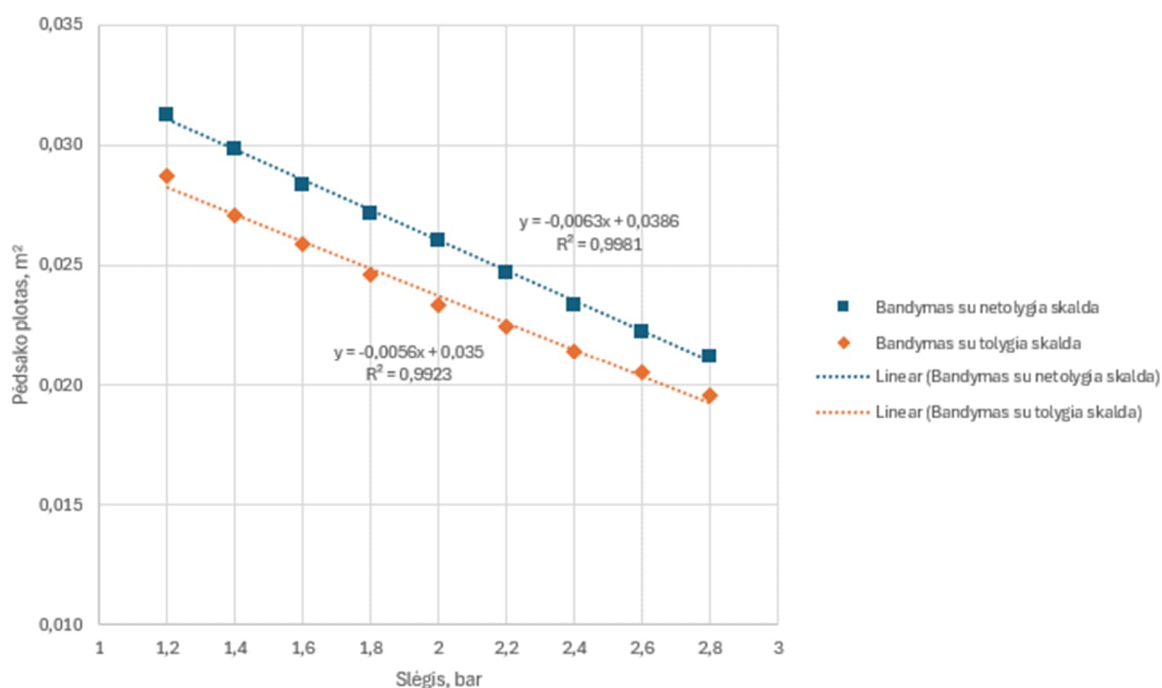
13 lentelė. Priekinės padangos reguliuojamo skaldos aukščio bandymas

Slėgis, bar	Bandymo nr. 1 metu fiksiuoti padangos pėdsako parametrai:			Bandymo nr. 2 metu fiksiuoti padangos pėdsako parametrai:			Bandymo nr. 3 metu fiksiuoti padangos pėdsako parametrai:		
	Ilgis, m	Plotis, m	Plotas, m ²	Ilgis, m	Plotis, m	Plotas, m ²	Ilgis, m	Plotis, m	Plotas, m ²
1,2	0,179	0,195	0,0274	0,182	0,198	0,0283	0,194	0,200	0,0305
1,4	0,174	0,193	0,0264	0,172	0,191	0,0258	0,190	0,195	0,0291
1,6	0,169	0,190	0,0252	0,168	0,188	0,0248	0,186	0,189	0,0276
1,8	0,166	0,185	0,0241	0,165	0,180	0,0233	0,182	0,185	0,0264
2,0	0,160	0,180	0,0226	0,162	0,177	0,0225	0,177	0,179	0,0249
2,2	0,159	0,178	0,0222	0,160	0,174	0,0219	0,171	0,174	0,0234
2,4	0,157	0,174	0,0215	0,155	0,170	0,0207	0,166	0,170	0,0222
2,6	0,154	0,170	0,0206	0,151	0,168	0,0199	0,160	0,168	0,0211
2,8	0,152	0,164	0,0196	0,143	0,165	0,0185	0,157	0,166	0,0205

14 lentelė. Galinės padangos reguliuojamo skaldos aukščio bandymas

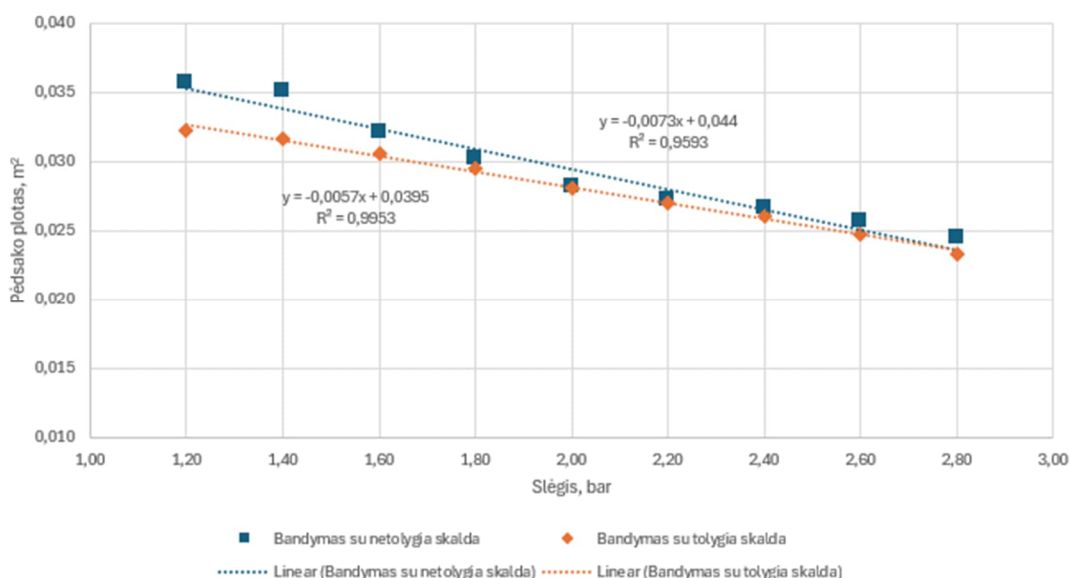
Slėgis, bar	Bandymo nr. 1 metu fiksuoti padangos pėdsako parametrai:			Bandymo nr. 2 metu fiksuoti padangos pėdsako parametrai:			Bandymo nr. 3 metu fiksuoti padangos pėdsako parametrai:		
	Ilgis, m	Plotis, m	Plotas, m ²	Ilgis, m	Plotis, m	Plotas, m ²	Ilgis, m	Plotis, m	Plotas, m ²
1,2	0,180	0,223	0,0315	0,183	0,227	0,0326	0,185	0,225	0,0327
1,4	0,177	0,226	0,0314	0,180	0,224	0,0317	0,181	0,223	0,0317
1,6	0,173	0,220	0,0299	0,175	0,223	0,0307	0,179	0,221	0,0311
1,8	0,169	0,219	0,0291	0,171	0,223	0,0299	0,172	0,217	0,0293
2,0	0,164	0,215	0,0277	0,167	0,218	0,0286	0,166	0,214	0,0279
2,2	0,160	0,215	0,0270	0,161	0,214	0,0271	0,161	0,212	0,0268
2,4	0,158	0,210	0,0261	0,157	0,210	0,0259	0,159	0,211	0,0263
2,6	0,153	0,205	0,0246	0,152	0,207	0,0247	0,153	0,206	0,0248
2,8	0,150	0,197	0,0232	0,149	0,199	0,0233	0,150	0,198	0,0233

Gauti bandymų rezultatai pateikiami grafiškai (48 ir 49 pav.):



48 pav. Priekinės žieminės padangos skaldos bandymų rezultatų palyginimas

Kaip galima matyti iš pateikto grafiko (48 pav.) kontakto ploto bandymą pakartojus su reguliuojamo aukščio skaldos sluoksniu, gauti rezultatų verčių vidurkiai sumažėjo. Kontakto ploto fiksuoto su nereguliuojamo storio skaldos sluoksniu bandymo metu gautų rezultatų koreliacijos koeficiento reikšmė fiksuota -0,9991. Tuo tarpu tyrimo su fiksuotu skaldos sluoksniu storio, kontakto ploto ir padangos slėgio verčių koreliacijos koeficiento nustatyta reikšmė -0,9961. Abejais bandymų atvejais galima pastebėti, jog sprendžiant pagal koreliacijos koeficientų reikšmes, slėgio ir padangos kontakto ploto priklausomybės yra stiprios.

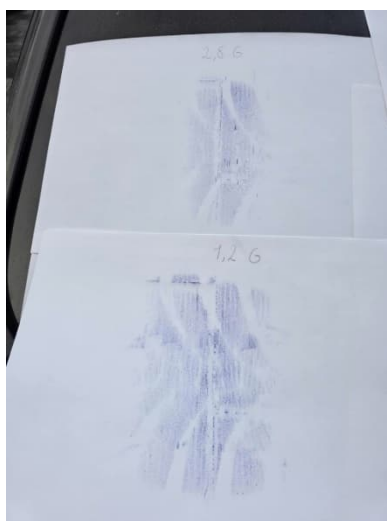


49 pav. Galinės žieminės padangos skaldos bandymų rezultatų palyginimas

Kaip galima matyti pagal pateiktus grafikus priekinės padangos rezultatuose matomas stiprus koreleacijos koeficientas tarp slėgio ir padangos paliekamo kontakto pėdsako. Mažesnis koreleacijos koeficientas gautas ir galinės padangos bandymų metu. Čia atliekant matavimus su atsitiktinio storio skaldos sluoksniu fiksuotas -0,9795 atvirkštinės koreliacijos koeficientas, o bandymuose su 6 mm storio skaldos sluoksniu ši vertė pakilo iki -0,9976. Pagrindinis vizualus ašių grafikų skirtumas, matomas tai, jog priekinės padangos visi bandymų rezultatai nuosekliai skyrėsi. Tačiau žvelgiant į galinės ašies grafiką matoma, kad nuo 1,8 bar slėgio vertės padangoje, fiksuotos pėdsako ploto vertės buvo labai artimos abejais bandymų atvejais.

3.2.5. Padangos pėdsako tyrimas fiksuojant kalkiniu popieriumi

Siekiant patikrinti pirminių skaldos bandymų rezultatų patikimumą, darbo eigoje buvo nuspręsta atlikti papildomus tyrimus padangos kontakto pėdsaką fiksuojant ant kieto pagrindo. Šiam bandymui atlikti buvo pasitelktas kalkinis popierius. Tyrimo eiga identiška prieš tai aprašytam metodui, tik šio tyrimo metu buvo atliekamas tik vienas bandymas su viena slėgio verte. Tyrimo eiga kaip ir bandymo su skalda atvejais, pradėta nuo numatyto slėgio vertės nustatymo. Tai atlikus, transporto priemonė buvo pakeliama hidraulinio keltuvo pagalba, bei po automobilio ratu pakišamas A3 formato popieriaus lapas uždengtas dviem A4 formato kalkinio popieriaus lapais bei papildomu popieriaus lapu, kuris buvo skirtas apsaugoti kalkinį popierių nuo galimo greito susidėvėjimo. Tada transporto priemonė iš lėto būdavo nuleidžiama žemyn, ko pasėkoje prispausdavo kalkinį popierių prie A3 formato lapo, o ant jo esantys dažai nuo susidariusio automobilio spaudimo, palikdavo pėdsaką (50 pav.). Kuris kaip ir skaldoje paliktas įspaudas buvo matuojamas dvejais parametrais: ilgiu ir pločiu.



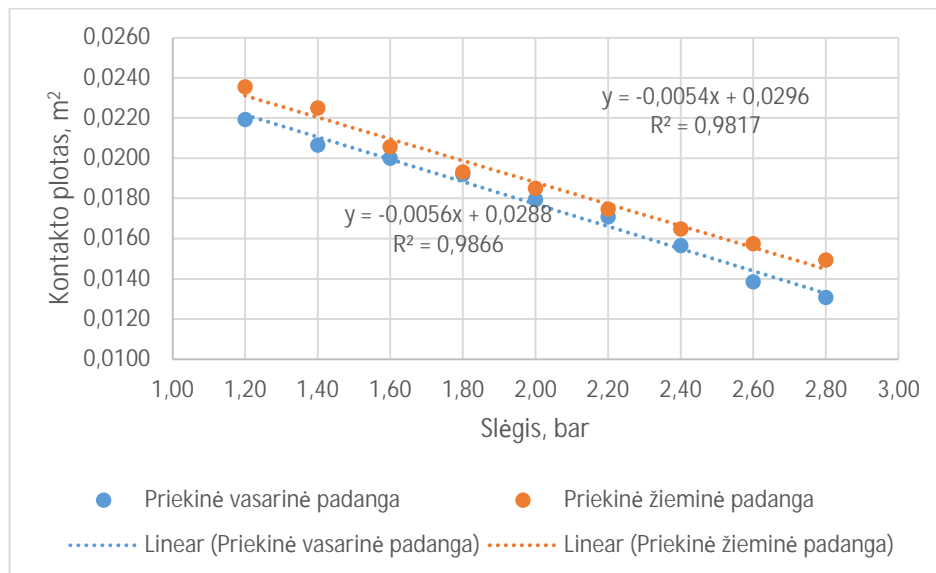
50 pav. Gautų rezultatų pavyzdys

Atlikto bandymo rezultatų pavyzdys pateikiamas 15 lentelėje.

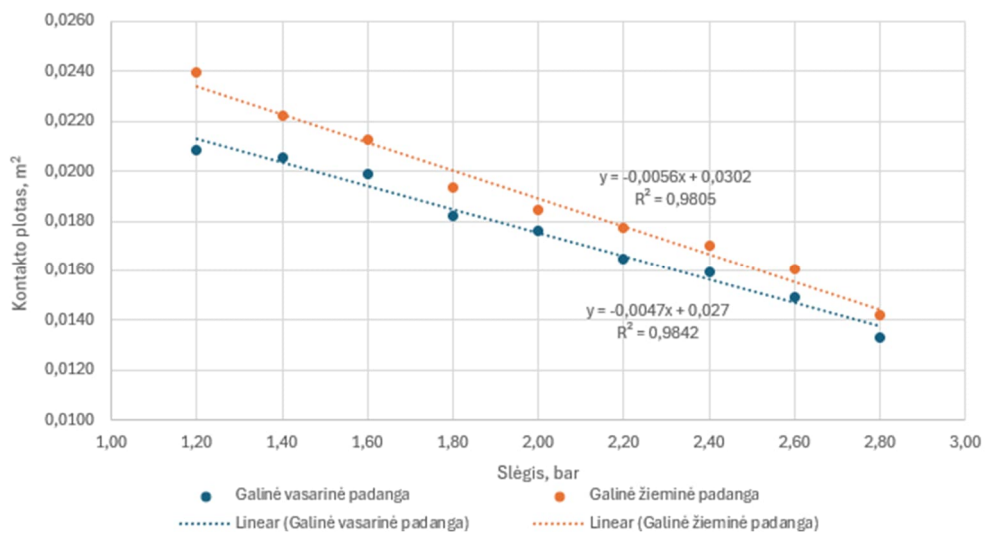
15 lentelė. Priekinės ašies padangų matavimo rezultatai

Slėgis, bar	Priekinės žieminės padangos pėdsako matavimas kalkiniu popieriumi		Priekinės vasarinės padangos pėdsako matavimas kalkiniu popieriumi	
	Ilgis, m	Plotis, m	Ilgis, m	Plotis, m
1,2	0,140	0,218	0,147	0,190
1,4	0,134	0,211	0,140	0,188
1,6	0,130	0,208	0,137	0,186
1,8	0,120	0,205	0,133	0,184
2,0	0,117	0,201	0,125	0,183
2,2	0,113	0,200	0,121	0,180
2,4	0,110	0,197	0,115	0,175
2,6	0,105	0,195	0,107	0,173
2,8	0,094	0,192	0,103	0,170

Kaip galima matyti iš rezultatų pateiktų 15 lentelėje, tyrimai buvo atlikti su dviejų skirtingų sezonų padangomis. Taip buvo siekiama ištirti abiejų padangų tipų reakcijas į slėgio pokyčius. Kadangi gaminių sudėtys yra skirtingos, skirtingi gamintojai, naudojamos konstrukcijos, gumos mišiniai. Vasaros sezonui skirtas padangų gumos mišinys yra kietesnis. Padangos konstrukcija tvirtesnė, optimalias darbinės savybes pasiekianti prie aukštesnių temperatūrų. Ko pasėkoje ir bandymo su kalkiniu popieriumi metu rezultatuose pateiktuose 15 lentelėje galima pastebėti, jog reikšmės išmatuotos prie vienodų slėgio verčių skiriasi.



51 pav. Priekinės ašies padangų bandymo su kalke palyginimas



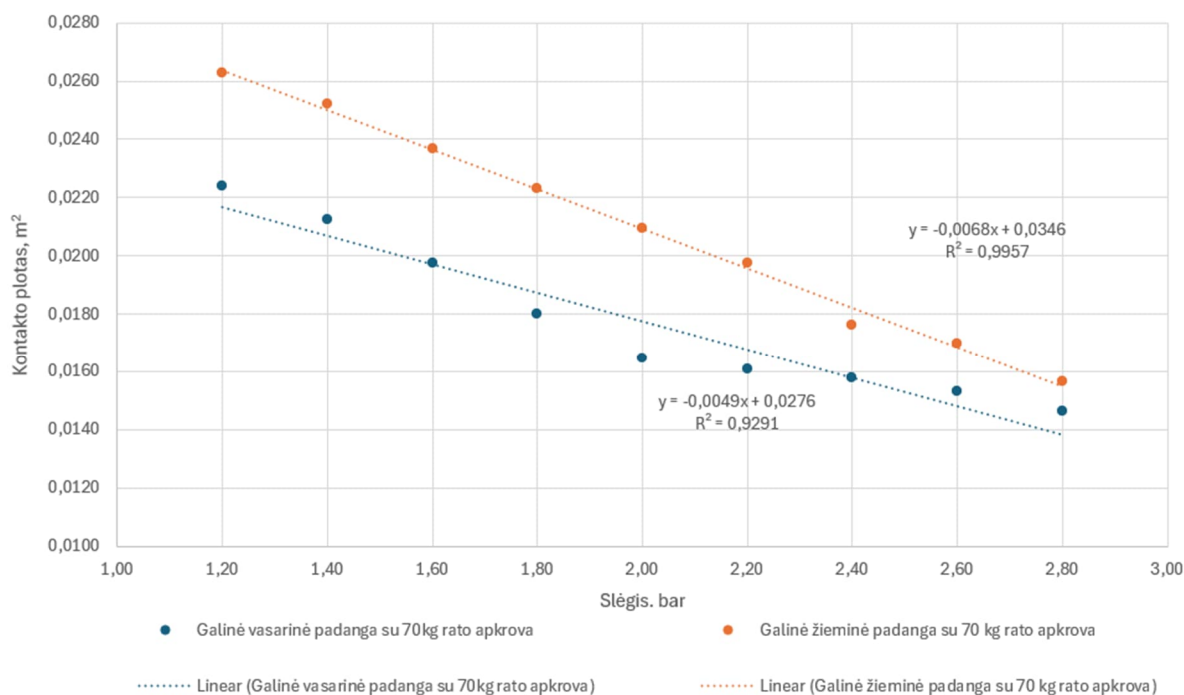
52 pav. Galinės ašies padangų bandymo su kalke palyginimas

Pagal gautus rezultatus sudarius grafikus (51 ir 52 pav.), galima pastebėti, jog slėgio vertėms artėjant prie gamintojo rekomenduojamos reikšmės, šiuo atveju 2,4 bar., padangų paliekamo pėdsako dydis supanašėja. Tačiau tiek prie žemiausios slėgio reikšmės 1,2 bar, tiek prie aukščiausios 2,8 bar reikšmės plotų skirtumas grafikuose matosi aiškus. Bendrai lyginant skirtingų ašių fiksuotus rezultatų koreliacijas galima pastebėti, jog priekinės ašies tyrime buvo fiksuota atvirkštiniai koreliacijos koeficientai -0,9933 ir -0,9908 vertės. Galinės automobilio ašies atveju šios vertės buvo -0,9921 ir -0,9902. Taigi tiek pirmųjų bandymų su skalda, tiek pakartotinių bandymų su kalkiniu popierumi atvejais padangų kontakto ploto dydžio priklausomybė nuo padangų slėgio vertės fiksuojama kaip stipri.

3.2.6. Padangų kontakto ploto tyrimas su papildoma apkrova

Vertinant padangos kontakto ploto įtaką riedėjimo pasipriešinimo koeficientui ir bendram vairavimo komfortui, svarbu yra atsižvelgti ir į galimus šalutinius veiksnius darančius įtaką šiems aspektams. Vienas iš tokių yra automobiliu gabenami daiktai, kroviniai, keleiviai. Dažniausiai gamintojai automobiliuose nurodo rekomendacijas savininkui kokias padangų slėgio reikšmes reiktų pasirinkti

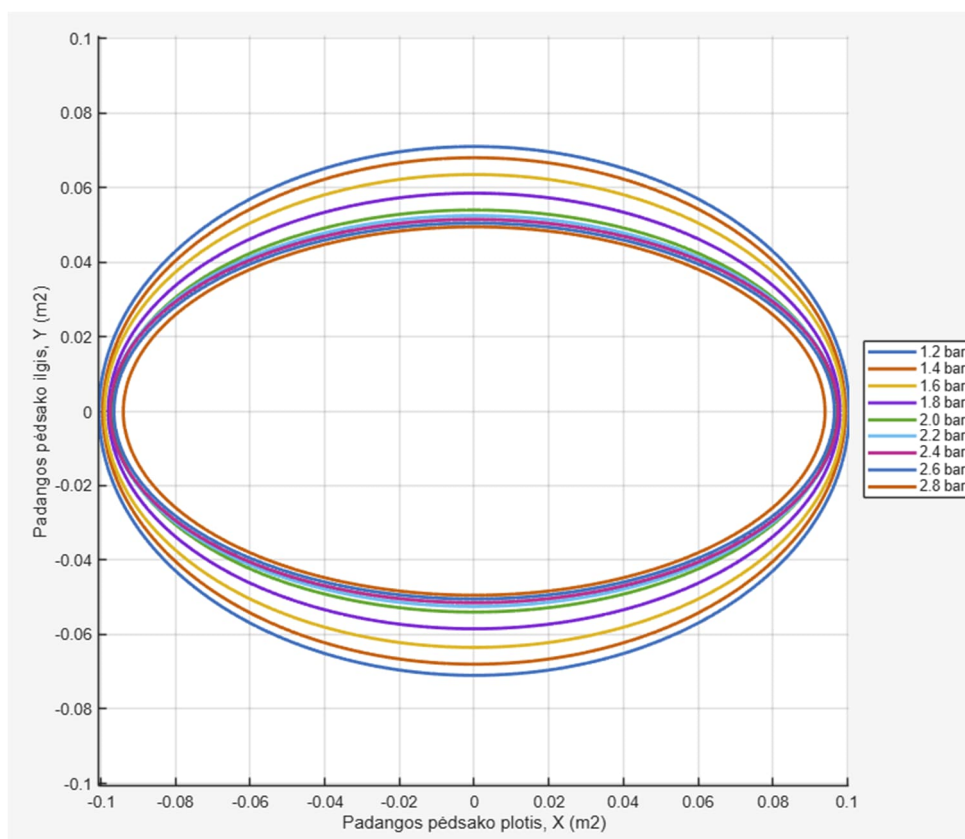
vežant atitinkamą skaičių keleivių ar krovinių. Tokios rekomendacijos galioja ne tik salone esantiems keleiviams tačiau ir bagažo skyriuje vežamiems kroviniams. Siekiant tai įvertinti buvo nuspręsta automobilio galinės ašies vienos pusės padangą tyrimo metu apkrauti papildomu svoriu. Norint tyrimą atlikti artimą realioms sąlygoms buvo nuspręsta imitacinio krovinio svorį pasirinkti 70 kg. Ši vertė pasirinkta neatsitiktinai, o remiantis [48] oficialios statistikos portalo pateikiama informacija, jog 2020 metų duomenimis bendras vyrų ir moterų kūno svoris Lietuvoje buvo 70,15 kg. Kitas argumentas naudoti tokio dydžio apkrovą vienai galinės ašies pusei yra tai, jog maksimalus leistinas krovinio svoris bandymuose naudojamam automobiliui rekomenduojama, jog neturėtų viršyti 140 kg. Todėl pasirinkta vertė atitinka pusę šio dydžio, kas leidžia realiai imituoti maksimalią vienai ašiai tenkančią krovinio apkrovą ir jo poveikį padangos kontakto plotui. Taigi siekiant imituoti tokio svorio krovinį, bandymams buvo pasitelkta du vienetai smėlio maišų, kurių kiekvieno svoris buvo parinktas po 35 kg. Prieš nustatant slėgį, automobilio bagažinėje maišai sudedami kaip įmanoma labiau sutelkiant visą svorį į planuojamos matuoti padangos pusę. Tada automobiliuose naudojamo oro kompresoriaus pagalba, nustatoma bandymui reikalinga padangos slėgio vertė. Automobilio šonas pakeliamas hidraulinio keltuvo pagalba. Po testuojama padanga padedama A3 formato popieriaus lapas uždengtas dvejais A4 formato kalkinio popieriaus lapais bei dar vienu A3 formato lapu. Transporto priemonė nuleidžiama. Po keletos minučių vėl pakeliama, lapai ištraukiami ir vėl nuleidžiama. Taip kartojamas ciklas kol atliekami bandymai su visomis numatytomis padangų slėgio vertėmis. Grafinė rezultatų išraiška pateikiama 53 paveiksle.



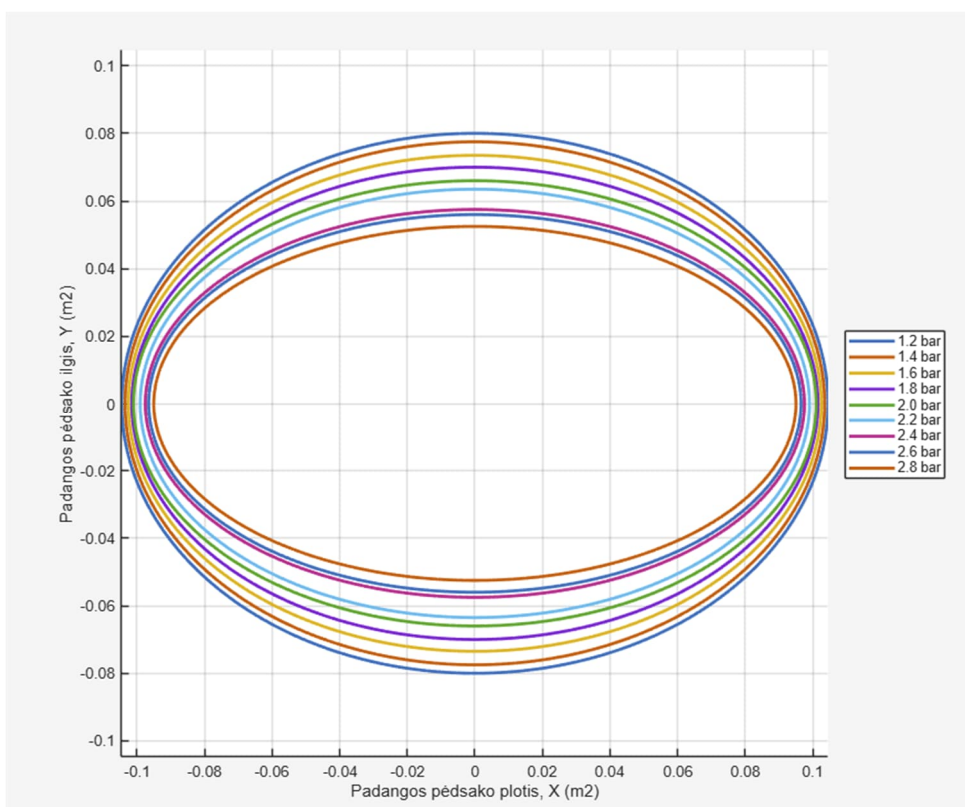
53 pav. Galinės padangos apkrautos 70 kg svoriu ploto priklausomybė nuo slėgio

Kaip galima matyti iš grafiko žiemos sezonui pritaikyta galinės ašies padanga į apkrovą reaguoja stipriau nei vasaros laikotarpiui pritaikytas gumos mišinys. Jeigu žiemos sezono rezultatuose fiksuojamas stiprus tiesinis ryšys. Tai vasaros laikotarpiu sąsaja yra silpnesnė. Šis sąsaja atsispindi ir grafiko koreliacijos koeficientų reikšmėse. Žiemos sezonui skirtos padangos kontakto ploto priklausomybė nuo padangos slėgio vertės fiksuota -0,9978. Tuo tarpu ši priklausomybė vasaros sezonui skirtos padangos atveju yra -0,9639.

Kaip kinta padangos kontakto forma atvaizduojama pasitelkiant MATLAB programinę įrangą ir nubraižant grafikus (54 ir 55 paveikslai).



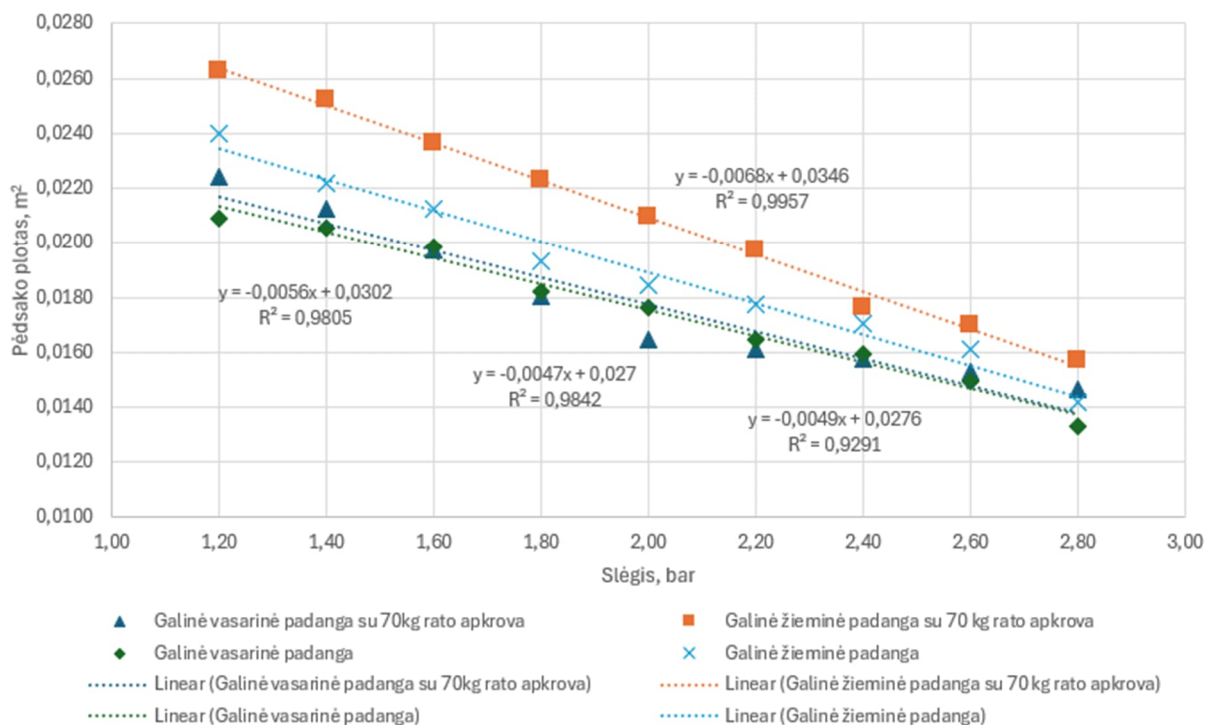
54 pav. Galinės vasarinės padangos kontakto ploto kitimas



55 pav. Galinės žieminės padangos kontakto ploto kitimas

Kaip galima pastebėti iš pateiktų grafikų 54 ir 55 paveiksluose apkrautos padangos plotai skiriasi. Žiemos sezonu naudojamas padangų mišinys stipriau deformuojasi nei vasaros sezonui skirtas padangos mišinys.

Siekiant suprasti kokią įtaką padangos kontakto plotui gali padaryti papildoma apkrova transporto priemonės bagažo skyriuje, šią priklausomybę pateikiame grafiškai kartu su gautais duomenimis kai padanga dar nebuvo apkrauta.



56 pav. Galinės padangos rezultatų palyginimas su apkrova ir be

Iš grafiko (56 pav.) galima matyti jog žiemos sezonui skirtos padangos parodyti rezultatai aiškiai išsiskiria. Tiek atliekant matavimus su papildoma apkrova, tiek su transporto priemonės svoriu. Fiksuoti padangos paliekamo kontakto pėdsako plotai buvo didesni nei vasaros sezono skirtos padangos. Papildomai neapkrautų padangų užfiksuoti rezultatai, vidutiniškai skyrėsi apie 7,2%. Tuo tarpu su papildoma apkrova fiksuotų bandymų rezultatų skirtumas siekė apie 15%. Kadangi gautos bandymų vertės grafiniame metode yra santykinai artimos, pagrindiniai rodikliai aprašomi 16 lentelėje.

16 lentelė. Galinės padangos tyrimo rezultatai

	Lygtis	Koreliacijos koeficientas
Vasarinė padanga	$y = -0,0047x + 0,027$	-0,9921
Žieminė padanga	$y = -0,0056x + 0,0302$	-0,9902
Vasarinė su apkrova	$y = -0,0049x + 0,0276$	-0,9639
Žieminė su apkrova	$y = -0,0068x + 0,0346$	-0,9978

3.3. Tyrimų rezultatų analizė

Atliktų tyrimų gauti rezultatai toliau yra panaudojami empiriniams padangos riedėjimo pasipriešinimo jėgos apskaičiavimui. Siekiant gauti šį rezultatą buvo naudojama papildomos formulės. Pirmoji iš jų skaičiavimuose naudota vertikalaus padangos aukščio pokyčio formulė:

$$\delta = r - \sqrt{r^2 - \left(\frac{L}{2}\right)^2}; \quad (2)$$

čia δ – vertikalus padangos aukščio pokytis; r – padangos spindulys; L – padangos pėdsako ilgis.

Siekiant atlikti skaičiavimus su nurodyta (2) formule, svarbus aspektas buvo naudojamos padangos skersmens apskaičiavimas. Kadangi tyrimui naudotas automobilis su dvejomis skirtingų matmenų padangomis, visi skaičiavimai atliekami kiekvieno tipo padangai atskirai. Veiksmai pateikiami žemiau [42]:

Bandymuose naudotų padangų matmenys:

- priekinė ašis – 225/40/R18;
- galinė ašis – 245/40/R18.

Iš šios gamintojo pateikiamos informacijos galima susirašyti duomenis kurie yra jau žinomi:

Padangų pločiai:

$$a_p = 225 \text{ mm};$$

$$a_g = 245 \text{ mm};$$

Kraštinių santykiai:

$$KS_p = 40\%;$$

$$KS_g = 40\%;$$

Ratlankio skermuo:

$$R = 18 \cdot 25,4 = 457,2 \text{ mm};$$

Iš kraštinių santykio apskaičiavimo formulės (3), išvedama formulė reikalinga padangos sienelės aukščio apskaičiavimui:

$$KS = \frac{h}{a} \cdot 100; \quad (3)$$

$$h = \frac{KS \cdot a}{100}; \quad (4)$$

Pagal formules apskaičiuojamos priekinės ir galinės padangų sienelės:

$$h_p = \frac{40 \cdot 225}{100} = 90 \text{ mm};$$

$$h_g = \frac{40 \cdot 245}{100} = 98 \text{ mm};$$

Apskaičiuojami abiejų ašių ratų diametrai:

$$d_p = R + 2 \cdot h_p; \quad (5)$$

$$d_g = R + 2 \cdot h_g; \quad (6)$$

$$d_p = 457,2 + 2 \cdot 90 = 637,2 \text{ mm};$$

$$d_g = 457,2 + 2 \cdot 98 = 653,2 \text{ mm};$$

Apskaičiuojamas rato spindulys, vertinant, jog automobiliui stovint, ratas yra spaudžiamas, pagal pateiktą skaičiavimo metodiką [42] pritaikomas koeficientas:

$$r = 0,95 \cdot \frac{d}{2}; \quad (7)$$

$$r_p = \frac{637,2}{2} = 318,6 \text{ mm};$$

$$r_g = \frac{653,2}{2} = 326,6 \text{ mm};$$

Atlikus visų reikalingų padangų parametrų skaičiavimus, vertinama padangos aukščio sumažėjimas kiekvieno matavimo metu. Vertinant šį rodiklį skaičiuojant padangos suplokštėjimą su rezultatais gautais tyrimui pasitelkiant skaldą, skaičiavimams buvo naudotos visų trijų bandymo pakartojimų vidurkio reikšmės, o bandymų su kalkiniu popieriumi atveju, palikto pėdsako ilgio reikšmė.

17 lentelė. Priekinės padangos vertikalios aukščio sumažėjimas

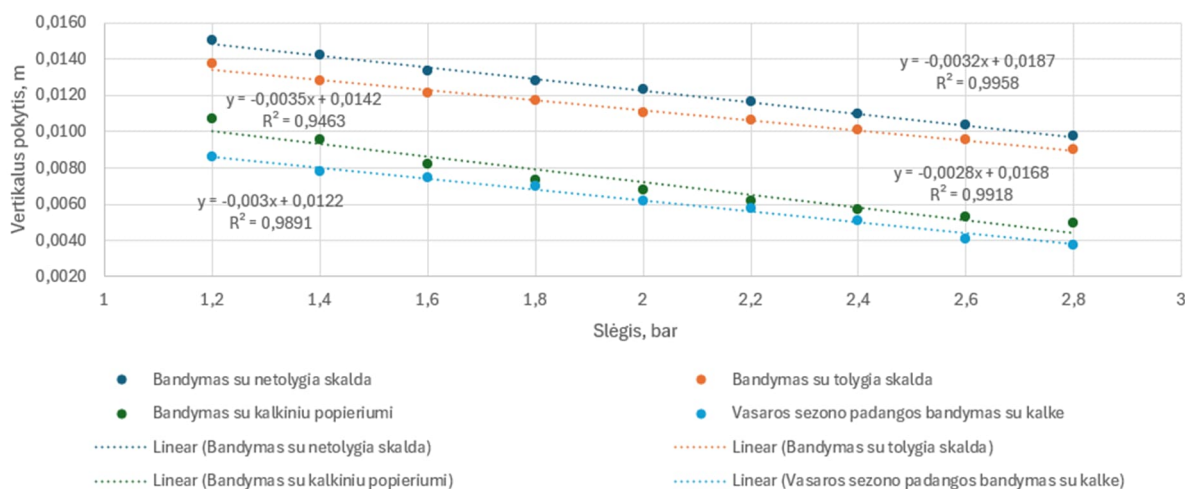
Priekinė padanga				
Slėgis, bar	Bandymas su netolygaus storio skaldos sluoksniu, m	Bandymas su tolygaus storio skaldos sluoksniu, m	Bandymas su kalkiniu popieriumi, m	Vasaros sezono padangos bandymas su kalke, m
1,2	0,0150	0,0137	0,0107	0,0086
1,4	0,0142	0,0128	0,0096	0,0078
1,6	0,0133	0,0122	0,0082	0,0075
1,8	0,0128	0,0117	0,0073	0,0070
2,0	0,0123	0,0110	0,0068	0,0062
2,2	0,0116	0,0106	0,0062	0,0058
2,4	0,0110	0,0101	0,0057	0,0051
2,6	0,0104	0,0096	0,0053	0,0041
2,8	0,0098	0,0090	0,0050	0,0038

Tokie patys skaičiavimai atlikti ir su galinės ašies padanga (18 lentelė).

18 lentelė. Galinės padangos vertikalaus aukščio sumažėjimas

Galinė padanga						
Slėgis, bar	Bandymas su netolygiaus storio skaldos sluoksniu, m	Bandymas su tolygiaus storio skaldos sluoksniu, m	Bandymas su kalkiniu popieriumi, m	Vasaros sezono padangos bandymas su kalke, m	Žieminės padangos bandymas su 70 kg apkrova, m	Vasarinės padangos bandymas su 70 kg apkrova, m
1,2	0,0152	0,0130	0,0076	0,0084	0,0099	0,0078
1,4	0,0151	0,0125	0,0069	0,0076	0,0093	0,0072
1,6	0,0131	0,0120	0,0065	0,0073	0,0084	0,0062
1,8	0,0120	0,0113	0,0056	0,0068	0,0076	0,0053
2,0	0,0109	0,0107	0,0053	0,0060	0,0067	0,0045
2,2	0,0106	0,0100	0,0049	0,0057	0,0062	0,0042
2,4	0,0105	0,0097	0,0047	0,0050	0,0051	0,0041
2,6	0,0102	0,0090	0,0042	0,0040	0,0048	0,0039
2,8	0,0096	0,0087	0,0034	0,0037	0,0042	0,0038

Norint suprasti aiškesnią vertikalaus padangos aukščio priklausomybę nuo slėgio, rezultatai pateikiami grafine forma (57 pav.):



57 pav. Priekinės padangos vertikalaus aukščio sumažėjimo priklausomybė nuo slėgio

19 lentelė. Priekinės padangos priklausomybių parametrai

	Lygtis	Koreliacijos koeficientas
Bandymas su netolygia skalda	$y = -0,0032x + 0,0187$	-0,9979
Bandymas su tolygia skalda	$y = -0,0028x + 0,0168$	-0,9959
Bandymas su kalkiniu popieriumi	$y = -0,0035x + 0,0142$	-0,9728
Vasarinės padangos bandymas su kalke	$y = -0,003x + 0,0122$	-0,9945

Sekanti formulė reikalinga galutiniam reidėjimo pasipriešinimo jėgos apskaičiavimui yra pasipriešinimo koeficiento C_{rr} :

$$C_{rr_{geom}} = \sqrt{\frac{\delta}{r}}; \quad (8)$$

Tačiau atliekant skaičiavimus vertinama, jog ši formulė parodo koeficiento vertę gaunamą kai padanga yra pilnai deformuojama. Šis vertinimas būtų tinkamas idealiai plastiško modelio skaičiavimui. Tokiu atveju riedėjimo pasipriešinimo koeficientas būtų tiesiogiai proporcingas suplokštėjimo ir rato spindulio santykiui. Tačiau padanga kaip gaminys yra sudarytas iš keletos skirtingų medžiagų iš kurių didžiąją dalį sudaro guma, kuri yra laikoma elastinga medžiaga. Ko pasėkoje energija kuri yra panaudojama padangos judėjimo metu spausti priekinę padangos dalį, vėlesnėje judėjimo dalyje grįžta galinėje padangos dalyje. Tokie energijos mainai yra paaiškinami fazės atsilikimu. Matematikoje visa galima deformacija apibrėžiama vektoriniu dydžiu $C_{rr_{geom}}$, o nuostolių dedamoji, pasireiškianti šilumos išsiskyrimu kontakto zonoje yra menama. Todėl faktinis koeficientas gali būti apibrėžiamas trigonometriniu priklausomybe:

$$C_{rr_{tikras}} = C_{rr_{geom}} \cdot \sin(\beta); \quad (9)$$

čia β – fazinis kampas.

Atliekant skaičiavimus fazinio kampo vertė vadovaujantis J. W. M. Noordermeer knyga [44] bei [45] naudojama 0,15. Kadangi nurodyti galimi režiai atliekami riedėjimo pasipriešinimo koeficiento skaičiavimai:

20 lentelė. Priekinės padangos riedėjimo pasipriešinimas

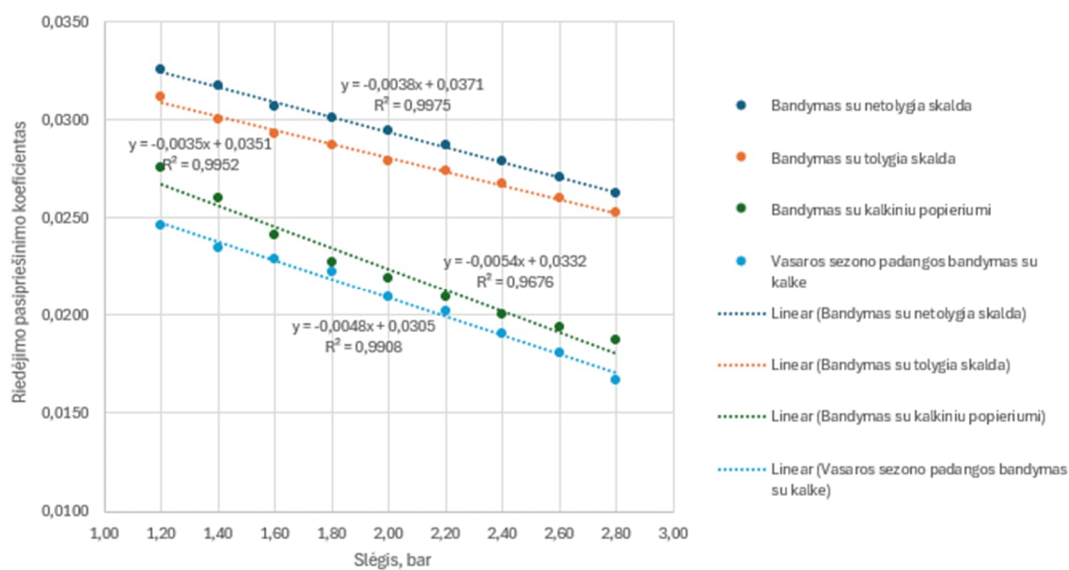
Slėgis, bar	Bandymas su netolygaus storio skaldos sluoksniu	Bandymas su tolygaus storio skaldos sluoksniu	Bandymas su kalkiniu popieriumi	Vasaros sezono padangos bandymas su kalkiniu popieriumi
1,2	0,0326	0,0311	0,0275	0,0246
1,4	0,0317	0,0300	0,0260	0,0234
1,6	0,0307	0,0293	0,0241	0,0229
1,8	0,0301	0,0287	0,0228	0,0223
2,0	0,0295	0,0279	0,0207	0,0209
2,2	0,0287	0,0274	0,0201	0,0202
2,4	0,0279	0,0267	0,0197	0,0191
2,6	0,0271	0,0260	0,0194	0,0170
2,8	0,0263	0,0253	0,0175	0,0164

Kaip galima matyti iš 20 lentelėje pateiktų skaičiavimų rezultatų, transporto priemonės padangos pasipriešinimo koeficientas didinant slėgį padangoje mažėja. Identiški pasipriešinimo koeficiento skaičiavimai atliekami ir su galinės automobilio ašies padangomis (21 lentelė).

21 lentelė. Galinės padangos riedėjimo pasipriešinimas

Galinės padangos riedėjimo pasipriešinimas						
Slėgis, bar	Bandymas su skalda	Bandymas su fiksuotu skaldos aukščiu	Bandymas su kalkiniu popieriumi	Žieminės padangos bandymas su 70 kg apkrova	Vasaros sezono padangos bandymas su kalke	Vasarinės padangos bandymas su 70 kg apkrova
1,2	0,0337	0,0300	0,0277	0,0265	0,0243	0,0235
1,4	0,0325	0,0294	0,0265	0,0257	0,0232	0,0225
1,6	0,0301	0,0288	0,0255	0,0243	0,0226	0,0210
1,8	0,0287	0,0280	0,0239	0,0232	0,0220	0,0193
2,0	0,0274	0,0271	0,0229	0,0218	0,0206	0,0178
2,2	0,0270	0,0263	0,0219	0,0210	0,0200	0,0173
2,4	0,0269	0,0258	0,0207	0,0190	0,0188	0,0170
2,6	0,0265	0,0250	0,0192	0,0185	0,0168	0,0167
2,8	0,0257	0,0245	0,0171	0,0173	0,0162	0,0163

Rezultatai pateikiami grafiškai 58 ir 59 paveiksluose:

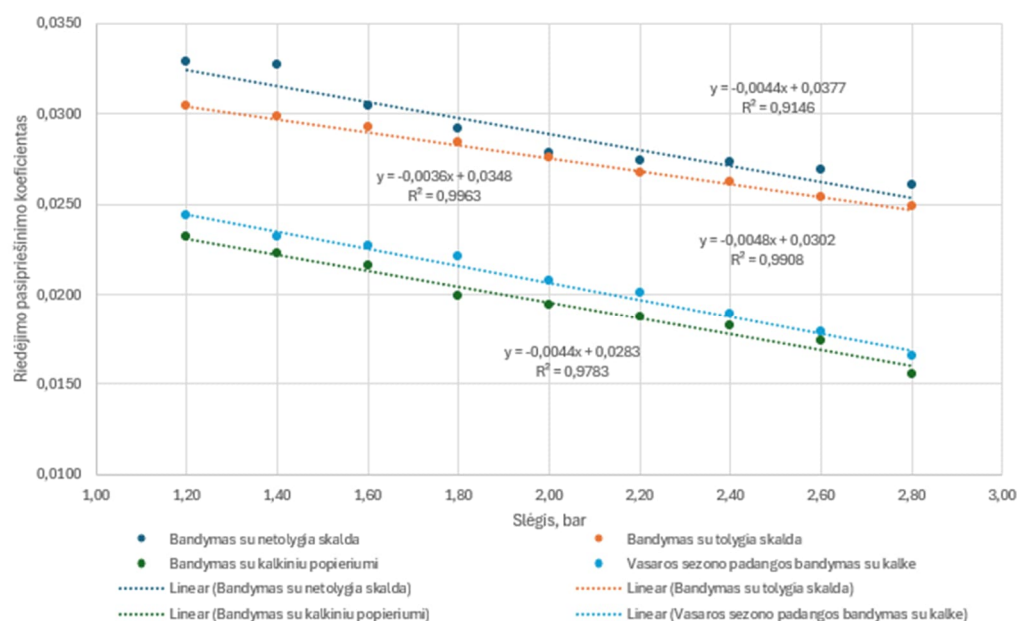


58 pav. Priekinės padangos pasipriešinimo koeficiento kitimas

Pagrindiniai priklausomybių parametrai pateikiami 22 lentelėje:

22 lentelė. Priekinės padangos riedėjimo pasipriešinimo grafiko analizė

	Lygtis	Koreliacijos koeficientas
Bandymas su netolygia skalda	$y = -0,0038x + 0,0371$	-0,9979
Bandymas su tolygia skalda	$y = -0,0035x + 0,0351$	-0,9959
Bandymas su kalkiniu popieriumi	$y = -0,0054x + 0,0332$	-0,9728
Vasarinės padangos bandymas su kalke	$y = -0,0052x + 0,0311$	-0,9945



59 pav. Galinės ašies riedėjimo pasipriešinimo koeficiento priklausomybė

Pagrindiniai galinės ašies padangos parametrai pateikiami 23 lentelėje:

23 lentelė. Galinė padangos riedėjimo pasipriešinimo koeficiento grafiko analizė

	Lygtis	Koreliacijos koeficientas
Bandymas su netolygia skalda	$y = -0,0044x + 0,0377$	-0,9563
Bandymas su tolygia skalda	$y = -0,0036x + 0,0348$	-0,9981
Bandymas su kalkiniu popieriumi	$y = -0,0048x + 0,0302$	-0,9891
Vasarinės padangos bandymas su kalke	$y = -0,0044x + 0,0283$	-0,9954

Iš duotų grafikų galima matyti, jog padangos slėgio vertėms kylant, riedėjimo pasipriešinimo koeficiento reikšmė krenta, nepriklausomai koku metodu buvo matuota padangos pėdsako parametrai. Kaip ir padangos kontakto plotą atvaizduojančio grafiko atveju galima pastebėti, jog bandymų atliktų matavimui pasitelkiant kalkinį popierių rezultatai yra aiškiai mažesni. Taip pat tokio tipo bandymų rezultatų koreliacijos koeficientų reikšmės fiksuojamos mažesnės (23 lentelė). Abiejų transporto priemonės ašių gautus rezultatus lyginant tarpusavyje galima pastebėti tendenciją, jog priekinės ir galinės ašies riedėjimo pasipriešinimo koeficientų skirtumai prie didžiausios ir mažiausios slėgių reikšmių bandymus atliekant su skalda skiriasi vidutiniškai apie 20%. Tačiau kontakto ploto fiksavimui pasitelkiant kalkinį popierių šis skirtumas tarp didžiausios ir mažiausios reikšmės abejose ašyse išauga iki 50%. Toks riedėjimo pasipriešinimo išaugimas lemia ir išaugusius kitus svarbius aspektus. Priešinimasis automobilio judėjimui, arba riedėjimui, sudaro nuo 20 iki 30% Remiantis Grzegorz Ronowski [49] ir bendraautorių darbu, riedėjimo pasipriešinimo koeficiento sumažinimas 50 %, gali padėti sumažinti energijos sąnaudas apie 15%. Tai ypač aktualu vertinant tiek vidaus degimo varikliais tiek elektra varomų automobilių vairuotojams. Sumažintas riedėjimo pasipriešinimas sąlygoja ir geresnę variklių ekologiškumą. Remiantis „Michelin“ padangų gamintojo pateikiama informacija [50], sumažinus riedėjimo pasipriešinimo vertę 30%, kelionės degalų sąnaudas galima sumažinti nuo 3 iki 5%. Taip pat šis koeficientas daro didelę įtaką padangų ilgaamžiškumui. Didesnė riedėjimo pasipriešinimo koeficiento vertė, sąlygoja kitų kintamųjų verčių kaip pasipriešinimo jėgos išaugimą.

Taigi siekiant apskaičiuoti riedėjimo pasipriešinimo jėgą tyrime buvo reikalinga nustatyti kokia jėga automobilis spaudžia padangą tyrime naudota slėgio skaičiavimo formulė, kurioje jėga yra prilyginama normalinei jėgai veikiančiai padangą dėl transporto priemonės svorio:

$$N = p \cdot A; \quad (10)$$

čia N – normalinė jėga kuria automobilis veikia padangą; p – slėgis padangoje; A – išmatuotas padangos kontakto plotas.

Gautos normalinės veikiančios jėgos skaitinės vertės naudojamos tolimesniuose riedėjimo pasipriešinimo jėgos skaičiavimuose, kurie atliekami pagal (11) formulę:

$$F_{rr} = C_{rr} \cdot N; \quad (11)$$

Įsistačius visas jau turimas vertes gaunami rezultatai (24 lentelė):

24 lentelė. Priekinės padangos riedėjimo pasipriešinimo jėga

Priekinė padanga				
Slėgis, bar	Bandymas su netolygia skalda, N	Bandymas su tolygia skalda, N	Bandymas su kalkiniu popieriumi, N	Vasaros sezono padangos bandymas su kalke, N
1,2	122,245	107,294	78,301	64,850
1,4	132,408	113,910	79,752	67,858
1,6	139,154	121,315	77,274	73,455
1,8	147,009	127,326	76,612	77,017
2,0	153,406	130,383	76,863	75,130
2,2	155,572	135,670	75,435	76,145
2,4	156,409	137,573	75,423	71,649
2,6	156,402	138,785	73,948	61,378
2,8	156,038	138,092	66,986	59,944

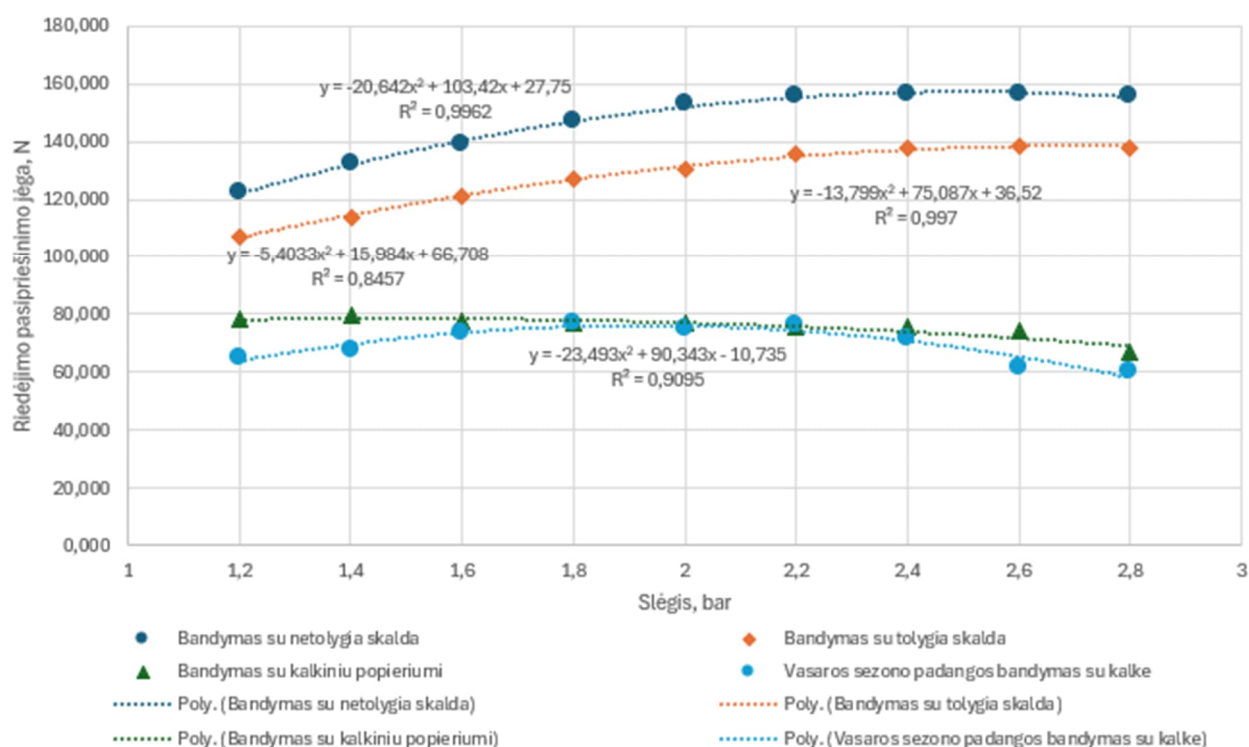
Taip pat atliekami skaičiavimai ir ant galinės ašies sumontuotoms padangoms (25 lentelė):

25 lentelė. Galinės padangos riedėjimo pasipriešinimo jėga

Galinė padanga						
Slėgis, bar	Bandymas su netolygia skalda, N	Bandymas su tolygia skalda, N	Bandymas su kalkiniu popieriumi, N	Vasaros sezono padangos bandymas su kalke, N	Žieminės padangos bandymas su 70 kg apkrova, N	Vasarinės padangos bandymas su 70 kg apkrova, N
1,2	140,352	117,507	66,594	60,921	83,542	63,179
1,4	160,234	131,693	68,857	66,599	90,550	66,905
1,6	156,322	142,426	72,989	71,999	92,112	66,295
1,8	158,414	150,018	68,905	71,989	93,018	62,614
2,0	156,537	154,123	71,345	72,727	91,366	58,639

Slėgis, bar	Bandymas su netolygia skalda, N	Bandymas su tolygia skalda, N	Bandymas su kalkiniu popieriumi, N	Vasaros sezono padangos bandymas su kalke, N	Žieminės padangos bandymas su 70 kg apkrova, N	Vasarinės padangos bandymas su 70 kg apkrova, N
2,2	163,744	157,898	72,821	72,456	91,155	61,271
2,4	174,084	163,941	74,135	71,869	80,232	64,311
2,6	178,639	162,316	72,412	65,263	81,580	66,296
2,8	178,059	161,431	61,497	60,120	75,982	66,811

Norint lengviau palyginti tyrimo metu gautas riedėjimo pasipriešinimo jėgos vertes sudaromi grafikai. Juose lyginama trys skirtingi variantai. Pirmasis grafikas (60 pav.) vaizduoja priekinės ašies padangos riedėjimo pasipriešinimo jėgos priklausomybę nuo slėgio visais atliktų bandymų atvejais:



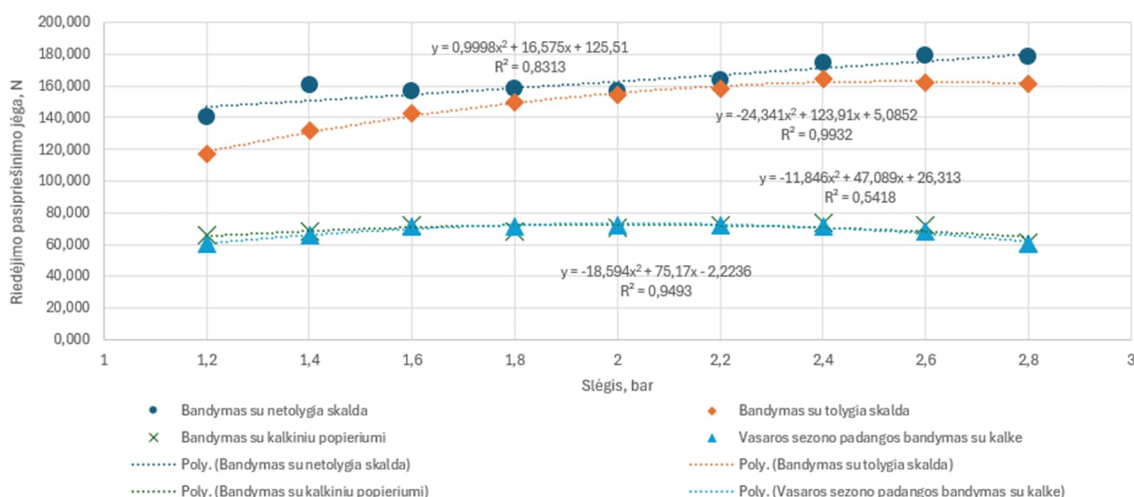
60 pav. Priekinės padangos riedėjimo pasipriešinimo jėgos priklausomybės nuo slėgio grafikas

Grafiko analizė pateikiama 26 lentelėje:

26 lentelė. Priekinės padangos riedėjimo pasipriešinimo jėgos priklausomybės nuo slėgio grafiko analizė

	Lygtis	Koreliacijos koeficientas
Bandymas su netolygia skalda	$y = -20,642x^2 + 103,42x + 27,75$	0,9107
Bandymas su tolygia skalda	$y = -13,799x^2 + 75,087x + 36,52$	0,9525
Bandymas su kalkiniu popieriumi	$y = -5,4033x^2 + 15,984x + 66,708$	-0,8433
Vasarinės padangos bandymas su kalke	$y = -23,493x^2 + 90,343x - 10,735$	-0,0998

Antrasis grafikas (61 pav.) sudaromas iš duomenų gautų matuojant ant galinės automobilio ašies sumontuotų padangų riedėjimo pasipriešinimo jėgą.



61 pav. Galinės padangos riedėjimo pasipriešinimo jėgos priklausomybės nuo slėgio grafikas

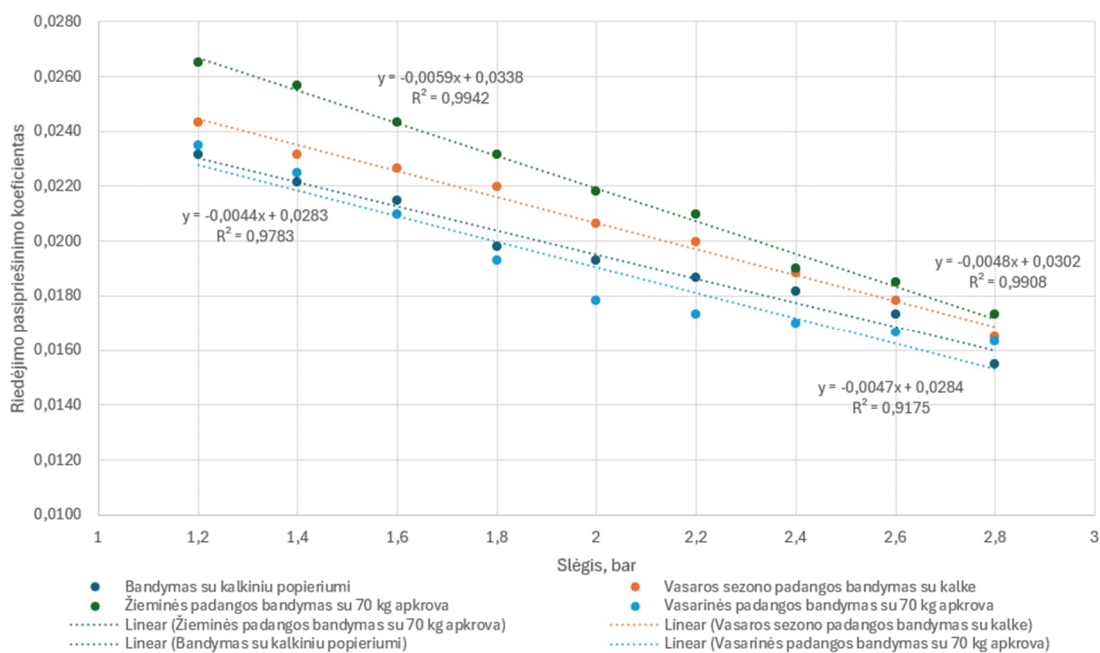
Taip pat pateikiama grafiko analizė (27 lentelė):

27 lentelė. Galinės padangos riedėjimo pasipriešinimo jėgos priklausomybės nuo slėgio grafiko analizė

	Lygtis	Koreliacijos koeficientas
Bandymas su netolygia skalda	$y=0,9998x^2+16,575x+125,51$	0,9116
Bandymas su tolygia skalda	$y=-24,341x^2+123,91x+5,0852$	0,9203
Bandymas su kalkiniu popieriumi	$y=-11,846x^2+47,089x+26,313$	-0,0401
Vasarinės padangos bandymas su kalke	$y=-18,594x^2+75,17x-2,2236$	0,0914

Kaip galima matyti iš abiejų ašių padangų grafikų, matavimai su kalkiniu popieriumi ir skalda davė skirtingas tendencijas rodančius rezultatus. Matavimai atlikti ant kieto pagrindo, padangos pėdsakui fiksuoti pasitelkiant kalkinio popieriaus pagalbą turi aiškia tendenciją prie žemiausios ir aukščiausios slėgio vertės išlaikyti panašias riedėjimo pasipriešinimo jėgos vertes. Taip pat abiejuose (60 ir 61 paveiksluose) matoma, jog bandymų su kalkiniu popieriumi metu padangos slėgio vertei esant 2 bar, pasipriešinimo riedėjimui jėgos vertės tampa beveik lygios ir vasaros sezono ir žiemos sezono padangų atvejais. Kita tendencija pastebima iš tyrimų metu gautų grafikų yra bandymų su skirtingai apdorota skalda. Abiejų ašių bandymų rezultatuose galima matyti tendenciją, jog automobilio padangos slėgio vertei kylant riedėjimo pasipriešinimo jėgos vertė taip turi augimo tendenciją. Ši tendencija aiškiai įrodo mažesnio padangų slėgio naudą transporto priemonei važiuojant biraus pagrindo danga. Kadangi mažas padangų slėgis padidina kontakto plotą, taip neleisdamas padangai nugrimzti giliau į birių paviršių, ko pasėkoje yra palaikomas mažesnis pasipriešinimas riedėjimui. Būtent dėl šios tendencijos autosporto šakose, kur kelio danga sudaryta iš birių paviršių, tinkamas padangų slėgio verčių pasirinkimas turi didelę įtaką galutiniam sportiniam rezultatui.

Siekiant tyrimą padaryti kuo universalesnį, bei apžvelgti įvairius galimus scenarijus. Riedėjimo pasipriešinimo koeficiento bei jėgos kitimo priklausomybės buvo vertintos ir apkrovus galinę automobilio ašį papildomu svoriu (62 ir 63 pav.).



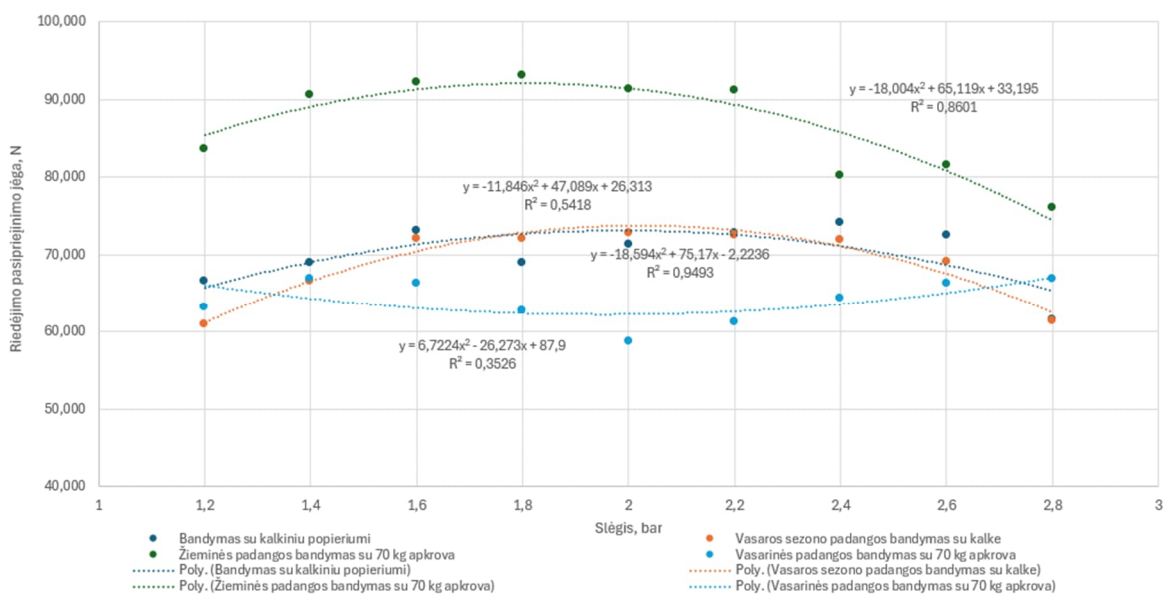
62 pav. Galinės padangos su apkrova riedėjimo pasipriešinimo koeficiento priklausomybė

Grafiko (62 pav.) analizė (28 lentelė):

28 lentelė. Galinės padangos su apkrova riedėjimo pasipriešinimo koeficiento grafiko analizė

	Lygtis	Koreliacijos koeficientas
Bandymas su kalkiniu popieriumi	$y = -0,0059x + 0,0338$	-0,9891
Vasaros sezono padangos bandymas su kalke	$y = -0,0048x + 0,0302$	-0,9954
Žieminės padangos bandymas su 70 kg apkrova	$y = -0,0047x + 0,0284$	-0,9971
Vasarinės padangos bandymas su 70 kg apkrova	$y = -0,0044x + 0,0283$	-0,9579

Įvertinama ir įtaka riedėjimo pasipriešinimo jėgai (63 pav):



63 pav. Galinės padangos riedėjimo pasipriešinimo jėgos palyginimas su apkrova ir be

Pateikiama grafiko analizė (29 lentelė):

29 lentelė. Galinės padangos su apkrova riedėjimo pasipriešinimo jėgos grafiko analizė

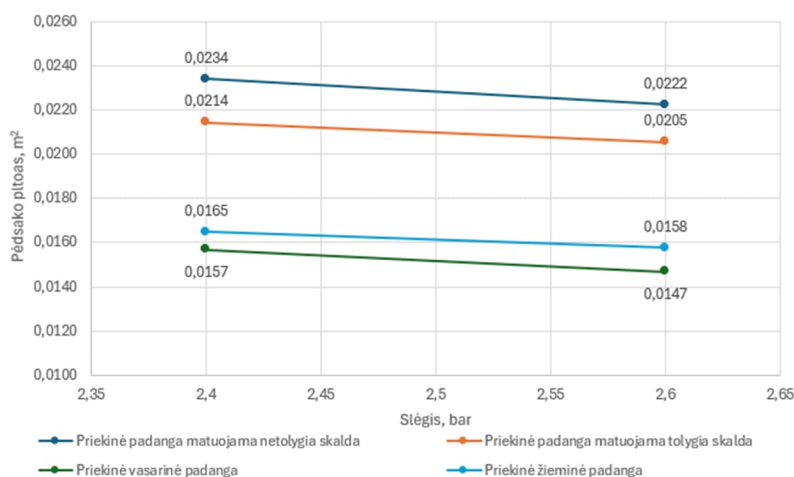
	Lygtis	Koreliacijos koeficientas
Bandymas su kalkiniu popieriumi	$y = -18,004x^2 + 65,119x + 33,195$	-0,0401
Vasaros sezono padangos bandymas su kalke	$y = -11,846x^2 + 47,089x + 26,313$	0,0914
Žieminės padangos bandymas su 70 kg apkrova	$y = -18,594x^2 + 75,17x - 2,2236$	-0,5988
Vasarinės padangos bandymas su 70 kg apkrova	$y = 6,7224x^2 - 26,273x + 87,9$	0,1177

Kaip galima matyti iš 63 paveiksle pateikto grafiko, didžiausia papildomo krovinio įtaka tyrimo metu riedėjimo pasipriešinimo jėgai buvo fiksuota bandymą atliekant su užmontuotomis, žiemos sezonui skirtomis padangomis. Tačiau šio bandymo rezultatų tendencija taip pat galima laikyti panašia kaip ir bandymų atliktų su neapkrauta žiemos sezono bei vasaros sezonui skirta padanga. Nors rezultatų priklausomybės ir neturi stipraus koreleacijos koeficiento, tačiau visų tendencija aiškiausiai apibūdinama polinomine linija.

3.4. Bendri tyrimų rezultatai

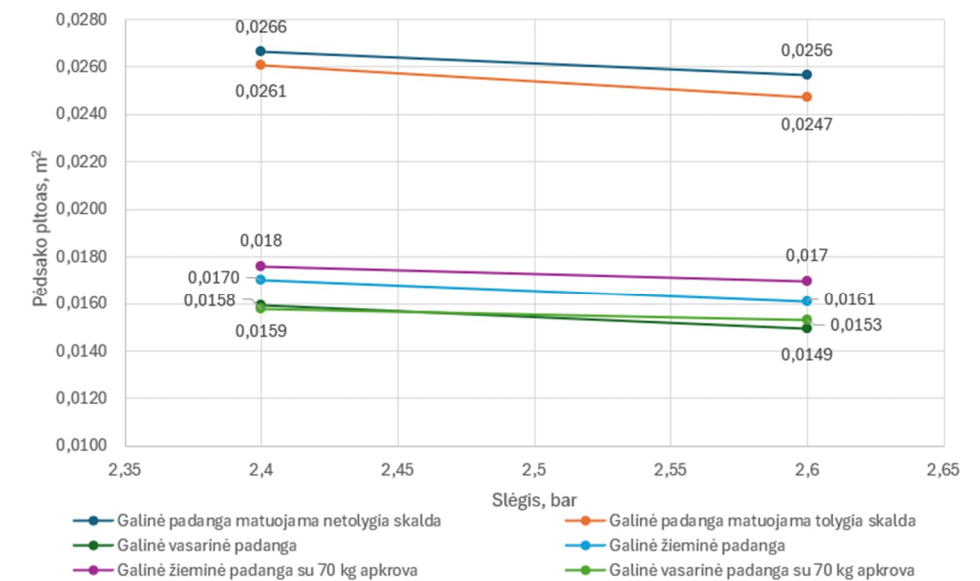
Taigi atlikus padangų slėgio ir oro temperatūros priklausomybės nuo nuvažiuojamo atstumo tyrimą eksploatacinėmis sąlygomis, bei ištyrus slėgio įtaką padangos kontakto plotui, gauti rezultatai apibendrinami ir apjungiami.

Pirmuoju tyrimu, kasdienių kelionių metu, buvo fiksuojamos padangų oro temperatūros bei slėgio vertės kelionės pradžioje, bei pabaigoje. Gauti duomenys parodė, kad dažniausiai tyrimo metu buvo įveikiamas atstumas mažesnis nei 25 km, kas buvo priimta kaip važiavimas miesto sąlygomis. Transporto priemonei nors ir skirtingais metų laikais įveikus 11 kilometrų atstumą, dažniausiai fiksuotos padangų slėgio pokyčio vertės buvo 0,1 bar ir 0,2 bar. Todėl norint įvertinti kokią įtaką gali padaryti toks slėgio padidėjimas padangose atsižvelgiame į kontakto ploto tyrimą. Jo metu standartinė eksploatacinė padangų slėgio vertė laikyta 2,4 bar, todėl ji yra atskaitos taškas visiems palyginimams. Padangos kontakto ploto tyrimai buvo atliekami 0,2 bar intervalu. Todėl ir šios analizės atveju priimsime slėgio pokyčio vertę lygią 0,2 bar. Įvertinant visuose tyrimuose gautus rezultatus vertės apibendrinamos grafiškai (64 pav.).



64 pav. Priekinės padangos ploto pokyčio grafikas

Kaip galima matyti iš grafike pateiktų verčių, kelionės metu padangos slėgio vertei pakylant 0,2 bar., kontakto plotas su kelio dangą mažėja visais atvejais. Tačiau svarbu įvertinti ir pokytį vykstantį galinės ašies padangose (65 pav.).



65 pav. Galinės padangos ploto pokyčio grafikas

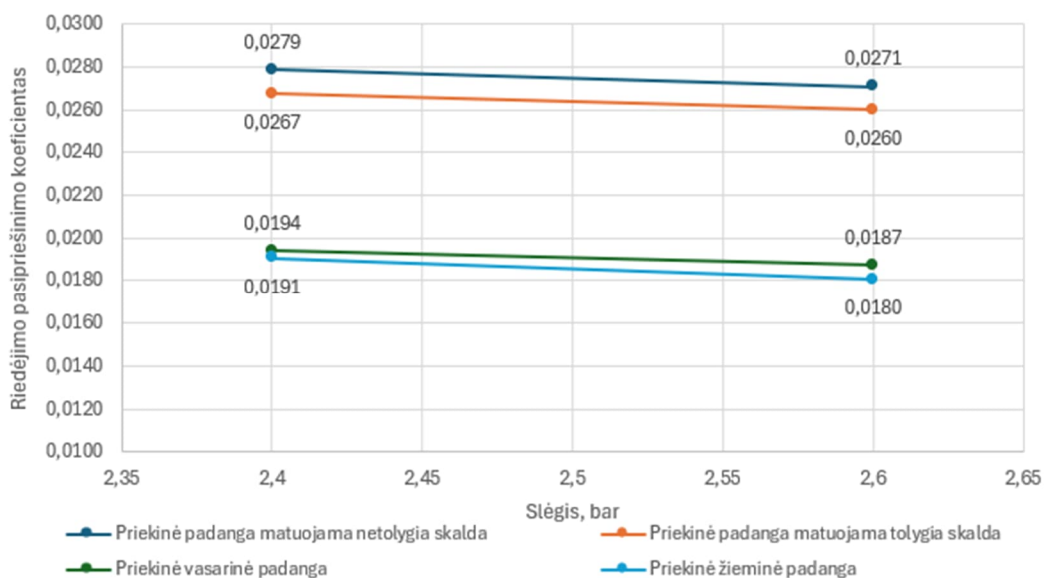
Taigi siekiant aiškiau pateikti slėgio pokyčių skirtumą, vertės surašomos į 30 lentelę.

30 lentelė. Ploto vertės pokyčiai kelionės metu

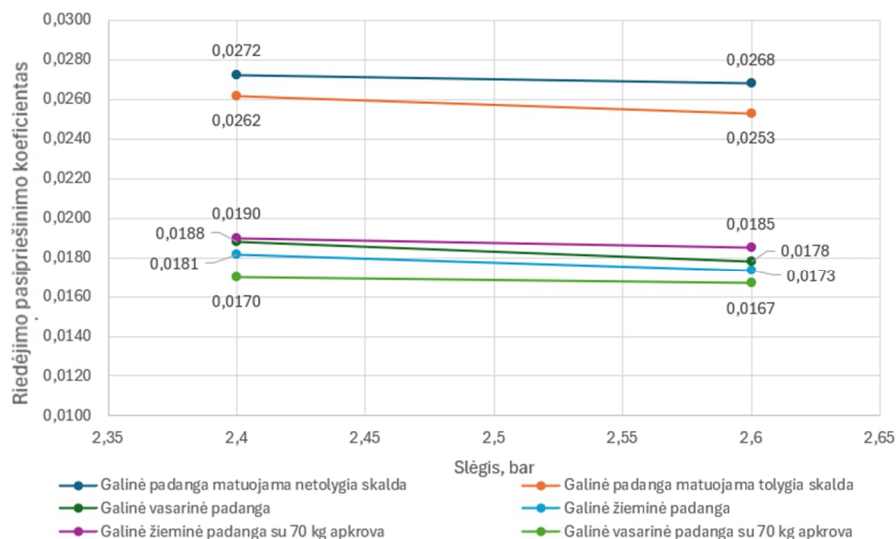
Ašis	Netolygi skalda	Tolygi skalda	Žieminė padanga	Vasarinė padanga	Žieminė padanga su apkrova	Vasarinė padanga su apkrova	Vidurkis
Priekinė (225/40)	-5,4%	-4,4%	-4,4%	-6,8%	-	-	-5,3%
Galinė (245/40)	-3,9%	-5,7%	-5,6%	-3,3%	-3,5%	-6,7%	-4,8%

Kaip galima matyti iš 30 lentelėje pateiktų rezultatų, vidutiniškai padangų slėgio vertėms pakilus 0,2 bar, kontakto plotas su kelio dangą sumažėja 5%. Didžiausias ploto sumažėjimas fiksuotas priekinės vasarinės padangos bandymo su kalkiniu popieriumi metu, čia pokytis buvo beveik 7%, labai panašiai kito plotas ir galinės ašies vasaros sezono padangą apkrovus papildomais 70 kg. Šio bandymo metu plotas sumažėjo 6,7%.

Toliau vertinama kaip toks slėgio pokytis padarė įtaką padangų riedėjimo pasipriešinimo koeficientams (66 ir 67 pav.).



66 pav. Priekinės padangos riedėjimo pasipriešinimo koeficiento kitimas



67 pav. Galinės padangos riedėjimo pasipriešinimo koeficiento kitimas

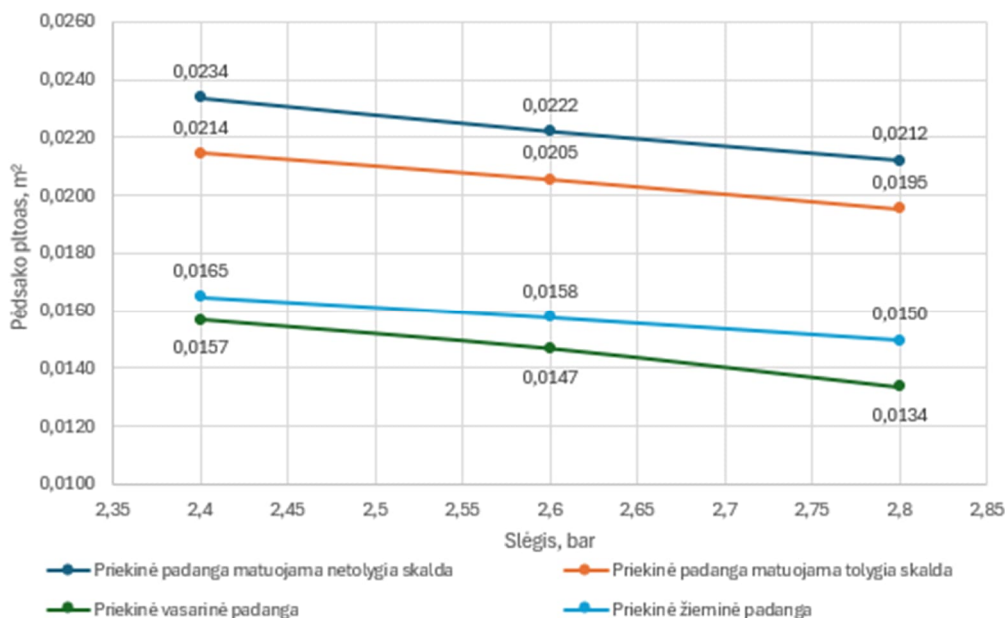
Kaip ir kontakto ploto pokyčio skaičiavimo atveju, rezultatų apibendrinimas pateikiamas 31 lentelėje.

31 lentelė. Riedėjimo pasipriešinimo koeficiento kitimo grafiko analizė

Ašis	Netolygi skalda	Tolygi skalda	Žieminė padanga	Vasarinė padanga	Žieminė padanga su apkrova	Vasarinė padanga su apkrova	Vidurkis
Priekinė (225/40)	-2,9%	-2,7%	-6,1%	-3,7%	-	-	-3,9%
Galinė (245/40)	-1,5%	-3,6%	-5,6%	-4,6%	-2,7%	-1,8%	-3,3%

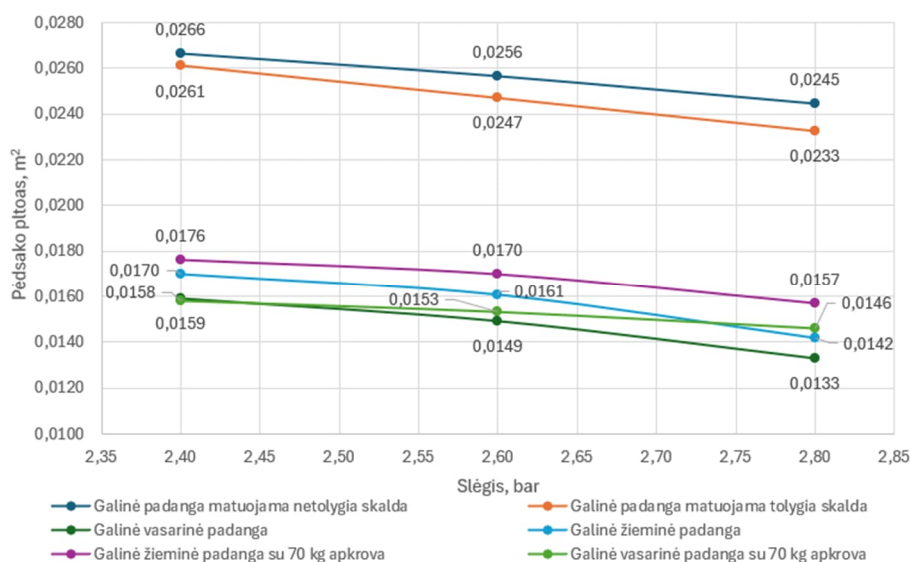
Gauti rezultatai rodo, kad padangos riedėjimo pasipriešinimo koeficiento reikšmės kinta panašiomis vertėmis kaip ir kontakto plotas. Lyginant šiuos verčių pokyčius galima pastebėti jog matavimuose naudojant skaldą, padangos riedėjimo pasipriešinimo vertė pakito dvigubai mažiau nei išmatuotas kontakto plotas.

Taigi aprašyti rezultatai buvo dažniausiai pasikartojantys kelionėse kurių atstumas siekė beveik 11 km. Tačiau dažnai nuvažiuojamas atstumas automobiliu yra didesnis. Tai lemia ir didesnius slėgio pokyčius padangose. Pagal pateiktą grafiką (41 pav.) galima matyti jog ilgiausios kelionės atliktos fiksuojant duomenis metu, nuvažiavus 68 km atstumą, padangų slėgio vertė vidutiniškai abejose ašyse pakito 0,35 bar. Todėl palyginimui slėgio ir kontakto ploto pokyčio, naudojama vertė kai slėgis kito nuo standartinio 2,4 bar iki 2,8 bar. Tokio pokyčio įtaka padangų kontakto plotui atvaizduota 68 ir 69 paveiksluose.



68 pav. Kontakto ploto priklausomybė nuo slėgio

Taip pat įvertinama ir galinės padangos kontakto ploto pokytis dėl padidėjusio slėgio padangoje (69 pav.).



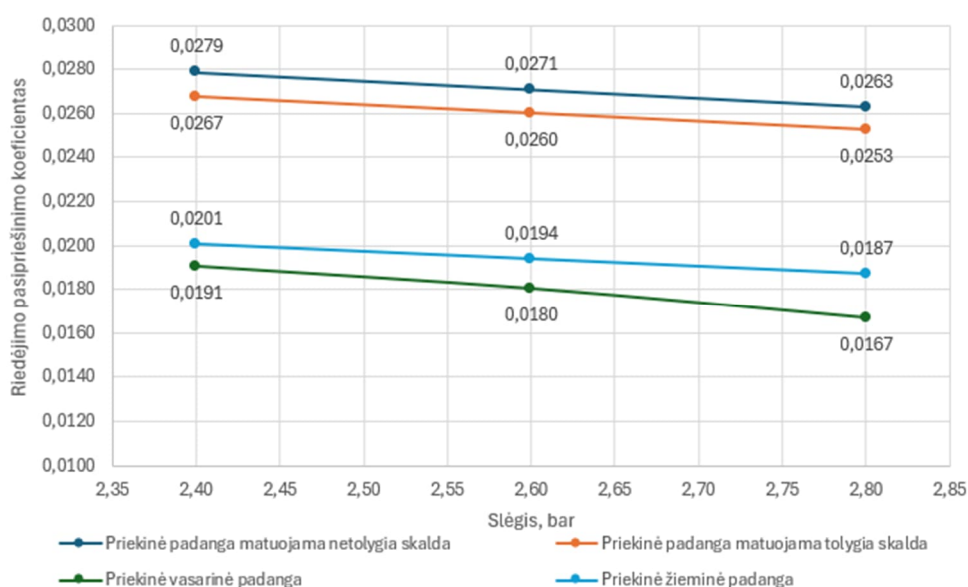
69 pav. Galinės padangos kontakto ploto kitimas nuo slėgio

Kaip ir pirmos kelionės analizės atveju rezultatų skirtumai pateikiami 32 lentelėje.

32 lentelė. Kontakto ploto vertės pokyčiai kelionės metu

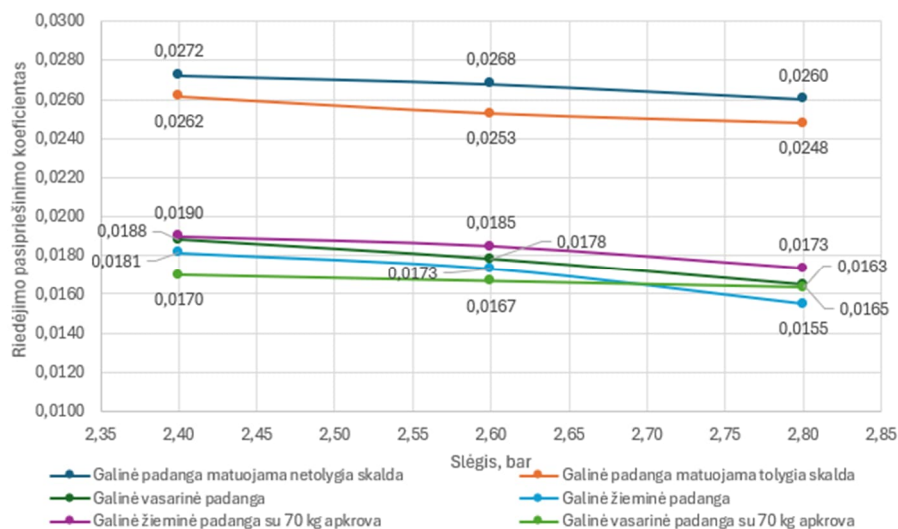
Ašis	Netolygi skalda	Tolygi skalda	Žieminė padanga	Vasarinė padanga	Žieminė padanga su apkrova	Vasarinė padanga su apkrova	Vidurkis
Priekinė (225/40)	-10,4%	-9,7%	-10%	-17%	-	-	-11,8%
Galinė (245/40)	-8,6%	-12%	-19,7%	-18,8%	-12,1%	-8,9%	-13,5%

Kaip galima matyti pagal gautus bandymo rezultatus 0,4 bar slėgio prieaguis padangose lėmė, jog žiemos sezono metu skirtos eksploatuoti padangos kontakto plotas matuojant kalkiniu popieriumi išaugo beveik 20%. Matavimuose, kuriuose rezultatų fiksavimui buvo naudojama skalda, gauti kontakto ploto verčių pokyčiai ne tokie žymūs. Vertinamas riedėjimo pasipriešinimo koeficientas (70 pav.).



70 pav. Priekinės padangos riedėjimo pasipriešinimo koeficiento kitimas

Įvertinama ir galinė automobilio ašis (71 pav):



71 pav. Galinės padangos riedėjimo pasipriešinimo kitimas

Riedėjimo pasipriešinimo koeficiento pokyčiai aprašomi 33 lentelėje.

33 lentelė. Riedėjimo pasipriešinimo lentelė

Ašis	Netolygi skalda	Tolygi skalda	Žieminė padanga	Vasarinė padanga	Žieminė padanga su apkrova	Vasarinė padanga su apkrova	Vidurkis
Priekinė (225/40)	-6,1%	-5,5%	-7,5%	-14,4%	-	-	-8,4%
Galinė (245/40)	-4,6%	-5,6%	-16,7%	-15,3%	-9,8%	-3,0%	-6,9%

Taigi iš rezultatų analizės galima matyti jog didžiausias riedėjimo pasipriešinimo augimas fiksuotas žieminės padangos atveju, matuojant kalkiniu popieriumi. Šio važiavimo metu per 68 km įveiktą atstumą padangos kontakto plotas, vertinant skirtingų matavimo būdų vidurkiu, sumažėjo beveik 12% priekinėje ašyje ir 13,5% galinėje ašyje. Vertinant riedėjimo pasipriešinimo koeficiento pokytį kelionės metu, didžiausias fiksuotas reikšmės sumažėjimas vasaros sezono padangos, kuris siekė 14,4%. Vidurkis visų bandymų skirtingai nei kontakto ploto atveju, čia labiau sumažėjo priekinės ašies padangos reikšmės.

Išvados

1. Atlikta literatūros analizė padangų gamybos proceso tematika leido geriau suprasti tiriamo objekto sandarą bei sudedamųjų dalių galimą įtaką tyrimo rezultatams. Nustatytos priežastys lemiančios eksploatacijos metu susidarantių padangų slėgio vertės pokyčius.
2. Išanalizavus kitus, jau publikuotus tyrimus susijusiomis tematikomis nustatyta, kad skirtingos padangų slėgio vertės transporto priemonės eksploatacijos metu gali daryti įtaką grupei įvairių veiksnių, tokių kaip: degalų sąnaudos, triukšmo lygis, padangų dėvėjimasis. Verta paminėti, kad dalis analizuotų panašios tematikos tyrimų buvo atliekami remiantis kompiuterinio modelio simuliacija, o ne realiomis eksploatacinėmis sąlygomis, todėl ir gauti rezultatai vertinami kaip preliminarūs.
3. Gauti padangų slėgio ir oro temperatūros pokyčio eksploatacijos metu bandymo rezultatai parodė, jog trumpo nuotolio kelionėse dažniausiai pasitaikanti slėgio pokyčio vertė yra 0,1 bar, o oro temperatūros pokytis 4 °C. Transporto priemonei važiuojant ilgesnius atstumus šios vertės fiksuotos 0,4 bar bei 14 °C. Bendra apskaičiuota šių kintamųjų koreliacijos koeficiento reikšmė 0,639. Tai rodo vidutinio stiprumo ryšį tarp šių kintamųjų, kas reiškia jog didėjant vienai iš reikšmių, kitas kintamasis taip pat turi tendenciją augti.
4. Padangų kontakto ploto tyrimai parodė slėgio pokyčio įtaką padangos riedėjimo pasipriešinimo koeficientui. Atlikus kontakto ploto matavimus nustatyta, kad padangos slėgio vertei pakilus 0,4 bar, priekinės padangos kontakto plotas sumažėjo 13,2-21,9%, galinės ašies 10,1-20,1% priklausomai nuo naudoto matavimo metodo. Vidutiniai verčių sumažėjimai 15,9% priekinėje ašyje, bei 15,8% galinėje ašyje. Padangų slėgį sumažinus per pusę, iki 1,2 bar, nustatytas kontakto ploto verčių augimas nuo 33,8% iki 42,9% priekinėje ašyje, bei nuo 23,6% iki 40,1% galinėje ašyje priklausomai nuo pasirinkto matavimo metodo. Vidutinis kontakto ploto vertės augimas priekinėje ašyje 37,7%, galinėje ašyje 32,4%.
5. Tyrimo metu pasinaudojant išmatuotomis padangos kontakto ploto vertėmis apskaičiuotos riedėjimo pasipriešinimo koeficiento reikšmės. Padangos slėgio vertę padidinus 0,4 bar, riedėjimo pasipriešinimo koeficientas priekinės ašies padangoms sumažėdavo tarp 5,5% ir 12,4%, tuo tarpu galinės ašies padangoms kitimas vyko tarp 4,5% ir 14,6%. Vidutinis sumažėjimas priekinėje ašyje 7,6%, galinėje ašyje 9,2%. Tuo tarpu slėgio vertę sumažinus per pusę iki 1,2 bar, riedėjimo pasipriešinimo koeficiento reikšmės priekinėje ašyje padidėjo intervale tarp 16,4% ir 37,2%, galinės ašies atveju fiksuotas intervalas tarp 15,9% ir 29,3%. Taigi vidutinis riedėjimo pasipriešinimo koeficiento vertės padidėjimas priekinės ašies padangoms fiksuotas 24,95%, galinės ašies 23,3%.
6. Įvertinus visais skirtingais tyrimais gautus rezultatus, galima teigti, jog trumpos kelionės metu priekinės padangos pėdsakas sumažėja 5,3%, o galinės ašies 4,8%. Riedėjimo pasipriešinimo vertė priekinėje ašyje sumažėjo 3,9%, galinėje ašyje 3,3%. Ilgesnių kelionių metu padangos kontakto su keliu plotas sumažėjo 11,8% priekinės ašies padangoje, 13,5% sumažėjimas fiksuotas galinėje ašyje. Riedėjimo pasipriešinimo pokyčiai siekė 8,4% priekinės padangos bei 6,9% galinės.

Informacijos šaltinių sąrašas

1. National Inventors Hall of Fame: John Boyd Dunlop. Svetainė. Prieiga per internetą: https://www.invent.org/inductees/john-boyd-dunlop?utm_source=chatgpt.com [žiūrėta 2024-11-30]
2. ARAVIND M.; AJITH, J.; TAMILARASU A.; BHASKER, P. ir KRISHNAIAH R. Design and analysis of non-pneumatic tyre. Prieiga per internetą: IOP Science: <https://doi.org/10.1088/1757-899X/263/6/062061> [žiūrėta: 2024-11-30].
3. PIOTROWSKA K., PIASECKA, I. B. W. P.; KRUSZELNICKA W. ir TOMPOROWSKI A. LCA as a tool for the environmental management of car time manufacturing. Prieiga per internetą: <https://doi.org/10.3390/app10207015> [žiūrėta 2026-01-10]
4. Continental: Tire components. An inside look at the components that make up modern car tires. Prieiga internete: <https://www.continental-tires.com/products/b2c/tire-knowledge/tire-mixture/> [žiūrėta: 2024-11-30]
5. Continental: Tire Manufacturing. Prieiga internete: <https://www.continental-tires.com/about-us/our-company/manufacturing/> [žiūrėta: 2024-11-30].
6. SANG WOOK L., KYOUNG MOON J., KEE WOON K. ir JANG HYEON K. Prieiga internete: Scientific Research: <https://doi.org/10.4236/wjet.2018.64051> [žiūrėta: 2024-11-31]
7. JOVANOVIC M., ZUPAN S., PREBIL I. Holonic control approach for the „green“ – tyre manufacturing system using IEC 61499 standard. Prieiga internete: <https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2016.06.008> [žiūrėta: 2024-12-03]
8. TAMBORSKI M., ROJEK I. ir MIKOLAJEWSKI D. Revolutionizing tire quality control: AI's impact on research, development and real life applications. Prieiga internete: https://doi.org/10.3390/app13148406?urlappend=%3Futm_source%3Dresearchgate.net%26utm_medium%3Darticle [žiūrėta 2026-01-10].
9. BARBOSA B.; PEREIRA T. M.; SILVA F.J.G. ir CAMPILHO G. straipsnyje „Solving quality problems tyre production preparation process: a practical approach“ Prieiga internete: <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2017.07.250> [žiūrėta: 2024-12-03]
10. Bridgestone: tyre size calculator. Prieiga internete: <https://www.bridgestone.co.nz/tyres/learn/understanding-tyre-sizes> [žiūrėta: 2024-12-03]
11. Pirelli: Tyre load chart. Prieiga internete: [Tyre Load Index & Chart | Pirelli](#) [žiūrėta 2024-12-07]
12. MENG D.; PENGFEI S.; SHUITING Z.; HONGWU H. ir JIE Z.. A Study on the Influence of Tire Speed and Pressure on Measurement Parameters Obtained from High-Speed Tire Uniformity Testing. Prieiga internete: MDPI: https://doi.org/10.3390/vehicles2030031?urlappend=%3Futm_source%3Dresearchgate.net%26utm_medium%3Darticle [žiūrėta 2026-01-11].
13. Padangų vienodumo tyrimo mašina. Prieiga internete: <https://www.tmsi-usa.com/54.html> [žiūrėta: 2024-12-07].
14. TPMS jutikliai ir jų veikimo principas. Prieiga internete: <https://www.germaincars.com/what-is-a-tpms-sensor/>
15. Nuotrauka. Prieiga internete: customwheelsexpress.com/17-43042-smart-sensor-one-dual-frequency-bolt-in-tpms-sensor-p-5064.html

16. SHIMMING Y., JIANBIN T., HONG Q., CHENGRONG C. Wireless communication based tire pressure monitoring system. *Wireless Communications, Networking and Mobile Computing*. p. 2511 – 2514.
17. MICLAUS A., JANO R., CHINDRIS G. (2016). Implementation of car model for indirect tire pressure monitoring system. *Electronics Technology*. 39, p. 316–321.
18. GVOZDAS V., NAGURNAS S., ŽURAILIS V., SURBLYS V.. Lengvųjų automobilių padangų slėgio kontrolės sistemų tyrimas. Prieiga internete: https://www.lvb.lt/permalink/370LABT_NETWORK/5bfng8/alma9917313412208451 [žiūrėta: 2026-01-12]
19. BINWEN H. Design of Direct-Type Tire-Pressure Monitoring System Based on SP37 Sensor. Prieiga internete: [\(PDF\) Design of Direct-Type Tire-Pressure Monitoring System Based on SP37 Sensor](#) [žiūrėta: 2026-01-12].
20. KALVAITIENĖ R. Apklausa: koku būdu darbuotojai vyksta į darbą?. Prieiga internete: <https://www.apiedarba.lt/koku-budu-darbuotojai-vyksta-i-darba/> [žiūrėta: 2024-10-18]
21. CABAN J., DROZDIEL P., BARTA D., LIŠČAK Š.. Vehicle tire pressure monitoring systems. Prieiga internete: [\(PDF\) Vehicle tire pressure monitoring systems](#) [žiūrėta: 2024-11-05].
22. NAIDIČ E., BRAŽIŪNAS J.. Žūčių Lietuvos keliuose dinamika ir priežastys. Prieiga internete: <https://doi.org/10.3846/mla.2023.19201> [žiūrėta: 2026-03-02].
23. HAMED M., TESFA B., ALIWAN M., LI G., GU F. ir kiti. The Influence of Vehicle Tyres Pressure on the Suspension System Response by Applying the Time-Frequency Approach. Prieiga internete: [\(PDF\) The influence of vehicle tyres pressure on the suspension system response by applying the time-frequency approach](#) [žiūrėta: 2026-03-01].
24. ELOUADRHIRI I., EL BARKANY A., RAMADANY M. ir EL QUADRHIRI A.. AI-Driven Predictive Maintenance for Intelligent Tires: A Real-Time Digital Twin Framework. Prieiga internete: <https://doi.org/10.1051/mateconf/202541503005> [žiūrėta: 2025-03-04].
25. PAINE M., GRIFFITHS M. ir MAGEDARA N. The Role of Tyre Pressure in Vehicle Safety Injury and Environment. Prieiga internete: <https://media.nrspp.org.au/wp-content/uploads/2017/07/06021319/The-Role-Of-Tyre-Pressure-In-Vehicle-Safety-Injury-And-Environment.pdf> [žiūrėta: 2026-03-02]
26. RUŽINSKAS A., GAUTERIN M. G. F., WIESE K., BOGDEVIČIUS M.. Experimental investigation of tire performance on slush. 2021;23(1):103-109. Prieiga internete: [10.17531/ein.2021.1.11](https://doi.org/10.17531/ein.2021.1.11). [žiūrėta: 2026-03-02].
27. Simple Tire: How to understand tire wear ratings. Prieiga internete: [How to Understand Tire Wear Ratings | SimpleTire](#) [žiūrėta: 2024-11-05].
28. National Highway traffic safety administration. The Pneumatic Tire. 2006. Prieiga internete: https://www.safetyresearch.net/Library/NHTSA_Pneu_Tire.pdf [žiūrėta: 2026-04-11].
29. SUYABODHA A. A Relationship between Tyre Pressure and Rolling resistance Force under Different Vehicle Speed. Prieiga internete: <https://doi.org/10.1051/mateconf/201710812004> [žiūrėta: 2026-04-22].
30. UGURU-OKORIE C. D. The role of tire in car crash, its causes and prevention. Prieiga internete: [The Role Of Tire In Car Crash, Its Causes, And Prevention - Landmark University Repository](#) [žiūrėta: 2026-03-04].
31. KARPENKO M., PRENTKOVSKIS M. ir SKAČKAUSKAS P. Comparison Analysis Between Pneumatic and Airless Tires by Computational Modelling for Avoiding Road Traffic Accidents.

- 22nd International Multidisciplinary Conference on Reliability and Statistics in Transportation and Communication, RelStat 2022, Lecture Notes in Networks and Systems. 2023;640:295-305. Prieiga internete: [10.1007/978-3-031-26655-3_28](https://doi.org/10.1007/978-3-031-26655-3_28). [žiūrėta: 2026-03-04].
32. SZABO M., MAJDAN R., TKAC Z., CAPORA R., H. LUBOMIR. Evaluation of fuel consumption in road freight transport. Prieiga internete: <https://doi.org/10.2478/ATA-2013-0005> [žiūrėta: 2026-01-18].
33. ECKERT J., SANTICIOLLI F., SANTOS COSTA E., ROSA MEREGE M., DEDINI G F. Influence of the tires pressure in the vehicle fuel consumption. [žiūrėta: 2026-01-18]. [interaktyvus]. Prieiga internete: (PDF) [INFLUENCE OF THE TIRES PRESSURE IN THE VEHICLE FUEL CONSUMPTION](#)
34. JAZAR, N. Reza. Vehicle Dynamics. Theory and Application. Springer Science+Business Media 2008. Prieiga internete: [epdf.pub_vehicle-dynamics-theory-and-application.pdf](https://www.pdf.pub/vehicle-dynamics-theory-and-application.pdf) [žiūrėta: 2026-03-05].
35. RIEVAJ V., VRABEL J., HUDAK A.. Tire Inflation Pressure Influence on a Vehicle Stopping Distances. International Journal of Traffic and Transportation Engineering, Vol. 2 No. 2, 2013, pp. 9-13. Prieiga internete: <https://doi.org/10.5923/J.IJTTE.20130202.01> [žiūrėta: 2026-03-05].
36. WONG J. Y. Theory of ground vehicles. Prieiga internete: <https://doi.org/10.1002/9781119719984.ch1> [žiūrėta: 2026-03-05].
37. AL-SOLIHAT M. K., RAKHEJA S., AHMER W. K. Influence of tyre pressure on an urban bus transient and steady state handling performance. Prieiga internete: <https://doi.org/10.1243/09544070JAUTO1402> [žiūrėta: 2026-03-05].
38. GILLESPIE T. D., 1992. Fundamentals of vehicle dynamics. Prieiga internete: <https://doi.org/10.4271/R-114> [žiūrėta: 2026-03-05].
39. GENTA G. Motor vehicle dynamics: modeling and simulation, Vol. 43. World Scientific.K
40. TOMARAE P., MARDANI A., MOHEBBI A., TAGHAVIFAR H. Relationships among the contact patch length and width, the tire deflection and the rolling resistance of a free-running wheel in a soil bin facility. Prieiga internete: <https://doi.org/10.5424/sjar/2015132-5245> [žiūrėta: 2026-05-10].
41. GRONOWICZ J. 2004 Environmental protection in land transport, Publisher of the Institute of Sustainable Technologies, Radom.
42. GORZELANCYK P., WLAD P., JURKOVIČ M., KALINA T.. Influence of tire pressure on noise road. Prieiga internete: <https://doi.org/10.2478/ttt-2021-0001> [žiūrėta: 2026-03-09]
43. BURDZIK R. 2012. Tire noise tests. Scientific issues of the Silesian University of Technology. Series Transport 77/1878. Prieiga internete: [10.2478/ttt-2021-0001](https://doi.org/10.2478/ttt-2021-0001). [žiūrėta: 2026-03-09].
44. Iliustracija: https://nairomarket.co.ke/products/motorcycle-tpms-2-sensors-bluetooth-4-0-5-0-tire-pressure-monitoring-system-pit-bike-tyre-tester-diagnostic-set-moto-accessories?srsltid=AfmBOorBn1kGciLN1p77iTSJcpS9QNngl_unM5I92baj2rzgwgALUZPq [žiūrėta: 2026-03-09].
45. Iliustracija https://www.jsm.lt/929687-automobiline-elektrine-pompa-ir-irankiu-komplektas-dekle.html?srsltid=AfmBOoq-VqyQ0OyvNLU0ry4XQS_5qfYpP57TFt07A5YHh59J-2YXuapv [žiūrėta: 2026-03-09].
46. BMW F30 modelio masė. Prieiga internete: https://www.autozine.org/Archive/BMW/old/3er_F30.html#:~:text=As%20before%2C%20the%20front%20suspensions,harsh%20on%20less%20perfect%20roads. [žiūrėta: 2026-03-10]

47. Padangos parametrų skaičiavimas. Prieiga internete: [How to calculate wheel radius – x-engineer.org](http://www.x-engineer.org) [žiūrėta: 2026-04-10].
48. Spanjaards M. M. A., PETERS G.W. M., HULSEN M. A., ANDERSON P. D., Towards the Development of a Strategy to Characterize and Model the Rheological Behavior of Filled, Uncured Rubber Compounds. Prieiga internete: <https://doi.org/10.3390/polym13234068> [žiūrėta: 2026-04-10].
49. GONG Z., MIAO Y., LANTIERI C. Review of Reseach on Tire-Pavement Contact Behavior. Prieiga internete: <https://doi.org/10.3390/coatings14020157> [žiūrėta: 2026-04-26].
50. Žmogaus kūno masės indeksas. Prieiga internete: [Kūno masės indeksas - Oficialiosios statistikos portalas](http://www.stat.gov.lt) [žiūrėta: 2026-04-22].
51. ŚWIECZKO-ŻUREK, B., RONOWSKI, G., EJSMONT, J. Tyre rolling resistance and its influence on fuel consumption. Combustion Engines. Prieiga internete: <https://doi.org/10.19206/CE-2017-110> [žiūrėta: 2026-04-23].
52. Padangos riedėjimo pasipriešinimas. Prieiga internete: <https://www.michelin.com.ph/auto/advice/tire-basics/rolling-resistance> [žiūrėta: 2026-04-24].