



Kauno technologijos universitetas

Panevėžio technologijų ir verslo fakultetas

Automobilio išorinių elementų geometrijos įtakos automobilio aerodinaminėms savybėms tyrimas

Baigiamasis magistro projektas

Valentinas Breivė

Projekto autorius

lekt. dr. Dainius Vaičiulis

Vadovas

Panevėžys, 2022



Kauno technologijos universitetas

Panevėžio technologijų ir verslo fakultetas

Automobilio išorinių elementų geometrijos įtakos automobilio aerodinaminėms savybėms tyrimas

Baigiamasis magistro projektas

Transporto priemonių inžinerija (6211EX021)

Valentinas Breivė

Projekto autorius

lekt. dr. Dainius Vaičiulis

Vadovas

Recenzentas / Recenzentė

Panevėžys, 2022



Kauno technologijos universitetas

Panevėžio technologijų ir verslo fakultetas

Valentinas Breivė

Automobilio išorinių elementų geometrijos įtakos automobilio aerodinaminėms savybėms 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.

Valentinas Breivė

Patvirtinta elektroniniu būdu



Kauno technologijos universitetas
Panevėžio technologijų ir verslo fakultetas

TVIRTINU
TVKC vadovė
Doc. dr. Nida Kvedaraitė

Baigiamojo magistro projekto užduotis

Diplomantui Valentinui Breivei

Baigiamojo projekto tema

lietuvių kalba: *AUTOMOBILIO IŠORINIŲ ELEMENTŲ GEOMETRIJOS ĮTAKOS AUTOMOBILIO AERODINAMINĖMS SAVYBĖMS TYRIMAS*

anglų kalba: *INVESTIGATION OF THE INFLUENCE OF VEHICLE OUTER ELEMENTS GEOMETRY ON VEHICLE AERODYNAMIC PROPERTIES*

Patvirtinta 2022 m. balandžio 11 d. dekanato potvarkiu Nr. V25-13-10

Parengto baigiamojo projekto įkėlimo į Moodle aplinką terminas iki 2022 m. birželio 1 d.

Duomenys, reikalavimai ir sąlygos baigiamajam projektui

Ištirti bent keturių pasirinkto automobilio išorinių elementų pavidalo įtaką automobilio aerodinaminėms savybėms. Tyrimą atlikti bent prie penkių skirtingų važiavimo greičių. Skaičiavimams naudoti CFD (skaičiuojamuosius srautų dinamikos metodus). Baigiamasis magistro projektas turi atitikti KTU Panevėžio technologijų ir verslo fakulteto baigiamųjų projektų apipavidalinimo reikalavimus.

Baigiamojo projekto užduotys / uždaviniai, kurie turi būti atskleisti projekte

- 1. Išnagrinėti Lietuvos ir užsienio mokslininkų darbus/tyrimus, kuriuose tiriama automobilių išorinių elementų ir jų pavidalo įtaka aerodinamikai.*
- 2. Ištirti ir pateikti kokią įtaką automobilio aerodinaminiams pasipriešinimo ir kėlimo-prispaudimo rodikliams turi važiavimo greitis ir išorinių automobilio elementų posvyrio kampai.*

Vadovas lekt. dr. Dainius Vaičiulis

(vadovo pareigos, vardas, pavardė, parašas)

Užduotį gavau Valentinas Breivė

(studento vardas, pavardė, parašas)

2022 m. balandžio 21 d.

Brevė Valentinas. Automobilio išorinių elementų geometrijos įtakos automobilio aerodinaminėms savybėms tyrimas. Magistro baigiamasis projektas / lekt. dr. Dainius Vaičiulis; Kauno technologijos universitetas, Panevėžio technologijų ir verslo fakultetas.

Studijų kryptis ir sritis (studijų kryptių grupė): transporto priemonių inžinerija, technologijos mokslai.

Reikšminiai žodžiai: aerodinamika, kėlimo koeficientas, prispaudimo koeficientas, tesla cybertruck.

Panevėžys, 2022. 68 p.

Santrauka

Automobilių aerodinamikoje didžiausias dėmesys kreipiamas į pasipriešinimo ir kėlimo jėgas, kurias sukelia oras, tekantis aplink kietus kūnus. Aerodinamiška transporto priemonė turi mažesnę oro pasipriešinimą, tad sunaudojus tą patį kuro (energijos) kiekį nuvažiuojamas atstumas yra didesnis.

Šiame baigiamajame darbe tiriama automobilio išorinių elementų ir jų pavidalų daroma įtaka automobilio aerodinaminėms savybėms. Prieš tyrimą buvo atlikta mokslinės literatūros apžvalga, kurioje nagrinėjama: oro slėgių apie automobilius pasiskirstymai; automobilio judėjimo pasipriešinimo jėgos ir koeficientai, bei automobilio kėlimo jėgos priklausomybės nuo komponentų, apžvalga. Tyrime naudotas 3D „Tesla Cybertruck“ modelis. Minėtas modelis modifikuotas: visi išoriniai paviršiai yra plokšti, briaunos aštrios – be užapvalinimo spindulių. Panaudojus kompiuterinę srautų dinamiką ištirtas gamyklinis ir modifikuotas automobilio modeliai. Buvo keičiami automobilio išorinių elementų posvyrio kampai. Visas tyrimas atliekamas esant skirtingam oro tekės greičiui ir skirtingoms aplinkos sąlygoms.

Tyrimai atlikti pasinaudojant „Solidworks Flow Simulation“ paketu, kurio terpėje sudarytas virtualus vėjo tunelis. Atlikti tyrimai prie 7 skirtingų oro tekės greičių nuo 10 m/s iki 50 m/s. Buvo tirta kaip aerodinaminės „Tesla Cybertruck“ savybės priklauso nuo priekinio stiklo, galinio stiklo, priekinės lempos ir grotelių kampų kitimo. Atlikus tyrimus nustatyta, kad modelyje, kuriame vertinamas kelias, automobilis yra spaudžiamas prie važiuojamosios dangos, o modelyje su „pakabintu“ ore automobiliu – automobilis keliamas. Geriausios (mažiausios) pasipriešinimo koeficiento vertės, kai vertinama kelio įtaka, gaunamos važiuojant 40-45 m/s greičiu. Keičiant priekinio stiklo posvyrio kampą, kai vertinama kelio įtaka, pasipriešinimo koeficientas kinta (sumažėja) 6,2 %, o prispaudimo-kėlimo koeficientas padidėja 178 %, kai vertinama kelio įtaka. Ištyrus „Tesla Cybertruck“ galinio stiklo posvyrio kampo įtaką aerodinaminėms savybėms, pastebėta, kad modelyje, kuriame vertinamas kelias pasipriešinimo koeficientas sumažėja 6 %, o prispaudimo-kėlimo koeficientas padidėja 124,7 %, lyginant su modeliu, kuriame automobilis „kabo“ ore. Gauti analogiški tyrimo rezultatai, kai keičiamas priekinės lempos posvyrio kampas: pasipriešinimo koeficientas sumažėja 6 %, o prispaudimo-kėlimo koeficientas – 152,7 %. Ištyrus grotelių posvyrio kampą, gaunama, kad įvertinus kelio įtaką, pasipriešinimo koeficienta sumažėjo 9 %, o prispaudimo-kėlimo koeficientų skirtumas – 156,3 %.

Breivė, Valentinas. Investigation of the influence of vehicle outer elements geometry on vehicle aerodynamic properties. Master's Final Degree Project / supervisor doc. in Dainius Vaičiulis; Panevėžys Faculty of Technologies and Business, Kaunas University of Technology.

Study field and area (study field group): Transport Engineering, Technology Sciences.

Keywords: aerodynamics, drag force, lift force, tesla cybertruck.

Panevėžys, 2022. 68 pages.

Summary

In automotive aerodynamics, the main attention is paid to the forces of resistance and lifting caused by the air flowing around solid bodies. An aerodynamic vehicle has less air resistance, so when you use the same amount of fuel (energy), the distance travelled is greater.

This final thesis examines the influence of the external elements of the car and their forms on the aerodynamic characteristics of the car. Before the study, a review of the scientific literature was carried out, which examines: distributions of air pressures about cars; an overview of the resistance forces and coefficients of the movement of the car, as well as the dependence of the lifting force of the car on the components. The study used a 3D model of the Tesla Cybertruck. The above model has been modified: all external surfaces are flat, the edges are sharp - without rounding rays. Using the computer dynamics of the streams, factory and modified models of the car were studied. The angles of inclination of the external elements of the car were changed. The entire study is carried out at different air flow rates and different environmental conditions.

The research was carried out using the Solidworks Flow Simulation package, which consists of a virtual wind tunnel in the medium. Studies were carried out at 7 different air flow speeds from 10 m/s to 50 m/s. It has been studied how the aerodynamic properties of the Tesla Cybertruck depend on the variation of the windshield, rear glass, front lamp and lattice corners. Studies have shown that in a model that assesses the road, the car is pressed against the pavement, and in a model with a car "suspended" in the air, the car is lifted. The best (minimum) resistance coefficient values when assessing the influence of the road are obtained at speeds of 40-45 m/s. When changing the angle of inclination of the windscreen when assessing the influence of the road, the resistance coefficient varies (decreases) by 6,2 %, and the clamp-lifting coefficient increases by 178 % when the influence of the road is assessed. After studying the influence of the tilt angle of the rear glass of the Tesla Cybertruck on aerodynamic characteristics, it was observed that in a model that evaluates several resistance coefficients, a decrease decreases by 6%, and the clamp-lifting coefficient increases by 124.7% compared to a model in which the car "hangs" in the air. Similar test results were obtained when the angle of inclination of the front lamp is changed: the resistance coefficient is reduced by 6 % and the clamping-lifting coefficient by 152,7 %. An examination of the angle of inclination of the lattice shows that the impact of the road has led to a decrease in the resistance coefficient by 9 % and the difference between the clamping-lifting coefficients by 156,3 %.

Turinys

Lentelių sąrašas	8
Paveikslų sąrašas	9
Santrumpų ir terminų sąrašas	13
Įvadas.....	14
1. Mokslinės literatūros, kurioje nagrinėjamos transporto priemonių aerodinaminės savybės, apžvalga	15
1.1. Automobilių aerodinaminiai rodikliai	15
1.2. Tyrimai, kuriuose naudojama kompiuterinės srautų dinamikos (CFD) analizė.....	17
1.2.1. Sumažinti modeliai.....	18
1.2.2. Realaus dydžio modeliai.....	19
1.2.3. Automobilio profilio tyrimas.....	20
1.2.4. Papildomi komponentai automobilio modelyje.....	20
1.2.5. Sportinio automobilio pasipriešinimo ir prispaudimo-kėlimo koeficientai.....	21
1.3. Tyrimai, kuriuose naudojamas vėjo tunelis.....	21
1.4. Tyrimo būdų palyginimas.....	22
2. Tiriamojo modelio aprašas	24
3. Tyrimo eiga	27
3.1. Automobilio be modifikacijų aerodinamiai koeficientai.....	28
3.2. Priekinio stiklo posvyrio kampo įtaka	30
3.3. Galinio stiklo posvyrio kampo įtaka.....	36
3.4. Priekinės lempos posvyrio kampo įtaka	41
3.5. Grotelių įtaka posvyrio kampo įtaka	47
Išvados	53
Literatūros sąrašas	54
Priedai.....	56
1 priedas. Automobilio be modifikacijų tyrimo rezultatai	56
2 priedas. Automobilio modifikavus groteles tyrimo rezultatai	56
3 priedas. Automobilio modifikavus priekinę lempą tyrimo rezultatai.....	59
4 priedas. Automobilio modifikavus priekinį stiklą rezultatai.....	61
5 priedas. Automobilio modifikavus galinę dalį tyrimo rezultatai.....	63
6 priedas. Pranešimas iš mokslinės studentų konferencijos	66

Lentelių sąrašas

1 lentelė. Kompiuterinės srautų dinamikos ir vėjo tunelio palyginimas [10, 13, 16-19, 24, 25]	22
2 lentelė. Automobilio tyrimo rezultatai be modifikacijų	56
3 lentelė. Automobilio „kabančio“ ore tyrimo rezultatai, kai modifikuotos grotelės.....	56
4 lentelė. Automobilio važiuojančio keliu tyrimo rezultatai, kai modifikuotos grotelės	57
5 lentelė. Automobilio „kabančio“ ore tyrimo rezultatai, kai modifikuota lempa	59
6 lentelė. Automobilio važiuojančio keliu tyrimo rezultatai, kai modifikuota lempa.....	60
7 lentelė. Automobilio „kabančio“ ore tyrimo rezultatai, kai modifikuotas priekinis stiklas	61
8 lentelė. Automobilio važiuojančio keliu tyrimo rezultatai, kai modifikuotas priekinis stiklas	62
9 lentelė. Automobilio „kabančio“ ore tyrimo rezultatai, kai modifikuota galinė dalis.....	63
10 lentelė. Automobilio važiuojančio keliu tyrimo rezultatai, kai modifikuota galinė dalis	64

Paveikslų sąrašas

1 pav. Slėgio ir trinties profilio paviršiuje schema [9].....	15
2 pav. Įvairių pavidalų pasipriešinimo koeficientai [9]	17
3 pav. Kompiuterinės srautų dinamikos seka [11].....	18
4 pav. Sumažinti Chevrolet Beat modeliai (dešinėje bazinis modelis, kairėje modelis su pridėta plokštele) [10].....	19
5 pav. Pasipriešinimo (dešinėje) ir prispaudimo (kairėje), keičiant spoilerio posvyrio kampą, rezultatai [16].....	20
6 pav. Modelis, pagamintas 3D spausdintuvu [20].....	22
7 pav. Tesla Cybertruck 3D modelio projekcijos ir pagrindiniai matmenys	24
8 pav. Tesla Cybertruck ploto nustatymui naudojamos projekcijos: a – projekcija iš priekio; b – projekcijos iš priekio pusė	24
9 pav. Skaičiuojamoji erdvė.....	25
10 pav. Modeliavimo erdvė: pilnas (kairėje) ir pusinis (dešinėje) modeliai.....	25
11 pav. Baigtinių elementų modelio tinklelis	26
12 pav. Oro srautų greičio pasiskirstymas apie automobilio centrinę pjūvį, kai važiavimo greitis yra 50 m/s ir vertinama kelio įtaka	27
13 pav. Perteklinio slėgio pasiskirstymas apie automobilio kontūro centrinę pjūvį, kai važiavimo greitis yra 50 m/s ir vertinama kelio įtaka	27
14 pav. Oro srautų greičio pasiskirstymas apie automobilio centrinę pjūvį, kai važiavimo greitis yra 50 m/s ir nevertinama kelio įtaka	28
15 pav. Perteklinio slėgio pasiskirstymas apie automobilio kontūro centrinę pjūvį, kai važiavimo greitis yra 50 m/s ir nevertinama kelio įtaka	28
16 pav. Pasipriešinimo C_D (a) ir prispaudimo-kėlimo C_L (b) koeficientų priklausomybė nuo važiavimo greičio, kai nevertinama kelio įtaka	29
17 pav. Pasipriešinimo C_D (a) ir prispaudimo-kėlimo C_L (b) koeficientų priklausomybė nuo važiavimo greičio, kai vertinama kelio įtaka.....	29
18 pav. Pasipriešinimo C_D (a) ir prispaudimo-kėlimo C_L (b) koeficientų palyginimas, kai: (→) – automobilis „pakabintas“ ore, (→) – automobilis važiuoja keliu	30
19 pav. Priekinio stiklo posvyrio kampas α_I	30
20 pav. Automobilio pasipriešinimo koeficiento C_D , nevertinant kelio įtakos, priklausomybė nuo važiavimo greičio, kai priekinio stiklo posvyrio kampas α_I yra: (→) 2°, (→) 4°, (→) 6°, (→) 8°, (→) 10°	31
21 pav. Automobilio pasipriešinimo koeficiento C_D , nevertinant kelio įtakos, priklausomybė nuo priekinio stiklo posvyrio kampo α_I , kai važiavimo greitis: (→) 10 m/s, (→) 15 m/s, (→) 20 m/s, (→) 30 m/s, (→) 40 m/s, (→) 45 m/s, (→) 50 m/s.....	31
22 pav. Automobilio prispaudimo-kėlimo koeficiento C_L , nevertinant kelio įtakos, priklausomybė nuo važiavimo greičio, kai priekinio stiklo posvyrio kampas α_I yra: (→) 2°, (→) 4°, (→) 6°, (→) 8°, (→) 10°.....	32
23 pav. Automobilio prispaudimo-kėlimo koeficiento C_L , nevertinant kelio įtakos, priklausomybė nuo posvyrio kampo α_I , kai važiavimo greitis: (→) 10 m/s, (→) 15 m/s, (→) 20 m/s, (→) 30 m/s, (→) 40 m/s, (→) 45 m/s,(→) 50 m/s.....	32
24 pav. Automobilio pasipriešinimo koeficiento C_D , įvertinant kelio įtaką, priklausomybė nuo važiavimo greičio, kai posvyrio kampas α_I yra: (→) 2°, (→) 4°, (→) 6°, (→) 8°, (→) 10°	33

25 pav. Automobilio pasipriešinimo koeficiento C_D , įvertinant kelio įtaką, priklausomybė nuo priekinio stiklo posvyrio kampo α_1 , kai važiavimo greitis: (—) 10 m/s, (—) 15 m/s, (—) 20 m/s, (—) 30 m/s, (—) 40 m/s, (—) 45 m/s, (—) 50 m/s.....	33
26 pav. Automobilio prispaudimo-kėlimo koeficiento C_L , įvertinant kelio įtaką, priklausomybė nuo važiavimo greičio, kai posvyrio kampas α_1 yra: (—) 2°, (—) 4°, (—) 6°, (—) 8°, (—) 10°.....	34
27 pav. Automobilio prispaudimo-kėlimo koeficiento C_L , įvertinant kelio įtaką, priklausomybė nuo posvyrio kampo α_1 , kai važiavimo greitis: (—) 10 m/s, (—) 15 m/s, (—) 20 m/s, (—) 30 m/s, (—) 40 m/s, (—) 45 m/s, (—) 50 m/s.....	34
28 pav. Pasipriešinimo koeficiento C_D vidurkių priklausomybė nuo važiavimo greičio (a) ir posvyrio kampo α_1 (b), kai: (—) – automobilis „pakabintas“ ore, (—) – automobilis važiuoja keliu.....	35
29 pav. Prispaudimo-kėlimo koeficiento C_L vidurkių priklausomybė nuo važiavimo greičio (a) ir posvyrio kampo α_1 (b), kai: (—) – automobilis „pakabintas“ ore, (—) – automobilis važiuoja keliu.....	35
30 pav. Galinio stiklo posvyrio kampas α_2	36
31 pav. Automobilio pasipriešinimo koeficiento C_D , nevertinant kelio įtakos, priklausomybė nuo važiavimo greičio, kai galinio stiklo posvyrio kampas α_2 yra: (—) 2°, (—) 4°, (—) 6°, (—) 8°, (—) 10°.....	36
32 pav. Automobilio pasipriešinimo koeficiento C_D , nevertinant kelio įtakos, priklausomybė nuo galinio stiklo posvyrio kampo α_2 , kai važiavimo greitis: (—) 10 m/s, (—) 15 m/s, (—) 20 m/s, (—) 30 m/s, (—) 40 m/s, (—) 45 m/s, (—) 50 m/s.....	37
33 pav. Automobilio prispaudimo-kėlimo koeficiento C_L , nevertinant kelio įtakos, priklausomybė nuo važiavimo greičio, kai galinio stiklo posvyrio kampas α_2 yra: (—) 2°, (—) 4°, (—) 6°, (—) 8°, (—) 10°.....	37
34 pav. Automobilio prispaudimo-kėlimo koeficiento C_L , nevertinant kelio įtakos, priklausomybė nuo galinio stiklo posvyrio kampo α_2 , kai važiavimo greitis: (—) 10 m/s, (—) 15 m/s, (—) 20 m/s, (—) 30 m/s, (—) 40 m/s, (—) 45 m/s, (—) 50 m/s.....	38
35 pav. Automobilio pasipriešinimo koeficiento C_D , įvertinant kelio įtakos, priklausomybė nuo važiavimo greičio, kai galinio stiklo posvyrio kampas α_2 yra: (—) 2°, (—) 4°, (—) 6°, (—) 8°, (—) 10°.....	38
36 pav. Automobilio pasipriešinimo koeficiento C_D , įvertinant kelio įtaką, priklausomybė nuo galinio stiklo posvyrio kampo α_2 , kai važiavimo greitis: (—) 10 m/s, (—) 15 m/s, (—) 20 m/s, (—) 30 m/s, (—) 40 m/s, (—) 45 m/s, (—) 50 m/s.....	39
37 pav. Automobilio prispaudimo-kėlimo koeficiento C_L , įvertinant kelio įtaką, priklausomybė nuo važiavimo greičio, kai galinio stiklo posvyrio kampas α_2 yra: (—) 2°, (—) 4°, (—) 6°, (—) 8°, (—) 10°.....	39
38 pav. Automobilio prispaudimo-kėlimo koeficiento C_L , įvertinant kelio įtaką, priklausomybė nuo galinio stiklo posvyrio kampo α_2 , kai važiavimo greitis: (—) 10 m/s, (—) 15 m/s, (—) 20 m/s, (—) 30 m/s, (—) 40 m/s, (—) 45 m/s, (—) 50 m/s.....	40
39 pav. Pasipriešinimo koeficiento C_D vidurkių priklausomybė nuo važiavimo greičio (a) ir posvyrio kampo α_2 (b), kai: (—) – automobilis „pakabintas“ ore, (—) – automobilis važiuoja keliu.....	40
40 pav. Prispaudimo-kėlimo koeficiento C_L vidurkių priklausomybė nuo važiavimo greičio (a) ir posvyrio kampo α_2 (b), kai: (—) – automobilis „pakabintas“ ore, (—) – automobilis važiuoja keliu.....	41
41 pav. Priekinės lempos posvyrio kampas α_3	41

42 pav. Automobilio pasipriešinimo koeficiento C_D , nevertinant kelio įtakos, priklausomybė nuo važiavimo greičio, kai priekinės lempos posvyrio kampas α_3 yra: (—) 2° , (—) 4° , (—) 6° , (—) 8° , (—) 10°	42
43 pav. Automobilio pasipriešinimo koeficiento C_D , nevertinant kelio įtakos, priklausomybė nuo priekinės lempos posvyrio kampo α_3 , kai važiavimo greitis: (—) 10 m/s, (—) 15 m/s, (—) 20 m/s, (—) 30 m/s, (—) 40 m/s, (—) 45 m/s,(—) 50 m/s.....	42
44 pav. Automobilio prispaudimo-kėlimo koeficiento C_L , nevertinant kelio įtakos, priklausomybė nuo važiavimo greičio, kai priekinės lempos posvyrio kampas α_3 yra: (—) 2° , (—) 4° , (—) 6° , (—) 8° , (—) 10°	43
45 pav. Automobilio prispaudimo-kėlimo koeficiento C_L , nevertinant kelio įtakos, priklausomybė nuo priekinės lempos posvyrio kampo α_3 , kai važiavimo greitis: (—) 10 m/s, (—) 15 m/s, (—) 20 m/s, (—) 30 m/s, (—) 40 m/s, (—) 45 m/s,(—) 50 m/s.....	43
46 pav. Automobilio pasipriešinimo koeficiento C_D , įvertinant kelio įtaką, priklausomybė nuo važiavimo greičio, kai priekinės lempos posvyrio kampas α_3 yra: (—) 2° , (—) 4° , (—) 6° , (—) 8° , (—) 10°	44
47 pav. Automobilio pasipriešinimo koeficiento C_D , įvertinant kelio įtaką, priklausomybė nuo priekinės lempos posvyrio kampo α_3 , kai važiavimo greitis: (—) 10 m/s, (—) 15 m/s, (—) 20 m/s, (—) 30 m/s, (—) 40 m/s, (—) 45 m/s,(—) 50 m/s.....	44
48 pav. Automobilio prispaudimo-kėlimo koeficiento C_L , įvertinant kelio įtaką, priklausomybė nuo priekinės lempos važiavimo greičio, kai posvyrio kampas α_3 yra: (—) 2° , (—) 4° , (—) 6° , (—) 8° , (—) 10°	45
49 pav. Automobilio prispaudimo-kėlimo koeficiento C_L , įvertinant kelio įtaką, priklausomybė nuo priekinės lempos posvyrio kampo α_3 , kai važiavimo greitis: (—) 10 m/s, (—) 15 m/s, (—) 20 m/s, (—) 30 m/s, (—) 40 m/s, (—) 45 m/s,(—) 50 m/s.....	45
50 pav. Pasipriešinimo koeficiento C_D vidurkių priklausomybė nuo važiavimo greičio (a) ir posvyrio kampo α_3 (b), kai: (—) – automobilis „pakabintas“ ore, (—) – automobilis važiuoja keliu.....	46
51 pav. Prispaudimo-kėlimo koeficiento C_L vidurkių priklausomybė nuo važiavimo greičio (a) ir posvyrio kampo α_3 (b), kai: (—) – automobilis „pakabintas“ ore, (—) – automobilis važiuoja keliu.....	46
52 pav. Grotelių posvyrio kampas α_4	47
53 pav. Automobilio pasipriešinimo koeficiento C_D , nevertinant kelio įtakos, priklausomybė nuo važiavimo greičio, kai grotelių posvyrio kampas α_4 yra: (—) 2° , (—) 4° , (—) 6° , (—) 8° , (—) 10°	47
54 pav. Automobilio pasipriešinimo koeficiento C_D nevertinant kelio įtakos, priklausomybė nuo grotelių posvyrio kampo α_4 , kai važiavimo greitis: (—) 10 m/s, (—) 15 m/s, (—) 20 m/s, (—) 30 m/s, (—) 40 m/s, (—) 45 m/s,(—) 50 m/s.....	48
55 pav. Automobilio prispaudimo-kėlimo koeficiento C_L , nevertinant kelio įtakos, priklausomybė nuo važiavimo greičio, kai grotelių posvyrio kampas α_4 yra: (—) 2° , (—) 4° , (—) 6° , (—) 8° , (—) 10°	48
56 pav. Automobilio prispaudimo-kėlimo koeficiento C_L , nevertinant kelio įtakos, priklausomybė nuo grotelių posvyrio kampo α_4 , kai važiavimo greitis: (—) 10 m/s, (—) 15 m/s, (—) 20 m/s, (—) 30 m/s, (—) 40 m/s, (—) 45 m/s,(—) 50 m/s.....	49
57 pav. Automobilio pasipriešinimo koeficiento C_D , įvertinant kelio įtaką, priklausomybė nuo važiavimo greičio, kai grotelių posvyrio kampas α_4 yra: (—) 2° , (—) 4° , (—) 6° , (—) 8° , (—) 10°	49

- 58 pav.** Automobilio pasipriešinimo koeficiento C_D , įvertinant kelio įtaką, priklausomybė nuo grotelių posvyrio kampo α_4 , kai važiavimo greitis: (—) 10 m/s, (—) 15 m/s, (—) 20 m/s, (—) 30 m/s, (—) 40 m/s, (—) 45 m/s, (—) 50 m/s..... 50
- 59 pav.** Automobilio prispaudimo-kėlimo koeficiento C_L , įvertinant kelio įtaką, priklausomybė nuo važiavimo greičio, kai grotelių posvyrio kampas α_4 yra: (—) 2°, (—) 4°, (—) 6°, (—) 8°, (—) 10° 50
- 60 pav.** Automobilio prispaudimo-kėlimo koeficiento C_L , įvertinant kelio įtaką, priklausomybė nuo grotelių posvyrio kampo α_4 , kai važiavimo greitis: (—) 10 m/s, (—) 15 m/s, (—) 20 m/s, (—) 30 m/s, (—) 40 m/s, (—) 45 m/s, (—) 50 m/s..... 51
- 61 pav.** Pasipriešinimo koeficiento C_D vidurkių priklausomybė nuo važiavimo greičio (a) ir posvyrio kampo α_4 (b), kai: (—) – automobilis „pakabintas“ ore, (—) – automobilis važiuoja keliu 51
- 62 pav.** Pasipriešinimo koeficiento C_D vidurkių priklausomybė nuo važiavimo greičio (a) ir posvyrio kampo α_4 (b), kai: (—) – automobilis „pakabintas“ ore, (—) – automobilis važiuoja keliu 52

Santrumpų ir terminų sąrašas

Santrumpos:

Dr. – daktaras;

Lekt. – lektorius;

CAD (angl. *Computer-aided Design*) – kompiuterinis projektavimas;

CFD (angl. *Computational Fluid Dynamics*) – kompiuterinė srautų dinamika.

Terminai:

Laminarinis tekėjimas – skysčio arba dujų klampusis tekėjimas tarpusavyje nesimaišančiais plonais sluoksniais [1].

Turbulentinis tekėjimas – skysčio, dujų arba plazmos tekėjimas, kurio metu srauto greitis, temperatūra, slėgis, tankis ir kiti parametrai kiekviename srauto taške kinta netvarkingai [2].

Adiabatinis procesas – termodinaminis procesas, kurio metu tarp sistemos ir aplinkos nevyksta šilumos mainai [3].

Perteklinis slėgis – absoliutinio ir atmosferos slėgio skirtumas [4].

Įvadas

Valdomumas, dizainas bei nuvažiuojamas atstumas yra pagrindiniai parametrai, kurie nulemia ne tik automobilio kainą, kas svarbu vartotojui, bet ir paklausą, kas šiais laikais labai aktualu gamintojams. Išvardyti parametrai neatsiejama aerodinamikos dalis. Aerodinamiška transporto priemonė turi mažesnę oro pasipriešinimą, tad esant toms pačioms kuro (energijos) sąnaudoms nuvažiuojamas didesnis atstumas.

Išoriniai elementai ir jų pavidalai daro įtaką automobilio aerodinaminėms savybėms. Įtakos dydis priklauso nuo to, koks yra elemento posvyrio kampas, kokie to elemento geometriniai matmenys, koku greičiu važiuoja automobilis. Norint sužinoti, kokią įtaką daro elementai automobilio aerodinaminėms savybėms, reikia atlikti tyrimus oro tunelyje arba pasinaudoti CFD galimybėmis.

Šiame tyrime keičiami elementų posvyrio kampai, siekiant nustatyti kokią įtaką automobilio aerodinaminiams rodikliams jie turi, skaičiavimai atliekami dviem atvejais: kai vertinama kelio įtaka, automobilis „pakabintas“ ore. Visas tyrimas atliekamas panaudojant CFD, esant skirtingam oro tėkmės greičiui ir skirtingoms aplinkos sąlygoms.

Baigiamojo projekto objektas: „Tesla Cybertruck“ automobilio modelis.

Baigiamojo projekto tikslas: panaudojant kompiuterinę srautų dinamikos analizę ištirti automobilio išorinių elementų pavidalų įtaką automobilio aerodinaminiams pasipriešinimo ir prispaudimo-kėlimo rodikliams.

Baigiamojo projekto uždaviniai:

1. apžvelgti mokslinius šaltinius;
2. sudaryti automobilio „Tesla Cybertruck“ erdvinį kompiuterinį modelį „SolidWorks“ terpėje;
3. tyrimus atlikti panaudojant srautų dinamikos skaičiuojamąjį modelį, sudarytą „SolidWorks FlowSimulation“ terpėje;
4. ištirti kokią įtaką automobilio „Tesla Cybertruck“ aerodinaminiams pasipriešinimo ir prispaudimo-kėlimo rodikliams turi:
 - važiavimo greitis;
 - priekinio ir galinio stiklų, priekinės lempos ir priekinių grotelių posvyrio kampai.

Pranešimai ir moksliniai darbai baigiamojo projekto tematika. Dalyvauta studentų mokslinėje konferencijoje „Technologijų ir verslo aktualijos – 2021“ (TVA-2021) Panevėžyje 2021 m. balandžio 23 d. Skaitytas pranešimas tema „Automobilio „Tesla Cybertruck“ aerodinamių savybių tyrimas“. Pranešimo pagrindu parengtas straipsnis, kuris įtrauktas į studentų mokslinės konferencijos TVA-2021 darbų rinkinį.

Baigiamojo projekto sandara ir apimtis. Baigiamąjį magistro projektą sudaro akademinio sąžiningumo deklaracija, baigiamojo projekto užduotis, santrauka lietuvių ir anglų kalbomis, lentelių ir paveikslukų sąrašai, įvadas, 3 skyriai, išvados ir literatūros sąrašas. Aiškinamojo rašto apimtis 68 p., kuriuose yra 62 paveikslukai ir 10 lentelių.

1. Mokslinės literatūros, kurioje nagrinėjamos transporto priemonių aerodinaminės savybės, apžvalga

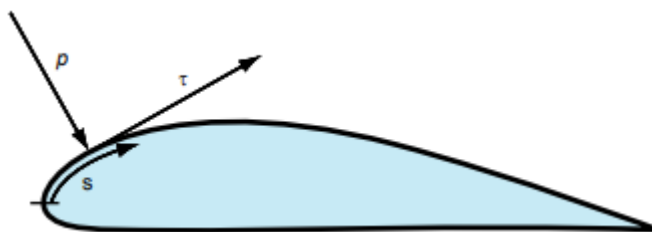
Kai daugiau nei prieš šimtą metų arklio tempiamas vežimas buvo pakeistas vidaus degimo varikliu, niekas negalvojo apie aerodinamiką. Tad pakeitus arklį, tikslas liko vienas – apsaugoti vairuotoją ir keleivius nuo vėjo, lietaus ir purvo. Idėja pritaikyti aerodinamiką transporto priemonėms atsirado daug vėliau, kai jau buvo pasiekta nemaža pažanga skrydžių technologijoje. Tiek dirižabliams, tiek orlaiviams supaprastintos formos sumažino pasipriešinimą ir leido padidinti greitį, turint ribotą variklio galią.

Ankstyvieji bandymai supaprastinti automobilius buvo pasitelkiant aeronautikos praktiką ir pritaikant formas iš laivyno architektūros. Tačiau tai negelbėjo, kadangi kelių būklė buvo prasta ir automobilių varikliai neturėjo pakankamai galios pasiekti didesnių greičių. Ilgas kelias nuo tų laikų iki šiandieninio aerodinamikos pripažinimo automobilių pramonėje išsamiai aprašomas Kieselbach'o [5] ir Hucho [6] knygose [7].

Aerodinamika – tai mokslas, tiriantis, kaip oras sąveikauja su judančiais kūnais [8]. Aerodinamikoje daugiausia pasireiškia pasipriešinimo ir kėlimo jėgos, kurias sukelia oras, tekantis aplink kietus kūnus.

1.1. Automobilių aerodinaminiai rodikliai

Transporto priemonei judant keliu, aplink ją juda oro srautas. Nesvarbu, ar tiriamojo kūno forma paprasta, ar sudėtinga (tokia kaip automobilio) – aerodinaminės jėgos ir momentai susidaro dėl dviejų pagrindinių priežasčių: slėgio p ir trinties τ pasiskirstymo kūno paviršiuje (žr. 1 pav.). [9]



1 pav. Slėgio ir trinties profilio paviršiuje schema [9]

Esant skirtingiems oro dalelių greičiams viršutinėje ir apatinėje profilio dalyse, susidaro skirtingi slėgiai: viršutinėje profilio dalyje žemas slėgis, apatinėje aukštas. Susumavus kūno paviršiuje veikiančias slėgio ir trinties jėgas, gaunama atstojamoji aerodinaminė jėga. Šią jėgą galima išskaidyti į dvi projekcijas: keliamąją jėgą ir pasipriešinimą. Keliamoji jėga yra atstojamosios aerodinaminės jėgos projekcija, statmena laisvojo srauto kryptčiai. Nuo šios kryptties priklauso, ar transporto priemonė keliamą nuo kelio ar spaudžiama prie jo. Pasipriešinimo jėga yra atstojamosios aerodinaminės jėgos projekcija, lygiagreti su laisvojo srauto krypttimi. Ji priešinasi automobilio judėjimui į priekį [9].

Aerodinaminės jėgos, veikiančios oro sraute judantį kūną, priklauso nuo kūno geometrinės formos ir oro srauto ypatybių. Norint atlikti aerodinaminių jėgų skaičiavimus, reikia įsivesti bemačius koeficientus, kurie priklauso nuo didžiausią įtaką darančių veiksnių. Pagrindiniai parametrai [9]:

Dinaminio slėgio formulė:

$$q = \frac{(\rho V^2)}{2}; \quad (1)$$

čia ρ – oro tankis $1,225 \text{ kg/m}^3$;

V – oro srauto greitis.

Keliamosios jėgos koeficiento formulė:

$$C_L = \frac{L}{q \cdot A}; \quad (2)$$

čia L – kėlimo jėga, A – kūno plotas.

Keliamosios jėgos formulė:

$$L = C_L \frac{\rho V^2}{2} A; \quad (3)$$

Iš (3) formulės matoma, jog keliamoji jėga yra proporcinga kūno atskaitos plotui ir dinaminiam slėgiui, kuris lygus oro tankio ir laisvojo srauto greičio kvadrato sandaugos pusei. Proporcingumo koeficientas C_L yra keliamosios jėgos koeficientas [9].

Pasipriešinimo jėgos koeficiento formulė:

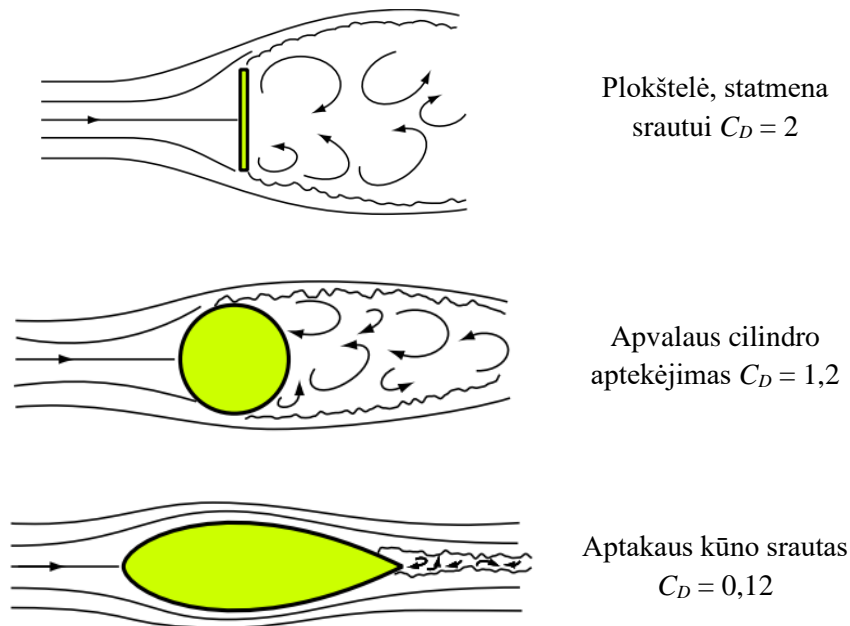
$$C_D = \frac{D}{qA}; \quad (4)$$

čia D – kėlimo jėga.

Pasipriešinimo jėgos formulė:

$$D = C_D \frac{\rho V^2}{2} A; \quad (5)$$

Iš (5) formulės matoma, jog pasipriešinimo jėga yra proporcinga kūno atskaitos plotui ir dinaminiam slėgiui, kuris lygus oro tankio ir laisvojo srauto greičio kvadrato sandaugos pusei. Proporcingumo koeficientas C_D yra pasipriešinimo koeficientas. Pasipriešinimo koeficientas priklauso nuo kūno formos padėties oro sraute [9].



2 pav. Įvairių pavidalų pasipriešinimo koeficientai [9]

Kūno forma (pavidalas) turi labai didelę įtaką pasipriešinimui. Kaip matyti 2 pav., kuo kūnas aptakesnis ir ilgesnis, tuo pasipriešinimo koeficientas mažesnis. Taip pat galime daryti išvadą, kad kuo oro srautas tolygiau apteka kūną, tuo mažesnė sukuriama pasipriešinimo jėga. Didžiausias oro srautas matomas už plokštelės, statmenos oro srautui. Susidarę oro sukūriai turi įtakos pasipriešinimo jėgai, todėl automobiliuose stengiamasi naudoti apvalias formas [9]. Pasipriešinimo koeficiento reikšmė dažniausiai vyrauja nuo 0,25 iki 0,45 [10].

1.2. Tyrimai, kuriuose naudojama kompiuterinės srautų dinamikos (CFD) analizė

Yra trys tyrimo būdai sprendžiant srautų uždavinius: teorinė analizė, eksperimentinė ir kompiuterinė simuliacija (CFD).

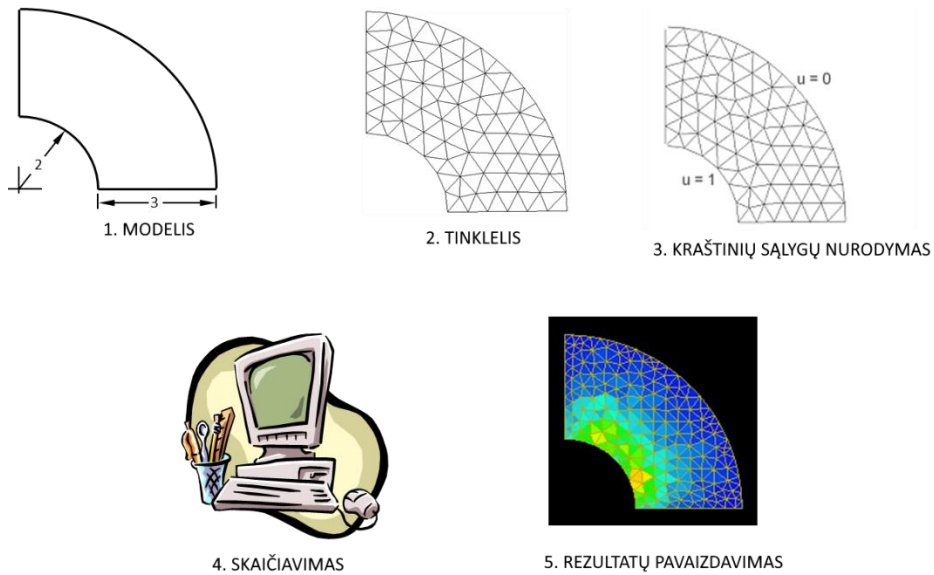
Kadangi teorinė analizė yra sudėtinga ir atima labai daug laiko, lyginant su eksperimentine ir kompiuterine, bus apžvelgiami šie du naudojami būdai.

CFD – sąlyginai nauja analizė, nustatanti skysčio ar oro srautą, šilumos ar masės perdavimą. Taigi šis metodas padeda išspręsti sudėtingas matematinės lygtis naudojant skaitinius metodus. Ši analizė suteikia kokybinių ir kiekybinių prognozių apie oro srautą. Kompiuterinę srautų dinamiką apima:

- matematiniai modeliai, sprendžiant diferencines lygtis;
- skaitmenizuoti metodai;
- programinė įranga, skirta sprendiniui skaičiuoti ir rezultatams apdoroti.

Darbe [11] teigiama, kad panaudojus kompiuterinę srautų dinamiką galima spręsti sudėtingus kūnų judėjimo skystose ir dujinėse terpėse uždavinius.

Simuliacijos procesui atlikti naudojama žingsnių seka pateikiama 3 pav.



3 pav. Kompiuterinės srautų dinamikos seka [11]

Pagrindiniai žingsniai:

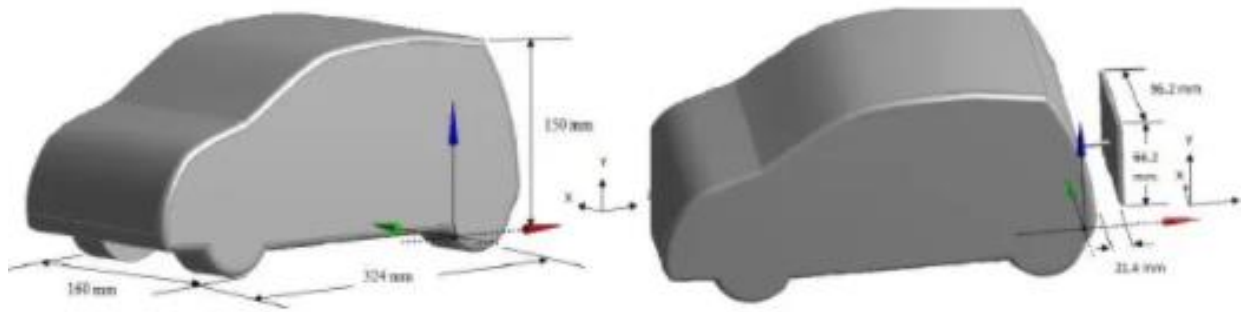
1. sukurti tiriamąjį modelį;
2. sukurti ir apdoroti (reikiamose vietose sutankinti) baigtinių elementų metodo tinklą;
3. nustatyti kraštines sąlygas (skaičiuojamoji erdvė, terpė, tekėjimo tipas, vėjo greitis, savasis svoris, drėgmė, paviršiaus šiurkštumas);
4. skaičiavimas;
5. rezultatų apdorojimas.

Šiame magistro projekte bus naudojama programinė įranga „SolidWorks Flow Simulation“ [12] leidžia gauti šiuos rezultatus:

- | | |
|-------------------------|-------------------------|
| – slėgio pokytį | – turbulentinį tekėjimą |
| – greičio pokytį | – išmatuoti jėgą |
| – srauto greičio pokytį | – išmatuoti slėgį |
| – laminarinį tekėjimą | – pasipriešinimo jėgas |

1.2.1. Sumažinti modeliai

Aerodinamiuose tyrimuose dažnai naudojami sumažinto dydžio modeliai. Modeliai gali būti tiek realūs, tiek kompiuteriniai. S. Majumder‘as ir S. Saha‘s [10] tyrimui atlikti naudojo 1:10 mastelio Chevrolet Beat 3D modelį (4 pav.), kuris buvo modifikuotas ir prie transporto priemonės galo pridėta plokštelė. Modeliavimo darbus atliko naudojant CAD įrankį „CATIA V5 R21“ ir simuliavo programoje „FLUENT“.



4 pav. Sumažinti Chevrolet Beat modeliai (dešinėje bazinis modelis, kairėje modelis su pridėta plokšte) [10]

Darbų [7,10] autoriai pažymi, kad automobilių industrijoje dažniausiai atliekant tyrimus naudojamas vėjo tunelis, tačiau pastaruosius 40 metų dauguma inžinierių renkasi nagrinėti automobilio aerodinamines savybes pasitelkdami CFD įrankius. Tai plačiausiai prieinamas įrankis norint optimizuoti automobilio kėbulą. Atlikdami tyrimą, autoriai S. Majumder'is ir S. Saha's [10] tyrė oro srauto ir pasipriešinimo poveikį aplink 3D „Chevrolet Beat“ automobilį su pritvirtinta galine plokšte naudojant CFD simuliacija. Tyrimo metu iširtos transporto priemonės su pritvirtinta galine plokšte aerodinaminės charakteristikos. Autorių [10] straipsnyje skaičiavimams atlikti naudotas simetrinis automobilio modelis tam, kad būtų sutaupyta skaičiavimo laikas ir, kad būtų kuo labiau sutankintas tinkelis. Atlikus tyrimą, iš autorių [10] pateiktų grafikų matosi, kad neigiamo slėgio pasiskirstymas automobilio gale pridėjus plokštelę sumažėjo 7,72 %.

Minėti autoriai savo tyrime [10] taip pat dalinasi, jog daug kitų autorių optimizavo galinę automobilio dalį tam, kad būtų sumažintas pasipriešinimo koeficientas. Guilmineau's [13] atliko CFD simuliaciją aplink Ahmedo kūną [14] pakeisdamas nuožulnimo kampą (25 ir 30 laipsnių). [13] tyrime, gauti rezultatai panašūs abiem atvejais. Visi turbulencijos modeliai teisingai prognozuoja srauto topologiją. Hu XingJun'as [15] savo tyrime aiškino difuzoriaus kampo įtaką be separatoriaus ir galinės plokštės. Tyrime buvo pritaikytas kompiuterinės srautų dinamikos analizė. Tyrimo išvados atskleidė, kad sedano kėbule slėgis keičiasi, kai keičiamas difuzoriaus kampas (nuo 0 iki 12 laipsnių). Aerodinaminis kėlimo koeficientas sumažėja, kai difuzoriaus kampas yra didinamas.

1.2.2. Realus dydžio modeliai

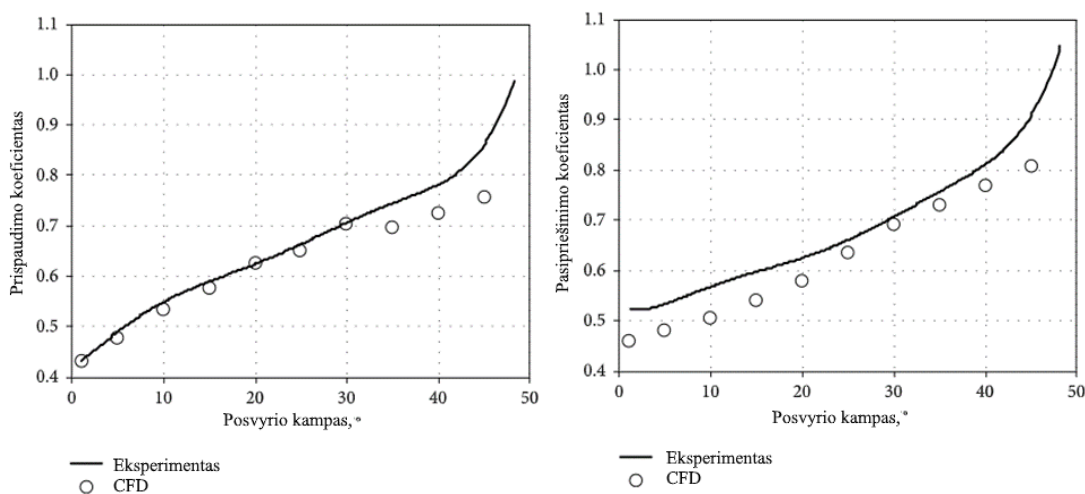
Autoriai [16] atliko tris bandymus. Vėjo tunelio, kelio testą ir panaudodami CAD modelį CFD skaičiavimus. Pasak Majumder'io ir Somnath'o [16], svarbiausias buvo kelio testas panaudojant „Honda CRX“ modelį. Atlikus testą, paaiškėjo, kurios automobilio modifikacijos padėjo lengviau kontroliuoti automobilį, kai kompiuterinės srautų dinamikos skaičiavimai tik leido analizuoti vėjo tunelio rezultatus ir buvo naudojami gauti papildomos informacijos dėl automobilio oro aptakumo aplink jį.

Pasak [16] darbo autorių, spoileris sukuria prispaudimo jėgą, kuri kompensuoja kėlimo jėgą (ją sukuria automobilio forma). Kai kurie papildomi elementai prideda papildomą pasipriešinimą.

Vėjo tunelyje panaudotas sumažintas modelis (1:2,5 mastelio) sukuriant 23 m/s srauto greitį. Nemodifikuotas modelis buvo naudojamas kaip atskaitos taškas, norint nustatyti modifikuoto

modelio rezultatų „gerumą“. Automobiliui „prilipdytas“ spoileris, kuris didina prispaudimo koeficientą.

Atlikus [16] tyrimą, vėjo tunelio ir kompiuterinės analizės rezultatai palyginti ir pateikti dviejose diagramose (5 pav.)



5 pav. Paspriešinimo (dešinėje) ir prispaudimo (kairėje), keičiant spoilerio posvyrio kampą, rezultatai [16]

Darbo [16] autoriai, pasitelkiant diagramas (žr. 5 pav.), nustatė, kad rezultatai naudojant kompiuterines simuliacijas yra artimi eksperimentiniams tyrimams.

Tyrimo [16] padaryta sekanti išvada: panaudojant kelis tyrimo būdus, galima išgauti papildomą stabilumą kelyje. Pakeitus automobilio geometriją, pasikeičia aerodinaminės savybės. Taip pat atlikti eksperimentiniai testai gali privesti prie sprendimų, kad naudojant elektronikos komponentus galima pagerinti automobilio valdomumą.

1.2.3. Automobilio profilio tyrimas

Aurių [17] atlikto tyrimo tikslas išanalizuoti kokią įtaką daro priekinis stiklas, variklio gaubtas ir priekinis buferis. Modeliavimas atliktas „SolidWorks“ programa, naudojantis sedano tipo kėbulu, kurio matmenys 2000x1000x1000 mm. Atliekant tyrimą keistas priekinio stiklo kampas, variklio gaubto kampas bei buferio geometrija (plokščias paviršius ir išgaubtas). Reikalingai simuliacijai atlikti naudotasi „ANSYS FLUENT“ programa, kuri dažniausiai naudojama atlikinėjant CFD uždavinius. Tyrimo atlikimo metu tinkamo dydžio pasirinktas pagal nutylėjimą, t.y. sugeneruotą programos. Skaičiuojamoji terpė - oras. Skaičiavimai atlikti prie vieno greičio – 30 m/s. Atliktas tyrimas atskleidė, jog pakeitus variklio gaubto ir priekinio stiklo kampą, galima ženkliai sumažinti pasipriešinimo jėgą bei koeficientą. Šiame tyrime atsiskleidė, jog pasipriešinimo jėga bei koeficientas sumažėjo 2,7 karto.

1.2.4. Papildomi komponentai automobilio modelyje

Atliktame tyrime [18] pateikta, nuo ko priklauso pasipriešinimo jėga – greičio, priekinės dalies ir kūno pasipriešinimo koeficiento. Taip pat tyrime aprašoma kaip oro srautas pasiskirto ir kur susidaro turbulencija. Bandant sumažinti pasipriešinimo koeficientą, naudoti papildomi komponentai. Analizuojamame tyrime naudojami galiniai dviejų tipų spoileriai, difuzorius ir oro aptakas. Minėti autoriai atliktame tyrime pateikia, kokią įtaką kiekvienas komponentas daro atskirose srityse –

sportinių automobilių ir kasdienių automobilių. Atliktas modeliavimas naudojantis „SolidWorks“ programa, kurioje pritaikytas „GT“ modelis. Tyrime tirti bei pristatyti septyni atvejai: „GT“ su spoileriu, „GT“ su pakeltu sparno formos spoileriu, „GT“ su difuzoriumi, „GT“ su oro aptaku, „GT“ su spoileriu ir difuzoriumi, GT su pakeltu spoileriu ir difuzoriumi bei GT su oro aptaku ir difuzoriumi. Aprašyta kiekvienu atveju montuojamų komponentų vieta. Minėtame tyrime 3D automobilio modelio CFD simuliaciją atlikta „FLUENT“ papildinyje. Virtualaus vėjo tunelio nustatytos ribos 12,000x4000x8000 mm. Tinkelis parinktas, kad aplink automobilį būtų tankesnis, o toliau esančios ribos nuo jo būtų mažiau sutankintos.

Atlikus tyrimą [18] paaiškėjo, jog papildomi elementai mažina oro srauto susidarymą automobilio gale, o tai mažina ir pasipriešinimo koeficientą, tačiau dalis komponentų gali koeficientą vėl padidinti.

1.2.5. Sportinio automobilio pasipriešinimo ir prispaudimo-kėlimo koeficientai

Tyrime [19] apžvelgiama, kaip yra optimizuojamos automobilių aerodinaminės savybės per pastarąjį dešimtmetį. Šio poskyrio tyrime teigiama, jog svarbūs pasipriešinimo koeficiento mažinimo procesai didinant prispaudimo koeficientą tam, jog kad būtų išlaikytas saugumas.

Minėto tyrimo [19] metu, vietoje prototipo naudojamas viso dydžio sportinis automobilis, todėl tyrimo metu pasirinktas ir pilno dydžio virtualus vėjo tunelis aerodinaminėje CFD aplinkoje. Tinkelio dydis bei tikslumas optimizuoti (sutankinta ties užapvalinimo spinduliais). Modeliui sukurti naudota CAD programa bei 3D simuliacijai komercinė „Star-CCM+“ programinė įranga. Siekiant tyrimą pritaikyti kuo artimesnį realiems bandymams bei padidinti tikslumui, įtraukti vidiniai komponentai, tokie kaip radiatorius, variklis bei pakaba, tačiau pats jų dizainas buvo supaprastintas.

Tyrimo rezultatai atskleisti naudojantis trimis modifikacijos modeliais:

- A modelyje - naudojamas vientisas kūnas be spoilerio, kurio pasipriešinimo jėga mažiausia 603,04 N, bet kėlimo jėga didžiausia 451,38 N.
- B modelyje – su varikliu ir komponentais be spoilerio, kurio pasipriešinimo jėga 621,398 N ir kėlimo jėga 352,499 N yra vidutinės.
- C modelyje – su varikliais ir komponentais bei su sparnu, kurio pasipriešinimo jėga 634,2 N didžiausia, o kėlimo 54,41 N mažiausia.

Tyrimo metu daroma išvada, kad kėlimo koeficientas sumažėjo 23 procentais, kuomet buvo pridėti papildomi komponentai.

1.3. Tyrimai, kuriuose naudojamas vėjo tunelis

Vėjo tunelis – patalpa, skirta dirbtinai sukurti oro tėkmę, kurioje galima sužinoti kaip objektas, šiuo atveju automobilis, judės ir taip ištirti aerodinamines savybes [20]. Vėjo tuneliai skirstomi į dvi pagrindines grupes[21]:

- Atviro ciklo vėjo tuneliai: oras viena turbina yra iš aplinkos, supančios vėjo tunelį, o kita turbina gražinamas į aplinką. Šio tipo tuneliai dažniausiai naudojami Europoje.
- Uždaro ciklo vėjo tuneliai: šio tipo tunelis turi analogiškus komponentus, tačiau yra vienas skirtumas – oro srautas yra recirkuliuojamas viduje. Šio tipo tuneliai dažniausiai sutinkami JAV [7].

Atviro ciklo vėjo tuneliai charakterizuojami, kaip tikslesni. Vėjo tuneliuose bandomi automobiliai turi du pagrindinius apribojimus. Dėl automobilio bukumo trikdomas srautas bandymų tunelyje, taip pat sunku įvertinti transporto priemonės ir kelio sukibimą, todėl dažniausiai šis rodiklis yra nepaisomas [7]. Taip pat, reikėtų paminėti, jog didžiausias vėjo tunelis, skirtas automobilių pramonei, yra 1980 m. atidarytas „GM Aerodynamic Laboratory“ (toliau GMAL), didesni tuneliai yra naudojami tik aeronautikos industrijoje. GMAL pastatytas Warren mieste, Michigano valstijoje [22].

Aerodinaminių apkrovų matavimai atliekami panaudojant 6-ių komponentų svarstyklėmis, kurios išdėstytos bandymų stendo apačioje. Bandomasis modelis sumontuotas ant 4 apskrito skerspjūvio balansinių statramsčių, kuriuos galima reguliuoti pagal bandomojo modelio geometriją. Kiekvienam statramsčiui, jungiančiam modelį su balansavimo sistema, atsiranda papildomos aerodinaminės apkrovos. Akivaizdžiausiai pamatuojama jėga, kuriai įtakos turi atviri statramsčiai, yra pasipriešinimas [23].

Bayindir'o ir Celik'o tyrime [24] naudotas sukurtas 3D keleivinio automobilio modelis panaudojant „SolidWorks“, tada šis modelis yra perkeliamas į „ANSYS FLUENT“ programą atlikti simuliacijas ir nustatyti aerodinaminį pasipriešinimo koeficientą. Taip pat tyrime naudojamas vėjo tunelis, kuriame tiriamas 1:33 mastelio spausdintas 3D modelis (6 pav.), kad būtų galima palyginti su kompiuteriniu modeliavimu. Tyrimo metu buvo pridėtas spoileris ant bagažinės dangčio, sukūrių generatorius, „uodegos“ virš galinio stiklo ir po galiniu buferiu. Tyrimo išvadose teigiama, kad pridėdamas papildomus elementus galima sumažinti pasipriešinimo koeficientą ir padidinti automobilio stabilumą, pasinaudojant kompiuteriniu modeliavimu.



6 pav. Modelis, pagamintas 3D spausdintuvu [20]

1.4. Tyrimo būdų palyginimas

Aukščiau aprašyti aerodinaminių rodiklių tyrimo būdai (vėjo tunelis ir CFD analizė) yra panašūs, bet kartu ir skirtingi. Jų palyginimas pateikiamas 1 lentelėje [25].

1 lentelė. Kompiuterinės srautų dinamikos ir vėjo tunelio palyginimas [10, 13, 16-19, 24, 25]

	Simuliacija (CFD)	Vėjo tunelis (eksperimentinė analizė)
Kaina	Pigu	Brangu
Laikas	Greitai	Ilgai
Modelio dydis	Bet koks	Mažas/vidutinis
Gaunami rezultatai	Visi	Riboti
Galimybė pakartoti	Taip	Kartais
Saugumas	Taip	Kartais pavojinga

Iš pateiktos 1 lentelės matyti, kad kompiuterinės srautų dinamikos analizė yra pigesnė, nereikia gaminti testavimo modelio, tyrimą galima atlikti greičiau ir efektyviau (gauti daugiau duomenų). Taip pat yra galimybė kartoti tyrimą neribotą skaičių kartų ir kartais tai netgi saugiau.

Tačiau abu šie būdai, turi ir bendrą trūkumą – negalima pamatuoti transporto priemonės elgesio pučiant šoniniam vėjui. Tai galima atlikti tik atliekant kelio testą [7].

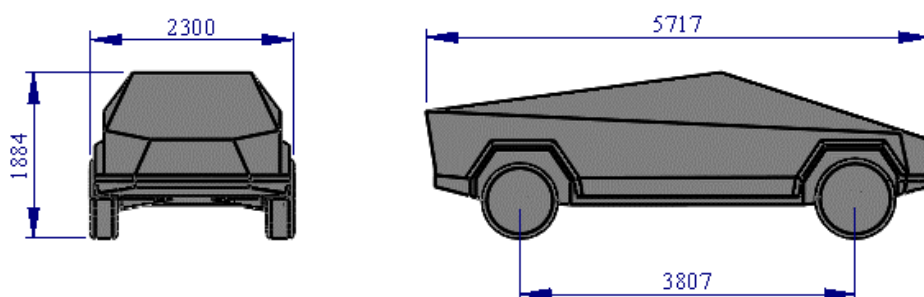
2. Tiriomojo modelio aprašas

Tyrimui naudotas „Tesla Cybertruck“ 3D modelis atsisiųstas iš 5 šaltinio (žr. 7 pav.). Modelis buvo modifikuotas taip, kad visi paviršiai tapo plokšti, briaunos aštrios (be užapvalinimo spindulių). Pasinaudojant „SolidWorks“ programa (8a pav.) nustatytas automobilio modelio projekcijos iš priekio plotas: $3,32 \text{ m}^2$.

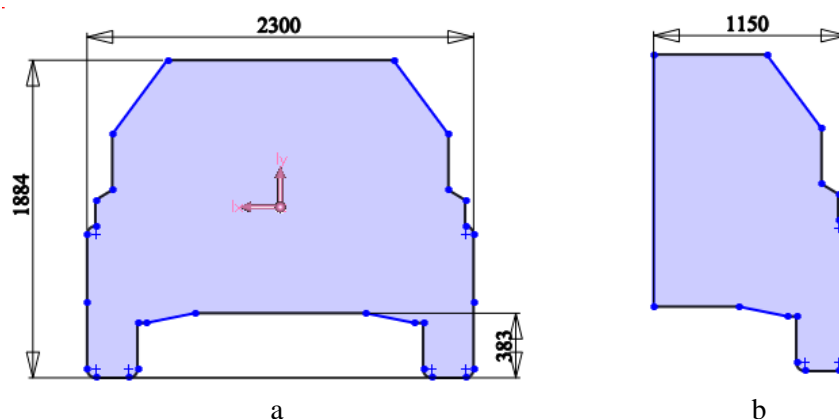
Tyrimams naudojamas „SolidWorks“ kompiuterinės srautų dinamikos paketas „Flow Simulation“.

Spręstas statinis, išorinių (aptekanciu automobilių) srautų uždavinys darant sekancias prielaidas:

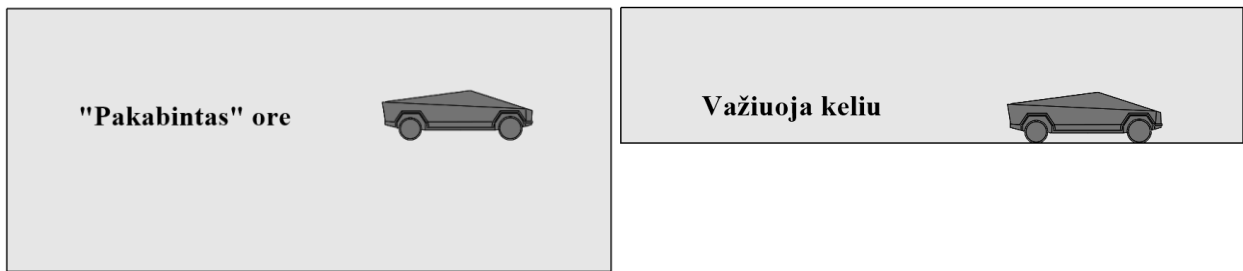
- automobilio modelį supanti virtuali terpė yra oras, kurio tankis $1,225 \text{ kg/m}^3$;
- terpės tekėjimas gali būti mišrus (laminarinis/turbulentinis);
- tarp automobilio ir aplinkos nevyksta šilumos mainai (adiabatinis procesas);
- atmosferinis slėgis – $101\,325 \text{ Pa}$;
- oro temperatūra – 20°C ;
- nėra vėjo, t.y. vėjo greitis lygus 0 m/s ;
- radiacija, savasis svoris, drėgmė ir automobilio paviršiaus šiurkštumas nevertinami;
- skaičiuojamoji erdvė prieš automobilį buvo parinkta 3 m dydžio, šonuose – 4 m , virš ir po automobilio – 5 m (kai automobilis „pakabintas“ ore), o kai automobilis važiuoja keliu, virš 5 m , po 0 m , už automobilio – 20 m tuščios erdvės (žr. 9 pav.).



7 pav. Tesla Cybertruck 3D modelio projekcijos ir pagrindiniai matmenys



8 pav. Tesla Cybertruck ploto nustatymui naudojamos projekcijos: a – projekcija iš priekio; b – projekcijos iš priekio pusė

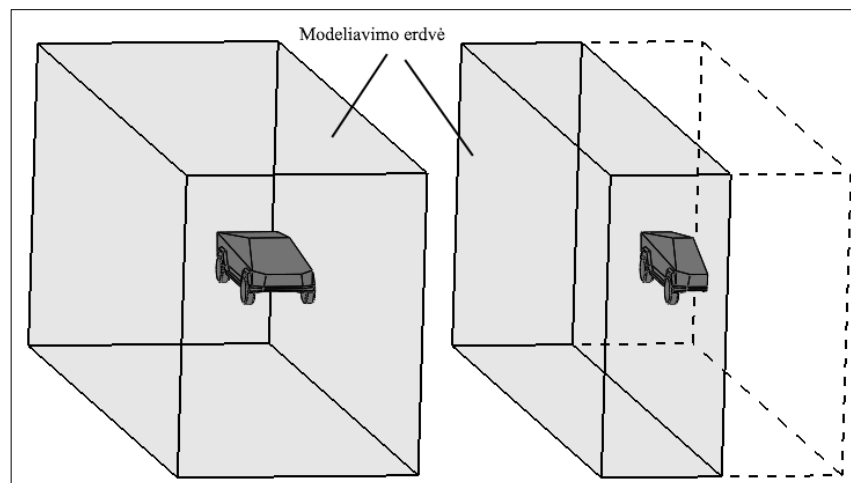


9 pav. Skaičiuojamoji erdvė

Kadangi tiriamasis modelis yra simetrinis išilginės plokštumos atžvilgiu (8a pav., tai YZ plokštuma) todėl pradžioje buvo nustatyti skaičiavimo rezultatų skirtumai, kai naudojamas pilnas ir pusinis modeliai (žr. 10 pav.). Skaičiavimo laikas kiekvienu atveju:

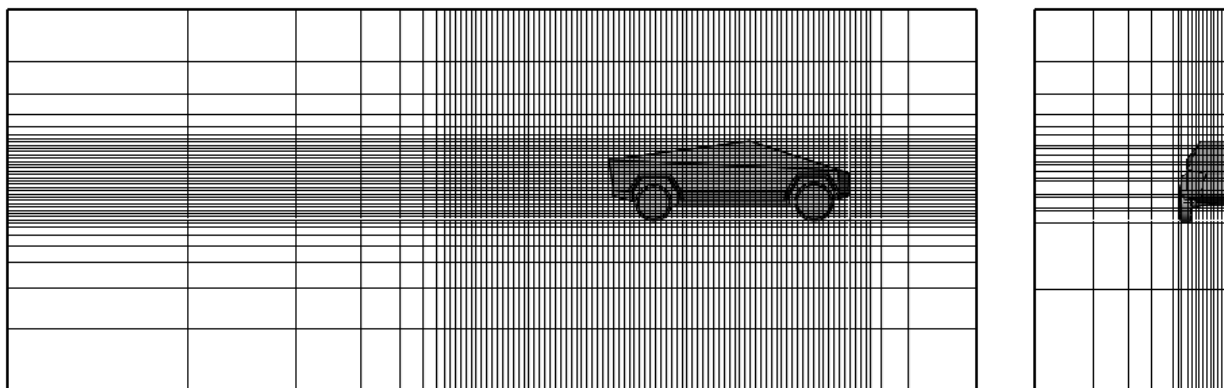
- pilnas modelis „pakabintas“ ore – 11 min;
- pilnas modelis vertinant kelio įtaką – 5 min;
- pusinis modelis „pakabintas“ ore – 6 min;
- pusinis modelis vertinant kelio įtaką – 2 min.

Pusinio modelio skaičiavimo laikas, lyginant su pilno modelio laiku, kai automobilis „pakabintas“ ore sumažėja 1,8 karto, o kai vertinama kelio įtaka taip pat sumažėja tik 2,5 karto. Pasipriešinimo koeficiento C_D , tarp pilno modelio ir pusinio modelio, skirtumas 3,4 %, o prispaudimo-kėlimo koeficientas C_L nekinta. Taupant kompiuterio resursus ir skaičiavimo laiką nuspręsta, kad tyrimas bus atliktas naudojant pusinį modelį. Todėl nustatant pasipriešinimo ir prispaudimo-kėlimo koeficientus buvo naudojama priekio projekcijos ploto pusė (8b pav.), t. y. $1,66 \text{ m}^2$.



10 pav. Modeliavimo erdvė: pilnas (kairėje) ir pusinis (dešinėje) modeliai

Prieš atliekant tyrimą buvo bandoma surasti optimalų tinklelio dydį. Pradžiai buvo skaičiuojama su 4-o lygio tinkleliu (mažiausia išmatuota ląstelė apytiksliai yra $103 \times 327 \text{ mm}$). Pastebėjus, kad skaičiavimo laikas užtrunka tik 2 minutes, tinklelio lygis buvo pakeistas į 5-ą (mažiausia išmatuota ląstelė yra $116 \times 75 \text{ mm}$). Sutankinus tinklelį, skaičiavimo laikas padidėjo apie 3 kartus, o apskaičiuota jėga vidutiniškai sumažėjo tik apie 5,3 procento. Nuspręsta naudoti 5-o lygio tinklelį. Tinklelio atvaizdavimas pateiktas 11 pav.



11 pav. Baigtinių elementų modelio tinklelis

Atlikti tyrimui pasirinkta keisti šiuos parametrus:

- keičiamas priekinio stiklo posvyrio kampas α_1 (žr. 19 pav.);
- keičiamas galinio stiklo posvyrio kampas α_2 (žr. 30 pav.);
- keičiamas priekinės lempos posvyrio kampas α_3 (žr. 41 pav.);
- keičiamas grotelių posvyrio kampas α_4 (žr. 52 pav.);
- važiavimo greitis keičiamas nuo 10 m/s iki 50m/s.

Tyrimo metu apskaičiuojami parametrai:

- aerodinaminis pasipriešinimo koeficientas C_D ;
- aerodinaminis prispaudimo-kėlimo koeficientas C_L .

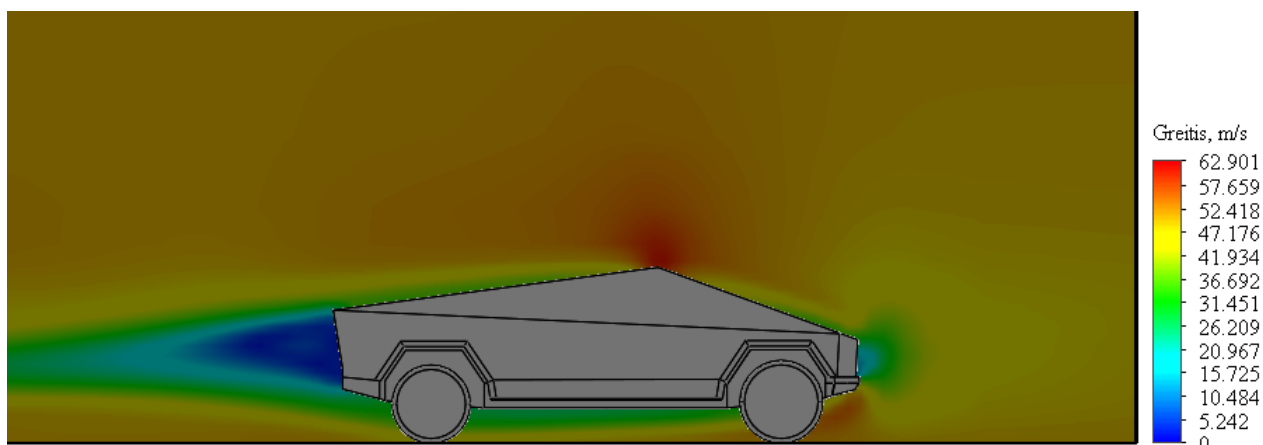
3. Tyrimo eiga

Pradžioje nustatytos oro srauto greičio ir perteklinio slėgio kitimo tendencijos netoli „Tesla Cybertruck“ modelio paviršiaus. Šios tendencijos išliko tokios pat viso tyrimo metu, t.y. ribinių oro srautų greičių ir ribinių perteklinių slėgių sritys, keičiant važiavimo greitį ir kampus, išliko maždaug tose pačiose vietose.

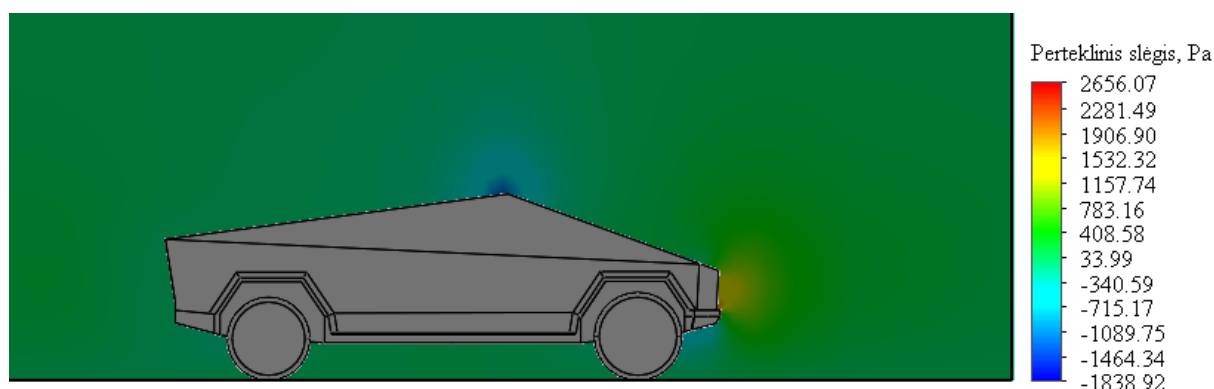
Oro srautų greičio apie „Tesla Cybertruck“ pasiskirstymas, kai modelyje vertinamas kelias, pateiktas 12 pav. Jame matoma, kad didžiausias greitis susidaro ties priekinio stiklo viršumi, o mažiausias oro srauto greitis gaunamas už automobilio galo.

Perteklinio slėgio didžiausios reikšmės, kai modelyje vertinamas kelias, yra modelio priekinėje dalyje, ties grotelėmis, o oro išretėjimas gaunamas ties priekiniu ratu ir viršutine priekinio stiklo dalimi (žr. 13 pav.).

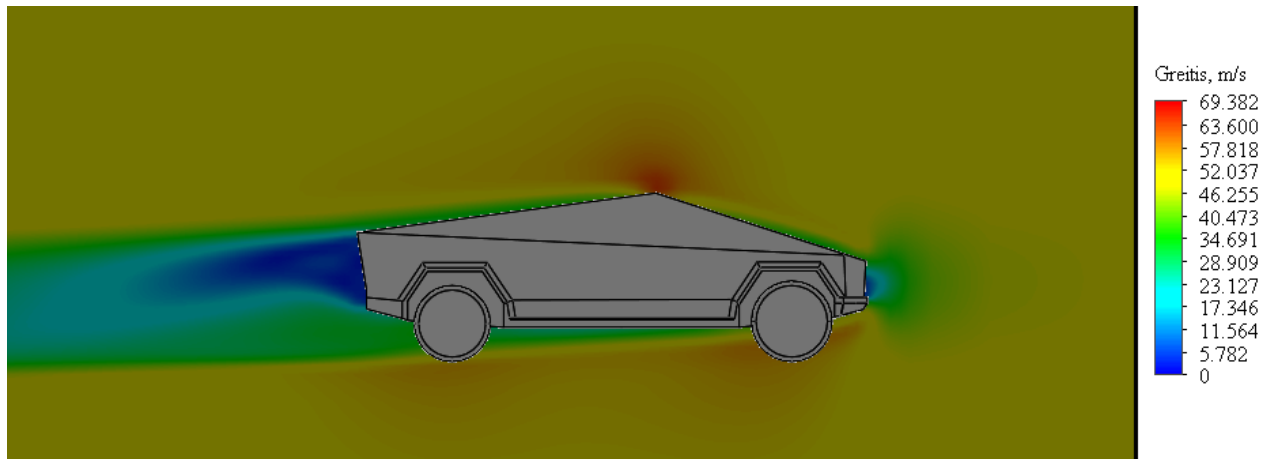
Tiek oro srautų greičių, tiek perteklinio slėgio pasiskirstymas aplink automobilio centrinę pjūvį, modeliuose su keliu ir be jo (automobilis „kabo“ ore), pasiskirsto labai panašiai (žr. 12-15 pav.).



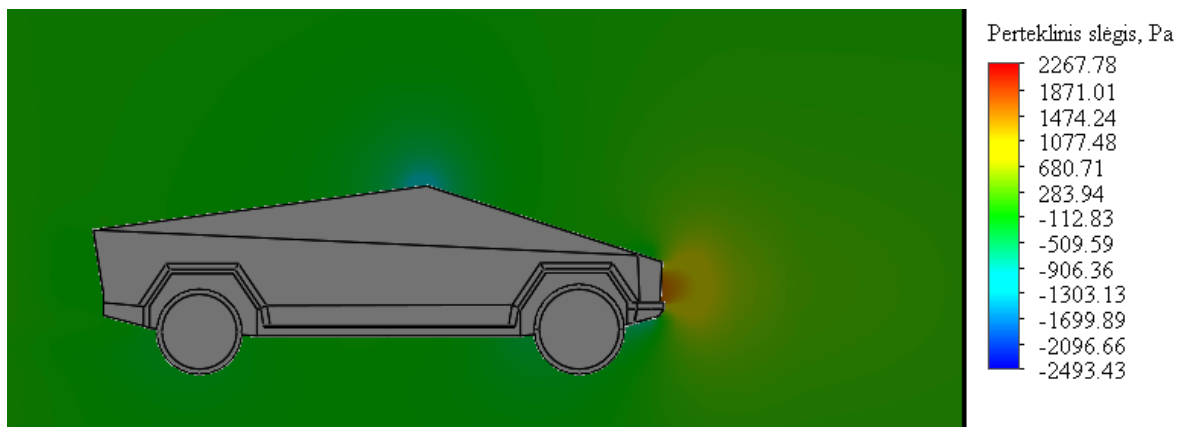
12 pav. Oro srautų greičio pasiskirstymas apie automobilio centrinę pjūvį, kai važiavimo greitis yra 50 m/s ir vertinama kelio įtaka



13 pav. Perteklinio slėgio pasiskirstymas apie automobilio kontūro centrinę pjūvį, kai važiavimo greitis yra 50 m/s ir vertinama kelio įtaka



14 pav. Oro srautų greičio pasiskirstymas apie automobilio centrinę pjūvį, kai važiavimo greitis yra 50 m/s ir nevertinama kelio įtaka



15 pav. Perteklinio slėgio pasiskirstymas apie automobilio kontūro centrinę pjūvį, kai važiavimo greitis yra 50 m/s ir nevertinama kelio įtaka

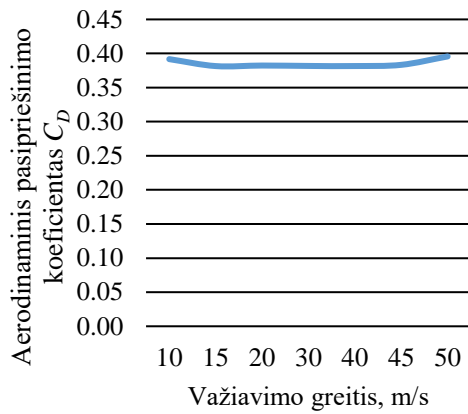
3.1. Automobilio be modifikacijų aerodinamiai koeficientai

Pirmiausia tiriama automobilio aerodinaminiai koeficientai, kai automobilio modelis yra nmodifikuotas.

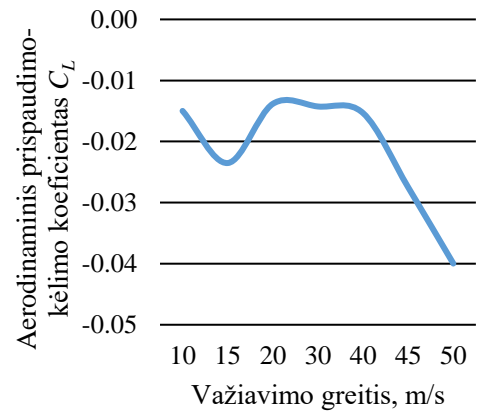
Aerodinaminio pasipriešinimo koeficiento C_D priklausomybė nuo važiavimo greičio, kai automobilis „kabo“ ore, pateikta 16a pav. Greičiui didėjant C_D praktiškai nekinta (pokyčio dydis neviršija 4 %). Mažiausia C_D vertė gaunama važiuojant nuo 15 iki 45 m/s greičiu.

Aerodinaminis prispaudimo-kėlimo koeficiento C_L priklausomybė nuo važiavimo greičio pateikta 16b pav. Neigiamos C_L vertės rodo, kad automobilis oro srauto yra keliamas nuo važiuojamosios dangos. Didėjant važiavimo greičiui C_L absoliutine reikšmė netolygiai didėja. Palankiausia C_L vertė yra važiuojant nedideliais greičiais.

Skaičiavimo rezultatų skaitinės vertės pateiktos 1 priedo 2 lentelėje.



a

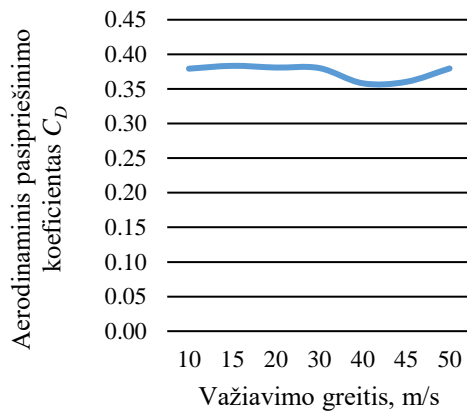


b

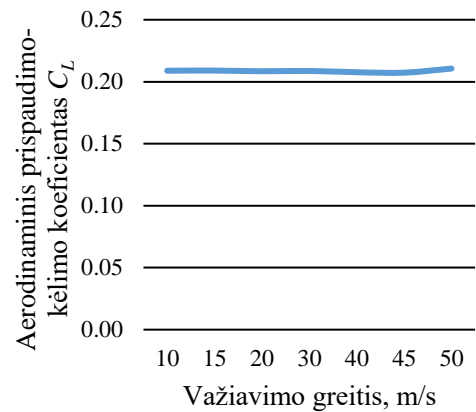
16 pav. Pasipriešinimo C_D (a) ir prispaudimo-kėlimo C_L (b) koeficientų priklausomybė nuo važiavimo greičio, kai nevertinama kelio įtaka

Aerodinaminio pasipriešinimo koeficiento C_D priklausomybė nuo važiavimo greičio, kai nevertinama kelio įtaka, pateikta 17a pav. Greičiui didėjant C_D kinta nežymiai (pokyčio dydis 6,2 %). Mažiausia C_D vertė gaunama važiuojant nuo 40-45 m/s greičiu.

Aerodinaminis prispaudimo-kėlimo koeficiento C_L priklausomybė nuo važiavimo greičio, kai vertinama kelio įtaka, pateikta 17b pav. Teigiama C_L vertė rodo, kad automobilis oro srauto yra spaudžiamas prie važiuojamosios dangos. Didėjant važiavimo greičiui C_L absoliutinė reikšmė praktiškai nekinta.



a

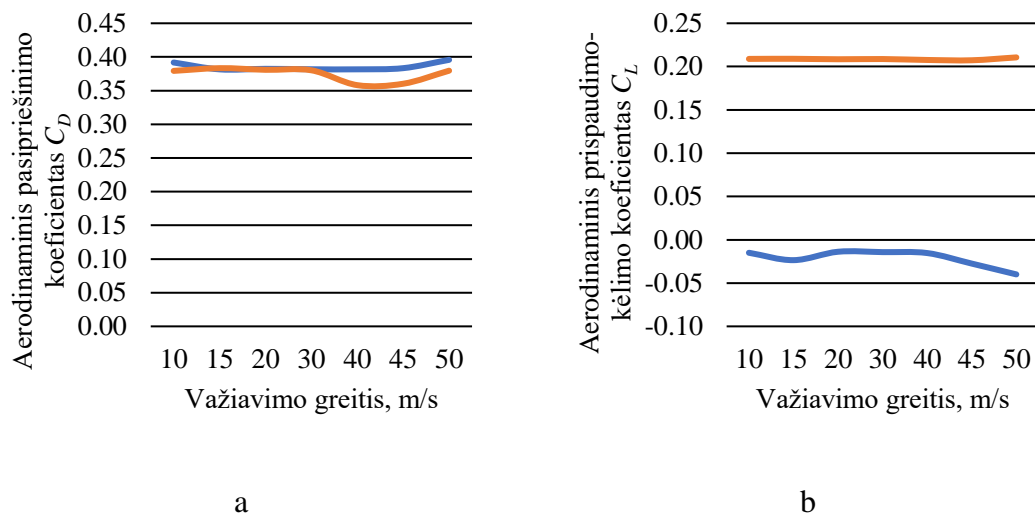


b

17 pav. Pasipriešinimo C_D (a) ir prispaudimo-kėlimo C_L (b) koeficientų priklausomybė nuo važiavimo greičio, kai vertinama kelio įtaka

Iš 18a pav., matoma, kad vertinant kelio įtaką, pasipriešinimo koeficientas C_D neženkiai pasikeičia - sumažėja. Geriausia (mažiausia) C_D vertė, automobiliui važiuojant keliu, gaunama, kai greitis yra 40-45 m/s. Pasipriešinimo koeficientas sumažėja 6,2 %, kai vertinama kelio įtaka.

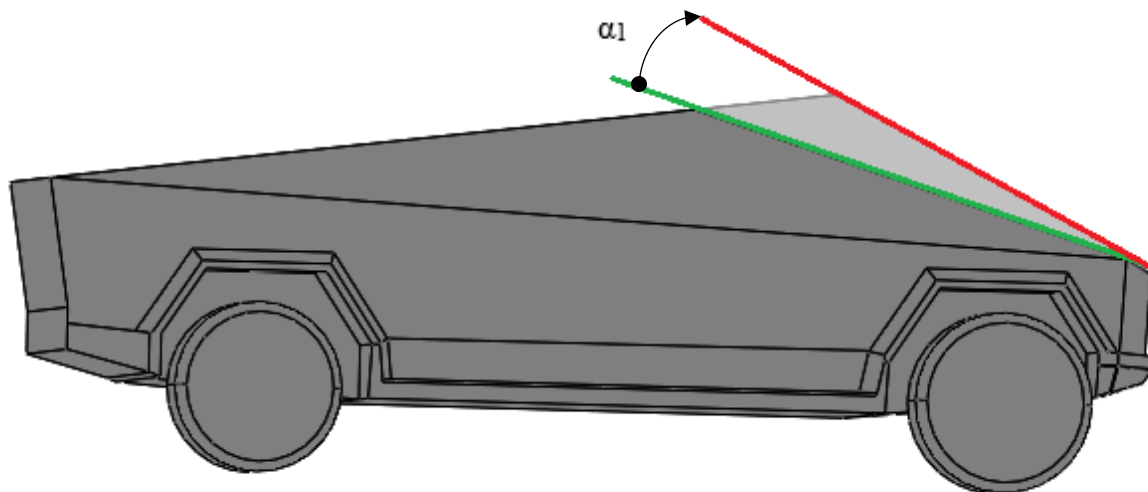
18b pav. pateikta aerodinaminio prispaudimo-kėlimo koeficiento C_L palyginimas. Iš grafiko matoma, kad nevertinant kelio įtakos, automobilis yra keliamas, o kai automobilis važiuoja keliu – spaudžiamas. Prispaudimo-kėlimo koeficientų skirtumas yra 178 %.



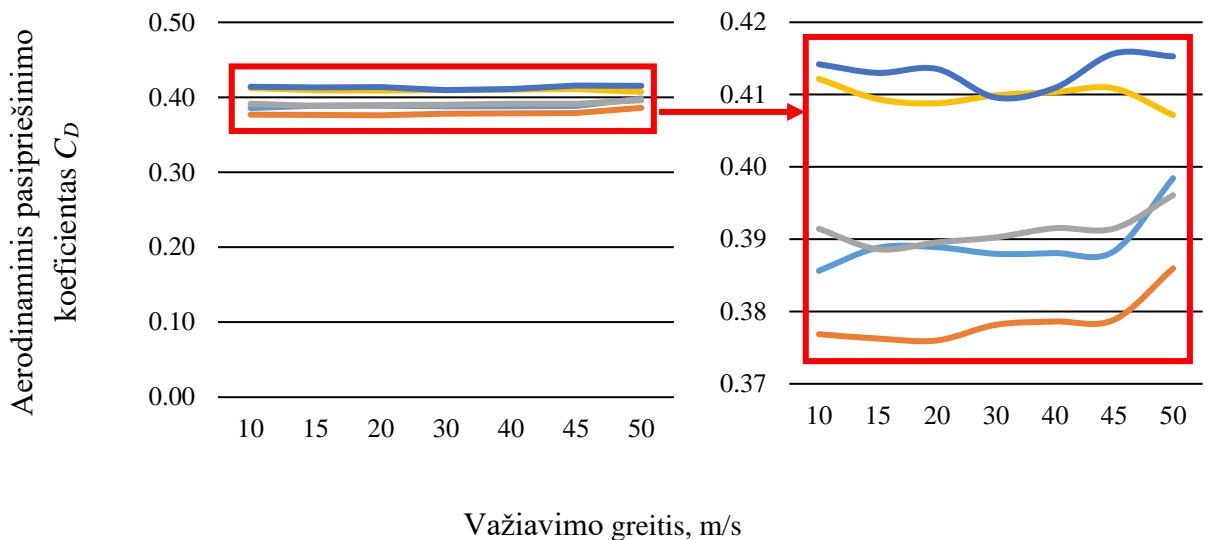
18 pav. Pasipriešinimo C_D (a) ir prispaudimo-kėlimo C_L (b) koeficientų palyginimas, kai: (—) – automobilis „pakabintas“ ore, (—) – automobilis važiuoja keliu

3.2. Priekinio stiklo posvyrio kampo įtaka

Priekinio stiklo posvyrio kampo α_1 režiiai (žr. 19 pav.) yra nuo 2 iki 10 laipsnių. Keičiamas priekinio stiklo posvyrio kampas, siekiant sužinoti kokią įtaką aerodinaminiais rodikliams jis turi. Aerodinaminio pasipriešinimo C_D ir prispaudimo-kėlimo C_L koeficientų priklausomybės priekiniam stiklui nuo važiavimo greičio ir posvyrio kampo atvaizduota 20-27 pav.

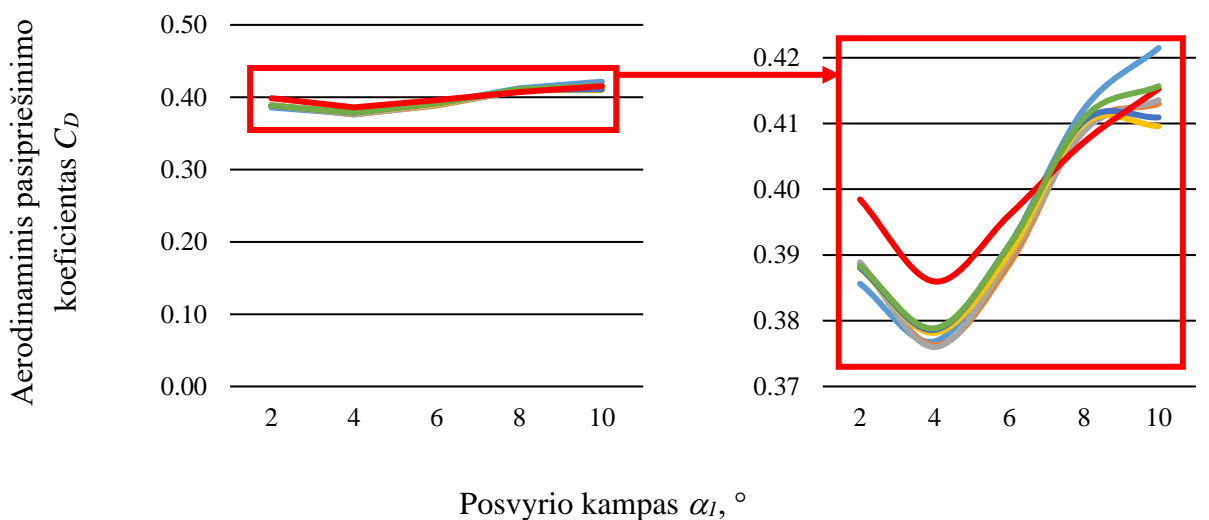


19 pav. Priekinio stiklo posvyrio kampas α_1

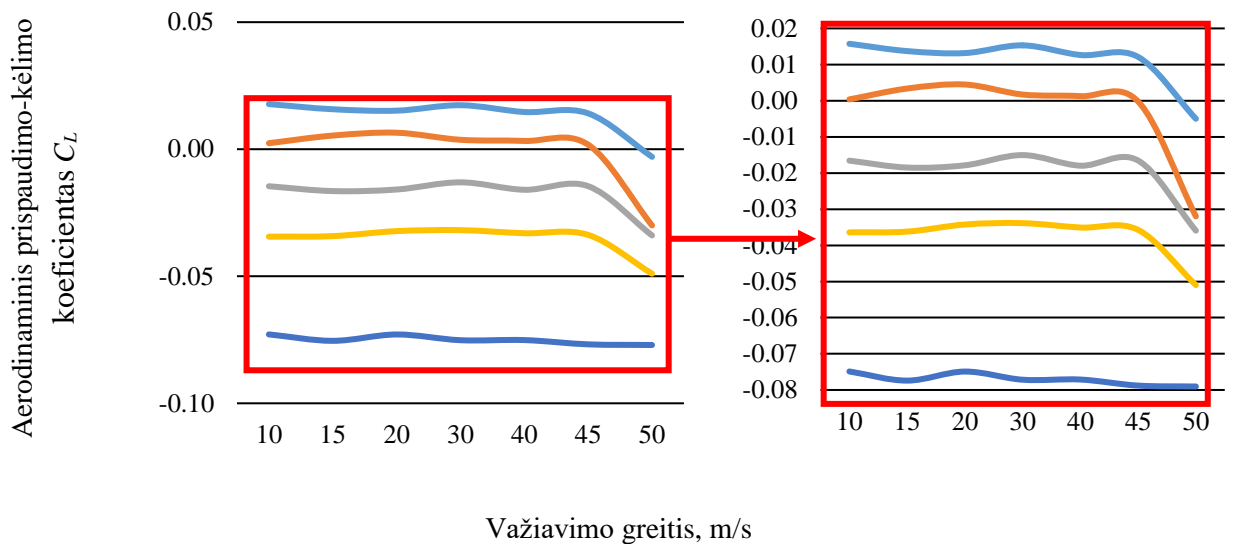


20 pav. Automobilio pasipriešinimo koeficiento C_D , nevertinant kelio įtakos, priklausomybė nuo važiavimo greičio, kai priekinio stiklo posvyrio kampas α_1 yra: (—) 2°, (—) 4°, (—) 6°, (—) 8°, (—) 10°

Automobilio pasipriešinimo koeficiento C_D priklausomybė, kai nevertinama kelio įtaka, nuo važiavimo greičio ir posvyrio kampo α_1 pateikta 20 ir 21 pav. Iš 20 pav. matyti, kad keičiant kampą α_1 ir greitį, C_D kinta nežymiai (pokyčio dydis neviršija 4 %). Didėjant važiavimo greičiui, kai keičiamas α_1 kampas, pasipriešinimo koeficientas C_D nežymiai didėja (žr. 20 pav.) Geriausia (mažiausia) C_D vertė gaunama, kai kampas α_1 yra artimas 4 laipsniams (žr. 21 pav.).

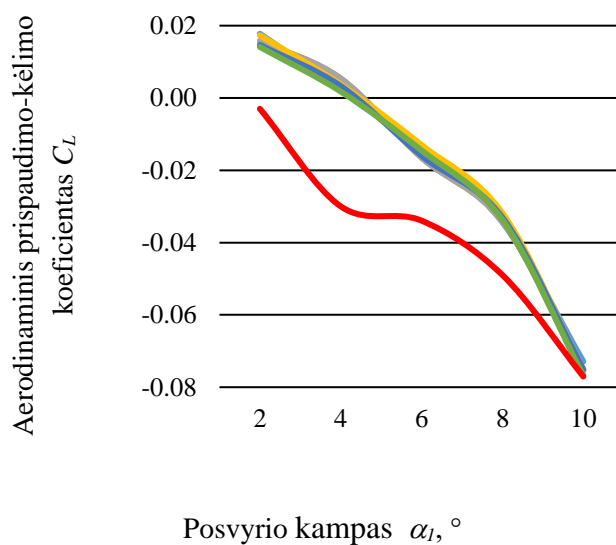


21 pav. Automobilio pasipriešinimo koeficiento C_D , nevertinant kelio įtakos, priklausomybė nuo priekinio stiklo posvyrio kampo α_1 , kai važiavimo greitis: (—) 10 m/s, (—) 15 m/s, (—) 20 m/s, (—) 30 m/s, (—) 40 m/s, (—) 45 m/s, (—) 50 m/s



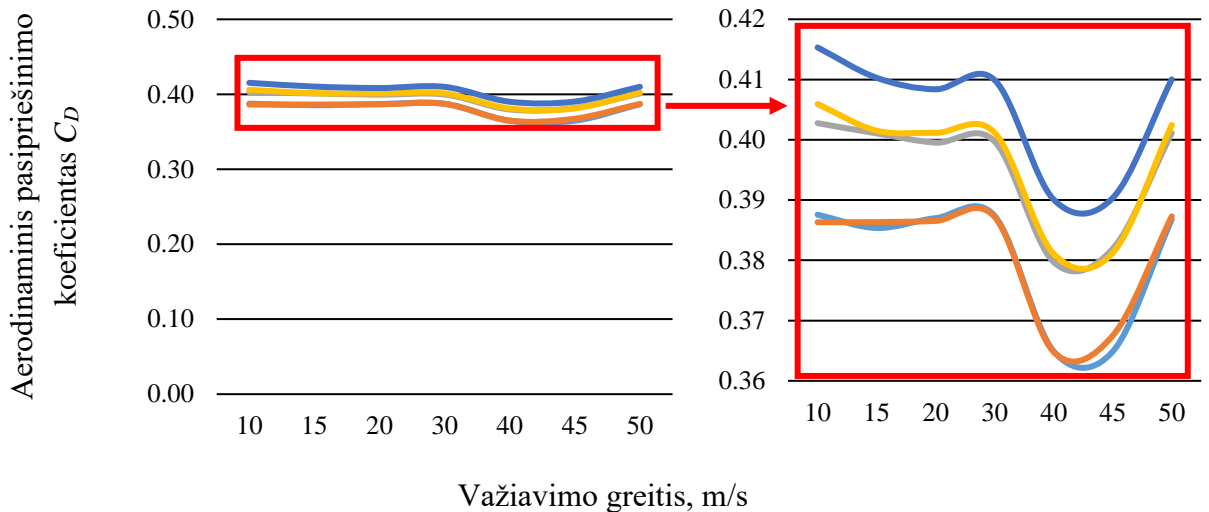
22 pav. Automobilio prispaudimo-kėlimo koeficiento C_L , nevertinant kelio įtakos, priklausomybė nuo važiavimo greičio, kai priekinio stiklo posvyrio kampas α_I yra: (—) 2° , (—) 4° , (—) 6° , (—) 8° , (—) 10°

22 pav. matoma, jog neigiamos prispaudimo-kėlimo koeficiento C_L vertės, kai nevertinama kelio įtaka, rodo, kad automobilis oro srauto yra keliamas nuo važiuojamosios dangos. Didėjant važiavimo greičiui C_L absoliutinė reikšmė tolygiai didėja. Palankiausia C_L vertė yra važiuojant nedideliais greičiais.



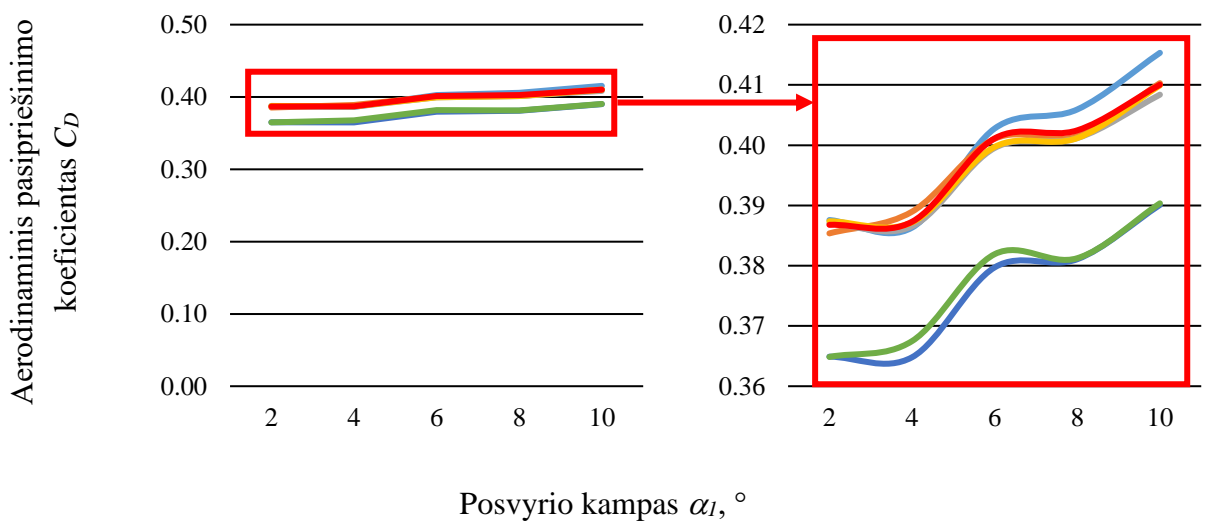
23 pav. Automobilio prispaudimo-kėlimo koeficiento C_L , nevertinant kelio įtakos, priklausomybė nuo posvyrio kampo α_I , kai važiavimo greitis: (—) 10 m/s, (—) 15 m/s, (—) 20 m/s, (—) 30 m/s, (—) 40 m/s, (—) 45 m/s, (—) 50 m/s

23 pav. matoma, jog neigiamos prispaudimo-kėlimo koeficiento C_L vertės, kai automobilis „kabo“ ore, rodo, kad automobilis oro srauto yra keliamas nuo važiuojamosios dangos. Didėjant posvyrio kampui α_I , C_L absoliutinė reikšmė netolygiai didėja. Palankiausia C_L vertė yra prie 2° . Apytiksliai ties 4° kampu C_L pradeda tolygiai mažėti.

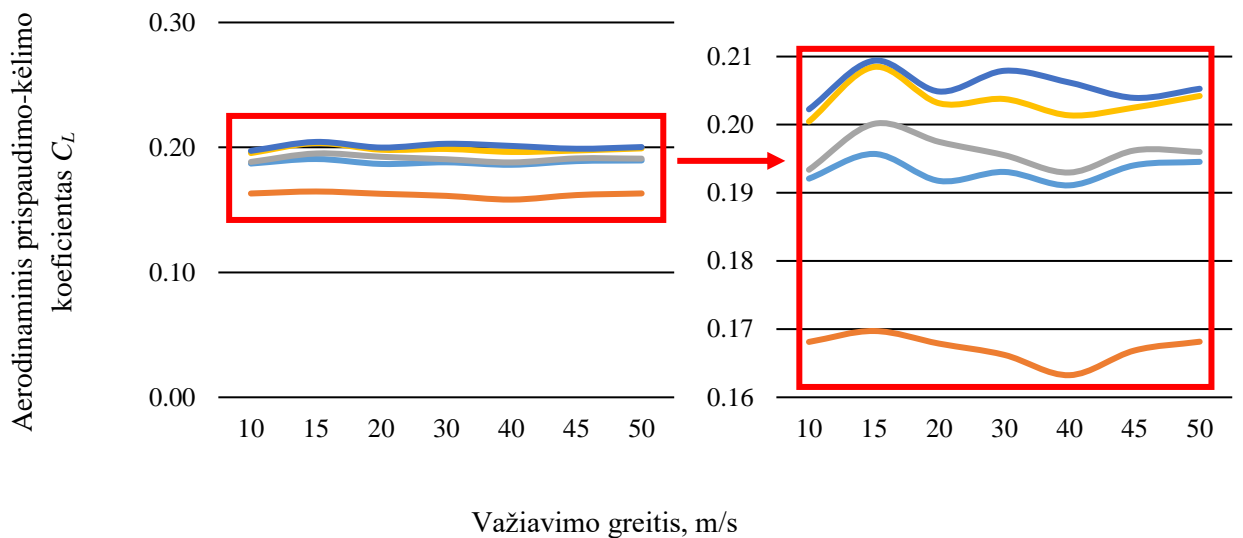


24 pav. Automobilio pasipriešinimo koeficiento C_D , įvertinant kelio įtaką, priklausomybė nuo važiavimo greičio, kai posvyrio kampas α_l yra: (—) 2° , (—) 4° , (—) 6° , (—) 8° , (—) 10°

Automobilio pasipriešinimo koeficiento C_D priklausomybė, kai vertinama kelio įtaka, nuo važiavimo greičio ir posvyrio kampo α_l pateikta 24 ir 25 pav. Iš 24 pav. matyti, kad keičiant kampą α_l ir greitį, C_D kinta nežymiai (pokyčio dydis neviršija 6 %). Didėjant važiavimo greičiui, kai keičiamas α_l kampas, pasipriešinimo koeficientas C_D nežymiai didėja (žr. 24 pav.) Geriausia (mažiausia) C_D vertė gaunama, kai kampas α_l yra artimas 2 laipsniams (žr. 25 pav.).

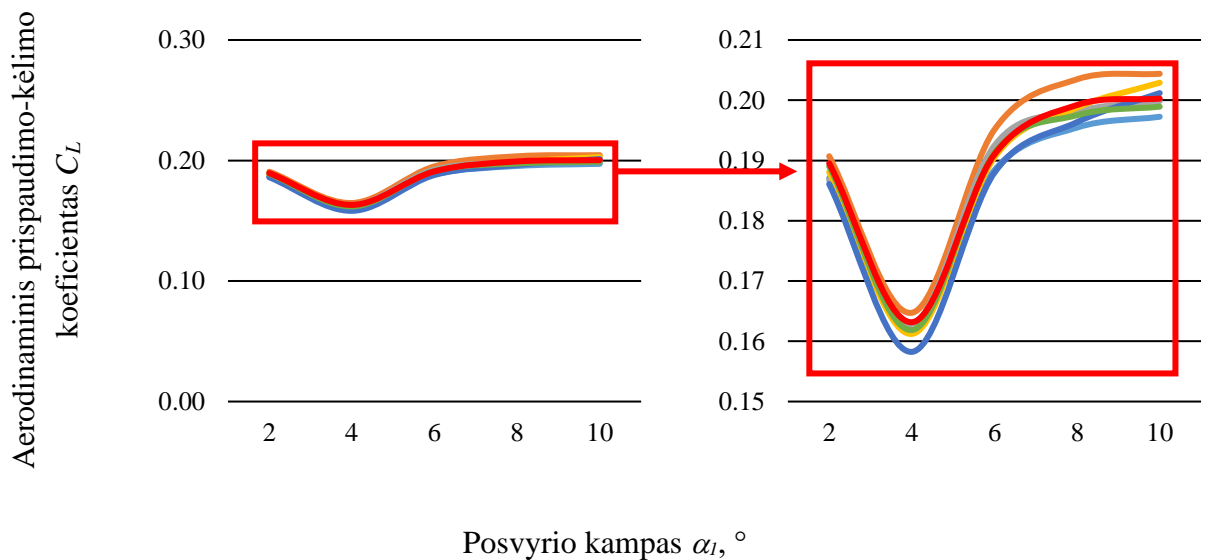


25 pav. Automobilio pasipriešinimo koeficiento C_D , įvertinant kelio įtaką, priklausomybė nuo priekinio stiklo posvyrio kampo α_l , kai važiavimo greitis: (—) 10 m/s, (—) 15 m/s, (—) 20 m/s, (—) 30 m/s, (—) 40 m/s, (—) 45 m/s, (—) 50 m/s



26 pav. Automobilio prispaudimo-kėlimo koeficiento C_L , įvertinant kelio įtaką, priklausomybė nuo važiavimo greičio, kai posvyrio kampas α_l yra: (—) 2°, (—) 4°, (—) 6°, (—) 8°, (—) 10°

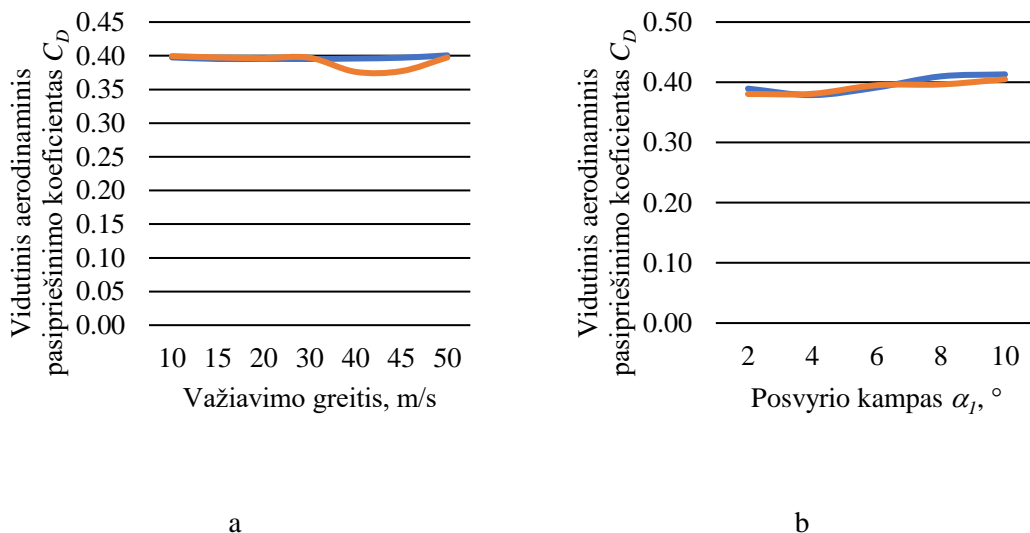
26 pav. matoma, jog teigiamos prispaudimo-kėlimo koeficiento C_L vertės, kai vertinama kelio įtaka, rodo, kad automobilis oro srauto yra spaudžiamas prie važiuojamosios dangos. Didėjant važiavimo greičiui C_L absoliutinė reikšmė praktiškai nekinta. Didėjant posvyrio kampui, C_L absoliutinė reikšmė netolygiai didėja. Palankiausia C_L vertė yra prie 4°. Didėjant kampui C_L pradeda tolygiai didėti (žr. 27 pav.).



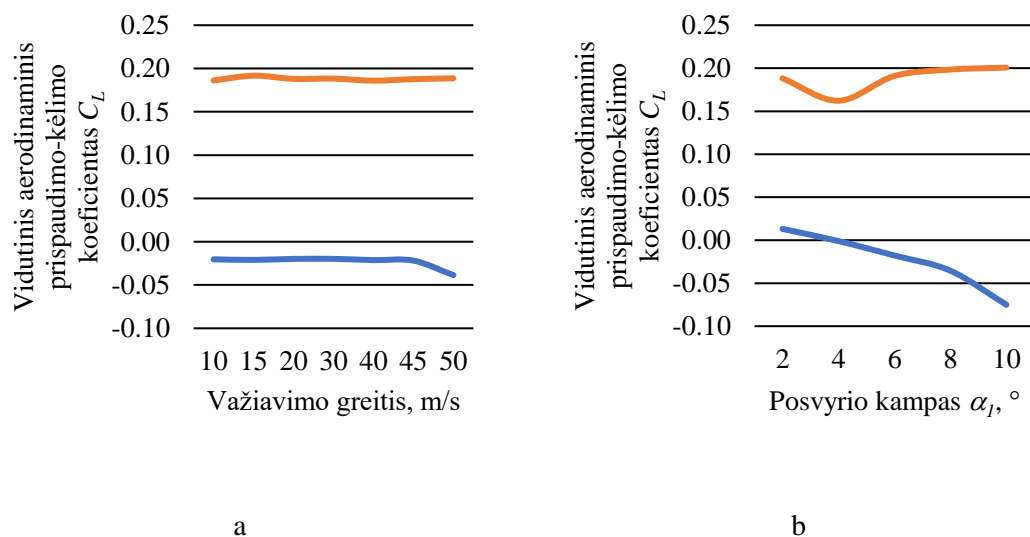
27 pav. Automobilio prispaudimo-kėlimo koeficiento C_L , įvertinant kelio įtaką, priklausomybė nuo posvyrio kampo α_l , kai važiavimo greitis: (—) 10 m/s, (—) 15 m/s, (—) 20 m/s, (—) 30 m/s, (—) 40 m/s, (—) 45 m/s, (—) 50 m/s

Kadangi šiame skyriuje daugumos grafikų C_D ir C_L priklausomybės nuo važiavimo greičio ir posvyrio kampo neturi aiškios kitimo tendencijos, buvo apskaičiuoti reikšmių vidurkiai (tikėtasi išvelgti aiškesnes kitimo tendencijas).

Iš 28a pav., matoma, kad vertinant kelio įtaką, vidutinis pasipriešinimo koeficientas C_D neženkliai pasikeičia - sumažėja. Geriausia (mažiausia) vidutinė C_D vertė, automobiliui važiuojant keliu, gaunama, kai greitis yra 40-45 m/s. Pasipriešinimo koeficientas sumažėja 5 %, kai vertinama kelio įtaka. Vidutinis pasipriešinimo koeficientas C_D keičiant posvyrio kampą α_1 kinta nežymiai. Geriausia (mažiausia) vidutinė vertė gauta esant 4 laipsnių kampui (žr. 28b pav.).



28 pav. Pasipriešinimo koeficiento C_D vidurkių priklausomybė nuo važiavimo greičio (a) ir posvyrio kampo α_1 (b), kai: (—) – automobilis „pakabintas“ ore, (—) – automobilis važiuoja keliu



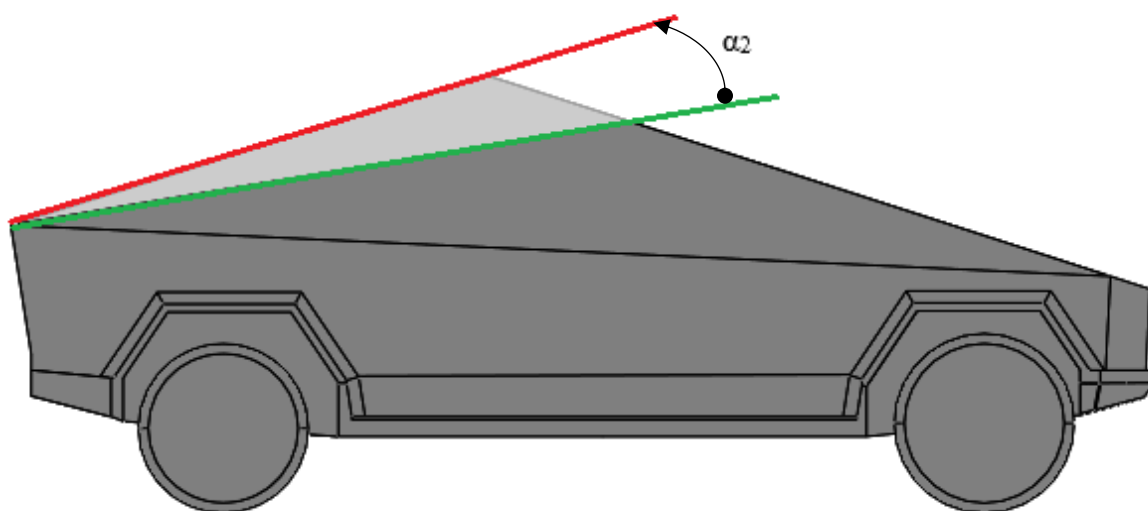
29 pav. Prispaudimo-kėlimo koeficiento C_L vidurkių priklausomybė nuo važiavimo greičio (a) ir posvyrio kampo α_1 (b), kai: (—) – automobilis „pakabintas“ ore, (—) – automobilis važiuoja keliu

29 pav. pateikta aerodinaminio prispaudimo-kėlimo koeficiento C_L vidutinių verčių palyginimas. Iš grafiko matoma, kad nevertinant kelio įtakos, automobilis yra keliamas, o kai automobilis važiuoja

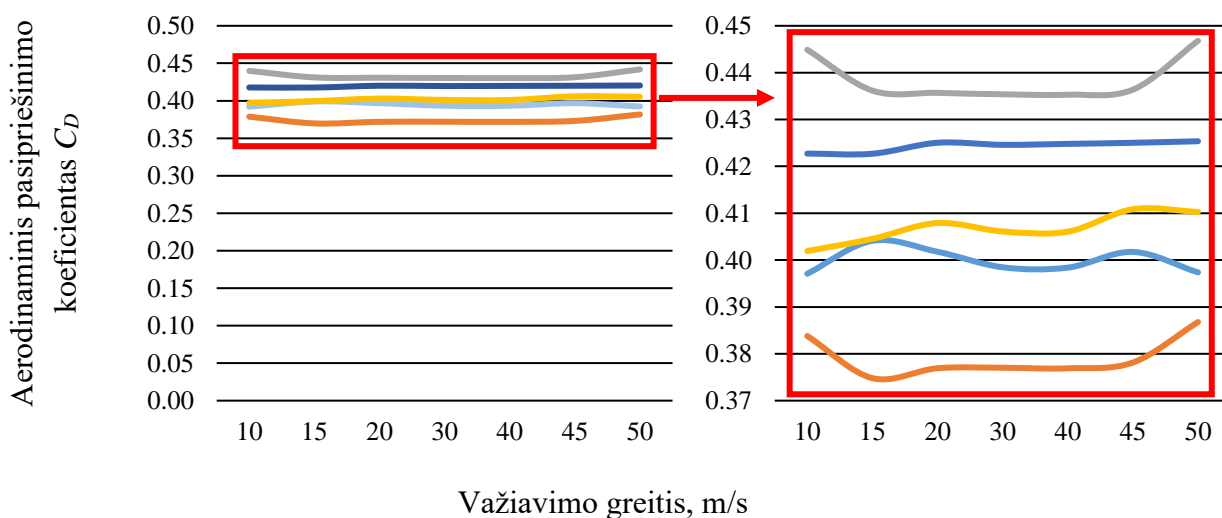
keliu – spaudžiamas. Vidutinių prispaudimo-kėlimo koeficientų skirtumas yra 178 %, reikšmė padidėja, kai automobilis važiuoja keliu. 29a pav. matoma, kad didėjant važiavimo greičiui, prispaudimo-kėlimo koeficiento vidutinė absoliutinė reikšmė praktiškai nekinta. Geriausia (didžiausia) prispaudimo-kėlimo koeficiento vidutinė vertė, kai automobilis važiuoja keliu, gaunama posvyrio kampui α_1 esant ribose nuo 6 iki 10 laipsnių (žr. 29b pav.).

3.3. Galinio stiklo posvyrio kampo įtaka

Galinio stiklo posvyrio kampo α_2 režiai (žr. 30 pav.) yra nuo 2 iki 10 laipsnių. Keičiamas galinio stiklo posvyrio kampas α_2 , siekiant sužinoti kokią įtaką aerodinaminiams rodikliams jis turi. Aerodinaminio pasipriešinimo C_D ir prispaudimo-kėlimo C_L koeficientų priklausomybės galiniam stiklui nuo važiavimo greičio ir posvyrio kampo atvaizduota grafikuose (31-38 pav.).

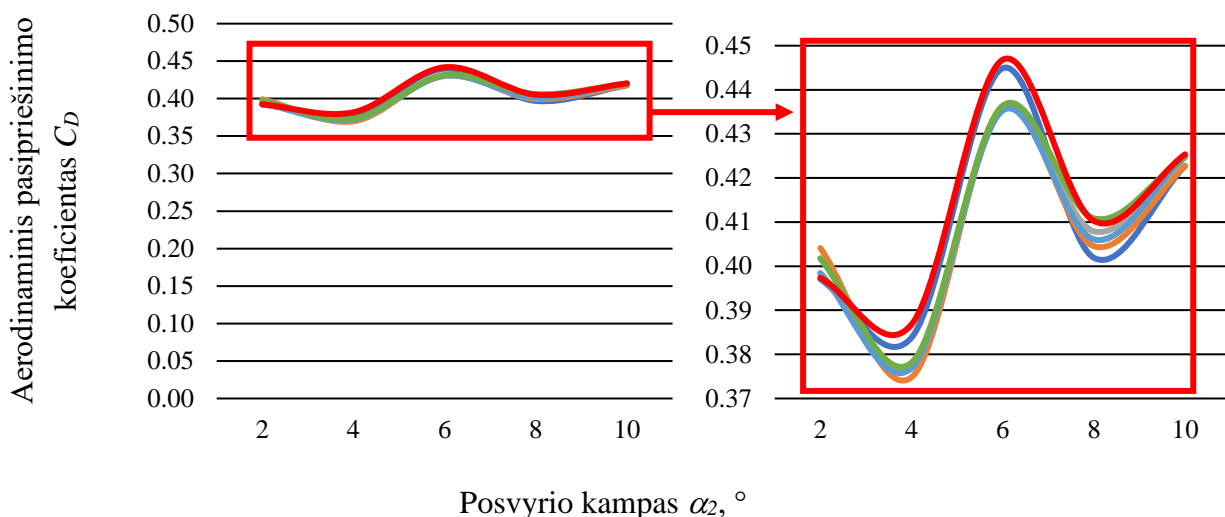


30 pav. Galinio stiklo posvyrio kampas α_2

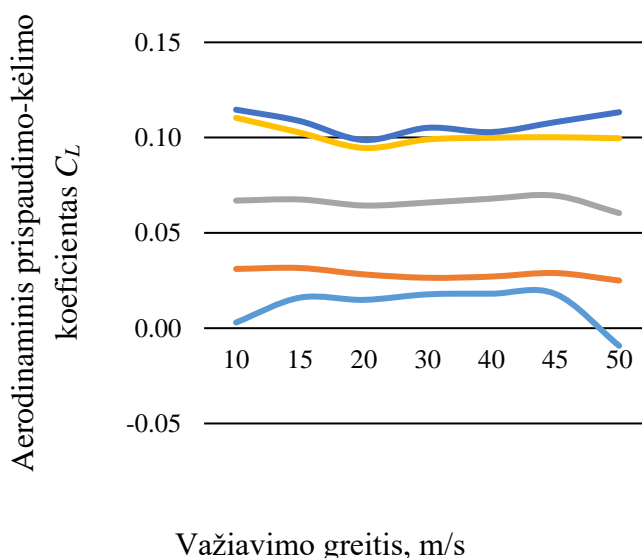


31 pav. Automobilio pasipriešinimo koeficiento C_D , nevertinant kelio įtakos, priklausomybė nuo važiavimo greičio, kai galinio stiklo posvyrio kampas α_2 yra: (—) 2° , (—) 4° , (—) 6° , (—) 8° , (—) 10°

Automobilio pasipriešinimo koeficiento C_D priklausomybė, kai automobilis „kabo“ ore, nuo važiavimo greičio ir posvyrio kampo α_2 pateikta 31 ir 32 pav. Iš 31 pav. matyti, kad keičiant kampą α_2 ir greitį, C_D kinta nežymiai (pokyčio dydis neviršija 4 %). Didėjant važiavimo greičiui, kai keičiamas α_2 kampas, pasipriešinimo koeficientas C_D nežymiai didėja (žr. 31 pav.) Geriausia (mažiausia) C_D vertė gaunama, kai kampas α_2 yra artimas 4 laipsniams, o didžiausia, kai kampas artimas 6 laipsniams (žr. 32 pav.).

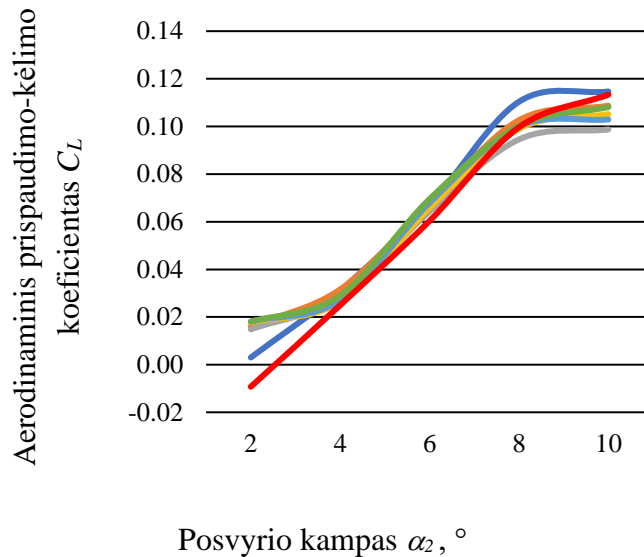


32 pav. Automobilio pasipriešinimo koeficiento C_D , nevertinant kelio įtakos, priklausomybė nuo galinio stiklo posvyrio kampo α_2 , kai važiavimo greitis: (—) 10 m/s, (—) 15 m/s, (—) 20 m/s, (—) 30 m/s, (—) 40 m/s, (—) 45 m/s, (—) 50 m/s



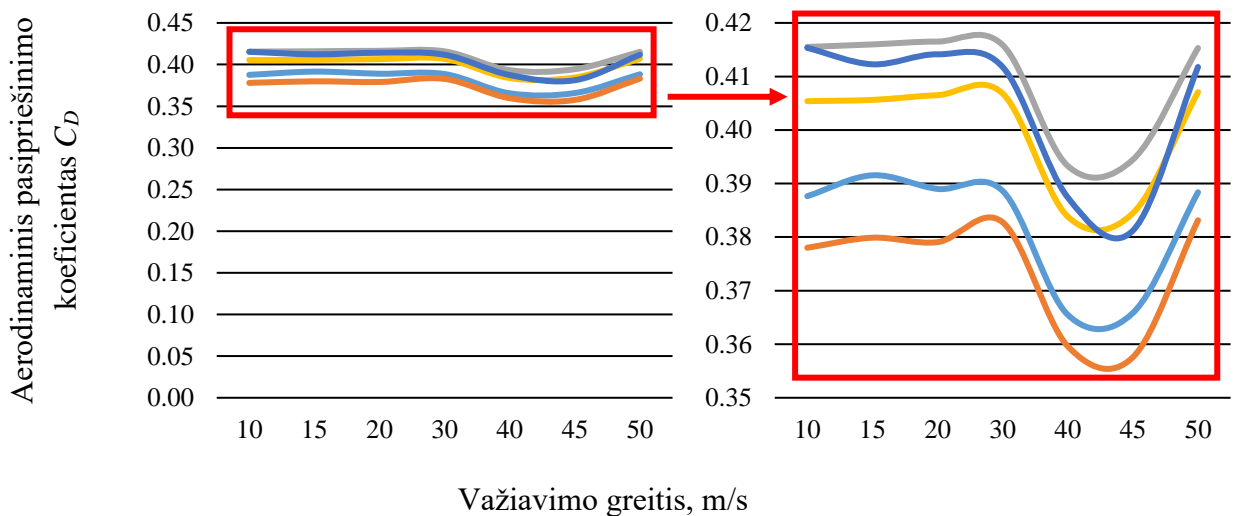
33 pav. Automobilio prispaudimo-kėlimo koeficiento C_L , nevertinant kelio įtakos, priklausomybė nuo važiavimo greičio, kai galinio stiklo posvyrio kampas α_2 yra: (—) 2°, (—) 4°, (—) 6°, (—) 8°, (—) 10°

33 pav. matoma, jog teigiamos prispaudimo-kėlimo koeficiento C_L vertės rodo, kad automobilis oro srauto yra spaudžiamas prie važiuojamosios dangos. Didėjant važiavimo greičiui C_L absoliutinė reikšmė tolygiai didėja. Palankiausia C_L vertė yra važiuojant nedideliais greičiais.



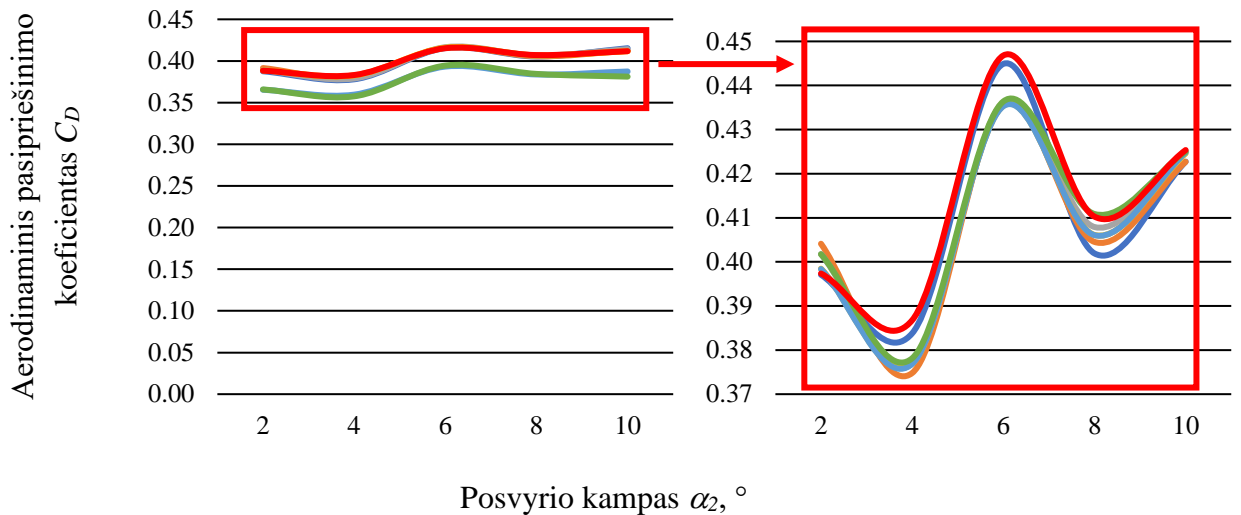
34 pav. Automobilio prispaudimo-kėlimo koeficiento C_L , nevertinant kelio įtakos, priklausomybė nuo galinio stiklo posvyrio kampo α_2 , kai važiavimo greitis: (—) 10 m/s, (—) 15 m/s, (—) 20 m/s, (—) 30 m/s, (—) 40 m/s, (—) 45 m/s, (—) 50 m/s

34 pav. matoma, jog teigiamos prispaudimo-kėlimo koeficiento C_L vertės, kai nevertinama kelio įtaka, rodo, kad automobilis oro srauto yra spaudžiamas prie važiuojamosios dangos. Didėjant posvyrio kampui α_2 C_L absoliutinė reikšmė tolygiai kinta. Palankiausia C_L vertė yra prie 10° .

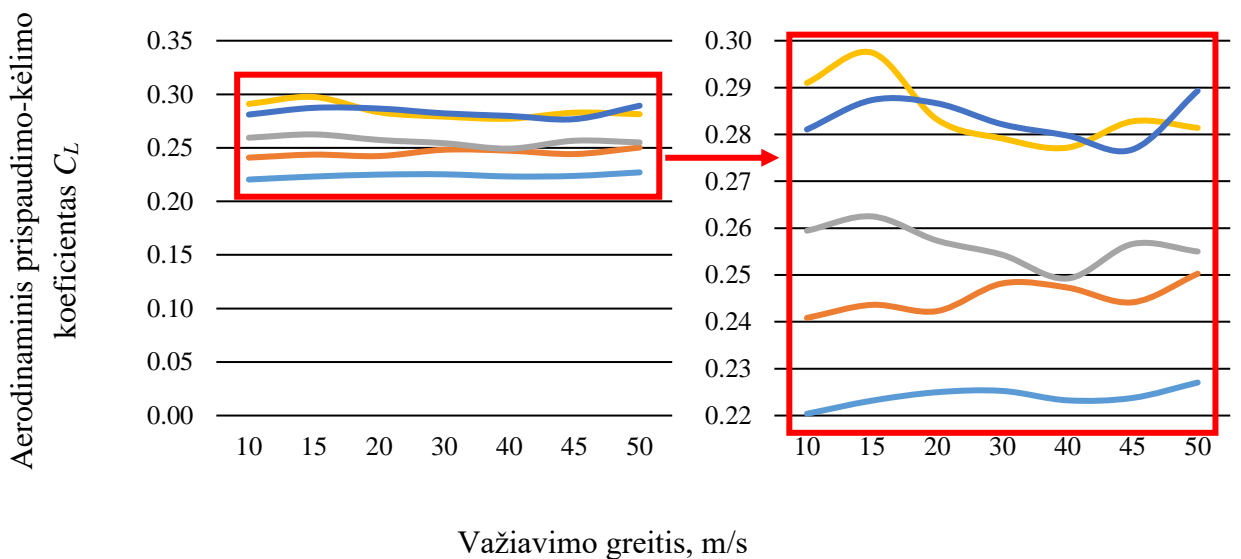


35 pav. Automobilio pasipriešinimo koeficiento C_D , įvertinant kelio įtakos, priklausomybė nuo važiavimo greičio, kai galinio stiklo posvyrio kampas α_2 yra: (—) 2° , (—) 4° , (—) 6° , (—) 8° , (—) 10°

Automobilio pasipriešinimo koeficiento C_D priklausomybė, kai vertinama kelio įtaka, nuo važiavimo greičio ir posvyrio kampo α_2 pateikta 35 ir 36 pav. Iš 35 pav. matyti, kad keičiant kampą α_2 ir greitį, C_D kinta nežymiai (pokyčio dydis 6,7 %). Didėjant važiavimo greičiui, kai keičiamas α_2 kampas, pasipriešinimo koeficientas C_D nežymiai didėja (žr. 35 pav.). Geriausia (mažiausia) C_D vertė gaunama, kai kampas α_2 yra artimas 4 laipsniams, o didžiausia, kai kampas artimas 6 laipsniams (žr. 36 pav.).

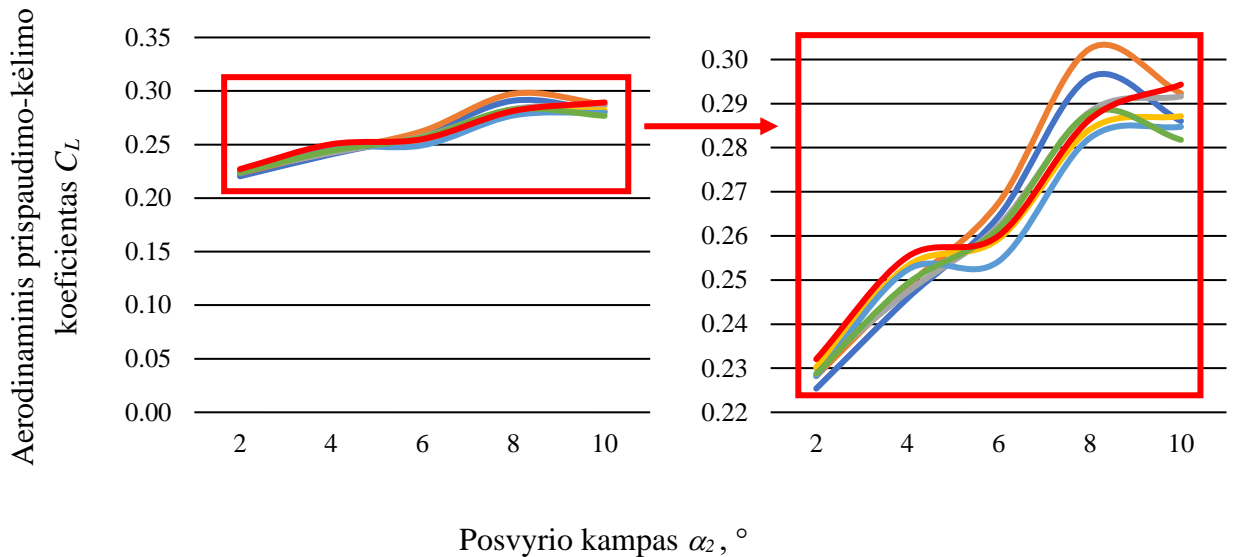


36 pav. Automobilio pasipriešinimo koeficiento C_D , įvertinant kelio įtaką, priklausomybė nuo galinio stiklo posvyrio kampo α_2 , kai važiavimo greitis: (—) 10 m/s, (—) 15 m/s, (—) 20 m/s, (—) 30 m/s, (—) 40 m/s, (—) 45 m/s, (—) 50 m/s



37 pav. Automobilio prispaudimo-kėlimo koeficiento C_L , įvertinant kelio įtaką, priklausomybė nuo važiavimo greičio, kai galinio stiklo posvyrio kampas α_2 yra: (—) 2° , (—) 4° , (—) 6° , (—) 8° , (—) 10°

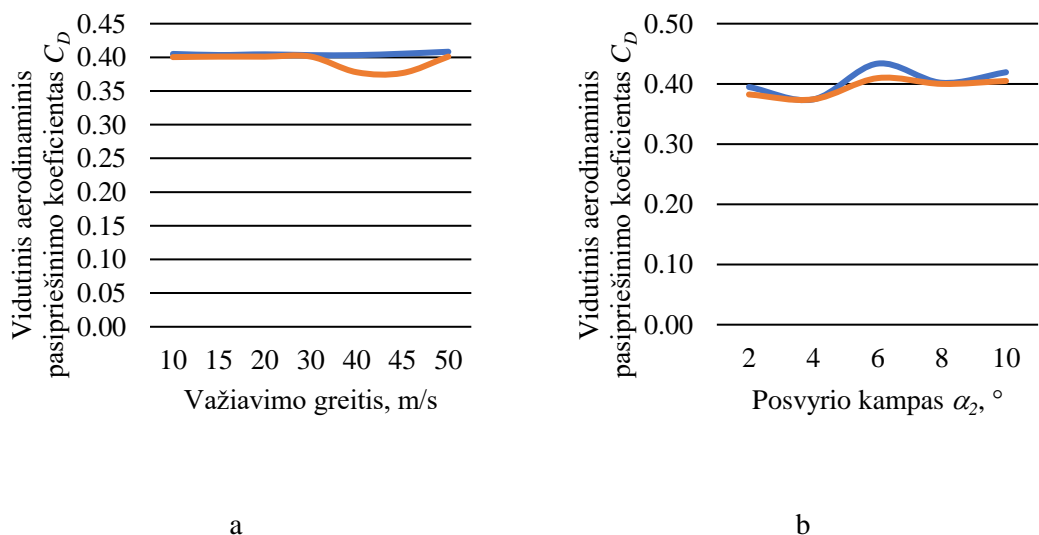
37 pav. matoma, jog teigiamos prispaudimo-kėlimo koeficiento C_L vertės, kai vertinama kelio įtaka, rodo, kad automobilis oro srauto yra spaudžiamas prie važiuojamosios dangos. Didėjant važiavimo greičiui C_L absoliutinė reikšmė praktiškai nekinta. Didėjant posvyrio kampui α_2 , C_L absoliutinė reikšmė tolygiai didėja. Palankiausia C_L vertė yra apytiksliai prie 8° (žr. 38 pav.).



38 pav. Automobilio prispaudimo-kėlimo koeficiento C_L , įvertinant kelio įtaką, priklausomybė nuo galinio stiklo posvyrio kampo α_2 , kai važiavimo greitis: (—) 10 m/s, (—) 15 m/s, (—) 20 m/s, (—) 30 m/s, (—) 40 m/s, (—) 45 m/s, (—) 50 m/s

Analogiškai kaip ir 3.2 poskyryje, toliau aptarsime C_D ir C_L vidutinių verčių kitimo tendencijas.

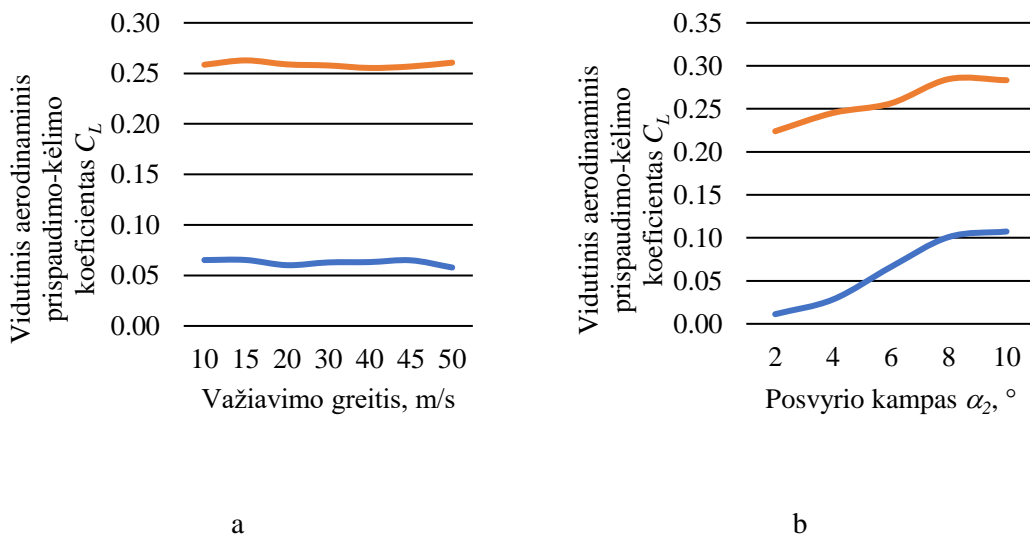
39a pav. grafikuose matoma, kad vertinant kelio įtaką, vidutinis pasipriešinimo koeficientas C_D neženkiai pasikeičia - sumažėja. Geriausia (mažiausia) vidutinė C_D vertė, automobiliui važiuojant keliu, gaunama, kai greitis yra 40-45 m/s. Vidutinis pasipriešinimo koeficientas sumažėja apytiksliai 6 %, kai vertinama kelio įtaka. Vidutinis pasipriešinimo koeficientas C_D keičiant posvyrio kampą α_2 kinta nežymiai. Geriausia (mažiausia) vertė ties 4 laipsnių kampu (žr. 39b pav.).



39 pav. Pasipriešinimo koeficiento C_D vidurkių priklausomybė nuo važiavimo greičio (a) ir posvyrio kampo α_2 (b), kai: (—) – automobilis „pakabintas“ ore, (—) – automobilis važiuoja keliu

40 pav. pateikta aerodinaminio prispaudimo-kėlimo koeficiento C_L vidutinių verčių palyginimas. Iš grafiko matoma, kad nevertinant kelio įtakos, automobilis yra keliamas, o kai automobilis važiuoja keliu – spaudžiamas. Modeliuojant „Tesla Cybertruck“ važiavimą keliu vidutinių prispaudimo-

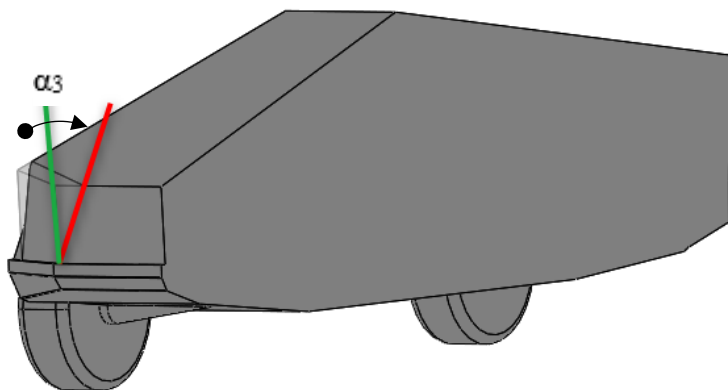
kėlimo koeficientų vertės padidėja 124,7 %, lyginant su duomenimis, gautais modelyje su ore „pakabintu“ automobiliu. 40a pav. matoma, kad didėjant važiavimo greičiui, prispaudimo-kėlimo koeficiento vidutinė absoliutinė reikšmė praktiškai nekinta. Geriausia (didžiausia) prispaudimo-kėlimo koeficiento C_L vidutinė vertė, kai automobilis važiuoja keliu, gaunama maždaug ties 8 laipsnių posvyrio kampu α_2 (žr. 40b pav.).



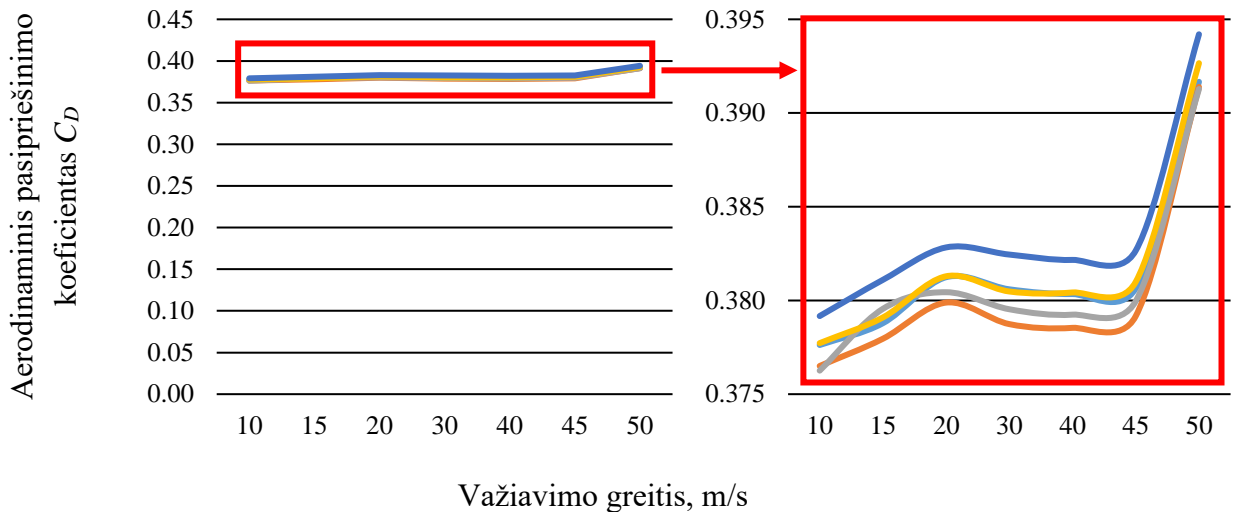
40 pav. Prispaudimo-kėlimo koeficiento C_L vidurkių priklausomybė nuo važiavimo greičio (a) ir posvyrio kampo α_2 (b), kai: (—) – automobilis „pakabintas“ ore, (—) – automobilis važiuoja keliu

3.4. Priekinės lempos posvyrio kampo įtaka

Priekinės lempos posvyrio kampo α_3 režiai (žr. 41 pav.) yra nuo 2 iki 10 laipsnių. Keičiamas priekinės lempos posvyrio kampas, siekiant sužinoti kokią įtaką aerodinaminiams rodikliams jis turi. Aerodinaminio pasipriešinimo C_D ir prispaudimo-kėlimo C_L koeficientų priklausomybės priekinei lempai nuo važiavimo greičio ir posvyrio kampo α_3 atvaizduota grafikuose (42-49 pav.).

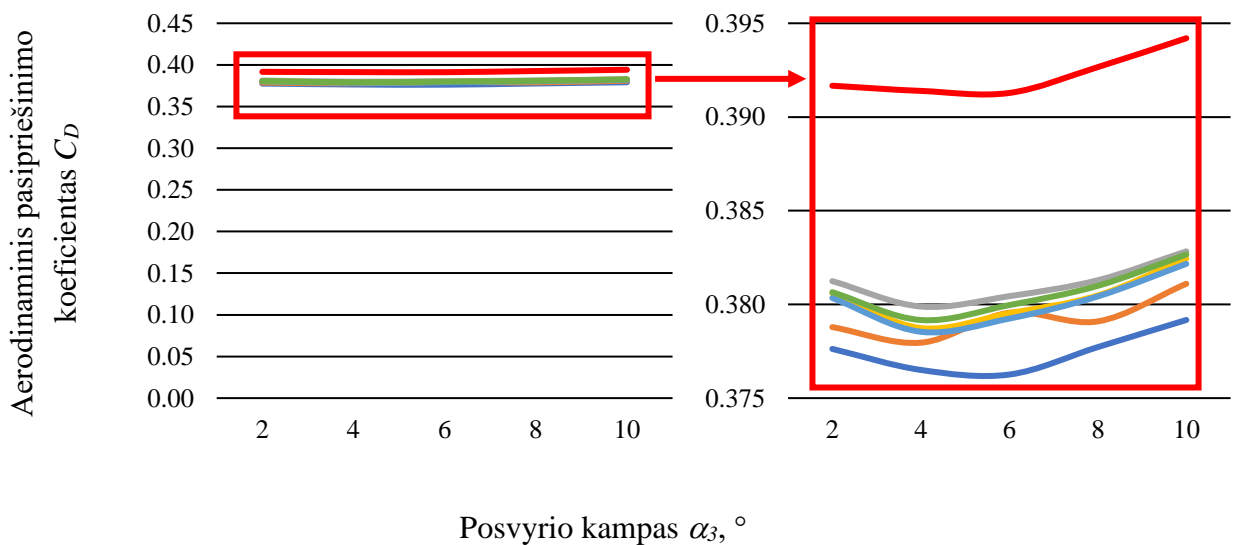


41 pav. Priekinės lempos posvyrio kampas α_3

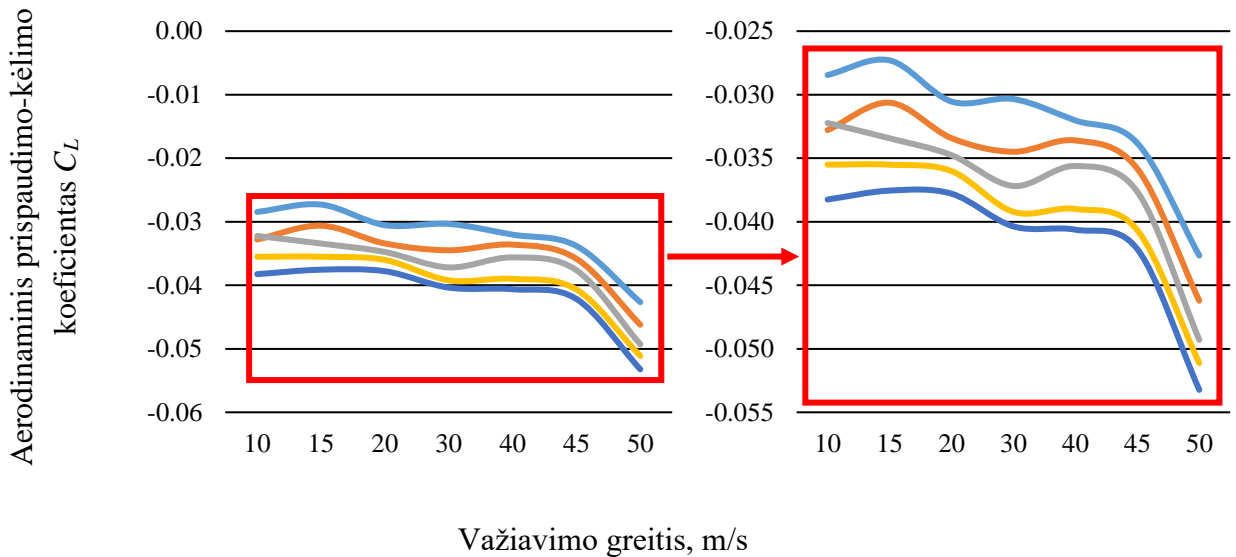


42 pav. Automobilio pasipriešinimo koeficiento C_D , nevertinant kelio įtakos, priklausomybė nuo važiavimo greičio, kai priekinės lemos posvyrio kampas α_3 yra: (—) 2° , (—) 4° , (—) 6° , (—) 8° , (—) 10°

Automobilio pasipriešinimo koeficiento C_D priklausomybė nuo važiavimo greičio ir posvyrio kampo α_3 , kai nevertinama kelio įtaka, pateikta 42 ir 43 pav. Iš 42 pav. matyti, kad keičiant kampą α_3 ir greitį, C_D kinta nežymiai (pokyčio dydis neviršija 5 %). Didėjant važiavimo greičiui, kai keičiamas α_3 kampas, pasipriešinimo koeficientas C_D nežymiai didėja (žr. 42 pav.) Geriausia (mažiausia) C_D vertė gaunama, kai kampas α_3 yra artimas 6 laipsniams, o didžiausia, kai kampas artimas 10 laipsnių (žr. 43 pav.).

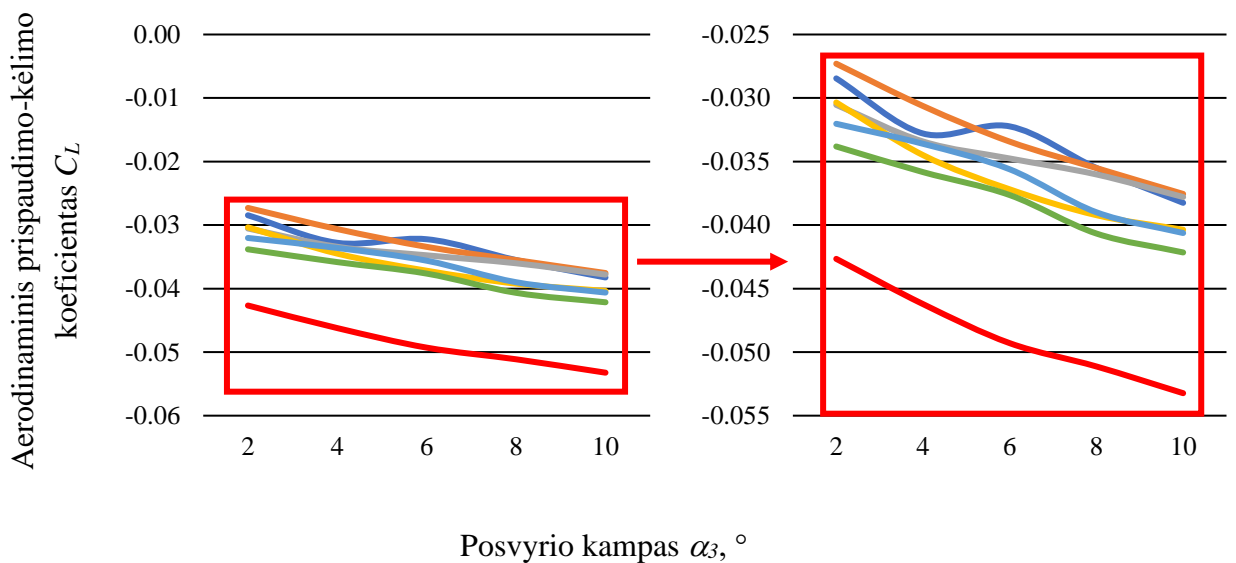


43 pav. Automobilio pasipriešinimo koeficiento C_D , nevertinant kelio įtakos, priklausomybė nuo priekinės lemos posvyrio kampo α_3 , kai važiavimo greitis: (—) 10 m/s, (—) 15 m/s, (—) 20 m/s, (—) 30 m/s, (—) 40 m/s, (—) 45 m/s, (—) 50 m/s



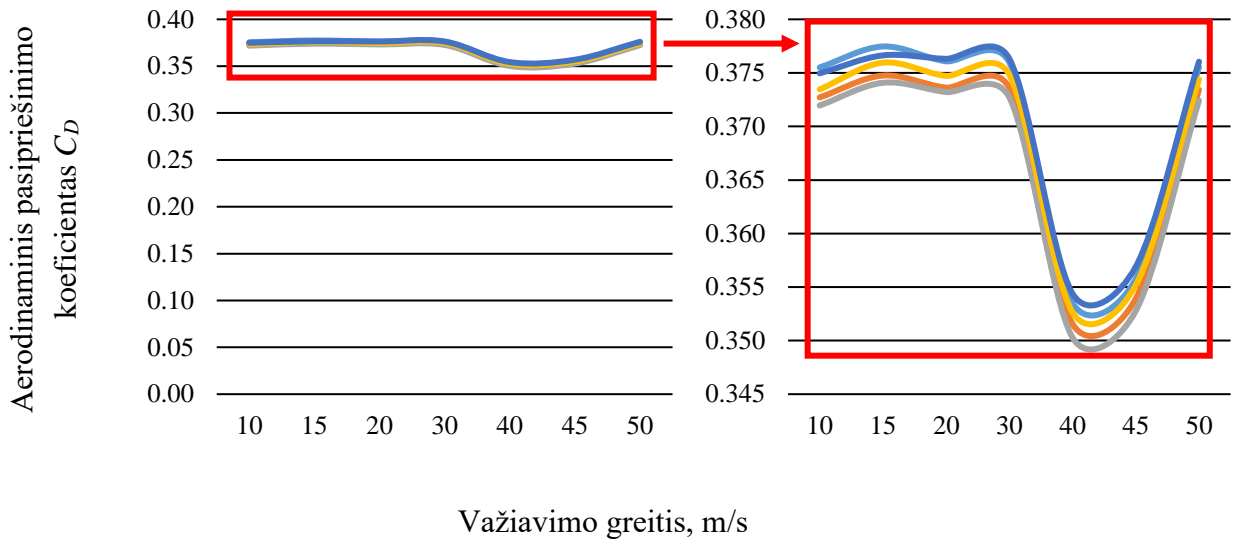
44 pav. Automobilio prispaudimo-kėlimo koeficiento C_L , nevertinant kelio įtakos, priklausomybė nuo važiavimo greičio, kai priekinės lempos posvyrio kampas α_3 yra: (—) 2° , (—) 4° , (—) 6° , (—) 8° , (—) 10°

44 pav. matoma, jog neigiamos prispaudimo-kėlimo koeficiento C_L vertės, kai nevertinama kelio įtaka, rodo, kad automobilis oro srauto yra keliamas nuo važiuojamosios dangos. Didėjant važiavimo greičiui C_L absoliutinė reikšmė tolygiai didėja. Palankiausia C_L vertė yra važiuojant nedideliais greičiais.



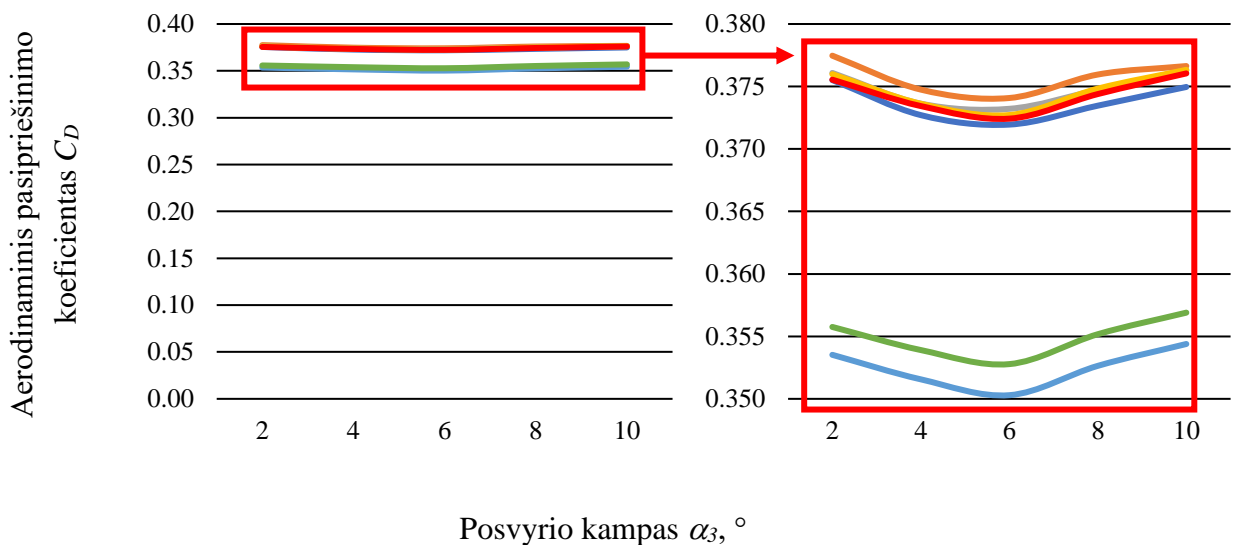
45 pav. Automobilio prispaudimo-kėlimo koeficiento C_L , nevertinant kelio įtakos, priklausomybė nuo priekinės lempos posvyrio kampo α_3 , kai važiavimo greitis: (—) 10 m/s, (—) 15 m/s, (—) 20 m/s, (—) 30 m/s, (—) 40 m/s, (—) 45 m/s, (—) 50 m/s

45 pav. matoma, jog neigiamos prispaudimo-kėlimo koeficiento C_L vertės, kai nevertinama kelio įtaka, rodo, kad automobilis oro srauto yra keliamas nuo važiuojamosios dangos. Didėjant posvyrio kampui α_3 , C_L absoliutinė reikšmė netolygiai didėja. Palankiausia C_L vertė yra prie 2° . Apytiksliai nuo 2° kampo C_L pradeda tolygiai mažėti.

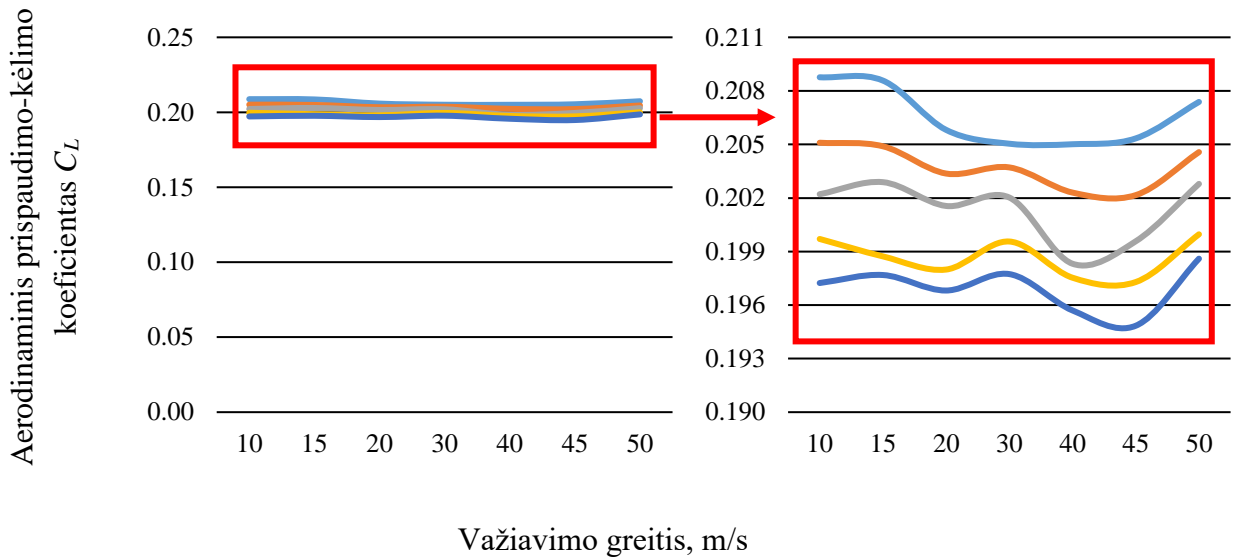


46 pav. Automobilio pasipriešinimo koeficiento C_D , įvertinant kelio įtaką, priklausomybė nuo važiavimo greičio, kai priekinės lempos posvyrio kampas α_3 yra: (—) 2° , (—) 4° , (—) 6° , (—) 8° , (—) 10°

Automobilio pasipriešinimo koeficiento C_D priklausomybė nuo važiavimo greičio ir posvyrio kampo α_3 , kai vertinama kelio įtaka, pateikta 46 ir 47 pav. Iš 46 pav. matyti, kad keičiant kampą α_3 ir greitį, C_D kinta nežymiai (pokyčio dydis neviršija 6 %). Didėjant važiavimo greičiui, kai keičiamas α_3 kampas, pasipriešinimo koeficientas C_D nežymiai didėja (žr. 46 pav.) Geriausia (mažiausia) C_D vertė gaunama, kai kampas α_3 yra artimas 6 laipsniams (žr. 47 pav.).

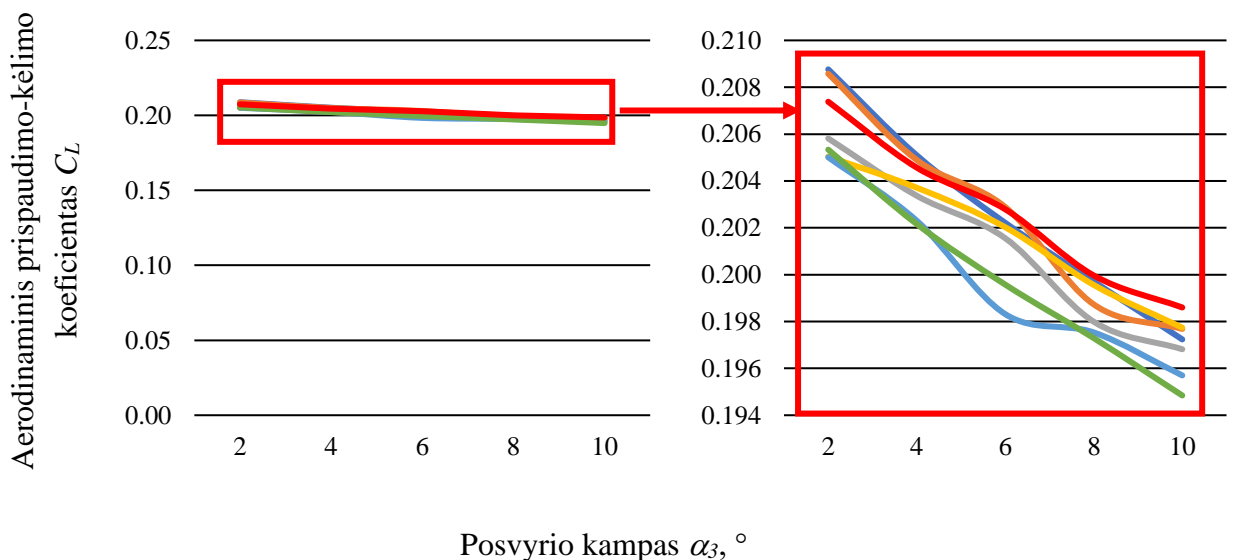


47 pav. Automobilio pasipriešinimo koeficiento C_D , įvertinant kelio įtaką, priklausomybė nuo priekinės lempos posvyrio kampo α_3 , kai važiavimo greitis: (—) 10 m/s, (—) 15 m/s, (—) 20 m/s, (—) 30 m/s, (—) 40 m/s, (—) 45 m/s, (—) 50 m/s



48 pav. Automobilio prispaudimo-kėlimo koeficiento C_L , įvertinant kelio įtaką, priklausomybė nuo priekinės lempos važiavimo greičio, kai posvyrio kampas α_3 yra: (—) 2° , (—) 4° , (—) 6° , (—) 8° , (—) 10°

48 pav. matoma, jog teigiamos prispaudimo-kėlimo koeficiento C_L vertės, kai vertinama kelio įtaka, rodo, kad automobilis oro srauto yra spaudžiamas prie važiuojamosios dangos. Didėjant važiavimo greičiui C_L absoliutinė reikšmė praktiškai nekinta. Didėjant posvyrio kampui α_3 , C_L absoliutinė reikšmė tolygiai mažėja. Palankiausia C_L vertė yra apytiksliai prie 2° (žr. 49 pav.).

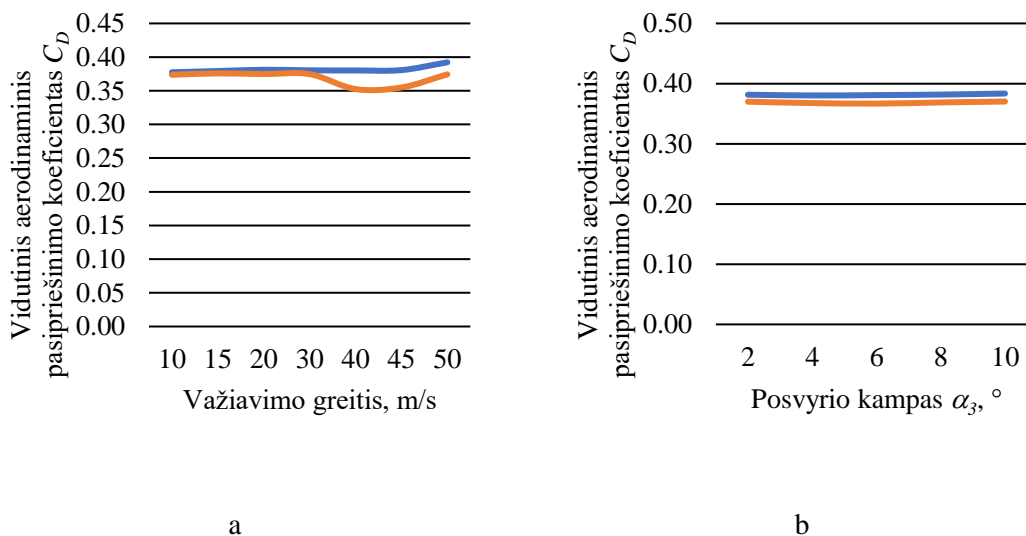


49 pav. Automobilio prispaudimo-kėlimo koeficiento C_L , įvertinant kelio įtaką, priklausomybė nuo priekinės lempos posvyrio kampo α_3 , kai važiavimo greitis: (—) 10 m/s, (—) 15 m/s, (—) 20 m/s, (—) 30 m/s, (—) 40 m/s, (—) 45 m/s, (—) 50 m/s

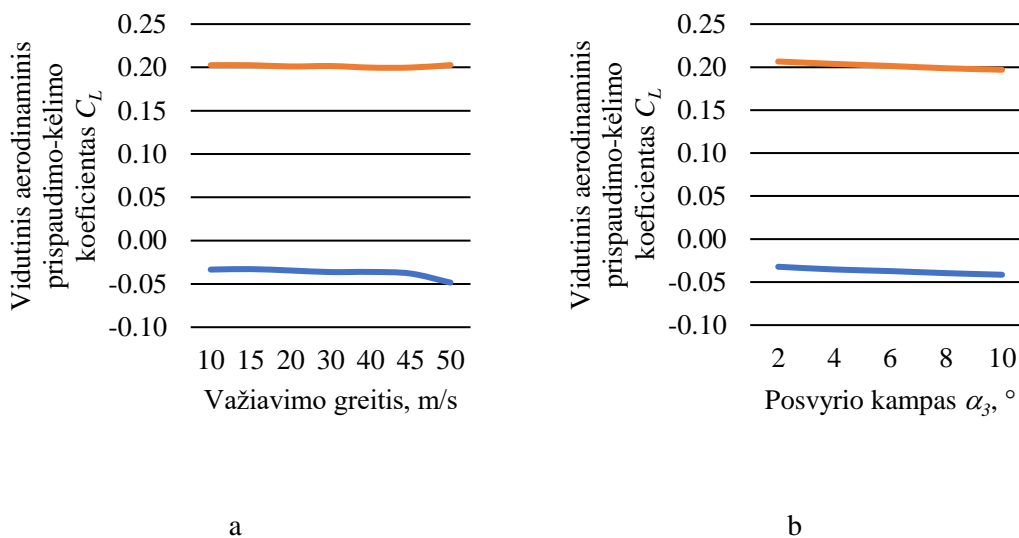
Kadangi šiame skyriuje daugumos grafikų C_D ir C_L priklausomybės nuo važiavimo greičio ir posvyrio kampo neturi aiškios tendencijos, vėl buvo apskaičiuoti C_D ir C_L reikšmių vidurkiai.

50a pav. grafikuose matoma, kad vertinant kelio įtaką, vidutinis pasipriešinimo koeficientas C_D neženkliai pasikeičia - sumažėja. Geriausia (mažiausia) vidutinė C_D vertė, automobiliui važiuojant

keliu, gaunama, kai greitis yra 40-45 m/s. Pasipriešinimo koeficientas sumažėja apytiksliai 6 %, kai vertinama kelio įtaka. Vidutinis pasipriešinimo koeficientas C_D keičiant posvyrio kampą α_3 praktiškai nekinta (žr. 50b pav.).



50 pav. Pasipriešinimo koeficiento C_D vidurkių priklausomybė nuo važiavimo greičio (a) ir posvyrio kampo α_3 (b), kai: (—) – automobilis „pakabintas“ ore, (—) – automobilis važiuoja keliu



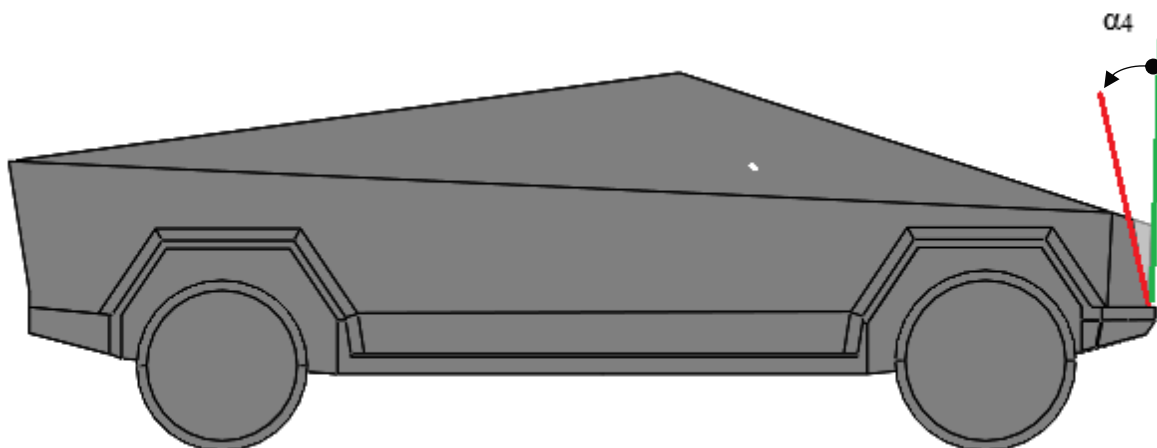
51 pav. Prispaudimo-kėlimo koeficiento C_L vidurkių priklausomybė nuo važiavimo greičio (a) ir posvyrio kampo α_3 (b), kai: (—) – automobilis „pakabintas“ ore, (—) – automobilis važiuoja keliu

51 pav. pateikta aerodinaminio prispaudimo-kėlimo koeficiento C_L vidutinių verčių palyginimas. Iš grafiko matoma, kad nevertinant kelio įtakos, automobilis yra keliamas, o kai automobilis važiuoja keliu – spaudžiamas. Vidutinės prispaudimo-kėlimo koeficiento C_L vertės, kai naudojamas automobilio važiuojančio keliu modelis, padidėja 152,7 %, lyginat su vidutinėmis C_L vertėmis, gautomis modelyje su ore „pakabintu“ automobiliu. 51a pav. matoma, kad didėjant važiavimo

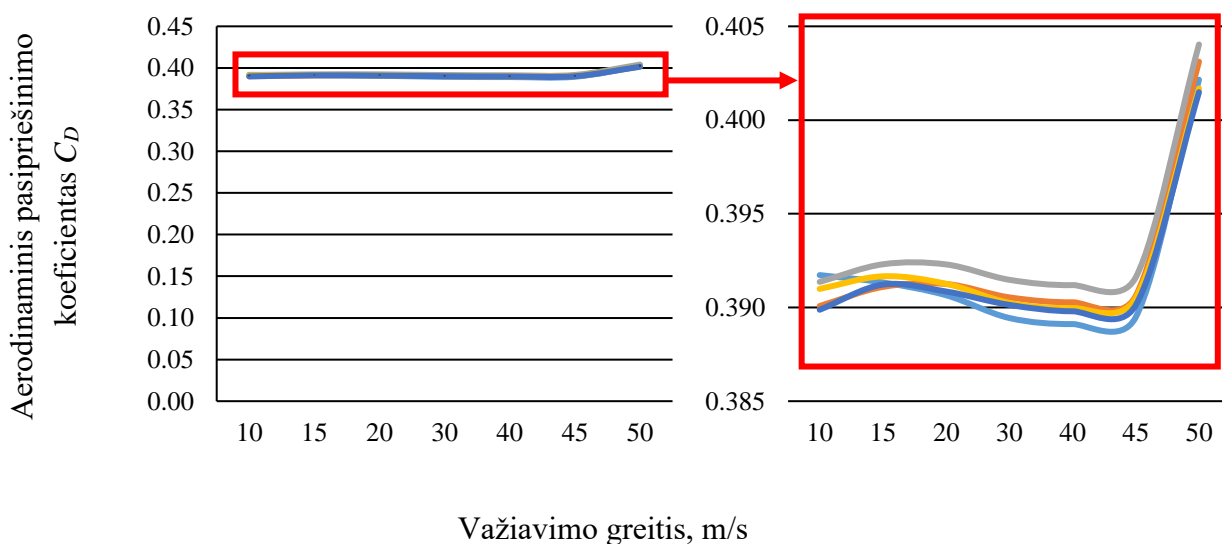
greičiui, prispaudimo-kėlimo koeficiento vidutinė absoliutinė reikšmė praktiškai nekinta. Geriausia (didžiausia) prispaudimo-kėlimo koeficiento C_L vidutinė vertė, kai automobilis važiuoja keliu, gaunama maždaug ties 2 laipsnių posvyrio kampu α_3 (žr. 51b pav.).

3.5. Grotelių įtaka posvyrio kampo įtaka

Grotelių posvyrio kampo α_4 režiai (žr. 52 pav.) yra nuo 2 iki 10 laipsnių. Keičiamas grotelių posvyrio kampas, siekiant sužinoti kokią įtaką aerodinaminiams rodikliams jis turi. Aerodinaminio pasipriešinimo C_D ir prispaudimo-kėlimo C_L koeficientų priklausomybės grotelėms nuo važiavimo greičio ir posvyrio kampo α_4 atvaizduota grafikuose (53-61 pav.).



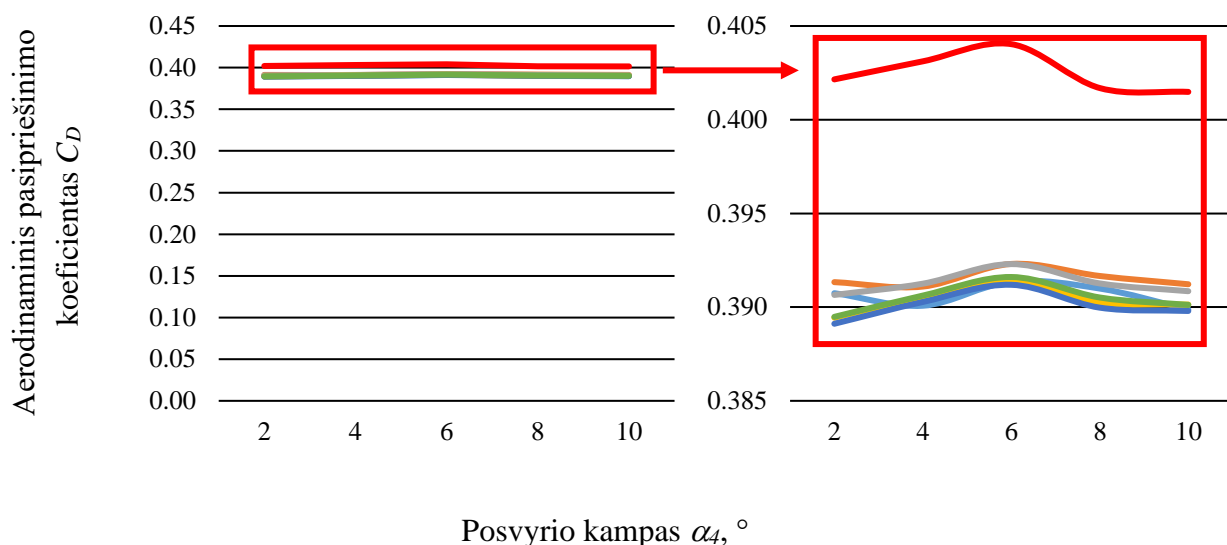
52 pav. Grotelių posvyrio kampas α_4



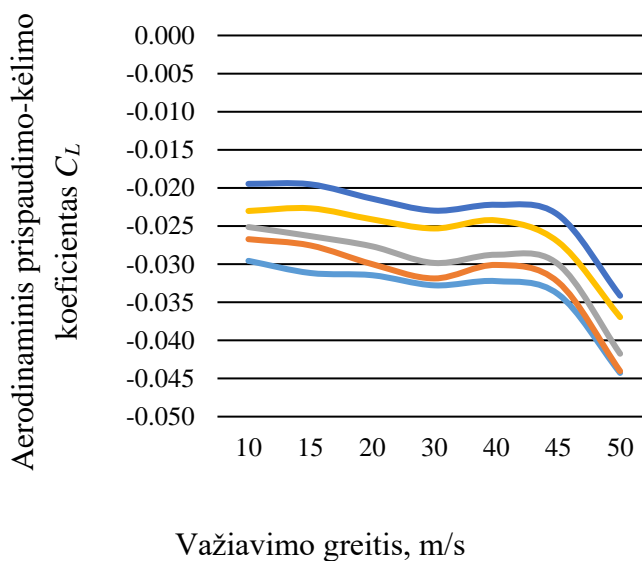
53 pav. Automobilio pasipriešinimo koeficiento C_D , nevertinant kelio įtakos, priklausomybė nuo važiavimo greičio, kai grotelių posvyrio kampas α_4 yra: (—) 2°, (—) 4°, (—) 6°, (—) 8°, (—) 10°

Automobilio pasipriešinimo koeficiento C_D priklausomybė nuo važiavimo greičio ir posvyrio kampo α_4 , kai nevertinama kelio įtaka, pateikta 53 ir 54 pav. Iš 53 pav. matyti, kad keičiant kampą α_4 ir greitį, C_D kinta nežymiai (pokyčio dydis neviršija 3,5 %). Didėjant važiavimo greičiui, kai keičiamas α_4 kampas, pasipriešinimo koeficientas C_D nežymiai didėja (žr. 53 pav.) Geriausia (mažiausia) C_D vertė

gaunama, kai kampas α_4 yra artimas 2 laipsniams, o didžiausia, kai kampas artimas 10 laipsnių (žr. 54 pav.).

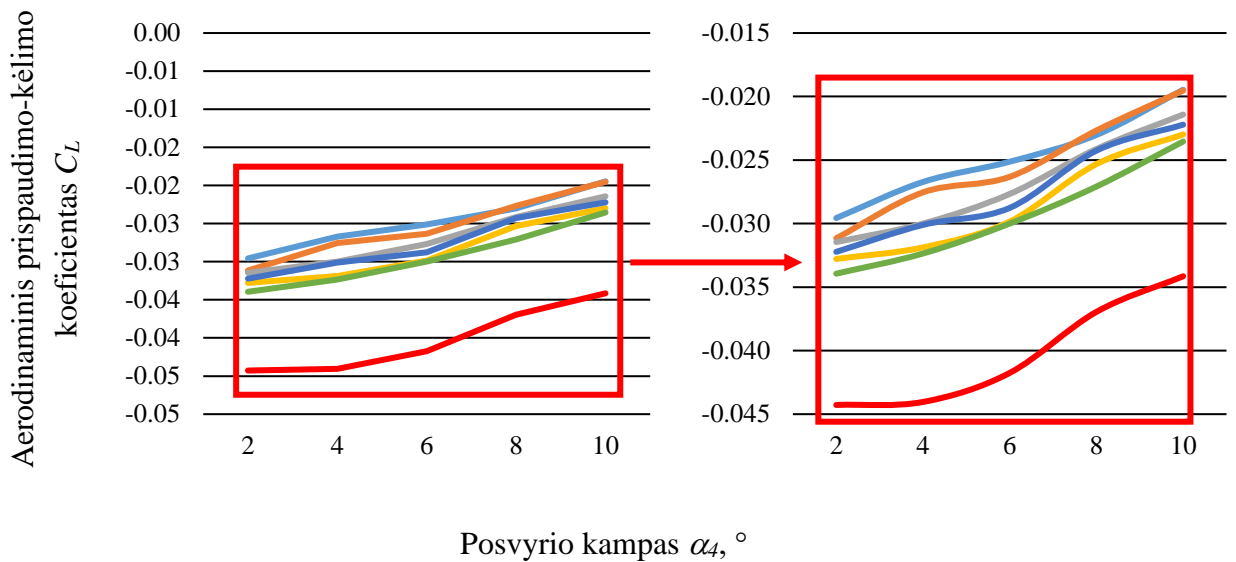


54 pav. Automobilio pasipriešinimo koeficiento C_D nevertinant kelio įtakos, priklausomybė nuo grotelių posvyrio kampo α_4 , kai važiavimo greitis: (—) 10 m/s, (—) 15 m/s, (—) 20 m/s, (—) 30 m/s, (—) 40 m/s, (—) 45 m/s, (—) 50 m/s



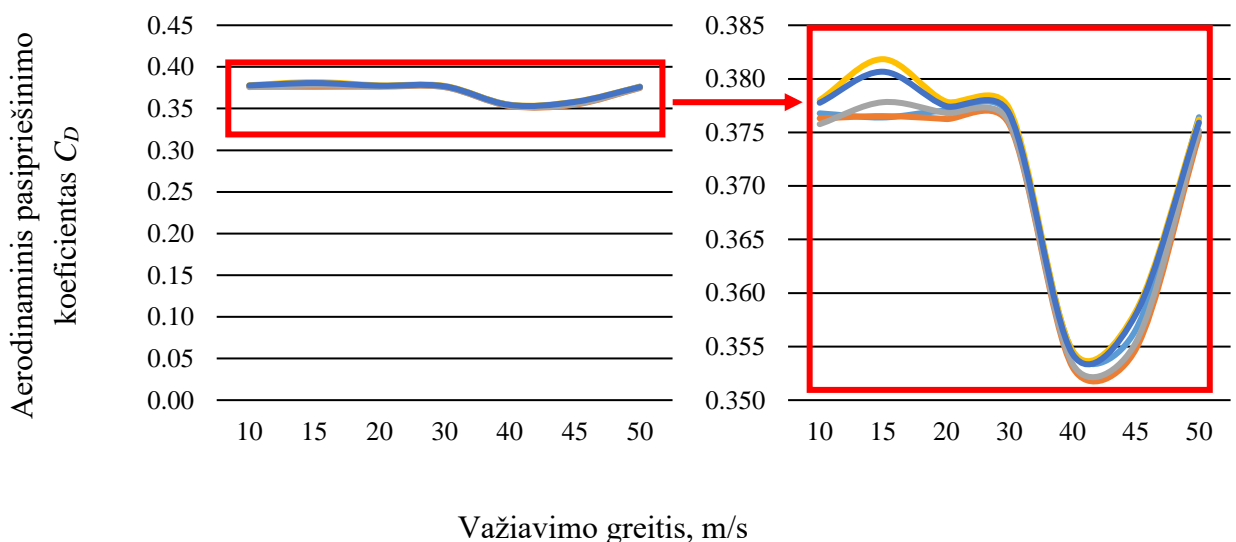
55 pav. Automobilio prispaudimo-kėlimo koeficiento C_L , nevertinant kelio įtakos, priklausomybė nuo važiavimo greičio, kai grotelių posvyrio kampas α_4 yra: (—) 2°, (—) 4°, (—) 6°, (—) 8°, (—) 10°

55 pav. matoma, jog neigiamos prispaudimo-kėlimo koeficiento C_L vertės, kai transporto priemonė „kabo“ ore, rodo, kad automobilis oro srauto yra keliamas nuo važiuojamosios dangos. Didėjant važiavimo greičiui C_L absoliutinė reikšmė tolygiai didėja. Palankiausia C_L vertė yra važiuojant nedideliais greičiais.



56 pav. Automobilio prispaudimo-kėlimo koeficiento C_L , nevertinant kelio įtakos, priklausomybė nuo grotelių posvyrio kampo α_4 , kai važiavimo greitis: (—) 10 m/s, (—) 15 m/s, (—) 20 m/s, (—) 30 m/s, (—) 40 m/s, (—) 45 m/s, (—) 50 m/s

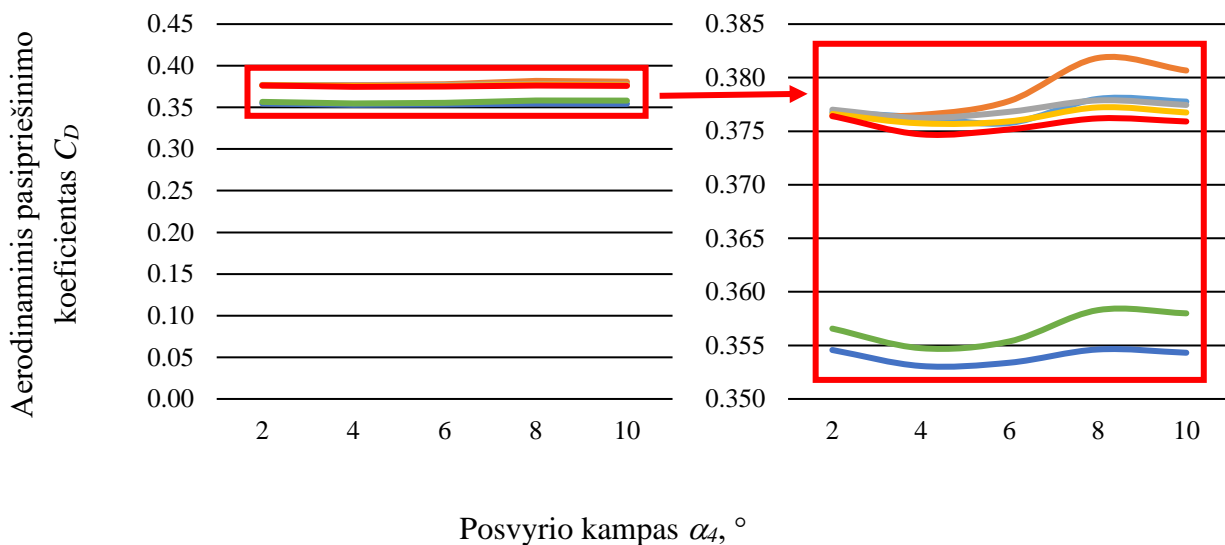
56 pav. matoma, jog neigiamos prispaudimo-kėlimo koeficiento C_L vertės, kai nevertinama kelio įtaka, rodo, kad automobilis oro srauto yra keliamas nuo važiuojamosios dangos. Didėjant posvyrio kampui α_4 , C_L absoliutinė reikšmė tolygiai mažėja. Palankiausia C_L vertė yra prie 10°. Apytiksliai nuo 2° kampo C_L pradeda tolygiai mažėti.



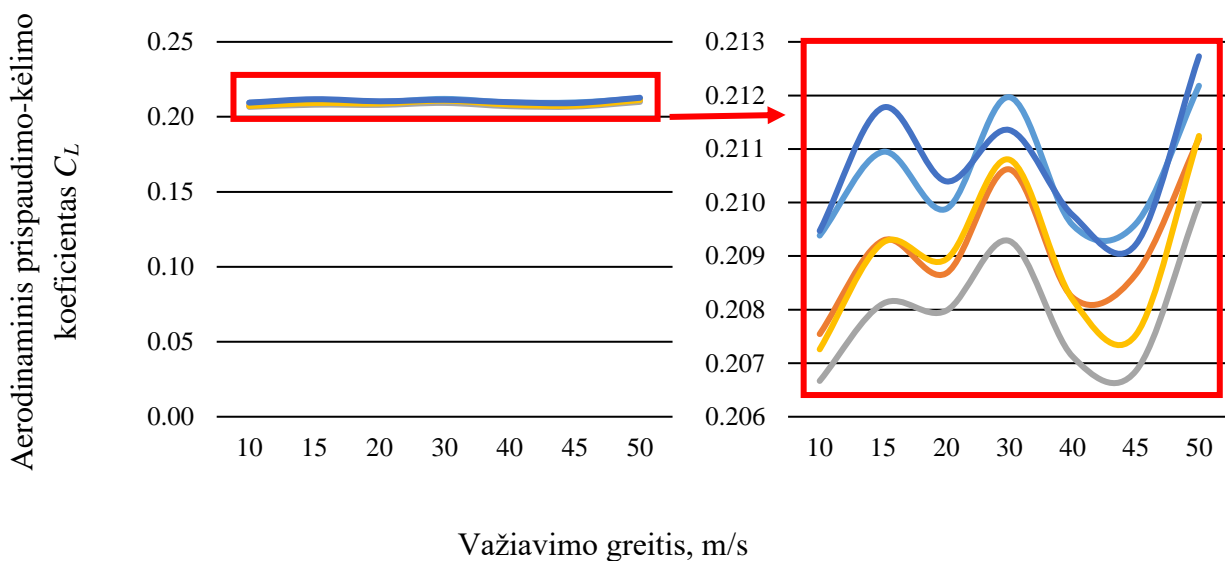
57 pav. Automobilio pasipriešinimo koeficiento C_D , įvertinant kelio įtaką, priklausomybė nuo važiavimo greičio, kai grotelių posvyrio kampas α_4 yra: (—) 2°, (—) 4°, (—) 6°, (—) 8°, (—) 10°

Automobilio pasipriešinimo koeficiento C_D priklausomybė nuo važiavimo greičio ir posvyrio kampo α_4 , kai vertinama kelio įtaka, pateikta 57 ir 58 pav. Iš 57 pav. matyti, kad keičiant kampą α_4 ir greitį, C_D kinta nežymiai (pokyčio dydis 6,5 %). Didėjant važiavimo greičiui, kai keičiamas α_4 kampas,

pasipriešinimo koeficientas C_D nežymiai didėja (žr. 57 pav.) Geriausia (mažiausia) C_D vertė, kai automobilis važiuoja keliu, gaunama posvyrio kampui α_4 esant ribose nuo 4 iki 6 laipsnių (žr. 58 pav.).

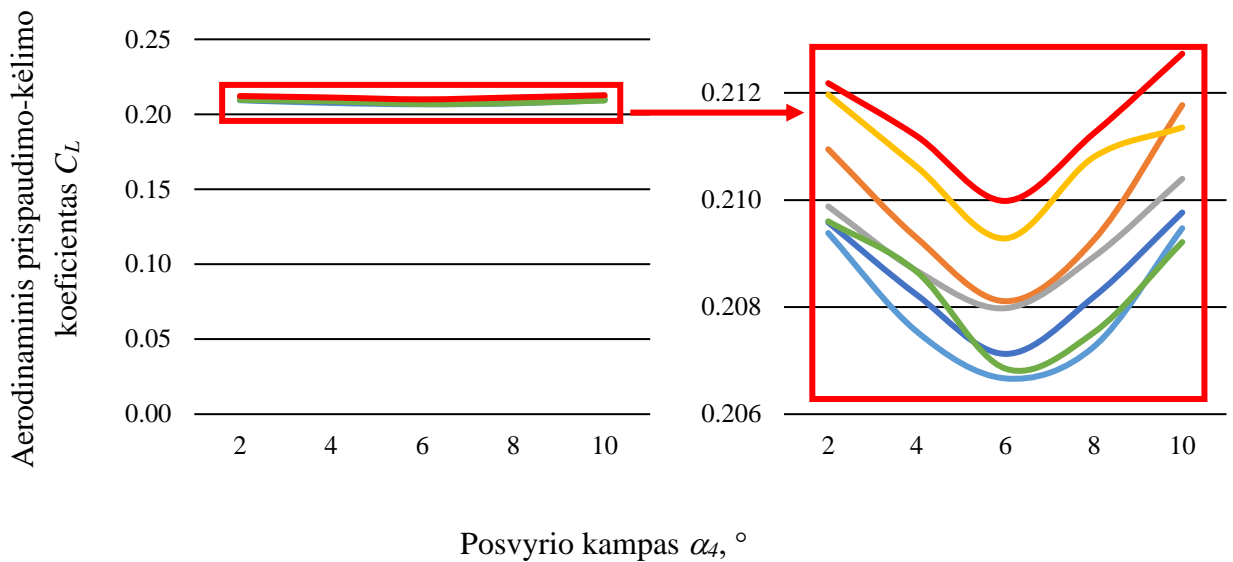


58 pav. Automobilio pasipriešinimo koeficiento C_D , įvertinant kelio įtaką, priklausomybė nuo grotelių posvyrio kampo α_4 , kai važiavimo greitis: (—) 10 m/s, (—) 15 m/s, (—) 20 m/s, (—) 30 m/s, (—) 40 m/s, (—) 45 m/s, (—) 50 m/s



59 pav. Automobilio prispaudimo-kėlimo koeficiento C_L , įvertinant kelio įtaką, priklausomybė nuo važiavimo greičio, kai grotelių posvyrio kampas α_4 yra: (—) 2°, (—) 4°, (—) 6°, (—) 8°, (—) 10°

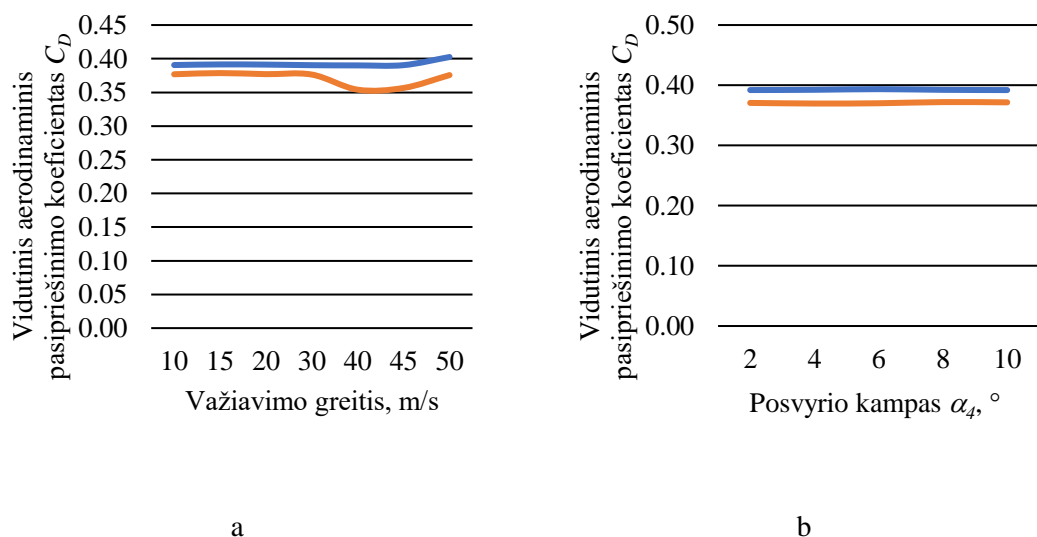
59 pav. matoma, jog teigiamos prispaudimo-kėlimo koeficiento C_L vertės, kai vertinama kelio įtaka, rodo, kad automobilis oro srauto yra spaudžiamas prie važiuojamosios dangos. Didėjant važiavimo greičiui C_L absoliutinė reikšmė praktiškai nekinta. Palankiausia C_L vertė yra apytiksliai prie 2 ir 10 laipsnių kampo (žr. 60 pav.).



60 pav. Automobilio prispaudimo-kėlimo koeficiento C_L , įvertinant kelio įtaką, priklausomybė nuo grotelių posvyrio kampo α_4 , kai važiavimo greitis: (—) 10 m/s, (—) 15 m/s, (—) 20 m/s, (—) 30 m/s, (—) 40 m/s, (—) 45 m/s, (—) 50 m/s

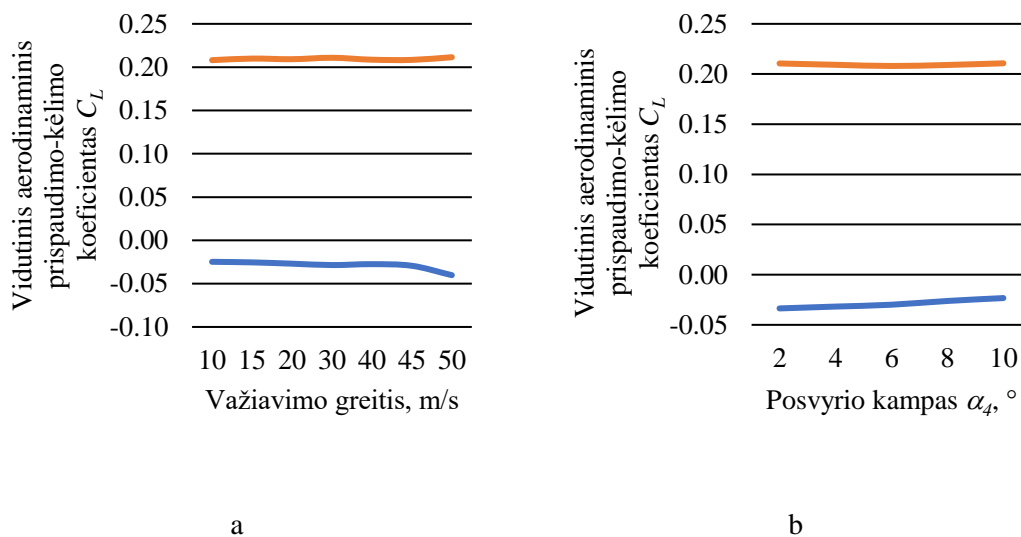
Analogiškai kaip ir 3.2-3.4 poskyriuose, toliau aptarsime C_D ir C_L vidutinių verčių kitimo tendencijas.

61a pav. grafikuose matoma, kad vertinant kelio įtaką, vidutinis pasipriešinimo koeficientas C_D neženkliai pasikeičia - sumažėja. Geriausia (mažiausia) vidutinė C_D vertė, automobiliui važiuojant keliu, gaunama, kai greitis yra 40-45 m/s. Vidutinis pasipriešinimo koeficientas sumažėja apytiksliai 9 %, kai vertinama kelio įtaka. Vidutinis pasipriešinimo koeficientas C_D keičiant posvyrio kampą α_4 praktiškai nekinta (žr. 61b pav.).



61 pav. Pasipriešinimo koeficiento C_D vidurkių priklausomybė nuo važiavimo greičio (a) ir posvyrio kampo α_4 (b), kai: (—) – automobilis „pakabintas“ ore, (—) – automobilis važiuoja keliu

62 pav. pateikta aerodinaminio prispaudimo-kėlimo koeficiento C_L vidutinių verčių palyginimas. Iš grafiko matoma, kad nevertinant kelio įtakos, automobilis yra keliamas, o kai automobilis važiuoja keliu – spaudžiamas. Vidutinių prispaudimo-kėlimo koeficientų reikšmės padidėja 156,3 %, kai „Tesla Cybertruck“ modelis važiuoja keliu, lyginant su vidutinėmis C_L vertėmis, gautomis modelyje su ore „pakabintu“ automobiliu. 62a pav. matoma, kad didėjant važiavimo greičiui, prispaudimo-kėlimo koeficiento vidutinė absoliutinė reikšmė praktiškai nekinta. Geriausia (didžiausia) prispaudimo-kėlimo koeficiento C_L vertė, kai automobilis važiuoja keliu, gaunama maždaug ties 10 laipsnių posvyrio kampu α_4 (žr. 62b pav.).



62 pav. Pasipriešinimo koeficiento C_D vidurkių priklausomybė nuo važiavimo greičio (a) ir posvyrio kampo α_4 (b), kai: (—) – automobilis „pakabintas“ ore, (—) – automobilis važiuoja keliu

Išvados

1. Ištyrus „Tesla Cybertruck“ nemodifikuotą modelį, nustatyta, kad kai automobilis važiuoja keliu, automobilis yra spaudžiamas prie važiuojamosios dangos, o kai „pakabintas“ ore – keliamas.
2. Ištyrus priekinio stiklo posvyrio kampo α_1 įtaką nustatyta, kad vertinant kelią, pasipriešinimo koeficiento C_D vidutinė vertė sumažėja 5 % lyginant su rezultatais, kai nevertinamas kelias (automobilis „kabo“ ore). Geriausias (mažiausia) C_D rezultatas gaunamas modelyje su keliu, kai greitis yra 40-45 m/s. Aerodinaminis pasipriešinimo koeficientas C_D , keičiant posvyrio kampą α_1 , gaunamas apie 6,2 % didesnis modelyje „pakabinus“ automobilį. Didėjant kampui α_1 koeficiento C_D vertės taip pat didėja Vidutinių prispaudimo-kėlimo koeficientų C_L reikšmės sumažėja 178 %, kai nevertinama kelio įtaka, lyginant su modeliu, kai „Tesla Cybertruck“ važiuoja keliu. Geriausia prispaudimo-kėlimo vidutinė vertė, kai „Tesla Cybertruck“ važiuoja keliu, gaunama posvyrio kampui α_1 esant ribose nuo 6 iki 10 laipsnių.
3. Darbe nustatyta, kad keičiant galinio stiklo posvyrio kampą α_2 , pasipriešinimo koeficiento C_D vidutinė vertė, kai vertinama kelio įtaka, sumažėja apytiksliai 6 %, nei, kad nevertinant kelio įtakos. Aerodinaminio prispaudimo-kėlimo koeficiento C_L vertė, kai automobilis važiuoja keliu padidėja 124,7 % lyginant su C_L verte, gauta modelyje su ore „pakabintu“ automobiliu. Taip pat pastebėta, kad didėjant greičiui, prispaudimo-kėlimo koeficiento absoliutinė reikšmė praktiškai nekinta. Geriausia (didžiausia) prispaudimo-kėlimo koeficiento C_L vidutinė vertė, kai automobilis važiuoja keliu, gaunama maždaug ties 8 laipsnių posvyrio kampu α_2 .
4. Atlikus priekinės lempos posvyrio kampo α_3 įtakos „Tesla Cybertruck“ aerodinaminėms savybės tyrimą, gauta, kad pasipriešinimo koeficientas C_D , kai didinamas greitis, sumažėja apytiksliai 6 %. Aerodinaminis pasipriešinimo koeficientas C_D keičiant posvyrio kampą α_3 praktiškai nekinta. Prispaudimo-kėlimo koeficientų vidutinių reikšmių skirtumas, kai modelis važiuoja keliu, padidėja 152,7 %, lyginant su modeliu, kuriame automobilis „kabo“ ore. Tiek keičiant važiavimo greitį, tiek posvyrio kampą α_3 , prispaudimo-kėlimo koeficiento C_L vidutinė absoliutinė reikšmė praktiškai nekinta. Skirtumas tarp didžiausių ir mažiausių C_L verčių yra apie 4,8%.
5. Tiriant grotelių posvyrio kampo α_4 įtaką, nustatyta, kad aerodinaminis pasipriešinimo koeficientas C_D , kai vertinama kelio įtaka, sumažėja apytiksliai 9 %, lyginant su modeliu, kai nevertinamas kelias. Geriausia (mažiausia) vidutinė C_D koeficiento vertė gaunama modelyje su keliu, kai greitis yra 40-45 m/s. Pasipriešinimo koeficientas C_D keičiant posvyrio kampą α_4 praktiškai nekinta. Aerodinaminio prispaudimo-kėlimo koeficiento C_L vidutinė reikšmė, tiek keičiant važiavimo greitį, tiek posvyrio kampą α_4 , praktiškai nekinta. Nevertinant kelio įtakos – automobilis yra keliamas, o kai važiuoja keliu – spaudžiamas. Vidutinis prispaudimo-kėlimo koeficientas C_L padidėja 156,3 %, kai vertinama kelio įtaka, lyginant su modeliu, kai nevertinamas kelias.

Literatūros sąrašas

1. Laminarinio tekėjimo sąvoka. [interaktyvus]. [žiūrėta 2022-03-10]. Prieiga per internetą: <https://www.vle.lt/straipsnis/laminarinis-tekejimas>
2. Turbulentinio tekėjimo sąvoka. [interaktyvus]. [žiūrėta 2022-03-10]. Prieiga per internetą: <https://www.vle.lt/straipsnis/turbulentinis-tekejimas>
3. Adiabatinio proceso sąvoka. [interaktyvus]. [žiūrėta 2022-03-10]. Prieiga per internetą: https://lt.wikipedia.org/wiki/Adiabatinis_procesas
4. Perteklinio slėgio sąvoka. [interaktyvus]. [žiūrėta 2022-05-08]. Prieiga per internetą: <https://www.lietuviuzodynas.lt/terminai/Manometrinis>
5. Kieselbach, R. J. F. 1982a. Streamline Cars in Germany. Aerodynamics in the Construction of Passenger Vehicles 1900-1945. Stuttgart: Kohlhammer Ed. Auto und Verk
6. Hucho, W.-H. 1987b. Aerodynamic drag of passenger cars
7. HUCHO W.-H. Aerodynamics of road vehicles [interaktyvus]. General Motors Research and Environmental Staff, Warren, Michigan, 1993 [žiūrėta 2022-03-17]. Annu. Rev. Fluid Mech. 1993.25 :485-537. Prieiga per internetą: <http://by.genie.uottawa.ca/~mcg3341/DragOfRoadVehicles.pdf>
8. Aerodinamikos sąvoka. [interaktyvus]. [žiūrėta 2022-03-10]. Prieiga per internetą: <https://www.vedantu.com/physics/aerodynamics>
9. LASAUSKAS, Eduardas. *Skrydžio principai*. VGTU leidykla TECHNIKA, 2008. 182 p. ISBN 978-9955-28-255-6.
10. MAJUMDER, Sambit, SAHA, Somnath. A Method of Drag Reduction of a Vehicle by Computational Investigation and Geometric Modification. [interaktyvus]. *National Institute of Technology, Agartala, Tripura*. [žiūrėta 2022-03-20]. Prieiga per internetą: https://www.academia.edu/14533582/A_method_of_drag_reduction_of_a_vehicle_by_computational_investigation_and_geometric_modification
11. VISAVALE, Ganesh. Understanding CFD simulation process with examples. 2012. [žiūrėta 2022-03-10]. Prieiga per internetą: <https://ganeshvisavale.wordpress.com/2012/12/07/understanding-cfd-simulation-process-with-examples/>
12. Introduction to CFD with Flow Simulation. [vaizdo įrašas]. [žiūrėta 2022-03-16]. Prieiga per internetą: <https://www.solidworks.com/media/introduction-cfd-flow-simulation>
13. GUILMINEAU Emmanuel. Computational study of flow around a simplified car body. *Journal of Wind Engineering*, 2008, vol. 96, pp. 1207-1217.
14. XINGJUN Hu, PENG QIN Gu, YANG An. Effect of turbulence parameters on numerical simulation of complex automotive external flow field. *Applied Mechanics and Materials*, 2011, VOL. 52-54, pp. 1062-1067.
15. XINJUN, Hu, RUI, Zhang, JIAN, Ye, XU, Yan, ZHIMING, Zhao. Influence of different diffuser angle on Sedan's aerodynamic characteristics. Proc. 2011 *Conference on Physics Science and Technology*, 2011, vol. 22, pp. 239-245.
16. KUREC Krzysztof, REMER Michal, BRNISZEWSKI Jakub, BIBIK Przemyslaw, TUDRUJ Sylwester, PIECHNA Janusz. Advanced modeling and simulation of vehicle active aerodynamic safety [interaktyvus]. *Smart technologies for vehicle safety and driver assistance*. Volume 2019. [žiūrėta 2022-03-20]. Prieiga per internetą: <https://www.hindawi.com/journals/jat/2019/7308590/>

17. GONEY Anurag. Computational analysis of drag forces on car profiles [interaktyvus]. *International Journal for Research in Applied Science & Engineering Technology*, Volume 5, Issue XI, 2017. [žiūrėta 2022-03-20]. Prieiga per internetą: <https://www.researchgate.net/publication/321633190> Computational Analysis of Drag Forces on Car Profiles
18. NATH S., Devang, PUJARI, Chandra, Prashant, JAIN, Amit, RASTOGI, Vikas. Advances in Aerodynamics, 2021 [žiūrėta 2022-03-23]. Prieiga per internetą: <https://aia.springeropen.com/articles/10.1186/s42774-020-00054-7>
19. DICKISON, M., GALEEH, M., MILADY, S., SUBBAKRISHNA, S., WEN, L.T., AL QUBEISSI, M. Investigation into the Aerodynamic Performance of a Concept Sports Car.[interaktyvus]. *Journal of Applied Fluid Mechanics*, Vol 13, No. 2, pp. 583-601, 2020. [žiūrėta 2022-03-20]. Prieiga per internetą: <https://www.researchgate.net/publication/335105716> Investigation into the Aerodynamic Performance of a Concept Sports Car
20. HITT, David. What are wind tunnels? *Educational Technology Services* [interaktyvus]. 2018 [žiūrėta 2022-04-20]. Prieiga per internetą: <https://www.nasa.gov/audience/forstudents/k-4/stories/nasa-knows/what-are-wind-tunnels-k4.html>
21. How many wind tunnel types exist? [interaktyvus]. [žiūrėtas 2022-04-20]. Prieiga per internetą: [https://www.presticebdt.com/wind-tunnel-types/#Two main wind tunnel types open and closed circuit](https://www.presticebdt.com/wind-tunnel-types/#Two%20main%20wind%20tunnel%20types%20open%20and%20closed%20circuit)
22. DUMITRACHE, Alina. Automotive wind tunnels – making aerodynamic cars. 2010.[žiūrėta 2022-04]. Prieiga per internetą: <https://www.autoevolution.com/news/automotive-wind-tunnels-making-aerodynamic-cars-23250.html>
23. LYU, Zhipeng. Aerodynamic Wind Tunnel in Passenger Car Application. [interaktyvus]. [žiūrėta 2022-04-20]. Prieiga per internetą: <http://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:1083457/FULLTEXT01.pdf>
24. BAYINDIRLI, Cihan, MEHMET Celik. The Experimentally and Numerically Determination Of The Drag Coefficient Of A Bus Model. *International Journal of Automotive Engineering and Technologies*, 2018 [žiūrėta 2022-04-15]. 7(3):117-123. Prieiga per internetą: <https://www.researchgate.net/publication/329120123> The Experimentally and Numerically Determination Of The Drag Coefficient Of A Bus Model
25. ZUO, Wangda. Introduction of Computational Fluid Dynamics. [nuoroda atsisiuntimui]. [žiūrėta 2022-03-17]. http://www.mayr.in.tum.de/konferenzen/Jass05/courses/2/Zuo/Zuo_paper.doc

Priedai

1 priedas. Automobilio be modifikacijų tyrimo rezultatai

2 lentelė. Automobilio tyrimo rezultatai be modifikacijų

Oro tekės greitis v , m/s	Pasipriešinimo jėga F_D , N	Prispaudimo jėga F_N , N	Pasipriešinimo koeficientas C_D	Prispaudimo koeficientas C_L
Automobilis "kabo" ore				
10	39,71	-1,52	0,3917	-0,0150
15	87,03	-5,36	0,3816	-0,0235
20	155,05	-5,61	0,3824	-0,0138
30	348,29	-13,01	0,3818	-0,0143
40	618,95	-24,88	0,3816	-0,0153
45	786,96	-56,45	0,3834	-0,0275
50	1002,82	-101,31	0,3957	-0,0400
Automobilis važiuoja keliu				
10	38,45	21,17	0,3793	0,2089
15	87,44	47,67	0,3834	0,2090
20	154,45	84,52	0,3809	0,2085
30	346,85	190,40	0,3802	0,2087
40	580,89	336,77	0,3582	0,2076
45	739,49	425,54	0,3603	0,2073
50	962,00	533,71	0,3796	0,2106

2 priedas. Automobilio modifikavus groteles tyrimo rezultatai

3 lentelė. Automobilio „kabančio“ ore tyrimo rezultatai, kai modifikuotos groteles

Oro tekės greitis v , m/s	Pasipriešinimo jėga F_D , N	Prispaudimo jėga F_N , N	Pasipriešinimo koeficientas C_D	Prispaudimo koeficientas C_L
2° automobilis "kabo" ore				
10	39,83	-3,01	0,3917	-0,0296
15	89,53	-7,13	0,3913	-0,0312
20	158,88	-12,79	0,3907	-0,0315
30	356,37	-30,00	0,3894	-0,0328
40	633,01	-52,42	0,3891	-0,0322
45	801,91	-69,88	0,3895	-0,0339
50	1022,22	-112,54	0,4022	-0,0443
4° automobilis "kabo" ore				
10	39,66	-2,72	0,3901	-0,0267
15	89,47	-6,30	0,3911	-0,0275
20	159,12	-12,20	0,3913	-0,0300
30	357,37	-29,17	0,3905	-0,0319

Oro tekmės greitis v , m/s	Pasipriešinimo jėga F_D , N	Prispaudimo jėga F_N , N	Pasipriešinimo koeficientas C_D	Prispaudimo koeficientas C_L
40	634,90	-48,97	0,3903	-0,0301
45	804,25	-66,62	0,3906	-0,0324
50	1024,67	-111,94	0,4031	-0,0440
6° automobilis "kabo" ore				
10	39,79	-2,56	0,3914	-0,0251
15	89,75	-6,02	0,3923	-0,0263
20	159,55	-11,25	0,3923	-0,0277
30	358,23	-27,31	0,3915	-0,0298
40	636,39	-46,80	0,3912	-0,0288
45	806,29	-61,77	0,3916	-0,0300
50	1027,00	-106,13	0,4040	-0,0418
8° automobilis "kabo" ore				
10	39,75	-2,34	0,3910	-0,0230
15	89,60	-5,19	0,3917	-0,0227
20	159,13	-9,81	0,3913	-0,0241
30	357,11	-23,17	0,3902	-0,0253
40	634,41	-39,46	0,3900	-0,0243
45	804,04	-55,76	0,3905	-0,0271
50	1021,04	-93,92	0,4017	-0,0369
10° automobilis "kabo" ore				
10	39,64	-1,98	0,3899	-0,0195
15	89,50	-4,47	0,3912	-0,0195
20	158,96	-8,71	0,3909	-0,0214
30	357,01	-21,03	0,3901	-0,0230
40	634,12	-36,14	0,3898	-0,0222
45	803,23	-48,47	0,3901	-0,0235
50	1020,52	-86,79	0,4015	-0,0341

4 lentelė. Automobilio važiuojančio keliu tyrimo rezultatai, kai modifikuotos grotelės

Oro tekmės greitis v , m/s	Pasipriešinimo jėga F_D , N	Prispaudimo jėga F_N , N	Pasipriešinimo koeficientas C_D	Prispaudimo koeficientas C_L
2° automobilis važiuoja keliu				
10	38,31	21,29	0,3768	0,2094
15	86,11	48,26	0,3764	0,2109
20	153,33	85,36	0,3770	0,2099
30	344,62	193,97	0,3766	0,2120
40	576,82	340,95	0,3546	0,2096
45	734,15	431,55	0,3566	0,2096

Oro tekės greitis v , m/s	Pasipriešinimo jėga F_D , N	Prispaudimo jėga F_N , N	Pasipriešinimo koeficientas C_D	Prispaudimo koeficientas C_L
50	956,81	539,34	0,3764	0,2122
4° automobilis važiuoja keliu				
10	38,26	21,10	0,3763	0,2075
15	86,14	47,88	0,3765	0,2093
20	153,02	84,87	0,3762	0,2087
30	343,82	192,73	0,3757	0,2106
40	574,39	338,75	0,3531	0,2082
45	730,39	429,61	0,3547	0,2087
50	952,46	536,83	0,3747	0,2112
6° automobilis važiuoja keliu				
10	38,21	21,01	0,3758	0,2067
15	86,43	47,61	0,3778	0,2081
20	153,25	84,59	0,3768	0,2080
30	344,00	191,51	0,3759	0,2093
40	574,88	336,95	0,3534	0,2071
45	731,68	425,89	0,3554	0,2069
50	953,63	533,75	0,3752	0,2100
8° automobilis važiuoja keliu				
10	38,44	21,07	0,3780	0,2073
15	87,35	47,87	0,3818	0,2093
20	153,68	84,98	0,3779	0,2089
30	345,18	192,90	0,3772	0,2108
40	576,90	338,69	0,3546	0,2082
45	737,69	427,28	0,3583	0,2075
50	956,24	536,96	0,3762	0,2112
10° automobilis važiuoja keliu				
10	38,41	21,30	0,3778	0,2095
15	87,08	48,45	0,3807	0,2118
20	153,51	85,57	0,3775	0,2104
30	344,75	193,41	0,3767	0,2114
40	576,40	341,25	0,3543	0,2098
45	737,08	430,76	0,3580	0,2092
50	955,51	540,74	0,3759	0,2127

3 priedas. Automobilio modifikavus priekinę lempą tyrimo rezultatai

5 lentelė. Automobilio „kabančio“ ore tyrimo rezultatai, kai modifikuota lempa

Oro tekamės greitis v , m/s	Pasipriešinimo jėga F_D , N	Prispaudimo jėga F_N , N	Pasipriešinimo koeficientas C_D	Prispaudimo koeficientas C_L
2° automobilis "kabo" ore				
10	38,40	-2,89	0,3776	-0,0285
15	86,66	-6,25	0,3788	-0,0273
20	155,05	-12,42	0,3812	-0,0305
30	348,27	-27,77	0,3806	-0,0303
40	618,74	-52,10	0,3803	-0,0320
45	783,73	-69,62	0,3807	-0,0338
50	995,57	-108,43	0,3917	-0,0427
4° automobilis "kabo" ore				
10	38,28	-3,33	0,3765	-0,0328
15	86,47	-7,01	0,3780	-0,0306
20	154,50	-13,59	0,3799	-0,0334
30	346,57	-31,56	0,3787	-0,0345
40	615,81	-54,66	0,3785	-0,0336
45	780,67	-73,77	0,3792	-0,0358
50	994,87	-117,48	0,3914	-0,0462
6° automobilis "kabo" ore				
10	38,26	-3,28	0,3763	-0,0322
15	86,83	-7,65	0,3796	-0,0334
20	154,73	-14,14	0,3804	-0,0348
30	347,30	-34,03	0,3795	-0,0372
40	616,95	-57,93	0,3792	-0,0356
45	782,32	-77,49	0,3800	-0,0376
50	994,59	-125,30	0,3913	-0,0493
8° automobilis "kabo" ore				
10	38,41	-3,61	0,3777	-0,0355
15	86,73	-8,12	0,3791	-0,0355
20	155,07	-14,65	0,3813	-0,0360
30	348,17	-35,89	0,3805	-0,0392
40	618,88	-63,43	0,3804	-0,0390
45	784,43	-83,73	0,3810	-0,0407
50	998,10	-129,96	0,3927	-0,0511
10° automobilis "kabo" ore				
10	38,55	-3,89	0,3792	-0,0382
15	87,18	-8,59	0,3811	-0,0375
20	155,70	-15,37	0,3828	-0,0378

Oro tekės greitis v , m/s	Pasipriešinimo jėga F_D , N	Prispaudimo jėga F_N , N	Pasipriešinimo koeficientas C_D	Prispaudimo koeficientas C_L
30	349,97	-36,94	0,3824	-0,0404
40	621,70	-66,09	0,3822	-0,0406
45	787,87	-86,79	0,3827	-0,0422
50	1002,01	-135,31	0,3942	-0,0532

6 lentelė. Automobilio važiuojančio keliu tyrimo rezultatai, kai modifikuota lempa

Oro tekės greitis v , m/s	Pasipriešinimo jėga F_D , N	Prispaudimo jėga F_N , N	Pasipriešinimo koeficientas C_D	Prispaudimo koeficientas C_L
2° automobilis važiuoja keliu				
10	38,18	21,23	0,3755	0,2088
15	86,35	47,72	0,3775	0,2086
20	152,95	83,71	0,3761	0,2058
30	344,05	187,63	0,3760	0,2050
40	575,11	333,51	0,3535	0,2050
45	732,47	422,77	0,3558	0,2053
50	954,58	527,14	0,3755	0,2074
4° automobilis važiuoja keliu				
10	37,90	20,85	0,3727	0,2051
15	85,73	46,87	0,3747	0,2049
20	151,95	82,71	0,3736	0,2034
30	341,89	186,41	0,3736	0,2037
40	571,92	329,11	0,3516	0,2023
45	728,66	416,23	0,3539	0,2022
50	949,22	519,99	0,3734	0,2046
6° automobilis važiuoja keliu				
10	37,82	20,56	0,3719	0,2022
15	85,58	46,41	0,3741	0,2029
20	151,79	81,97	0,3732	0,2016
30	341,06	184,87	0,3727	0,2020
40	569,85	322,62	0,3503	0,1983
45	726,34	410,91	0,3528	0,1996
50	946,66	515,47	0,3724	0,2028
8° automobilis važiuoja keliu				
10	37,97	20,31	0,3735	0,1997
15	86,01	45,46	0,3760	0,1987
20	152,40	80,52	0,3747	0,1980
30	343,00	182,61	0,3748	0,1996
40	573,68	321,35	0,3526	0,1975

Oro tekės greitis v , m/s	Pasipriešinimo jėga F_D , N	Prispaudimo jėga F_N , N	Pasipriešinimo koeficientas C_D	Prispaudimo koeficientas C_L
45	731,27	406,21	0,3552	0,1973
50	951,66	508,28	0,3744	0,2000
10° automobilis važiuoja keliu				
10	38,12	20,05	0,3750	0,1972
15	86,16	45,22	0,3766	0,1977
20	153,05	80,05	0,3763	0,1968
30	344,37	180,94	0,3763	0,1977
40	576,52	318,36	0,3544	0,1957
45	734,83	401,17	0,3569	0,1948
50	955,86	504,82	0,3760	0,1986

4 priedas. Automobilio modifikavus priekinį stiklą rezultatai

7 lentelė. Automobilio „kabančio“ ore tyrimo rezultatai, kai modifikuotas priekinis stiklas

Oro tekės greitis v , m/s	Pasipriešinimo jėga F_D , N	Prispaudimo jėga F_N , N	Pasipriešinimo koeficientas C_D	Prispaudimo koeficientas C_L
2° automobilis "kabo" ore				
10	39,21	1,81	0,3856	0,0178
15	88,95	3,60	0,3888	0,0157
20	158,17	6,17	0,3889	0,0152
30	355,03	15,85	0,3880	0,0173
40	631,34	23,82	0,3881	0,0146
45	799,56	29,05	0,3883	0,0141
50	1012,80	-7,62	0,3984	-0,0030
4° automobilis "kabo" ore				
10	38,32	0,24	0,3769	0,0024
15	86,08	1,23	0,3763	0,0054
20	152,92	2,64	0,3760	0,0065
30	346,05	3,39	0,3782	0,0037
40	615,94	5,31	0,3786	0,0033
45	780,03	3,65	0,3789	0,0018
50	981,06	-76,23	0,3860	-0,0300
6° automobilis "kabo" ore				
10	39,80	-1,48	0,3914	-0,0146
15	88,90	-3,77	0,3886	-0,0165
20	158,43	-6,45	0,3896	-0,0159
30	357,12	-11,93	0,3903	-0,0130
40	636,94	-25,97	0,3915	-0,0160
45	806,02	-29,96	0,3915	-0,0145

Oro tekms greitis v , m/s	Pasipriešinimo jėga F_D , N	Prispaudimo jėga F_N , N	Pasipriešinimo koeficientas C_D	Prispaudimo koeficientas C_L
50	1006,80	-86,26	0,3961	-0,0339
8° automobilis "kabo" ore				
10	41,91	-3,50	0,4122	-0,0344
15	93,65	-7,82	0,4094	-0,0342
20	166,26	-13,11	0,4088	-0,0322
30	375,09	-29,16	0,4099	-0,0319
40	667,57	-53,80	0,4104	-0,0331
45	845,92	-69,44	0,4109	-0,0337
50	1034,95	-124,53	0,4072	-0,0490
10° automobilis "kabo" ore				
10	42,11	-7,41	0,4142	-0,0729
15	94,48	-17,25	0,4130	-0,0754
20	168,19	-29,65	0,4135	-0,0729
30	374,80	-68,78	0,4096	-0,0752
40	668,49	-122,19	0,4109	-0,0751
45	855,84	-158,10	0,4157	-0,0768
50	1055,60	-195,83	0,4153	-0,0770

8 lentelė. Automobilio važiuojančio keliu tyrimo rezultatai, kai modifikuotas priekinis stiklas

Oro tekms greitis v , m/s	Pasipriešinimo jėga F_D , N	Prispaudimo jėga F_N , N	Pasipriešinimo koeficientas C_D	Prispaudimo koeficientas C_L
2° automobilis važiuoja keliu				
10	39,41	19,02	0,3876	0,1871
15	88,16	43,63	0,3854	0,1907
20	157,39	75,95	0,3870	0,1868
30	354,48	172,10	0,3874	0,1881
40	593,64	302,75	0,3649	0,1861
45	751,22	389,23	0,3649	0,1890
50	983,14	481,81	0,3868	0,1896
4° automobilis važiuoja keliu				
10	39,28	16,59	0,3863	0,1631
15	88,38	37,69	0,3863	0,1647
20	157,21	66,24	0,3865	0,1629
30	354,31	147,53	0,3872	0,1612
40	593,46	257,43	0,3648	0,1582
45	756,63	333,28	0,3675	0,1619
50	984,45	414,73	0,3873	0,1632
6° automobilis važiuoja keliu				
10	40,95	19,15	0,4028	0,1884

Oro tekės greitis v , m/s	Pasipriešinimo jėga F_D , N	Prispaudimo jėga F_N , N	Pasipriešinimo koeficientas C_D	Prispaudimo koeficientas C_L
15	91,75	44,64	0,4011	0,1951
20	162,49	78,28	0,3995	0,1925
30	365,77	174,35	0,3997	0,1905
40	617,72	305,81	0,3797	0,1880
45	786,33	393,72	0,3819	0,1912
50	1019,60	485,51	0,4011	0,1910
8° automobilis važiuoja keliu				
10	41,27	19,87	0,4059	0,1955
15	91,85	46,55	0,4015	0,2035
20	163,16	80,59	0,4012	0,1981
30	367,11	181,89	0,4012	0,1988
40	619,93	319,45	0,3811	0,1964
45	784,95	406,69	0,3812	0,1975
50	1023,01	506,38	0,4025	0,1992
10° automobilis važiuoja keliu				
10	42,23	20,06	0,4153	0,1973
15	93,86	46,76	0,4103	0,2044
20	166,09	81,29	0,4084	0,1999
30	375,10	185,68	0,4099	0,2029
40	634,59	327,29	0,3901	0,2012
45	803,70	409,59	0,3904	0,1989
50	1042,26	509,07	0,4100	0,2003

5 priedas. Automobilio modifikavus galinę dalį tyrimo rezultatai

9 lentelė. Automobilio „kabančio“ ore tyrimo rezultatai, kai modifikuota galinė dalis

Oro tekės greitis v , m/s	Pasipriešinimo jėga F_D , N	Prispaudimo jėga F_N , N	Pasipriešinimo koeficientas C_D	Prispaudimo koeficientas C_L
2° automobilis "kabo" ore				
10	39,87	0,31	0,3921	0,0030
15	91,31	3,67	0,3991	0,0160
20	161,37	6,04	0,3968	0,0149
30	360,05	16,26	0,3935	0,0178
40	639,96	29,46	0,3934	0,0181
45	816,86	37,06	0,3967	0,0180
50	997,34	-23,56	0,3924	-0,0093
4° automobilis "kabo" ore				
10	38,51	3,16	0,3788	0,0311
15	84,60	7,23	0,3698	0,0316

Oro tekms greitis v , m/s	Pasipriešinimo jėga F_D , N	Prispaudimo jėga F_N , N	Pasipriešinimo koeficientas C_D	Prispaudimo koeficientas C_L
20	151,26	11,49	0,3719	0,0282
30	340,42	24,21	0,3720	0,0265
40	605,00	44,07	0,3719	0,0271
45	768,26	59,58	0,3731	0,0289
50	970,42	63,54	0,3818	0,0250
6° automobilis "kabo" ore				
10	44,73	6,81	0,4399	0,0670
15	98,64	15,45	0,4312	0,0675
20	175,16	26,18	0,4307	0,0644
30	393,83	60,33	0,4304	0,0659
40	700,00	110,58	0,4303	0,0680
45	888,16	143,17	0,4314	0,0695
50	1123,00	153,50	0,4418	0,0604
8° automobilis "kabo" ore				
10	40,36	11,22	0,3969	0,1104
15	91,40	23,48	0,3995	0,1026
20	163,86	38,46	0,4029	0,0946
30	367,05	90,62	0,4011	0,0990
40	652,45	162,60	0,4011	0,0999
45	835,63	206,30	0,4059	0,1002
50	1030,14	253,35	0,4053	0,0997
10° automobilis "kabo" ore				
10	42,47	11,66	0,4177	0,1147
15	95,56	24,86	0,4177	0,1087
20	170,83	40,16	0,4200	0,0987
30	383,96	96,23	0,4196	0,1052
40	682,93	167,44	0,4198	0,1029
45	864,81	222,61	0,4200	0,1081
50	1068,50	288,06	0,4204	0,1133

10 lentelė. Automobilio važiuojančio keliu tyrimo rezultatai, kai modifikuota galinė dalis

Oro tekms greitis v , m/s	Pasipriešinimo jėga F_D , N	Prispaudimo jėga F_N , N	Pasipriešinimo koeficientas C_D	Prispaudimo koeficientas C_L
2° automobilis važiuoja keliu				
10	39,41	22,41	0,3876	0,2204
15	89,57	51,06	0,3915	0,2232
20	158,21	91,50	0,3890	0,2250
30	355,63	206,13	0,3886	0,2253

Oro tekės greitis v , m/s	Pasipriešinimo jėga F_D , N	Prispaudimo jėga F_N , N	Pasipriešinimo koeficientas C_D	Prispaudimo koeficientas C_L
40	594,59	363,18	0,3655	0,2232
45	753,24	460,70	0,3658	0,2238
50	987,21	577,12	0,3884	0,2270
4° automobilis važiuoja keliu				
10	38,44	24,49	0,3780	0,2408
15	86,91	55,74	0,3799	0,2436
20	154,17	98,54	0,3791	0,2423
30	350,27	227,12	0,3828	0,2482
40	585,02	402,32	0,3596	0,2473
45	736,22	502,72	0,3576	0,2442
50	973,91	636,14	0,3831	0,2503
6° automobilis važiuoja keliu				
10	42,25	26,38	0,4155	0,2594
15	95,16	60,05	0,4160	0,2625
20	169,40	104,65	0,4165	0,2573
30	380,56	232,70	0,4159	0,2543
40	639,80	405,47	0,3933	0,2492
45	812,18	528,35	0,3945	0,2566
50	1055,68	648,23	0,4153	0,2550
8° automobilis važiuoja keliu				
10	41,22	29,59	0,4054	0,2910
15	92,80	68,05	0,4056	0,2974
20	165,33	115,16	0,4065	0,2832
30	372,27	255,41	0,4068	0,2791
40	624,41	450,91	0,3838	0,2772
45	791,62	582,25	0,3845	0,2828
50	1034,75	715,29	0,4071	0,2814
10° automobilis važiuoja keliu				
10	42,23	28,58	0,4153	0,2811
15	94,32	65,73	0,4123	0,2873
20	168,43	116,57	0,4141	0,2866
30	376,80	258,20	0,4118	0,2822
40	630,23	455,09	0,3874	0,2797
45	784,91	569,87	0,3812	0,2768
50	1046,66	735,41	0,4118	0,2893

6 priedas. Pranešimas iš mokslinės studentų konferencijos

KTU Panevėžio technologijų ir verslo fakultetas 2021 m. balandžio 23 d., Panevėžys



TECHNOLOGIJŲ IR VERSLO AKTUALIJOS

Automobilio „Tesla Cybertruck“ aerodinaminių savybių tyrimas

Breivė V.¹, Vaičiulis D.¹

¹ Kauno technologijos universitetas

Raktiniai žodžiai: Tesla Cybertruck, aerodinamika, pasipriešinimo koeficientas.

1. Įvadas

„Tesla Cybertruck“ rinkoje pasirodė 2019m. [1]. Kadangi tai labai neįprasto pavidalo automobilis ir yra visiškai kitoks, nei matome naujai kuriamus produktus, yra įdomu kokiomis aerodinaminėmis savybėmis pasižymi šis modelis. Darbuose [2, 3] buvo tirtos kitų automobilių aerodinaminės savybės, kaip jos priklauso nuo modeliavimo ypatumų ir kokiais būdais aerodinaminius koeficientus galima mažinti [4, 5].

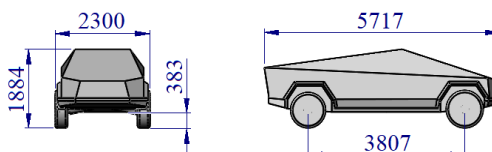
Tačiau nepavyko rasti darbų, kuriuose būtų nagrinėjama kaip „Cybertruck“ aerodinaminiai koeficientai priklauso nuo modelio tikslumo.

Darbo tikslas: ištirti kokią įtaką aerodinaminei pasipriešinimo jėgai turi automobilio judėjimo greitis ir modelio kraštinės sąlygos.

2. Tiriamasis modelis

Tyrimui naudojamas „Tesla Cybertruck“ 3D modelis pateiktas 1 pav., kuriame visi paviršiai yra plokšti, briaunos aštrios (be užapvalinimo spindulių).

Modelio projekcijos iš priekio plotas pasinaudojant *SolidWorks* programa gautas lygus 3,32 m². Pusės automobilio vaizdo iš priekio projekcijos plotas yra 1,66 m².



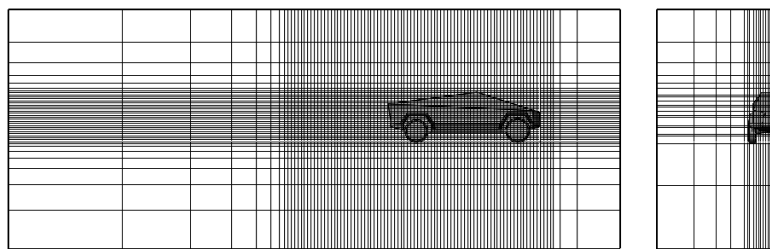
1 pav. Tesla Cybertruck 3D modelio projekcijos ir pagrindiniai matmenys

3. Tyrimo eiga

Tyrimas atliktas panaudojant *SolidWorks Flow Simulation*. Buvo tirti du variantai: ratai prispausti prie kelio; automobilis „pakabintas“ ore.

Spręstas statinis, išilginės plokštumos (ši plokštuma modelį išilgine kryptimi dalina į dvi lygias dalis) atžvilgiu simetrisinis, išorinių (aptekiančių automobilio modelį) srautų uždavinys darant sekančias prielaidas:

- radiacija, savasis svoris, drėgmė ir automobilio paviršiaus šiuurkštumas nevertinami;
- automobilio modelio supanti terpė yra oras, kurio tankis 1,225 kg/m³;
- terpės tekėjimas gali būti mišrus (laminarinis/turbulentinis);
- tarp automobilio ir aplinkos nevyksta šilumos mainai (adiabatinis procesas).
- atmosferos slėgis – standartinis (101 325 Pa), o temperatūra yra 20°C;
- nėra vėjo, t. y. vėjo greitis lygus 0 m/s.



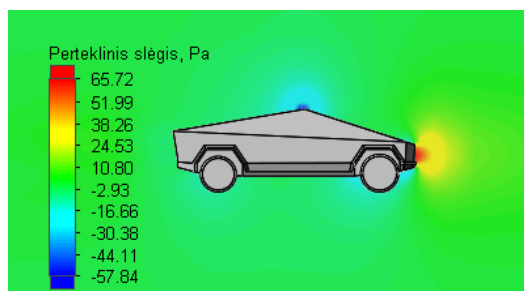
2 pav. Baigtinių elementų modelio tinklelis

Baigtinių elementų modelio tinklelio dydis ir sutankinimas pateikti 3 pav. Skaičiuojamoji erdvė prieš automobilį buvo parinkta 3 m dydžio, šonuose – 4 m, virš ir po automobiliu – 5 m, už automobilio – 20 m, kai automobilis buvo ore, o kai automobilis buvo prispaustas prie kelio, tada virš automobilio buvo palikta 5 m tuščios erdvė, o po juo – 0 m.

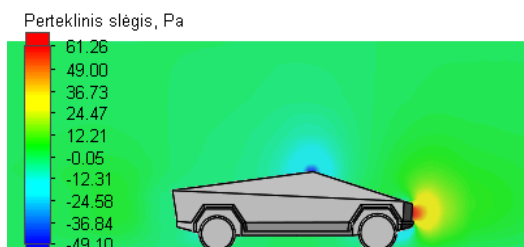
4. Skaičiavimo rezultatai

Skaičiavimo laikas pakeitus tinklelio dydį iš 4-o lygio (mažiausia išmatuota ląstelė apytiksliai yra 103×327 mm) į 5-ą (mažiausia išmatuota ląstelė apytiksliai yra 116×75mm) padidėjo 3 kartus, o apskaičiuota jėga vidutiniškai sumažėjo tik apie 5,3 procento. Todėl šiame darbe nuspręsta naudoti 5 lygio tinklelį.

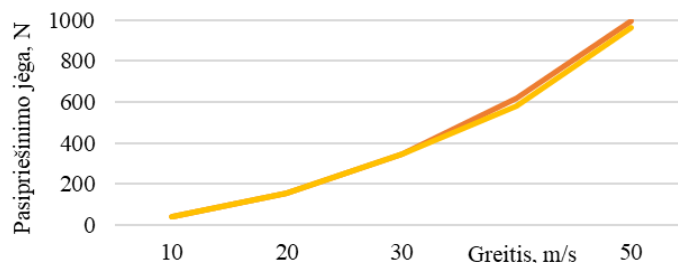
Perteklinis slėgis (absoliutinio ir atmosferinio slėgių skirtumas) veikiantis automobilį pateiktas 3-5 pav.



3 pav. Perteklinis slėgis veikiantis automobilį „kabantį“ ore



4 pav. Perteklinis slėgis veikiantis automobilį važiuojantį keliu



5 pav. Prispaudimo jėgos priklausomybė nuo automobilį aptekancio oro srauto greičio, kai: (—) – automobilis „kabo“ ore; (—) – automobilis važiuoja keliu

Iš 3 ir 4 pav. matome, kad didžiausias perteklinis slėgis susidaro automobilio priekyje. Šis slėgis modelyje, kuriame automobilis „kabo“ ore gautas apie 1,07 karto didesnis nei modelyje, kuriame automobilis važiuoja keliu.

Didžiausias neigiamas perteklinis slėgis (slėgis mažesnis už atmosferinį slėgį) susidaro automobilio viršuje ir ties priekiniu automobilio ratu. Neigiamas perteklinis slėgis gautas apie 1,18 karto modelyje, kuriame automobilis „kaba“ ore.

Didėjant aptekancio oro srauto greičiui automobilį veikianti aerodinaminė pasipriešinimo jėga kinta didėjančiu tempu (žr. 5 pav.). Kai automobilis „pakabintas“ ore, gauname didesnę pasipriešinimo jėgą, nei kai automobilis važiuoja keliu.

5. Išvados

6. Skaičiavimo rezultatams baigtinio elementų modelio tinklelio dydis turėjo nedidelę įtaką: tinklelį sumažinus apie 3,9 karto, aerodinaminio pasipriešinimo jėga sumažėjo 5,3 procento, o skaičiavimo laikas padidėjo apie 3 kartus.
7. Naudojant skaičiuojamąjį modelį su automobiliu „kabančiu“ ore, gaunama apie 3,4 procento didesnė aerodinaminė pasipriešinimo jėga nei naudojant modelį, kuriame automobilis važiuoja keliu.

Literatūra

1. Tesla Cybertruck – WIKIPEDIA [interaktyvus] . 2021 [žiūrėta 2021-04-08]. Prieiga per: https://en.wikipedia.org/wiki/Tesla_Cybertruck.
2. KRZYSZTOF KUREC, MICHAŁ REMER, JAKUB BRONISZEWSKI, PRZEMYSŁAW BIBIK, SYLWESTER TUDRUJ, JANUSZ PIECHNA Advanced Modeling and Simulation of Vehicle Active Aerodynamic Safety [interaktyvus]. 2019. [žiūrėta 2021-03-21]. Prieiga per: <https://www.hindawi.com/journals/jat/2019/7308590/>.
3. SAMBIT MAJUMDER, SOMANTH SAHA. A Method of Drag Reduction of a Vehicle by Computational Investigation and Geometric Modification [interaktyvus]. [žiūrėta 2021-03-21]. Prieiga per: https://www.academia.edu/14533582/A_method_of_drag_reduction_of_a_vehicle_by_computational_investigation_and_geometric_modification.
4. XINJUN HU, RUI ZHANG, JIAN YE, XU YAN, ZHIMING ZHAO. Influence of different diffuser angle on Sedan's aerodynamic characteristics. 2011 Conference on Physics Science and Technology 2011; 22:239-245.
5. AHMED BAHGAT MOHAMED, MOHAMED SAFWAT KHATAB, IBRAHIM MOHAMED IBRAHIM. *Computational investigation of spoiler effect on the aerodynamic performance of passenger car* [interaktyvus] 2018. [žiūrėta 2021-03-20]. Prieiga per: https://www.academia.edu/37235548/Computational_Investigation_of_Spoiler_Effect_on_the_Aerodynamic_Performance_of_Passenger_Cars.
6. JOHN E. MATSSON, Ph.D. An Introduction to SOLIDWORKS Flow Simulation [interaktyvus] 2017. [žiūrėta 2021-03-25]. Prieiga per: <https://static.sdcpublishings.com/pdf/sample/978-1-63057-078-1-2.pdf>.