



Kauno technologijos universitetas
Mechanikos inžinerijos ir dizaino fakultetas

**Važiavimo atidarytais langais įtakos automobilio
aerodinaminiam pasipriešinimui ir degalų sąnaudoms tyrimas**

Baigiamasis magistro projektas

Paulius Preibys

Projekto autorius

Doc. Robertas Keršys

Vadovas

Kaunas, 2022



Kauno technologijos universitetas
Mechanikos inžinerijos ir dizaino fakultetas

Važiavimo atidarytais langais įtakos automobilio aerodinaminiam pasipriešinimui ir degalų sąnaudoms tyrimas

Baigiamasis magistro projektas
Transporto priemonių inžinerija (6211EX021)

Paulius Preibys
Projekto autorius

Doc. Robertas Keršys
Vadovas

Doc. Ramūnas Skvireckas
Recenzentas

Kaunas, 2022



Kauno technologijos universitetas
Mechanikos inžinerijos ir dizaino fakultetas
Paulius Preibys

Važiavimo atidarytais langais įtakos automobilio aerodinaminiam pasipriešinimui ir degalų sąnaudoms tyrimas

Akademinio sąžiningumo deklaracija

Patvirtinu, kad:

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

Paulius Preibys

Patvirtinta elektroniniu būdu



Kauno technologijos universitetas

Mechanikos inžinerijos ir dizaino fakultetas

Studijų programa – Transporto priemonių inžinerija (6211EX021)

Magistro baigiamojo projekto užduotis

Studentui *Pauliui Preibiui*

1. Baigiamojo projekto tema:

Važiavimo atidarytais langais įtakos automobilio aerodinaminiam pasipriešinimui ir degalų sąnaudoms tyrimas

Research of the Influence of Driving with Open Windows on Car Aerodynamic Resistance and Fuel Consumption

2. Projekto tikslas:

Ištirti važiavimo atidarytais automobilio langais įtaką jo aerodinaminiam pasipriešinimui ir degalų sąnaudoms.

3. Projekto uždaviniai:

1. atlikti automobilių aerodinamikos ir panašių įgyvendintų tyrimų literatūros analizę;
2. *SolidWorks* programa suprojektuoti tiriamo automobilio 3D kėbulo modelį su skirtingomis atidarytų langų konfigūracijomis;
3. modeliuojant programa *Ansys Fluent* ištirti skirtingų langų atidarymo konfigūracijų įtaką automobilio aerodinaminiam pasipriešinimui;
4. remiantis aerodinaminio pasipriešinimo jėga nustatyti teorines degalų sąnaudas, jų pokytį;
5. atlikti tyrimą su realiu automobiliu ir ištirti, kokią įtaką degalų sąnaudoms turi važiavimas atidarytais langais ar įjungtu oro kondicionieriumi;
6. palyginti realaus tyrimo rezultatus su teoriniais skaičiavimais, nustatyti mažiausiai ekonomiškus važiavimo variantus, pateikti pasiūlymus ir išvadas.

4. Projekto aprašomosios dalies struktūra:

Literatūros ir tyrimų analizė, tyrimų objektas ir metodika, rezultatų analizė, apibendrinimas, palyginimas ir išvados.

5. Projekto konsultantai:

Baigiamojo projekto autorius	Paulius Preibys	2020-10-09
	<i>(vardas, pavardė, data)</i>	
Baigiamojo projekto vadovas	Doc. Robertas Keršys	2020-10-09
	<i>(pareigų sutrumpinimas, vardas, pavardė, data)</i>	
Krypties studijų programų vadovas	Doc. Saulius Japertas	2020-10-09
	<i>(pareigų sutrumpinimas, vardas, pavardė, data)</i>	

Paulius Preibys. Važiavimo atidarytais langais įtakos automobilio aerodinaminiam pasipriešinimui ir degalų sąnaudoms tyrimas. Magistro baigiamasis projektas / vadovas doc. Robertas Keršys; Kauno technologijos universitetas, Mechanikos inžinerijos ir dizaino fakultetas.

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

Reikšminiai žodžiai: automobilis, aerodinamika, oro pasipriešinimo jėga, kėbulas, degalų sąnaudos.

Kaunas, 2022. 65 p.

Santrauka

Baigiamojo magistro projekto teorinėje dalyje gilinamasi į automobilių aerodinamikos mokslo sudedamąsias dalis, pagrindines transporto priemonę važiavimo metu veikiančias aerodinamines jėgas, aptariama jų reikšmė ir analizavimo metodika. Glaustai pristatyta ant automobilio kėbulo tvirtinamų daiktų įtaka oro pasipriešinimo jėgos pokyčiams. Išanalizuotas degalų sąnaudų, priklausančių nuo aerodinaminio pasipriešinimo, įvertinimas bei aprašytos pagrindinės automobilių aerodinaminių tyrimų vėjo tuneliuose atlikimo metodikos. Taip pat darbe pristatyti pagrindiniai programinės aerodinaminės analizės aspektai, į ką reikalinga atkreipti dėmesį teoriškai modeliuojant automobilio judėjimą oro sraute. Teorinės dalies pabaigoje apžvelgiami atlikti moksliniai tyrimai, kuriuose analizuojama atidarytų langų įtaka oro pasipriešinimo jėgai bei transporto priemonės degalų sąnaudoms.

Darbo tiriamojoje dalyje atliekamas uždaro automobilio kėbulo ir 6 skirtingų atidarytų langų konfigūracijų projektavimas programa *SolidWorks*. Vėliau suprojektuoti 3D modeliai perkeliama į *Ansys Fluent* programą, kur atliekami aerodinaminiai modeliavimai. Skaičiavimai atliekami su kiekvienu skirtingu modeliu 30 km/val., 50 km/val., 70 km/val., 100 km/val. ir 130 km/val. važiavimo greičiais. Modeliavimo metu analizuojama atidarytų langų įtaka oro pasipriešinimo jėgai. Remiantis rezultatais matyti, kad atidaryti langai didina oro pasipriešinimo jėgą, o didėjant važiavimo greičiui jėgos pokytis didėja: važiuojant 100 km/val. greičiu uždaro kėbulo oro pasipriešinimo jėga siekia 308 N, o važiuojant pilnai atidarytais 4 langais – 332 N. Nustatyta, kad didžiausią įtaką oro pasipriešinimui turi asimetriškas langų atidarymas, tokiu atveju pasipriešinimo jėga siekia 337 N.

Nustačius oro pasipriešinimo koeficientus ir oro pasipriešinimo jėgas skirtinguose modeliuose, apskaičiuojama bendra galia, reikalinga įveikti oro pasipriešinimo ir riedėjimo pasipriešinimo jėgoms. Remiantis teorinėje dalyje aptarta degalų sąnaudų įvertinimo metodika, apskaičiuojamos degalų sąnaudos bei jų pokytis. Matyti, kad važiavimas atidarytais langais padidina degalų sąnaudas, lyginant su važiavimu uždarytais langais: pilnai atidarius 4 langus esant 100 km/val. greičiui degalų sąnaudos padidėja 4,5 %, o atidarius langus asimetriškai – 5,4 %.

Paskutinėje darbo dalyje atliekamas realus tyrimas su „BMW E91“ automobiliu. Važiuojama 4,2 kilometrų ilgio atkarpa uždaru kėbulu, pilnai atidarytais 4 langais ir įjungtu oro kondicionieriumi. Nustatyta, kad važiuojant 100 km/val. greičiu pilnai atidarius 4 langus degalų sąnaudos padidėja 5,45 %, o įjungus oro kondicionierių – 5,86 %. Tiesa, oro kondicionieriaus įjungimas didžiausią įtaką degalų sąnaudoms turi mažesniuose greičiuose, vėliau pokytis mažėja, ir atvirkščiai, atidarius langus mažesniuose greičiuose įtaka yra nedidelė, o ženkliai pasireiškia tik dideliuose greičiuose.

Paulius Preibys. Research of the Influence of Driving with Open Windows on Car Aerodynamic Resistance and Fuel Consumption. Masters's Final Degree Project / supervisor assoc. prof. Robertas Keršys; Faculty of Mechanical Engineering and Design, Kaunas University of Technology.

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

Keywords: car, aerodynamics, air resistance force, car body, fuel consumption.

Kaunas, 2022. 65 p.

Summary

Theoretical part of the final master's project delves into the components of automotive aerodynamics science, what are the main aerodynamic forces operating on the vehicle during driving, discusses their meaning and analysis methodology. The influence of objects placed on the car body on the changes in the force of air resistance was briefly presented. The assessment of fuel consumption, which depends on aerodynamic resistance, was analyzed and the main methodologies for conducting aerodynamic tests in wind tunnels of real cars were described. Also in the work presented the main aspects of software aerodynamic analysis, where you need to pay attention to when theoretically simulating the movement of the car moving in the air flow. At the end of the theoretical part, the researches carried out are reviewed, which analyzes the impact of open windows on the air resistance force and fuel consumption of the vehicle.

In the research part of the work, modeling of the closed car body and 6 configurations of different open windows is done in the program SolidWorks. Later, simulated 3D models are transferred to Ansys Fluent program, where aerodynamic simulations are performed. Calculations are made for each different model at speeds of 30 km/h, 50 km/h, 70 km/h, 100 km/h and 130 km/h. During the simulation, the influence of open windows on the force of air resistance is observed. Based on the results it can be seen that the open windows increase air resistance force and as the speed increases, the change in force increases: at a speed of 100 km/h, air resistance force of the closed body reaches 308 N, and when driving fully 4 windows open – 332 N. It was found that asymmetrical opening of windows has the greatest influence on air resistance, in which case resistance force reaches 337 N.

After determining air resistance coefficients and air resistance forces in different models, the total power required to overcome the forces of air resistance and rolling resistance is calculated. On the basis of the methodology for assessing fuel consumption discussed in the theoretical part, fuel consumption is calculated. It can be seen that driving with open windows increases fuel consumption compared to driving with closed windows: fully opening 4 windows at a speed of 100 km/h increases fuel consumption by 4,5 % and asymmetrical windows opening by 5,4 %.

In the final part of the work, a real study with the „BMW E91“ car is carried out. A 4,2 kilometer long section is driven with a closed body, fully opened 4 windows and turned on air conditioner. At 100 km/h, opening 4 windows shown increase fuel consumption by 5,45 % and by 5,86 % when the air conditioner is turned on. True, turning on the air conditioner has the greatest impact on fuel efficiency at lower speeds, later the change decreases, and vice versa, when opening windows at lower speeds, the influence is small, and manifests itself significantly only at high speeds.

Turinys

Lentelių sąrašas	10
Paveikslų sąrašas	11
Santrumpų ir terminų sąrašas	13
Įvadas.....	14
1. Automobilių aerodinamika.....	15
1.1. Oro srautas.....	15
1.1.1. Srauto klampumas ir spūdimas.....	16
1.1.2. Pasienio sluoksnis.....	16
1.1.3. Laminarinis ir turbulentinis srautas.....	17
1.1.4. Reinoldso skaičius.....	18
1.2. Būdingos lengvojo automobilio aerodinaminės zonos.....	19
1.3. Aerodinaminės jėgos ir momentai.....	21
1.3.1. Oro pasipriešinimo jėga.....	22
1.3.2. Keliamoji jėga.....	24
1.3.3. Šoninė jėga.....	25
1.3.4. Posvyrio momentas.....	25
1.3.5. Polinkio momentas.....	26
1.3.6. Pokrypio momentas.....	26
1.4. Ant automobilio kėbulo pritvirtinamų papildomų elementų įtaka aerodinaminės savybėms ir degalų sąnaudoms.....	26
1.5. Degalų sąnaudų pokyčio įvertinimas.....	27
1.6. Aerodinaminiai tyrimų tuneliai.....	28
1.6.1. Žemės efektas.....	29
1.6.2. Eksperimentai su sumažintais modeliais.....	30
1.6.3. Srauto turbulentiškumas.....	30
1.6.4. Oro tunelio korekcijos.....	31
1.7. Programinė aerodinaminė analizė.....	31
1.7.1. Darbinės aplinkos sudarymas.....	31
1.7.2. Skaitinių metodų sprendimas.....	33
1.7.3. Rezultatų atvaizdavimas ir analizė.....	33
1.8. Atlikti tyrimai.....	34
2. Važiavimo atidarytais langais įtakos automobilio aerodinaminiam pasipriešinimui ir degalų sąnaudoms tyrimas.....	38
2.1. 3D Modelio kūrimas.....	38
2.2. Aerodinaminė analizė.....	39
2.2.1. Modelio paruošimas.....	39
2.2.2. Baigtinių elementų tinklelio kūrimas.....	40
2.2.3. Modeliavimo nustatymai.....	41
2.2.4. Rezultatų konvergavimas.....	42
2.3. Grafiniai rezultatai.....	43
2.4. Skaitiniai rezultatai.....	48
2.5. Degalų sąnaudų įvertinimas.....	50
2.6. Realus automobilio „BMW E91“ degalų sąnaudų pokyčio tyrimas.....	55

2.6.1. Realaus automobilio „BMW E91“ degalų sąnaudų pokyčio tyrimo rezultatai.....	56
Tyrimo apibendrinimas ir rezultatų palyginimas	61
Išvados	62
Literatūros sąrašas	63
Priedai.....	66
1 priedas. Kraštinių sąlygų priskyrimas modeliavimui <i>Ansys Fluent</i> programoje.....	66
2 priedas. Srauto tėkmės linijos apie modelį su asimetriškai atidarytais langais	69
3 priedas. Srauto tėkmės linijos apie modelį su uždarytais langais	71
4 priedas. Srauto tėkmės greičio atvaizdavimas simetrinėje plokštumoje, modelis su uždarytais langais.....	73
5 priedas. Srauto tėkmės greičio atvaizdavimas plokštumoje ties atidarytais langais, modelis su asimetriškai atidarytais langais.....	74

Lentelių sąrašas

1 lentelė. Procentinė skirtingų pasipriešinimo rūšių įtaka bendram aerodinaminiam automobilio pasipriešinimui [16].....	26
2 lentelė. Vidutinis oro pasipriešinimo padidėjimas pritvirtinus įvairius kūnus ant automobilio stogo [19]	27
3 lentelė. Malaizijos universiteto darbuotojų atlikto aerodinaminio tyrimo rezultatai [26].....	35
4 lentelė. Mokslininkų atlikto tyrimo su autobusu aerodinaminiai rezultatai [28].....	36
5 lentelė. Baigtinių elementų tinklelio parametrai.....	41
6 lentelė. Aerodinaminio modeliavimo pagrindiniai nustatymai	41
7 lentelė. Apskaičiuota bendra pasipriešinimo jėga visuose greičiuose.....	51
8 lentelė. Degalų sąnaudos skirtinguose modeliuose	53
9 lentelė. Tiriamo automobilio charakteristikos	55
10 lentelė. Tyrimo sąlygos	55
11 lentelė. Pirmo važiavimo degalų sąnaudų rezultatai	56
12 lentelė. Antro važiavimo degalų sąnaudų rezultatai	57
13 lentelė. Abiejų važiavimų degalų sąnaudų vidurkiai.....	57

Paveikslų sąrašas

1 pav. Aerodinaminio ir riedėjimo pasipriešinimo jėgos kitimas skirtinguose greičiuose [2]	15
2 pav. Srauto linija [3]	15
3 pav. Srauto linijų pasiskirstymas apie aptekamą automobilio kėbulą [3, 4]	16
4 pav. Pasienio sluoksnio greičių epiūra [6].....	17
5 pav. Laminarinio-turbulentinio sluoksnio virsmo vieta [6].....	17
6 pav. Laminarinis ir turbulentinis srautas [8].....	18
7 pav. Srauto tėkmės pokytis [11]	19
8 pav. Srauto tėkmė apie sedano tipo kėbulą [12].....	19
9 pav. Srauto tėkmė apie sedano tipo kėbulą [12].....	20
10 pav. Trimatis srauto tekėjimas ties variklio gaubto ir rato sparno susijungimu [3]	20
11 pav. Tekančio srauto slėgio pasiskirstymas virš automobilio kėbulo ir po juo [12]	21
12 pav. Transporto priemonę veikiančios aerodinaminės jėgos ir momentai [13].....	22
13 pav. Oro pasipriešinimo jėgos dedamosios [15].....	23
14 pav. Keliamosios jėgos priklausomybė nuo atstumo tarp automobilio dugno ir kelio paviršiaus [12]	24
15 pav. Automobilio kėbulas su įvairias daiktas, pritvirtintais ant stogo [17].....	27
16 pav. Uždaras aerodinaminis vamzdis [22].....	29
17 pav. Kelio judėjimui po automobiliu užtikrinimo būdai [21].....	29
18 pav. Turbulentiško srauto sukūrimas oro tunelyje [21].....	30
19 pav. 3D automobilio modelis ir vėjo tunelio matmenys CFD analizės aplinkoje [25]	32
20 pav. Kraštinių sąlygų sudarymas darbiname srauto regione tiriant pusę automobilio paviršiaus [25]	32
21 pav. Kraštinės sąlygos automobiliui [25]	33
22 pav. Srauto greičio skirtinguose regiono taškuose vizualinis atvaizdavimas CFD analizėje [25]	34
23 pav. Malaizijos universiteto darbuotojų naudotos skaičiavimų įrangos metodika [26]	34
24 pav. SAE organizacijos atliekamo tyrimo objektas [27]	35
25 pav. SAE organizacijos atlikto tyrimo rezultatai [27]	35
26 pav. Sedano tyrimo rezultatai, degalų sąnaudos skirtingais važiavimo metodais [29]	36
27 pav. Visureigio tyrimo rezultatai, degalų sąnaudos skirtingais važiavimo metodais [29]	37
28 pav. Tiriamos modelių konfigūracijos ; a) – uždaryti langai; b) – atidaryti priekiniai langai iki pusės; c) – atidarytas stoglangis; d) – atidaryti priekiniai langai pilnai; e) – atidaryti priekiniai langai pilnai ir stoglangis; f) – atidaryti 4 langai pilnai; g) – atidarytas priekinis kairės pusės langas ir galinis dešinės pusės langas	38
29 pav. <i>Ansys SpaceClaim</i> aplinkoje sukurtas vėjo tunelis bei išskirtos svarbiausios zonos.....	39
30 pav. Vėjo tunelio matmenys, L – automobilio ilgis	39
31 pav. Pilnas baigtinių elementų tinklelis	40
32 pav. Baigtinių elementų tinklelis automobilio paviršiuje ir šalia automobilio.....	40
33 pav. Automobilio paviršiuje esantis pasienio sluoksnis	41
34 pav. Skaičiavimo kintamųjų tolygumas ir konvergavimas.....	42
35 pav. Konvergavimo funkcijos priskyrimas oro pasipriešinimo jėgos skaičiavimui.....	42
36 pav. Oro pasipriešinimo jėgos ir pasipriešinimo koeficiento kitimas iteracijų metu	42
37 pav. Recirkuliaciniai regionai modeliuose; a) – uždaryti langai; b) – atidaryti priekiniai langai iki pusės; c) – atidaryti priekiniai langai pilnai; d) – atidarytas stoglangis; e) – atidaryti priekiniai langai	

pilnai ir stoglangis; f) – atidaryti 4 langai pilnai; g) – atidarytas priekinis kairės pusės langas ir galinis dešinės pusės langas	43
38 pav. Tekančio srauto slėgio koeficiento pasiskirstymas virš kėbulo ir po juo, langai uždaryti ...	44
39 pav. Tekančio srauto slėgio koeficiento pasiskirstymas virš kėbulo ir po juo, atidarytas stoglangis ir priekiniai langai pilnai.....	44
40 pav. Srauto greitis automobilio plokštumoje 1,2 metro aukštyje, visi langai uždaryti	45
41 pav. Srauto greitis automobilio plokštumoje 1,2 metro aukštyje, priekiniai langai atidaryti iki pusės	45
42 pav. Srauto greitis automobilio plokštumoje 1,2 metro aukštyje, priekiniai langai atidaryti pilnai	45
43 pav. Srauto greitis automobilio plokštumoje 1,2 metro aukštyje, atidarytas stoglangis	46
44 pav. Srauto greitis automobilio plokštumoje 1,2 metro aukštyje, atidaryti priekiniai langai ir stoglangis.....	46
45 pav. Srauto greitis automobilio plokštumoje 1,2 metro aukštyje, visi keturi langai atidaryti pilnai	46
46 pav. Srauto greitis automobilio plokštumoje 1,2 metro aukštyje, langai atidaryti asimetriškai...	47
47 pav. Srauto tėkmė automobilyje, greitis 70 km/val.; a) – atidaryti priekiniai langai iki pusės; b) – atidaryti priekiniai langai pilnai; c) – atidarytas stoglangis; d) – atidaryti priekiniai langai pilnai ir stoglangis; e) – atidaryti 4 langai pilnai; f) – atidarytas priekinis kairės pusės langas ir galinis dešinės pusės langas	47
48 pav. Oro pasipriešinimo jėgos kitimas važiuojant uždarytais ar skirtingu būdu atidarytais langais bei pasipriešinimas riedėjimui	48
49 pav. Aerodinaminio pasipriešinimo koeficientas važiuojant uždarytais ar skirtingu būdu atidarytais langais.....	48
50 pav. Procentinis aerodinaminio oro pasipriešinimo koeficiento padidėjimas važiuojant skirtingu būdu atidarytais langais	49
51 pav. Aerodinaminio pasipriešinimo koeficiento kitimas važiuojant uždarytais ar skirtingu būdu atidarytais langais skirtinguose greičiuose	49
52 pav. Pasipriešinimui įveikti reikalinga galia važiuojant uždarytais ar skirtingu būdu atidarytais langais.....	52
53 pav. Degalų sąnaudos l/100 km ir degalų sąnaudų l/100 km praradimas važiuojant uždarytais ar skirtingu būdu atidarytais langais	54
54 pav. Degalų sąnaudų procentinis padidėjimas važiuojant skirtingu būdu atidarytais langais.....	54
55 pav. Tyrimo maršrutas.....	56
56 pav. Realus tyrimo metu nustatytos degalų sąnaudos	57
57 pav. Realus tyrimo metu nustatytas procentinis degalų sąnaudų padidėjimas važiuojant atidarytais 4 langais ar įjungtu oro kondicionieriumi, lyginant su važiavimu uždarytais langais	58
58 pav. Realus tyrimo metu nustatytas procentinis degalų sąnaudų skirtumas važiuojant įjungus oro kondicionierių, lyginant su važiavimu atidarytais 4 langais.....	58
59 pav. Realus tyrimo metu nustatytos degalų sąnaudos l/100 km ir degalų sąnaudų l/100 km praradimas važiuojant skirtingais metodais.....	59
60 pav. Realus tyrimo metu nustatytas ir teoriškai apskaičiuotas procentinis degalų sąnaudų padidėjimas, lyginant su važiavimu uždarytais langais.....	60

Santrumpų ir terminų sąrašas

Santrumpos:

JAV – Jungtinės Amerikos Valstijos;

SAE – automobilių inžinerijos draugija;

CFD – skaičiuojamoji skysčių dinamika;

TP – transporto priemonė.

Terminai:

Aerodinamika – mokslas apie oro (dujų) judėjimą ir jėgas, veikiančias dujose judančius kūnus.

Skaičiuojamoji skysčių dinamika – skysčių mechanikos šaka, kuri naudoja skaitinę analizę, algoritmus ir diferencialines lygtis tam, kad būtų išsiaiškintos skirtingos srauto tėkmės aplink įvairius kūnus situacijos.

Įvadas

Aerodinamika yra laikoma vienu pagrindiniu automobilio ar kitos transporto priemonės konstrukciniu aspektu. Šia sfera ypač pradėta domėtis 20-ajame amžiuje, kadangi pasaulinis klimato atšilimas, brangstantys naftos produktai ir senkantys jų išteklių privertė automobilių inžinierius ieškoti sprendimų, kaip sumažinti degalų sąnaudas, skleidžiamą triukšmą ir taip padidinti automobilio efektyvumą. Prieš dešimtmetį atlikti tyrimai rodo, kad sumažinus aerodinaminio pasipriešinimo koeficiento reikšmę dydžiu 0,1 galima padidinti nuvažiuojamą atstumą 2,6 km/l (2,6 kilometro per sunaudojamą litrą degalų). Jungtinių Amerikos Valstijų energetikos departamentas atliko tyrimą [1], kurio metu išsiaiškinta, kad 16 % JAV pagaminamos energijos yra sunaudojama transporto priemonės aerodinaminiam pasipriešinimui keliuose įveikti. Teigiama, kad trys pagrindiniai veiksniai, darantys įtaką degalų sąnaudoms, yra variklio efektyvumas, automobilio masė bei aerodinaminis pasipriešinimas, o transporto priemonei judant didesniu nei 70 km/val. greičiu, aerodinaminis pasipriešinimas yra svarbiausias veiksnys degalų ekonomijai.

Baigiamajame magistro projekte aprašyti automobilių aerodinamikos ypatumai, transporto priemonei judant atsirandančios aerodinaminės jėgos, jų reikšmė ir analizavimo metodikos. Modeliuojant oro srauto aptekėjimą apie automobilio kėbulą, gilinamasi į aerodinaminių jėgų pokyčius, kai kelionės metu vairuotojas ar keleiviai atidaro langus, analizuojama, kokią įtaką tai turi aerodinaminio pasipriešinimo padidėjimui ir degalų sąnaudoms.

Darbo objektas – atidarytais langais važiuojantis automobilis, jo degalų sąnaudos, transporto priemonę veikiantis aerodinaminis pasipriešinimas.

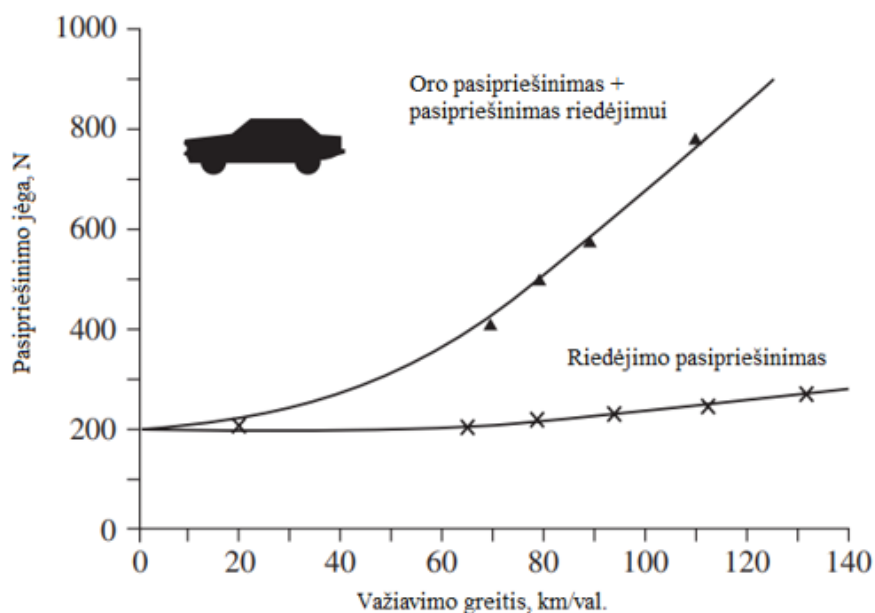
Darbo tikslas – ištirti važiavimo atidarytais automobilio langais įtaką jo aerodinaminiam pasipriešinimui ir degalų sąnaudoms.

Darbo uždaviniai:

1. atlikti automobilių aerodinamikos ir panašių įgyvendintų tyrimų literatūros analizę;
2. *SolidWorks* programa suprojektuoti tiriamo automobilio 3D kėbulo modelį su skirtingomis atidarytų langų konfigūracijomis;
3. modeliuojant programa *Ansys Fluent* ištirti skirtingų langų atidarymo konfigūracijų įtaką automobilio aerodinaminiam pasipriešinimui;
4. remiantis aerodinaminio pasipriešinimo jėga nustatyti teorines degalų sąnaudas, jų pokytį;
5. atlikti tyrimą su realiu automobiliu ir ištirti, kokią įtaką degalų sąnaudoms turi važiavimas atidarytais langais ar įjungtu oro kondicionieriumi;
6. palyginti realaus tyrimo rezultatus su teoriniais skaičiavimais, nustatyti mažiausiai ekonomiškus važiavimo variantus, pateikti pasiūlymus ir išvadas.

1. Automobilių aerodinamika

Automobilių aerodinamika apima keliais važiuojančių transporto priemonių aerodinamikos tyrimus. Pagrindiniai šių tyrimų tikslai yra sumažinti oro pasipriešinimo jėgą ir vėjo keliamą triukšmą, kad būtų užtikrintas transporto priemonės saugumas, stabilumas bei pasiektas efektyviausias degalų suvartojimas.

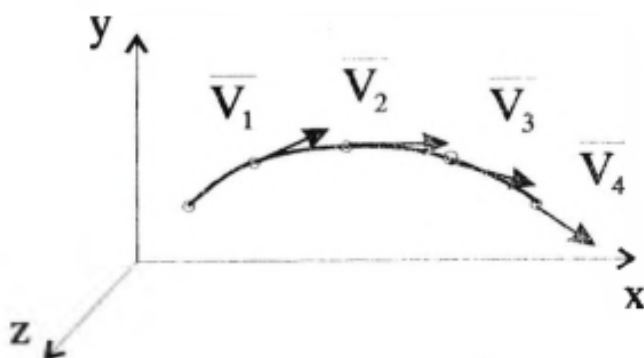


1 pav. Aerodinaminio ir riedėjimo pasipriešinimo jėgos kitimas skirtinguose greičiuose [2]

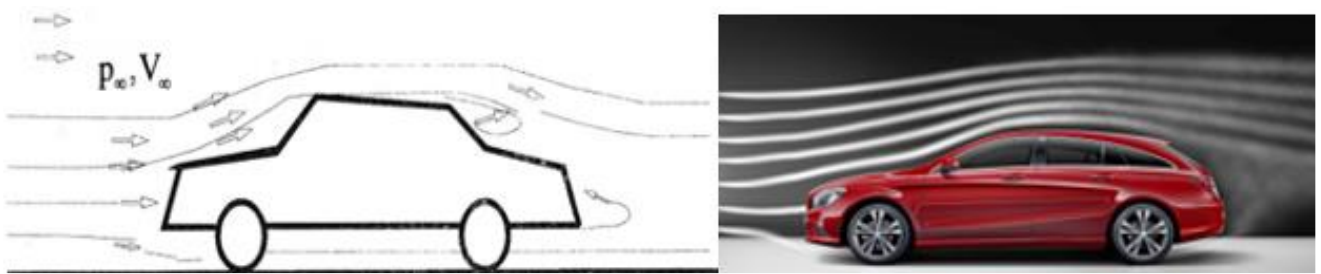
1 paveiksle matyti, kokią didelę įtaką turi aerodinaminis pasipriešinimas. Dėl kelio dangos ir rato padangos kontakto atsiranda pasipriešinimas riedėjimui, tačiau didėjant automobilio važiavimo greičiui, jis kinta labai nežymiai, priešingai oro pasipriešinimui. Antroji kreivė rodo, kad didinant važiavimo greitį, oro pasipriešinimo jėga didėja apytiksliai tiesine priklausomybe [2].

1.1. Oro srautas

Vienas svarbiausių aerodinamikos tyrimų aspektų yra srautinės linijos. Srauto linija yra kreivės sudaranti taškų visuma erdvėje, o kiekvienos dalelės greičio vektorius veikia kreivės liestinės kryptimi (2 pav.). Kai srauto judesys nusistovi, srauto linijos sutampa su dalelių judėjimo trajektorija. Tada kiekviena dalelė juda srauto vektoriaus greičiu.



2 pav. Srauto linija [3]



3 pav. Srauto linijų pasiskirstymas apie aptekamą automobilio kėbulą [3, 4]

Geriausias būdas atvaizduoti ir pamatyti srauto linijas – eksperimento metu, kai srautas teka apie kūną, į srautą įleisti spalvotų dūmų. Srautui nusistovėjus galima aiškiai matyti dūmų linijas, kurias perteikia spalvotų dalelių trajektorija (3 pav.) [3].

1.1.1. Srauto klampumas ir spūdimas

Klampumas yra skysčio savybė, besipriešinanti jėgai, sukeliančiai srauto tekėjimą. Didelio klampumo skystis, pavyzdžiui, medus, turi didelį pasipriešinimą judėjimui. Vandens klampumas yra daug mažesnis, todėl kūnui prasibrauti pro tokį srautą lengviau [5]. Aerodinamikoje klampumas apibūdinamas kaip jėga, kuri suteikia dviem tarpusavyje judantiems kūnams tam tikrą greičio judesį ir yra apskaičiuojama pagal (1) formulę [3]:

$$F = \mu \frac{Sv}{d}; \quad (1)$$

čia F – klampumo jėga (N);

μ – klampumo dinaminis koeficientas (kg/ms);

S – sąveikaujančio kūno paviršiaus plotas (m²);

v – greitis (m/s);

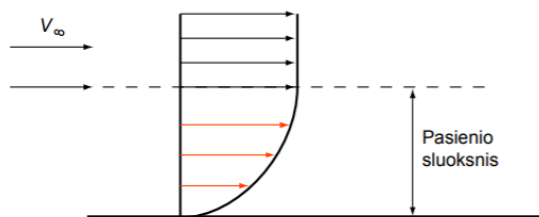
d – tarpusavio kūnų atstumas (m).

Dujos ir skysčiai, lyginant su kietais kūnais, deformuojasi ženkliai daugiau. Svarbi šių medžiagų savybė – gebėjimas keisti tūrį, veikiant išorinėms jėgoms. Ši dujų ir skysčių charakteristika vadinama spūdimu. Spūdimas ypač pasireiškia dujose, o jį įvertinti galima per spūdimą koeficientą, kuris yra lygus santykiniam tūrio deformacijos pokyčiui, atsižvelgiant į pakitusį slėgio vienetą. Spūdimą charakteristikas aerodinaminiuose reiškinuose apibrėžia Macho skaičius, tačiau dujų spūdimą įtaka pasireiškia tik judant viršgarsiniu greičiu, taigi automobilių aerodinamikoje šis aspektas nenagrinėjamas [3].

1.1.2. Pasienio sluoksnis

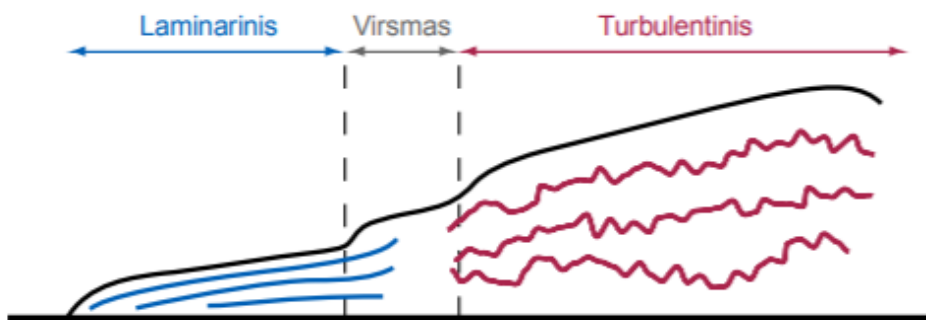
Kai objektas juda skysčio ar dujų sraute, šalia objekto esančios srauto molekulės yra sutrikdomos ir juda aplink objektą. Tarp srauto dalelių ir kūno susidaro aerodinaminės jėgos. Šių jėgų dydis priklauso nuo objekto formos, greičio, srauto masės, klampumo bei spūdimą. Srautui judant objektu, šalia kūno esančios molekulės prilimpa prie paviršiaus. Dalelės, esančios virš paviršiaus, sulėtėja, susidūrusios su ant paviršiaus prilipusiomis molekulėmis. Kuo toliau tolstama nuo paviršiaus, tuo

mažiau molekulių susidūrimai paveikia objektą. Šiame ploname sluoksnyje, esančiame šalia kūno paviršiaus, srauto greitis kinta nuo nulio iki laisvojo srauto greičio, kuris vyrauja toliau nuo kūno. Aerodinamikos inžinieriai šį sluoksnį vadina pasienio sluoksniu (4 pav.).



4 pav. Pasienio sluoksnio greičių epiūra [6]

4 paveiksle matyti, kaip kinta srauto greitis pasienio sluoksnyje. Tekančių dalelių greičio pokytis srauto tekėjimo kryptimi sukelia greičio pokyčius ir kitomis kryptimis. Atsiranda maža greičio dedamoji, kuri yra statmena paviršiui, taip po truputį išstumdama srautą virš paviršiaus. Pasienio sluoksnio storį galima išreikšti kaip šio išstumto srauto poslinkio dydį. Poslinkio dydis priklauso nuo Reinoldso skaičiaus, kuris yra inercinių jėgų santykis su klamos jėgomis.



5 pav. Laminarinio-turbulentinio sluoksnio virsmo vieta [6]

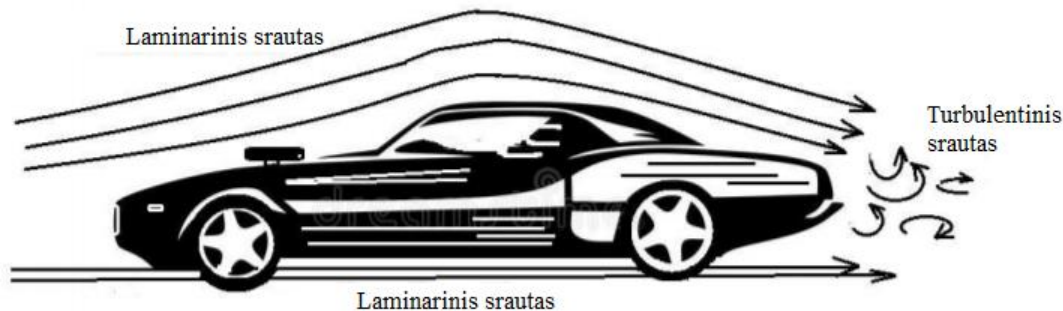
Pasioenio sluoksnis būna dviejų tipų: laminarinis ir turbulentinis. Pradžioje, kai srautas ir kūno paviršius susitinka, susidaro laminarinis pasienio sluoksnis, tačiau paprastai greitai jis tampa nestabilus ir virsta turbulentiū. Vieta, kur laminarinis pasienio sluoksnis tampa turbulentiū, yra vadinama srauto virsmo vieta (5 pav.) [6, 7].

1.1.3. Laminarinis ir turbulentinis srautas

Kaip jau minėta, atsižvelgiant į tekėjimo pobūdį, srautą galima suskirstyti į laminarinį ir turbulentiū. Laminarinis srautas yra paremtas tvarkingu, lygiagrečiu dalelių judėjimu, jame nėra sukurių ar kryžminių srovių, jos nesimaišo tarpusavyje. Dažniausiai laminarinis srautas pasireiškia mažesniuose greičiuose. Laminarinio tekėjimo pagrindiniai aspektai:

- oras juda sluoksniais, jo greitis šalia automobilio paviršiaus lygus nuliui;
- tekančių dalelių greitis tuose pačiuose taškuose yra vienodas;
- pasipriešinimo jėgą didžiaja dalimi sukelia trinties pasipriešinimas;
- pasipriešinimo jėga yra tiesiogiai proporcinga automobilio judėjimo greičiui.

Padidėjus oro srauto greičiui, tekančiui per automobilio kėbulą, srautas pereina iš laminarinio tekėjimo į turbulentinį. Greitis, kuriame laminarinis tekėjimas virsta turbulentišku, vadinamas kritiniu greičiu.



6 pav. Laminarinis ir turbulentinis srautas [8]

Turbulentinis srautas sukelia daug didesnę pasipriešinimą nei laminarinis, jis yra chaotiškas, o srauto skystis ar dujos maišosi (6 pav.). Turbulentiniame sluoksnyje tekėjimo greitis nuolat kinta tiek savo dydžiu, tiek kryptimi. Dauguma skysčių ir dujų srautų yra turbulentiniai. Šiam srauto tekėjimui yra būdinga:

- srauto netvarkingumas ir chaotiškumas;
- pasipriešinimo jėga priklauso nuo oro tankio, o ne nuo klampumo;
- pasipriešinimo jėga yra proporcinga greičio kvadratui [9, 10].

1.1.4. Reinoldso skaičius

Svarbus klampumo parametras yra Reinoldso skaičius, išreiškiantis inercinių jėgų ir klampos jėgų santykį. Mokslininkas O. Reynolds`as nustatė, kad, jeigu srauto greitis yra didesnis už tam tikrą kritinę reikšmę, srautas tampa nenusistovėjęs, chaotiškas. Tėkmės pobūdis nustatomas bedimensiu dydžiu, kuris ir pavadintas mokslininko garbei – Reinoldso skaičiumi (2) [3]:

$$Re = \frac{vb}{\nu} = \frac{vb\rho}{\mu}; \quad (2)$$

čia Re – Reinoldso skaičius;

v – srauto greitis (m/s);

b – aptekamo kūno charakteringas matmuo (m);

ν – kinematinis klampumo koeficientas (m²/s);

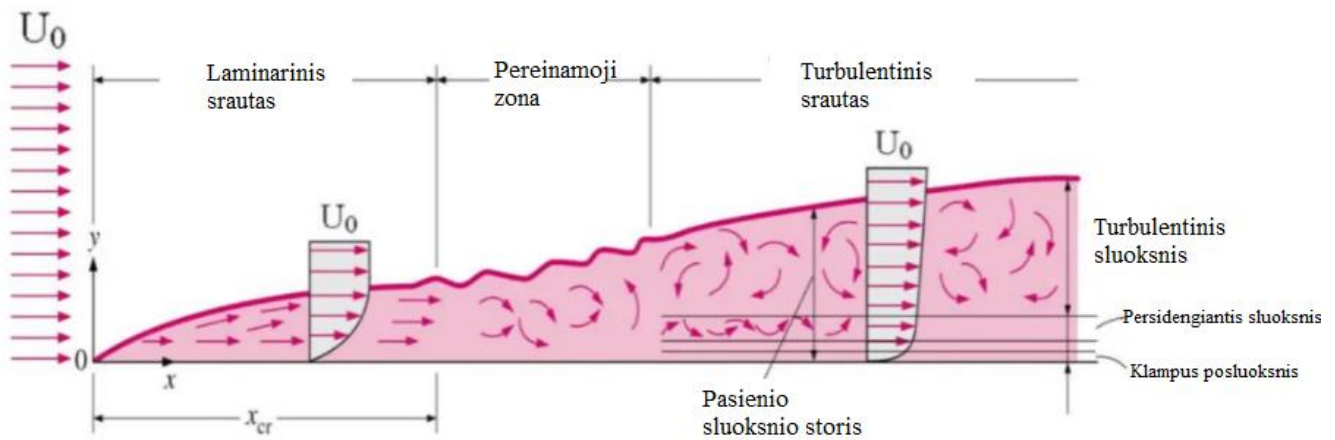
ρ – aplinkos tankis (kg/m³);

μ – dinaminis klampumo koeficientas (kg/ms).

Jeigu norima aerodinamiškai lyginti du skirtingų matmenų kūnus, reikia užtikrinti, kad Reinoldso skaičius būtų vienodas ir tenkintų šią sąlygą [3]:

$$Re_1 = Re_2 . \quad (3)$$

Sąlyga gali būti užtikrinama keičiant tokius srauto parametrus kaip greitis arba dujų kinematinis klampumas. Tokiu principu galima lyginti ir tirti sumažintus realių kūnų modelius, o rezultatai bus teisingi.

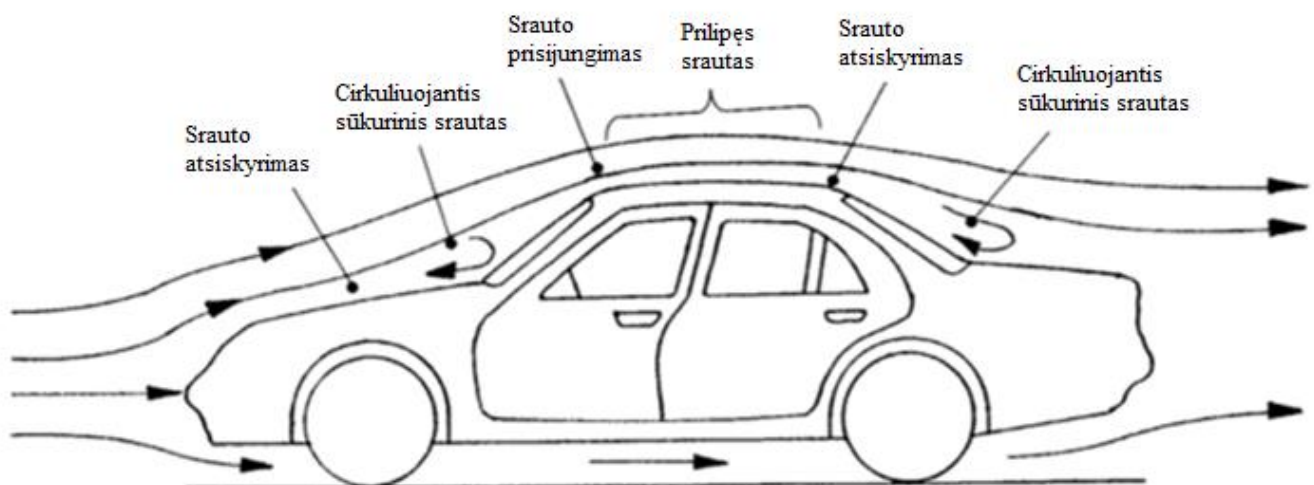


7 pav. Srauto tėkmės pokytis [11]

Kaip jau minėta anksčiau, laminarinis tekėjimas įprastai ilgai neišsilaiko, o virsta į turbulentinį. Šis virsmas įvyksta prie kritinio Reinoldso skaičiaus, jo reikšmė yra lygi apie 500 000. Žinant kritinį Reinoldso skaičių galima apskaičiuoti atstumą x_{cr} , kuriame įvyksta srauto pokytis (7 pav.) [3, 11].

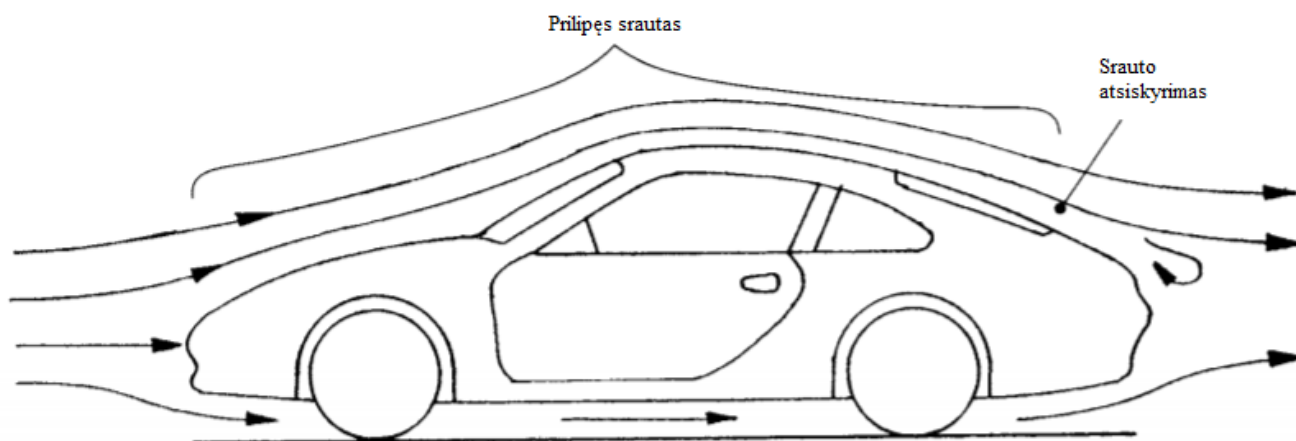
1.2. Būdingos lengvojo automobilio aerodinaminės zonos

Oro srautas, tekantis per automobilio kėbulą, linkęs tolygiai atkartoti kūno paviršiaus trajektorijas iki tol, kol staiga nepasikeičia objekto forma. Priekinis variklio gaubtas paprastai būna šiek tiek išlenktas ir kyla aukštyr link priekinio stiklo, toliau seka į viršų nukreiptas stiklas, o po jo, išlenktas, bet beveik horizontalus stogas. Galinis stiklas nukreiptas žemyn, kur apačioje susijungia su bagažine arba tęsiasi laipsnišku nuolydžiu žemyn, kol pasiekiamas automobilio galas (8 pav.).



8 pav. Srauto tėkmė apie sedano tipo kėbulą [12]

Oro srautas įprastai didžiausią greitį ir mažiausią slėgį pasiekia priekinio stiklo viršutinėje dalyje, ties susijungimu su stogu. Link galinės dalies, kur baigiasi stogas ir srautas krypsta galinio stiklo trajektorija, sumažėja oro greitis ir padidėja slėgis. Jei slėgio kilimas artėjant link galinės dalies yra laipsniškas (tolydus nuolydis nuo stogo iki galinės automobilio dalies), tada srautų maišymasis su turbulentiniais sūkuriais bus nedidelis (9 pav.). Atvirkščiai, jeigu automobilio kūbulas turi ilgą horizontalią bagažinės dalį (kaip dauguma sedano tipo automobilių), slėgio pakilimas bus didelis, todėl pagrindinio srauto maišymosi intensyvumas su ribiniais sluoksniais smarkiai išauga (8 pav.).



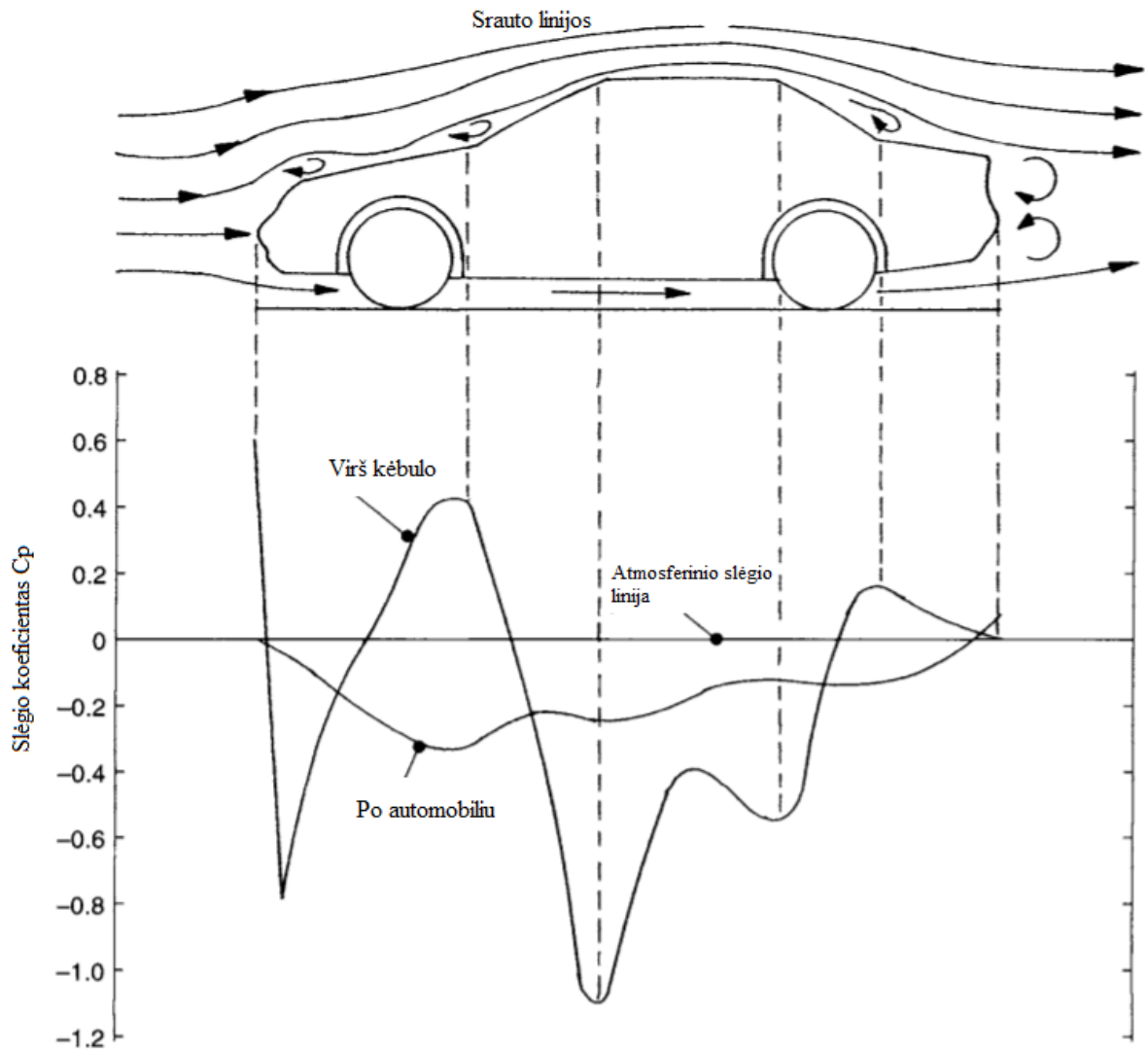
9 pav. Srauto tėkmė apie sedano tipo kūbulą [12]

Tokiame būvyje srautas linkęs atitrūkti nuo kūno paviršiaus. Pavyzdžiui, dažnai srautas atitrūksta variklio gaubto ir priekinio stiklo sandūroje: jeigu kampas tarp jų yra statesnis, srautas atsiskiria nuo variklio gaubto ir vėl prisitvirtina tik prie stiklo viršutinės dalies arba stogo. Tarpas, kuriame srautas yra atitrūkęs, užpildomas cirkuliuojančia sukamąja tėkme, kuri neretai gali virsti stipriu skersiniu sūkuriumi [12]. Srauto tėkmę apie kūbulą galima suskaidyti į dvimatį ir trimatį. Daugiausia vyrauja dvimatis srautas, kur srauto linijos išsidėsčiusios vertikaliajoje plokštumoje, o srauto greitis kinta tik Y ašyje. Trimatis srautas pasireiškia ten, kur srauto greitis kinta visomis koordinačių ašių kryptimis, pavyzdžiui ties variklio gaubto ir priekinių ratų sparnų susijungimu, kai srautas teka išilgai automobilio, tačiau tuo pat metu užsilenkia ties ratų sparnais, taip keisdamas kryptį ir plokštumoje Z–Y (10 pav.) [3].



10 pav. Trimatis srauto tekėjimas ties variklio gaubto ir rato sparno susijungimu [3]

11 paveiksle pavaizduotas slėgio koeficiento kitimas charakteringose automobilio kūbulo vietose.

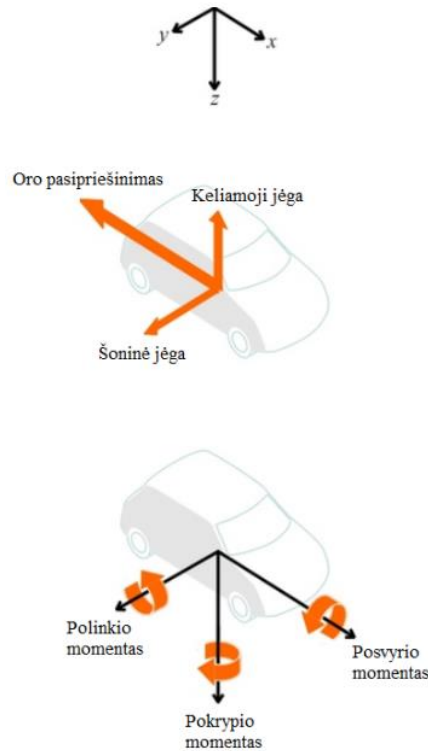


11 pav. Tekančio srauto slėgio pasiskirstymas virš automobilio kėbulo ir po juo [12]

Matyti, kad ties priekine dalimi slėgis yra didžiausias, nes srautas atsitrenkia į statų automobilio priekį. Vėliau slėgis krenta, o ties variklio gaubto ir priekinio stiklo susijungimo vieta vėl pakyla. Kaip jau minėta, didžiausias srauto greitis įprastai yra ties priekinio stiklo susijungimu su automobilio stogu, tą atspindi šioje vietoje esantis mažiausias srauto slėgis. Ties galinio stiklo susijungimu su bagažine slėgis vėl pakyla, o už automobilio susilygina su atmosferos slėgiu. Srautas, vyraujantis tarp automobilio dugno ir kelio paviršiaus yra daug pastovesnis, kadangi dažnu atveju transporto priemonės dugnas yra lygus bei oro srautas nesutinka didelio pasipriešinimo [12].

1.3. Aerodinaminės jėgos ir momentai

Visos aerodinaminės jėgos transporto priemonę veikia ribiniame sluoksnyje – ploname oro sluoksnyje, esančiame arčiausiai kūno paviršiaus. Šiame sluoksnyje oro srautas elgiasi savitai – lėtėja dėl atsirandančios trinties ir molekulių sąveikos. Oro molekulės šalia automobilio paviršiaus juda atsitiktinai visomis kryptimis. Aerodinaminės jėgas sukuria atskirų molekulių bendras poveikis ribiniame sluoksnyje.



12 pav. Transporto priemonę veikiančios aerodinaminės jėgos ir momentai [13]

Galima išskirti tris aerodinamines jėgas ir tris momentus, kurie veikia automobilį judant: oro pasipriešinimo jėga, keliamoji jėga, šoninė jėga bei posvyrio, polinkio ir pokrypio momentai (12 pav.) [13].

1.3.1. Oro pasipriešinimo jėga

Važiuojant nedideliu greičiu oro pasipriešinimas yra mažas, tačiau ši jėga ženkliai pasireiškia, kai peržengiamas 70 km/val. greitis. Oro pasipriešinimas veikia prieš automobilio judėjimo kryptį, todėl yra būtina sukurti aerodinamišką automobilio kėbulo dizainą, siekiant užtikrinti efektyvų transporto priemonės greičio ir suvartojamų degalų santykį. Oro pasipriešinimo jėgą sudaro dvi dedamosios: trinties bei slėgio pasipriešinimas [14].

Trinties pasipriešinimas

Kai kūnas juda sraute, šalia kūno esančios srauto dalelės prilimpa prie paviršiaus ir juda kartu su juo. Šios prilipusios molekulės sąveikauja su virš jomis esančio srauto molekulėmis ir pasireiškia trinties jėga, nukreipta prieš automobilio judėjimo kryptį – transporto priemonė stabdoma. Trinties jėga gali būti apibūdinama kaip išilginė jėga, kuri veikia mažo ploto vienetą tarp srauto ir aptekamo kūno paviršiaus. Ši jėga sukuria šlyties įtempius, kurie yra proporcingi srauto greičiui, tenkančiam tarp srauto esančių sluoksnių atstumo vienetui ir yra apskaičiuojama pagal (4) formulę [3]:

$$\tau = \mu \left(\frac{dv}{dn} \right); \quad (4)$$

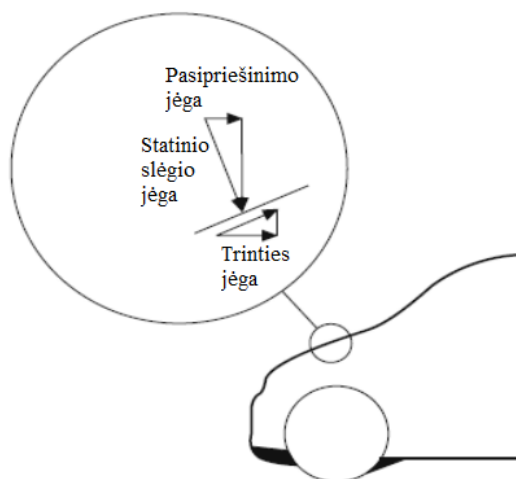
čia μ – dinaminis klampumo koeficientas (kg/ms);

$\frac{dv}{dn}$ – srauto greičio gradientas.

Trinties pasipriešinimas veikia išilgai kūno paviršiaus ir yra proporcingas visam paviršiaus plotui, transporto priemonės forma neturi įtakos, tačiau tėkmės srauto pobūdis turi reikšmės trinties pasipriešinimui. Turbulentiniame sraute pasienio sluoksnis auga, o greičio gradientas šalia paviršiaus yra didesnis nei laminarinio tekėjimo metu. Dėl šios priežasties turbulentinis srautas sukuria didesnius šlyties įtempius bei didesnę pasipriešinimą [3, 14].

Slėgio pasipriešinimas

Antroji dedamoji yra slėgio pasipriešinimas, veikiantis stačiu kampu į kūno paviršių. Priešingai nei trinties pasipriešinimas, slėgio pasipriešinimas ypač priklauso nuo kūno formos. Pavyzdžiui, priekinėje automobilio dalyje srautas atsitrenkia į statmeną priekinį automobilio paviršių, šiame taške srauto slėgis stipriai pakyla, o kinetinė energija mažėja, šį tašką galima pavadinti stagnacijos tašku. Tiesa, srauto molekulės ilgai neužsilaiko stagnacijoje, o veikiamos aplinkinių srautų yra išstumiamos judėti toliau. Judant į automobilio galą molekulių greitis vėl didėja, generuojama kinetinė energija bei mažėja srauto slėgis. Dėl šių priežasčių ties automobilio priekine ir galine dalimi atsiranda didelis slėgių skirtumas, dėl kurio transporto priemonė stabdoma [14].



13 pav. Oro pasipriešinimo jėgos dedamosios [15]

Kaip jau žinoma, bendrą oro pasipriešinimo jėgą sudaro dėl srauto klampumo pasireiškiantis trinties pasipriešinimas ir dėl skirtingų srauto greičių atsirandantis slėgio pasipriešinimas (13 pav.), ji apskaičiuojama pagal (5) formulę [15]:

$$F_D = F_f + F_p = C_D A \frac{\rho v^2}{2}; \quad (5)$$

čia F_f – trinties pasipriešinimas (N);

F_p – slėgio pasipriešinimas (N);

C_D – oro pasipriešinimo koeficientas;

A – automobilio midelio plotas (m^2);

ρ – srauto tankis (kg/m^3);

v – kūno greitis (m/s).

Oro pasipriešinimo koeficientas apskaičiuojamas pagal (6) formulę [15]:

$$C_d = \frac{F_D}{\frac{1}{2}\rho v^2 A}; \quad (6)$$

čia F_D – pasipriešinimo jėga (N);

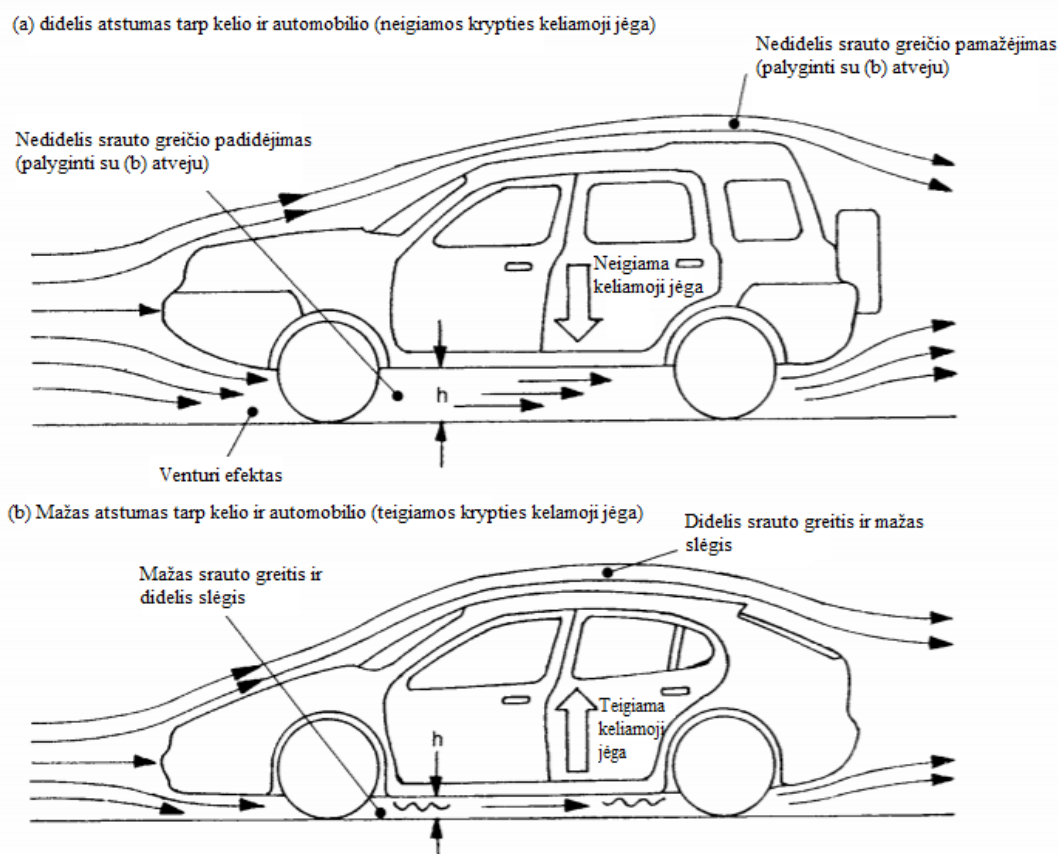
ρ – srauto tankis (kg/m^3);

v – kūno greitis (m/s);

A – automobilio midelio plotas (m^2).

1.3.2. Keliamoji jėga

Oro srautas, judėdamas per automobilio viršutinę dalį, turi nueiti didesnę atstumą nei srautas judantis apačia. Lėčiau, bet tiesia linija judantis oro srautas tarp automobilio apačios ir kelio, bei greičiau, bet ne tik horizontaliai judantis srautas virš automobilio, sukuria didesnę slėgį apatinėje dalyje nei virš automobilio. Dėl atsirandančių slėgių skirtumų pasireiškia keliamoji jėga. Šios jėgos dydis priklauso nuo kūno paviršiaus profilio, atstumo tarp automobilio dugno ir kelio bei automobilio judėjimo greičio. Įprastai, kuo kelias yra arčiau automobilio dugno, tuo didesnė teigiamos krypties keliamoji jėga sugeneruojama (14 pav.).



14 pav. Keliamosios jėgos priklausomybė nuo atstumo tarp automobilio dugno ir kelio paviršiaus [12]

Ypač didelė keliamoji jėga gali įtakoti transporto priemonės nestabilumą, kadangi padangos netolygiai ir nepakankamai sukimba su kelio paviršiumi [8, 12]. Keliamoji jėga apskaičiuojama pagal (7) formulę [15]:

$$F_L = C_L \frac{1}{2} \rho v^2 A; \quad (7)$$

čia C_L – keliamosios jėgos koeficientas;

ρ – srauto tankis (kg/m^3);

v – kūno greitis (m/s);

A – automobilio midelio plotas (m^2).

Keliamosios jėgos koeficientas apskaičiuojamas pagal (8) formulę [15]:

$$C_L = \frac{F_L}{\frac{1}{2} \rho v^2 A}; \quad (8)$$

čia F_L – pasipriešinimo jėga (N);

ρ – srauto tankis (kg/m^3);

v – kūno greitis (m/s);

A – automobilio midelio plotas (m^2).

1.3.3. Šoninė jėga

Šoninė jėga suformuojama dėl asimetriškos šoninio vėjo gūsių tėkmės apie automobilio kėbulą. Ši jėga verčia automobilį keisti važiavimo kryptį. Šoninė jėga veikia automobilio slėgio centre ir yra apskaičiuojama naudojant (9) formulę [16]:

$$F_s = C_s \frac{1}{2} \rho v^2 A; \quad (9)$$

čia C_s – šoninės jėgos koeficientas;

ρ – srauto tankis (kg/m^3);

v – kūno greitis (m/s);

A – charakteringo paviršiaus plotas (m^2).

1.3.4. Posvyrio momentas

Automobilio kėbulo tam tikras kampinis pasvyrimas išilginėje ašyje yra vadinamas posvyriu. Posvyrio momentas veikia išilginėje horizontalioje ašyje ir yra sukliamas dėl šoninio vėjo įtakotų jėgų. Šis momentas turi nedidelę įtaką transporto priemonės stabilumui ir yra skaičiuojamas naudojantis (10) formule [16]:

$$M_R = C_r \frac{1}{2} \rho v^2 AL; \quad (10)$$

čia C_r – posvyrio momento koeficientas;

ρ – srauto tankis (kg/m^3);

v – kūno greitis (m/s);

A – charakteringo paviršiaus plotas (m^2);

L – ratų bazė (m).

1.3.5. Polinkio momentas

Polinkio momentas veikia skersinėje automobilio ašyje. Transporto priemonės polinkis gali būti apibrėžtas kaip kampinis pasvyrimas skersinėje ašyje. Polinkio momentas perskirsto svorį tarp priekinės ir galinės automobilio ašių. Šis momentas paprastai yra neigiamas (automobilio priekis pasviręs arčiau kelio paviršiaus). Taip automobilio galinė dalis pakyla aukščiau ir suprastėja jos sukibimas su kelio paviršiumi. Polinkio momentas atsiranda dėl oro pasipriešinimo jėgos, taip pat įtaką gali turėti ne ties automobilio centru veikianti keliamoji jėga. Polinkio momentas apskaičiuojamas pagal tą pačią formulę (10), vietoje posvyrio momento koeficiento naudojant polinkio momento koeficientą [16].

1.3.6. Pokrypio momentas

Pokrypio momentas veikia vertikalioje ašyje. Šoniniai vėjo gūšiai neveikia ties automobilio centru, šoninės jėgos sukuria pokrypį vertikalioje ašyje bandydamos pakeisti automobilio važiavimo kryptį. Pokrypio momentas apskaičiuojamas kaip ir kiti du pasipriešinimo momentai, tik pritaikius atitinkamą pokrypio momento koeficientą (10 formulė) [16].

1.4. Ant automobilio kėbulo pritvirtinamų papildomų elementų įtaka aerodinaminės savybėms ir degalų sąnaudoms

Bendra automobilio oro pasipriešinimo procentinė išraiška pateikta 1 lentelėje.

1 lentelė. Procentinė skirtingų pasipriešinimo rūšių įtaka bendram aerodinaminiam automobilio pasipriešinimui [16]

Slėgio pasipriešinimas	55–60 %
Indukuotas arba keliamosios jėgos pasipriešinimas	8 %
Trinties pasipriešinimas	10 %
Interferencinis (išsikišimų) pasipriešinimas	15 %
Aušinimo ir ventiliavimo sistemų pasipriešinimas	10 %
Ratų, posparnių formos ir kt. pasipriešinimas	1 %

Kaip matyti 1 lentelėje, labai didelę dalį sudaro slėgio bei įvairių išsikišimų (veidrodėliai, papildomos ant stogo montuojamos bagažinės) pasipriešinimas, kuris ypač priklauso nuo bendros paviršiaus formos. Papildomi įrengimai ant transporto priemonės kėbulo ne tik padidina degalų sąnaudas ir išmetamų šiltnamio efektą sukeliančių dalelių kiekį, bet ir pablogina stabilumą ir saugumą. Stabilumas prarandamas dėl dviejų pagrindinių priežasčių:

- automobilio masės centras pasislenka į priekį arba į galą;
- padidėja oro pasipriešinimo jėga bei sukuriama papildoma šalutinė šoninė jėga bei posvyrio momentų vertės.

Atlikti tyrimai rodo [17, 18], kad papildomi elementai ant automobilio stogo (15 pav.) turi ženkliai įtaką degalų sąnaudoms ir oro pasipriešinimui.

1 Automobilis

2 Automobilis su stogo
bagažinės tvirtinimu

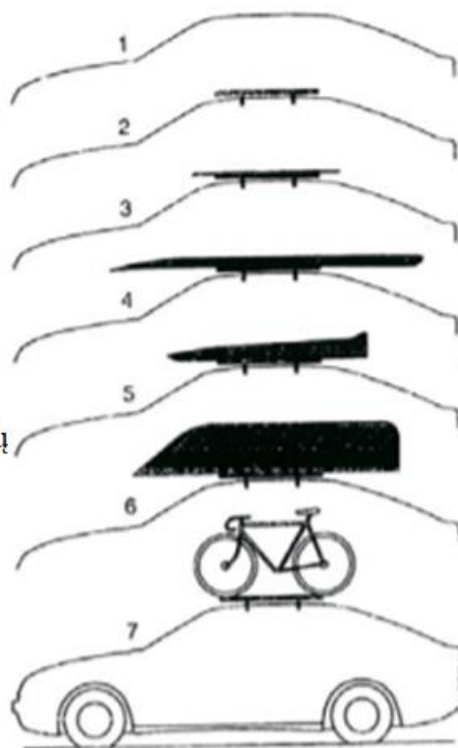
3 Automobilis su
pritvirtintomis slidėmis

4 Automobilis su
pritvirtinta banglente

5 Automobilis su slidžių
bagažine ant stogo

6 Automobilis su
pritvirtinta valtimi

7 Automobilis su
pritvirtintu dviračiu



15 pav. Automobilio kėbulas su įvairias daiktas, pritvirtintais ant stogo [17]

2 lentelė. Vidutinis oro pasipriešinimo padidėjimas pritvirtinus įvairius kūnus ant automobilio stogo [19]

Pritvirtintas kūnas	Vidutinis oro pasipriešinimo padidėjimas, %
Policijos sirena	15,6
Reklaminis ženklas	24,7
Taksi automobilio žymėjimas ant stogo	5
Stogo bagažinės tvirtinimas	12,5
Stogo bagažinės tvirtinimas su kopėčiomis	17,3
Statinė, pritvirtinta ant stogo	40

2 lentelėje matyti, kokią įtaką įvairūs pritvirtinti kūnai turi oro pasipriešinimo jėgai. Net nedidelis taksi automobilio žymuo, išsikišęs virš automobilio stogo, padidina oro pasipriešinimą 5 % [19].

1.5. Degalų sąnaudų pokyčio įvertinimas

Keliu judantis automobilis turi nugalėti ne tik oro pasipriešinimo jėgą. Visa pasipriešinimo jėga veikianti automobilį apskaičiuojama pagal (11) formulę [20]:

$$F_p = F_{oro} + F_{ried} + F_{iner} + F_{posv}; \quad (11)$$

čia F_{oro} – oro pasipriešinimo jėga (N);

F_{ried} – pasipriešinimo jėga riedėjimui (N);

F_{iner} – inercijos pasipriešinimo jėga (N);

F_{posv} – posvyrio pasipriešinimo jėga (N).

Kadangi dažnu atveju teigiama, kad tiriamasis automobilis važiuoja horizontaliame kelyje pastoviu greičiu, F_{posv} ir F_{iner} bus lygios nuliui. F_{oro} apskaičiuojama pagal anksčiau minėtą oro pasipriešinimo jėgos formulę (5).

Pasipriešinimas riedėjimui įvertinamas pagal (12) formulę [36]:

$$F_r = mgc; \quad (12)$$

čia F_r – pasipriešinimo riedėjimui jėga (N);

m – automobilio masė (kg);

g – laisvojo kritimo pagreitis (m/s^2);

c – pasipriešinimo riedėjimui koeficientas.

Žinant bendrą pasipriešinimo jėgą F_p , pagal (13) formulę galima apskaičiuoti galią, reikalingą įveikti bendram pasipriešinimui [20]:

$$P_T = \frac{F_p V}{\eta_m} + P_E; \quad (13)$$

čia P_T – galia (W);

F_p – bendra pasipriešinimo jėga (N);

V – automobilio greitis (m/s);

η_m – transmisijos naudingumo koeficientas;

P_E – kitiems automobilio prietaisams reikalinga energija (W).

Žinant P_T , naudojantis (14) formule galima apskaičiuoti degalų efektyvumą, išreikšiamą nuvažiuotais kilometrais litrai degalų [20]:

$$KMPL = \frac{V \eta_t E_F}{P_T 10^6}; \quad (14)$$

čia $KMPL$ – degalų efektyvumas, išreikšiamas nuvažiuotais kilometrais litrai degalų (km/l);

V – automobilio greitis (m/s);

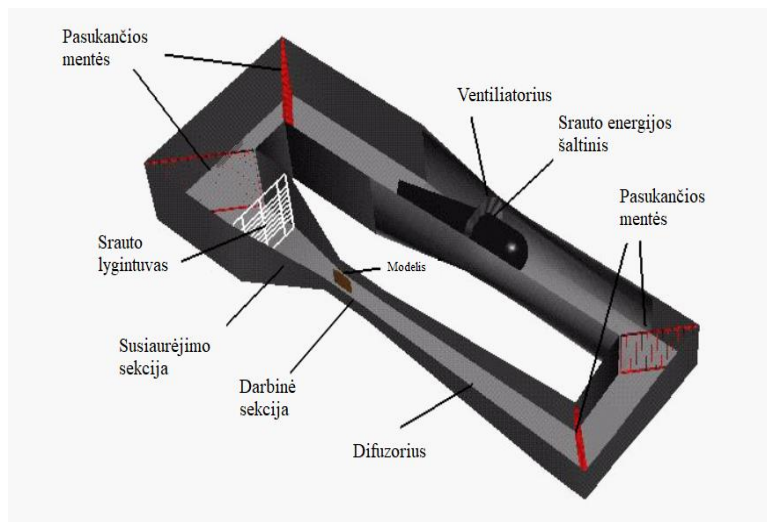
η_t – šiluminis dyzelinio variklio efektyvumas, apytiksliai priimamas 32 % [20];

E_F – degalų energijos kiekis (J/l) (dyzeliniams degalams priimama $39,7 \cdot 10^6$ J/l [20]);

P_T – galia, reikalinga įveikti pasipriešinimui (kW).

1.6. Aerodinaminiai tyrimų tuneliai

Aerodinaminiai tyrimai automobiliams yra atliekami vėjo tuneliuose. Pagal skirtingų kategorijų bandymus – aerodinaminis, aeroakustinis ar šiluminis – yra sukurta įvairių tipų bandymų įranga, kurioje generuojamas oro srautas, tekantis per transporto priemonę. Visos šios technologijos vadinamos aerodinaminiais tuneliais. Tiriant transporto priemonių aerodinamiką dažniausiai pasitelkiamas uždaro tipo oro tunelis (16 pav.) [21].

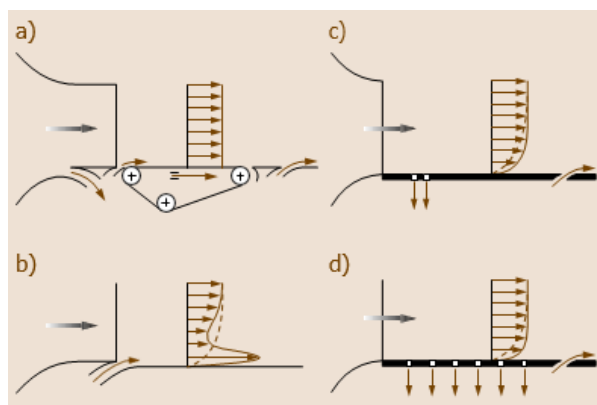


16 pav. Uždaras aerodinaminis vamzdis [22]

Oro srautą tunelio viduje priverčia judėti ventiliatorius, kurį mechaniškai suka srauto energijos šaltinis. Oro srautas šiame vamzdyje juda prieš laikrodžio rodyklę. Kampuose esančios mentės padeda sumažinti slėgio nuostolius oro srautui keičiant judėjimo kryptį. Prieš patekdamas į pagrindinę darbinę sekciją, oras praeina srauto lygintuvus, kurie kiek įmanoma užtikrina srauto tolygumą darbinėje sekcijoje. Darbinėje dalyje patalpinamas bandymų objektas, įprastai ši sekcija yra siauriausia, o oro srautas čia pasiekia didžiausią greitį. Praėjęs modelį srautas patenka į difuzorių, kuriame sumažinamas jo greitis prieš grįžtant į ventiliatorių [22].

1.6.1. Žemės efektas

Realybėje automobilis juda aplink beveik stacionarų oro srautą. Kadangi aerodinamiame vamzdyje automobilis stacionarus, o oro srautas juda aplink, norint teisingai imituoti realų judesį, būtina, kad kelias po automobiliu judėtų bei transporto priemonės ratai suktųsi. Šiam tikslui užtikrinti gali būti naudojamos kelios skirtingos sistemos (17 pav.).



17 pav. Kelio judėjimui po automobiliu užtikrinimo būdai [21]

- a) – diržų pagalba keliui suteikiamas judėjimas oro srauto tekėjimo kryptimi bei atitekančio pasienio sluoksnio nutraukimas išsiurbiant orą;
- b) – papildomas išilginis oro srauto greičio didinimas;
- c), d) – pasienio sluoksnio pašalinimas pagrindiniu arba paskirstytu srauto išsiurbimu [21].

1.6.2. Eksperimentai su sumažintais modeliais

Oro tuneliuose galima atlikti bandymus su daug kartų sumažintais realaus kūno modeliais, tiesa, turi būti užtikrinami tam tikri atitikimo parametrai. Sumažintas modelis savo paviršiaus profiliu turi idealiai atitikti realų kūną. Dar vienas labai svarbus aspektas – Reinoldso skaičius, tiriant sumažintą modelį jis turi būti toks pats kaip tiriant realų modelį realiomis sąlygomis (15) [21]:

$$\frac{U_1 l_1}{\nu_1} = \frac{U_2 l_2}{\nu_2}; \quad (15)$$

čia U – srauto greitis (m/s);

l – aptekamo kūno charakteringas matmuo (m);

ν – kinematinis klampumo koeficientas (m²/s).

Tiesa, šį aspektą ne visada galima įgyvendinti, kadangi srauto greitis tiriant sumažintą kūną turi būti padidintas tiek kartų, kiek kartų yra sumažintas objektas. Aerodinaminiai vamzdžiai gali turėti ribotą srauto greitį, kurio nepakanka užtikrinti panašumo kriterijui [21].

1.6.3. Srauto turbulentiškumas

Aerodinaminiai vamzdžiai įprastai geba generuoti mažo turbulentiškumo srautą. Realybėje automobiliai dažnai juda didelio turbulentiškumo sraute, kuris kyla nuo vėjo bei aplinkinių automobilių, pastatų, medžių ir kitų kelią supančių objektų [23]. Vienas populiariausių būdų sugeneruoti turbulentišką srautą oro tunelyje pateiktas 18 paveiksle.



18 pav. Turbulentiško srauto sukūrimas oro tunelyje [21]

Aerodinaminiam vamzdyje įmontuojami atvartai. Jie naudojami fiksuotoje padėtyje, jeigu norima imituoti prieš tiriamą kūną važiuojantį kitą automobilį ir jo sukuriamus turbulencinius oro srautus, arba veikia sukamaisiais judesiais, kad sukeltų savitus turbulencijos efektus [21].

1.6.4. Oro tunelio korekcijos

Realybėje automobilis juda neribotoje erdvėje srauto atžvilgiu, vienintelis kelio paviršius limituoja srauto erdvę. Oro tunelio matmenys yra baigtiniai tiek išilgine, tiek skersine kryptimi. Oro srauto ribojimas modifikuoja jo charakteristikas. Dėl šios priežasties paveiktas tekėjimo kampas, greitis ir slėgio pasiskirstymas aplink transporto priemonę vėjo tunelyje šiek tiek iškraipo kūną veikiančias aerodinamines jėgas. Kuo mažesnis oro tunelis, tuo didesnis skirtumas gali būti tarp rezultatų, gautų aerodinamiame vamzdyje, lyginant su gautais realiuose bandymuose. Egzistuoja dvi pagrindinės galimybės sumažinti baigtinės oro srauto aplinkos poveikį:

- korekcijos, kurios atliekamos gavus rezultatus po matavimų;
- oro srauto greičio reguliavimas bandymo metu [21].

Oro tunelių korekcijos apima sudėtingus skaičiavimus bei teorijas, plačiau šie aspektai aptarti [21] šaltinyje.

1.7. Programinė aerodinaminė analizė

Išanalizuoti automobilio aerodinamines savybes galima dviem būdais: anksčiau aptartu aerodinamių vamzdžių pagalba arba kompiuterinėmis skysčių ir dujų tėkmės skaičiavimo programomis. Skaičiuojamoji skysčių dinamika (CFD) leidžia inžinieriams numatyti ir ištirti skysčio ar dujų srauto, tekančio per automobilio paviršių, elgseną. Tai skysčių mechanikos šaka, kuri naudoja skaitinę analizę, algoritmus ir diferencialines lygtis tam, kad būtų išsiaiškintos skirtingos srauto tėkmės aplink įvairius kūnus situacijos. Skirtingų CFD analizės programų yra nemažai, tačiau visos jos turi tris pagrindinius skaičiavimo struktūros elementus:

- darbinės aplinkos sudarymas;
- skaitinių metodų sprendimas;
- rezultatų atvaizdavimas ir analizė [24].

1.7.1. Darbinės aplinkos sudarymas

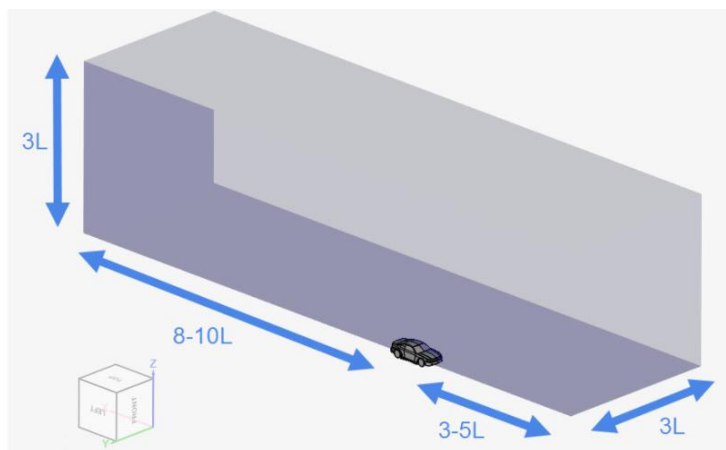
Darbinės aplinkos sudarymas CFD analizėje reiškia išsikelto ir norimos analizuoti problemos atvaizdavimą ir perkėlimą į kompiuterinę erdvę. Veiklą, apimančią šiuos veiksmus, sudaro:

Geometrijos ir bandymų lauko sudarymas. Geometriniai modeliai sudaromi kompiuterinio projektavimo programine įranga, tokia kaip *Catia*, *SolidWorks* ir pan. Naudojant projektavimo programas taip pat sukuriamas skysčių ar dujų srauto veikimo regionas. Svarbu užtikrinti, kad 3D modelis neturėtų neatitikimų, tokių kaip persidengiantys paviršiai, nenumatytos ertmės paviršiuose ar aštrūs kampai.

Baigtinių elementų tinklelio generavimas. Kadangi CFD analizės procesas naudoja skaitinės aproksimacijos metodus, darbinės aplinkos regioną reikia suskirstyti į struktūrinius elementus. Visi baigtiniai elementai yra sujungiami vieni su kitais mazgais tam, kad susidarytų reikalingas srautinis modelis. Šis etapas yra vienas pagrindinių CFD skaitinio modeliavimo aspektų, kuris stipriai įtakoja gautus rezultatus.

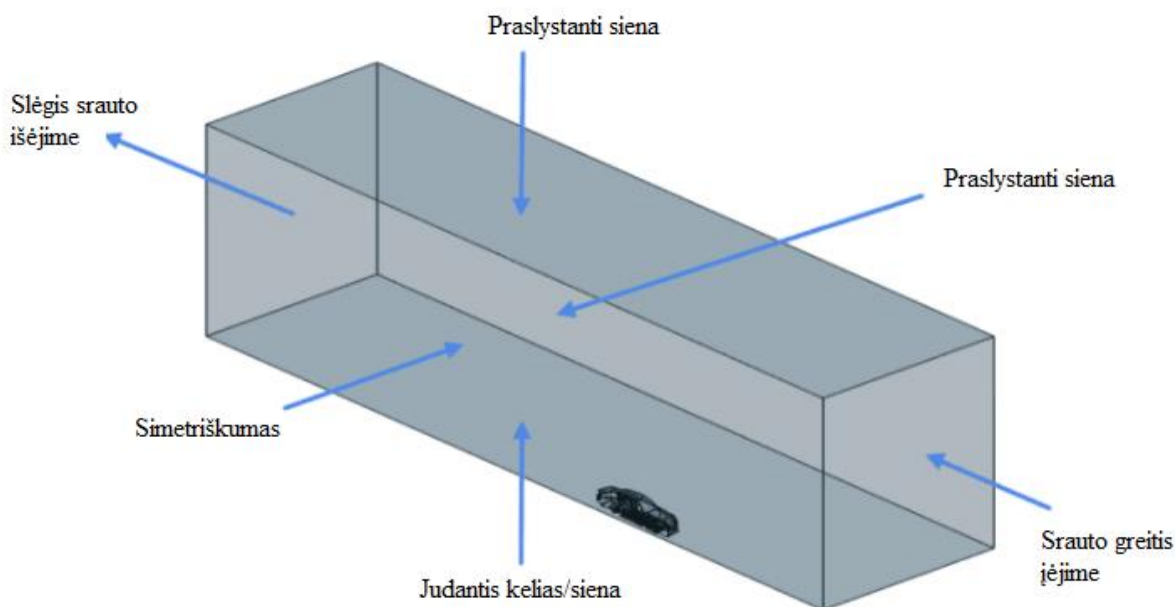
Skysčio ar dujų srauto charakteristikų apibrėžimas. Kiekvienas skystis ar dujos turi joms būdingas charakteristikas. Šiame procese yra apibrėžiami srauto ar regiono, kuriame jis sąveikauja su kūnu, parametrai. Įprastai daugelis CFD modeliavimo programų turi šią galimybę.

Kraštinės sąlygos. Kiekvienoje CFD programoje būtina išskirti kraštinės modeliavimo sąlygas. Dažnu atveju tai yra tam tikrų baigtinių verčių ar fizinių sąlygų priskyrimas būdingiems skaičiavimo regionams, pavyzdžiui, srauto įėjimo greitis, srauto išėjimo slėgis ar srauto fizinė elgsena su tam tikrais paviršiais (20 pav.) [24].



19 pav. 3D automobilio modelis ir vėjo tunelio matmenys CFD analizės aplinkoje [25]

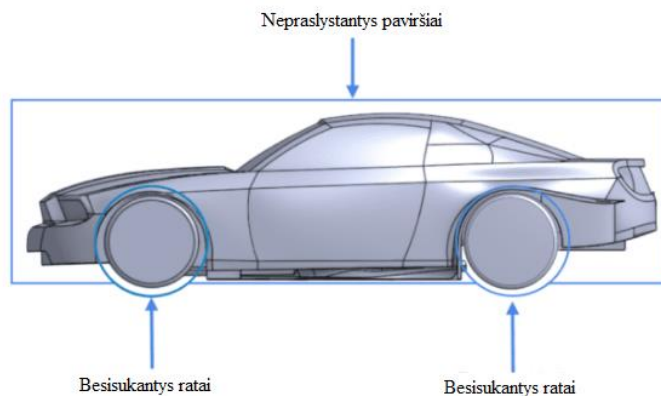
19 paveiksle matyti modeliuojamo aerodinaminio vamzdžio matmenys. Atstumas tarp automobilio priekio bei srauto tėkmės pradžios turėtų būti apie 3–5 automobilio ilgiai, už automobilio reikšmė turi atitikti 8–10 automobilio ilgius, o į aukštį ir plotį – apie 3 automobilio ilgius.



20 pav. Kraštinių sąlygų sudarymas darbiname srauto regione tiriant pusę automobilio paviršiaus [25]

20 paveiksle matomos pagrindinės kraštinės sąlygos, taikomos darbinei oro srauto zonai. Praslystančių sienų sąlyga reiškia, kad oro srautas šalia sienos gali tekėti tik išilgine sienai kryptimi.

Ši sąlyga naudojama viršutinėje bei išilginėje ašyje toliau nuo automobilio esančioms sienoms. Dažnai CFD skaičiavimuose pasirenkama tirti tik pusę kūno paviršiaus, taip sumažinant skaičiavimo trukmę, o simetriškumo sąlyga užtikrina, kad simetrijos plokštumoje aerodinaminis srauto tekėjimas bus simetriškas tiriamajam. Judančio kelio imitavimas yra viena svarbiausių sąlygų aerodinaminuose CFD tyrimuose, kadangi būtina užtikrinti, kad pasienio sluoksnis šalia kelio paviršiaus nesusidarytų. Išilginėje galinėje sienoje nurodomas srauto manometrinis slėgis tyrimo lauko pabaigoje, o pradžioje būtina nustatyti įtekančio srauto greitį [25].



21 pav. Kraštinės sąlygos automobiliui [25]

Kraštinės sąlygas būtina užtikrinti ir automobiliui. Norint tiksliai imituoti realias važiavimo sąlygas, reikalinga automobilio ratams suteikti sukimosi judesį, o visam likusiam kūno paviršiui – nepraslystančio srauto sąlygą, kad šalia paviršiaus susidarytų pasienio sluoksnis [24].

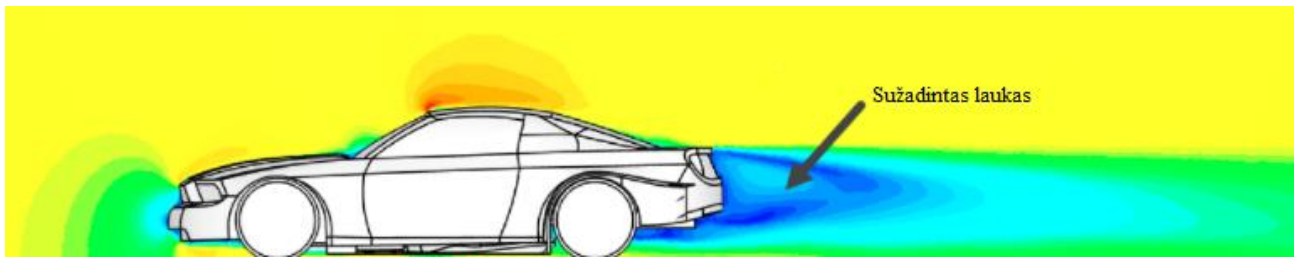
1.7.2. Skaitinių metodų sprendimas

Skaitmeninė sprendimo dalis yra viena svarbiausių CFD analizėje. Šiuolaikinės skysčių dinamikos skaičiavimo programos dažniausiai naudojami trims skirtingais sprendimo būdais – baigtinio skirtumo, baigtinių elementų ar baigtinio tūrio metodais. Baigtinio tūrio metodas yra labiausiai pritaikytas atlikti CFD analizę, apimantis skaitinius algoritmų skaičiavimus atsižvelgiant į baigtinio tūrio elementus [24].

1.7.3. Rezultatų atvaizdavimas ir analizė

Rezultatų analizė yra paskutinis CFD modeliavimo etapas, apimantis duomenų vizualizavimą. Šiame etape naudojamos programinės įrangos įrankiais, skirtais stebėti ir analizuoti šiuos modeliavimo rezultatus:

- darbinės aplinkos geometrijos ir tinklelio atvaizdavimas;
- vektorinė srauto parametrų vizualizacija;
- linijinė srauto parametrų vizualizacija;
- 2D ir 3D paviršių, paveiktų srauto, parametrų atvaizdavimas;
- dalelių aptekėjimo vaizdinis dinaminis modeliavimas;
- diagramos ir parametrų kitimo grafikai [24].



22 pav. Srauto greičio skirtinguose regiono taškuose vizualinis atvaizdavimas CFD analizėje [25]

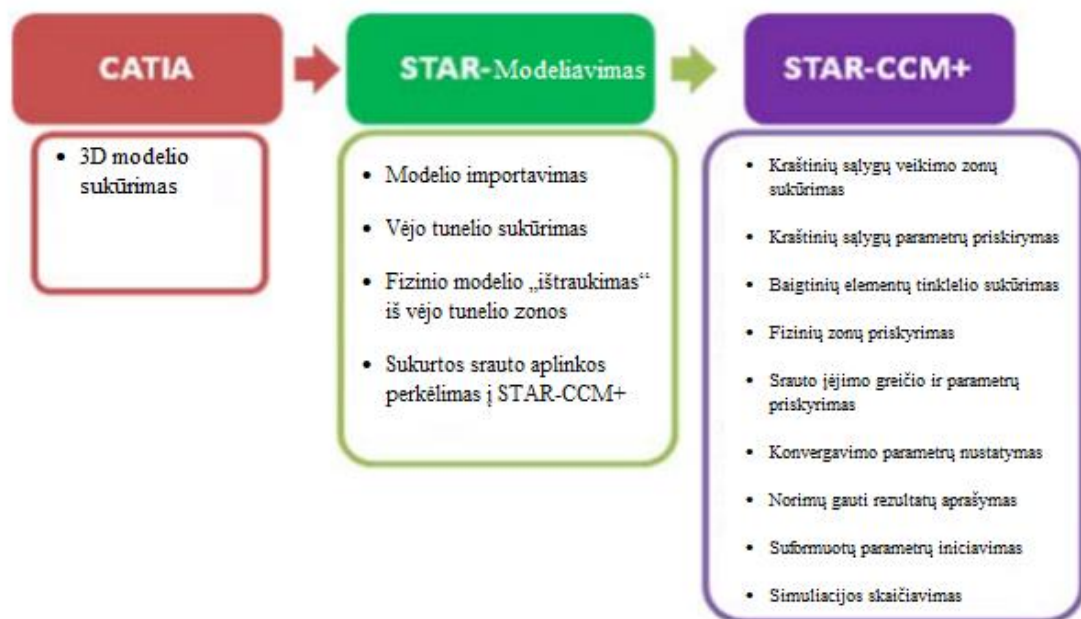
Pagrindinės CFD analizės naudos:

- naujų modelių kūrimo kaštų sumažinimas;
- galima išanalizuoti labai daug įvairių situacijų, kurias realiai testuoti labai sudėtinga;
- CFD metodai leidžia analizuoti sistemą virš realių situacijų ribų;
- detalumo lygis CFD analizėje neribojamas;
- aiškus ir įvairus rezultatų atvaizdavimas leidžia lengviau suprasti aerodinamikos ypatybes [24].

1.8. Atlikti tyrimai

Mokslinėje bendruomenėje yra atlikta įvairiausių tyrimų, siekiant išsiaiškinti atidarytų transporto priemonės langų įtaką jos aerodinaminiam pasipriešinimui ir degalų sąnaudoms. Šiame skyriuje pateikiama panašių tyrimų atlikimo metodika bei rezultatai.

2014 metais Malaizijos universiteto darbuotojai atliko tyrimą [26], kurio metu analizavo, kokią įtaką automobilio oro pasipriešinimo jėgai turi važiavimas uždarytais bei pilnai atidarytais transporto priemonės langais.



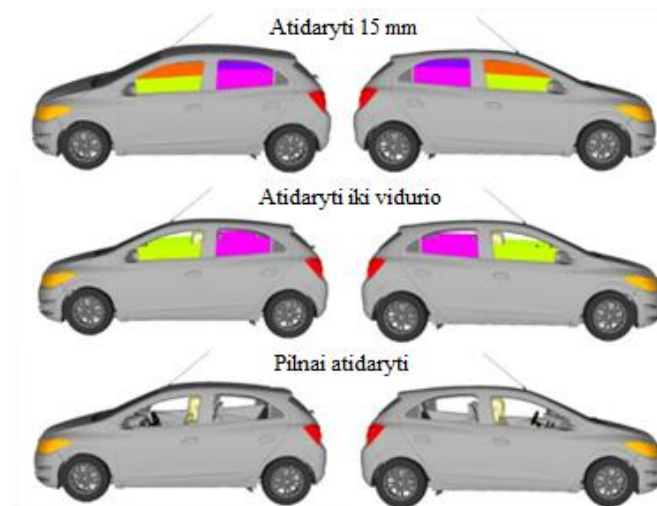
23 pav. Malaizijos universiteto darbuotojų naudotos skaičiavimų įrangos metodika [26]

Skaičiavimo metu analizuojama keletas skirtingų atidarytų langų pozicijų bei skirtingi važiavimo greičiai. Pateiktuose rezultatuose matyti, kad tiriamam automobilio modeliui važiuojant 45 m/s greičiu visais uždarytais langais oro pasipriešinimo koeficientas yra 0,225, o su visais atidarytais langais – 0,258 (3 lentelė). Važiuojant tokiu dideliu greičiu tyrėjai nustatė, kad oro pasipriešinimo koeficientas važiuojant visais 4 atidarytais langais padidėja 14 % [26].

3 lentelė. Malaizijos universiteto darbuotojų atlikto aerodinaminio tyrimo rezultatai [26]

Langų padėtis	Važiavimo greitis m/s	Oro pasipriešinimo koeficientas
Visi uždaryti	45	0,225
Visi atidaryti	45	0,258

2015 metais automobilių inžinerijos draugijos (angl. *SAE International*) bendruomenė atliko tyrimą [27], kuriame, naudojant *FLUENT* programinę įrangą, analizavo važiavimo skirtingo lygio automobilio langų atidarymo konfigūracijomis įtaką transporto priemonės aerodinamikai (24 pav.). Tyrimo rezultatai parodė (25 pav.), kad šiek tiek atidarius langus – 15 mm, oro pasipriešinimo koeficientas padidėja 4 %, atidarius iki vidurio – 6 %, o su visais pilnai atidarytais langais – 7 %. Taip pat teigiama, kad oro pasipriešinimo jėga padidėja, kadangi važiuojant atidarytais langais srautas tose vietose atitrūksta nuo aptekamo paviršiaus ir taip sužadina didelius turbulentinius oro srautus, o tai generuoja didesnę pasipriešinimą [27].



24 pav. SAE organizacijos atliekamo tyrimo objektas [27]

Atidarytų langų pozicija		Cd	Pokytis nuo bazinio modelio
Atidaryti langai 15 mm		0.403	0.016
Atidaryti langai iki vidurio		0.410	0.023
Atidaryti langai pilnai		0.413	0.026

25 pav. SAE organizacijos atlikto tyrimo rezultatai [27]

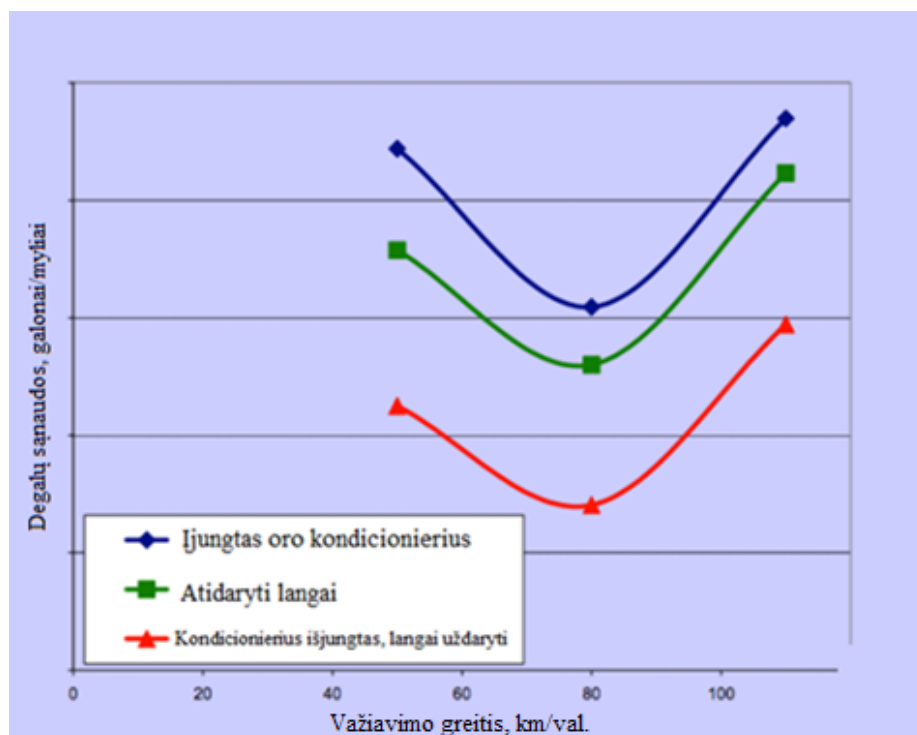
2014 metais tarptautiniame skysčių inžinerijos žurnale publikuotas tyrimas [28], kurio metu analizuota atidarytų langų įtaka oro pasipriešinimo jėgai važiuojant autobusu. Tyrimui atlikti pasitelkiamas primityvus 3D autobuso modelis ir programinė įranga *OpenFOAM*. Tyrimo rezultatus galima matyti 4 lentelėje.

4 lentelė. Mokslininkų atlikto tyrimo su autobusu aerodinaminiai rezultatai [28]

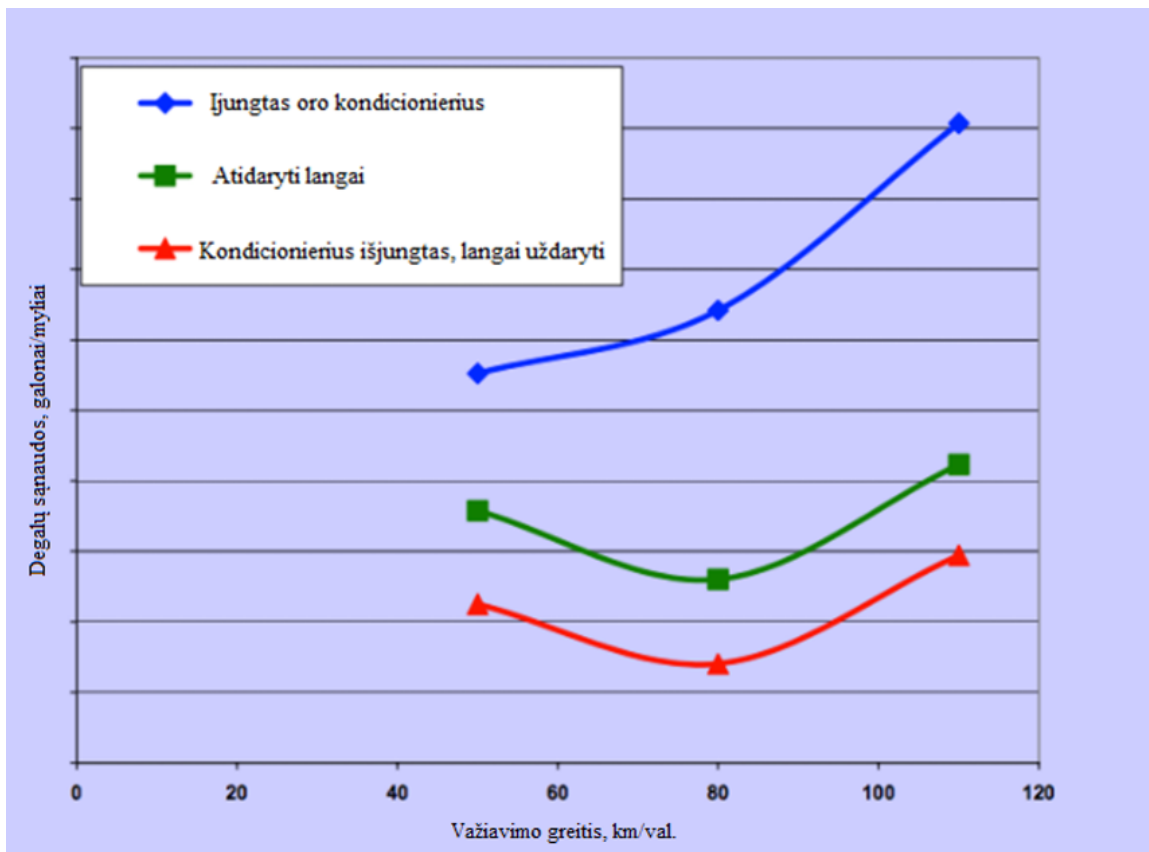
Važiavimo greitis, km/val.	Cd uždarytais langais	Cd atidarytais langais	F _{pas} uždarytais langais	F _{pas} atidarytais langais
40	0,9997	1,1475	548,67	629,79
45	1,0004	1,1399	695,04	791,96
50	0,9998	1,1364	855,23	972,08
55	0,9995	1,1362	1036,29	1178,02
60	0,9993	1,1369	1234,78	1404,81
65	0,9998	1,1318	1448,41	1639,63
70	0,999	1,1318	1678,72	1901,88

Kaip matyti iš 4 lentelės, važiuojant atidarytais langais autobuso aerodinaminis pasipriešinimo koeficientas padidėja apie 13 %, tiesia, reikia atsižvelgti, kad autobusas turi daugiau langų nei automobilis, o tai įtakoja didesnę pokytį. Taip pat galima įžvelgti, kad didėjant važiavimo greičiui, pasipriešinimo jėgos skirtumas taip pat didėja [28].

2004 metais automobilių inžinierių asociacija atliko realų tyrimą [29], kurio metu testavo du automobilius – visureigį bei sedaną – realiomis važiavimo sąlygomis. 26 paveiksle matyti sedano tyrimo rezultatai, o 27 pav. – visureigio.



26 pav. Sedano tyrimo rezultatai, degalų sąnaudos skirtingais važiavimo metodais [29]



27 pav. Visureigio tyrimo rezultatai, degalų sąnaudos skirtingais važiavimo metodais [29]

Sedano atveju degalų sąnaudos išauga važiuojant atidarytais langais, tačiau, važiuojant įjungtu oro kondicionieriumi ir uždarytais langais, jos yra dar didesnės. Visureigio tyrimas parodė, kad važiuojant atidarytais ar uždarytais langais degalų sąnaudų pokytis nedidelis, tačiau įjungus oro kondicionierių sąnaudos išauga drastiškai [29]. Galima daryti išvadą: kuo transporto priemonė labiau aerodinamiška, tuo mažesnis degalų sąnaudų skirtumas tarp važiavimo atidarytais langais ar įjungtu oro kondicionieriumi, bei atvirkščiai – kuo automobilis mažiau aerodinamiškas, tuo važiuoti įjungus oro kondicionierių yra mažiau ekonomiška.

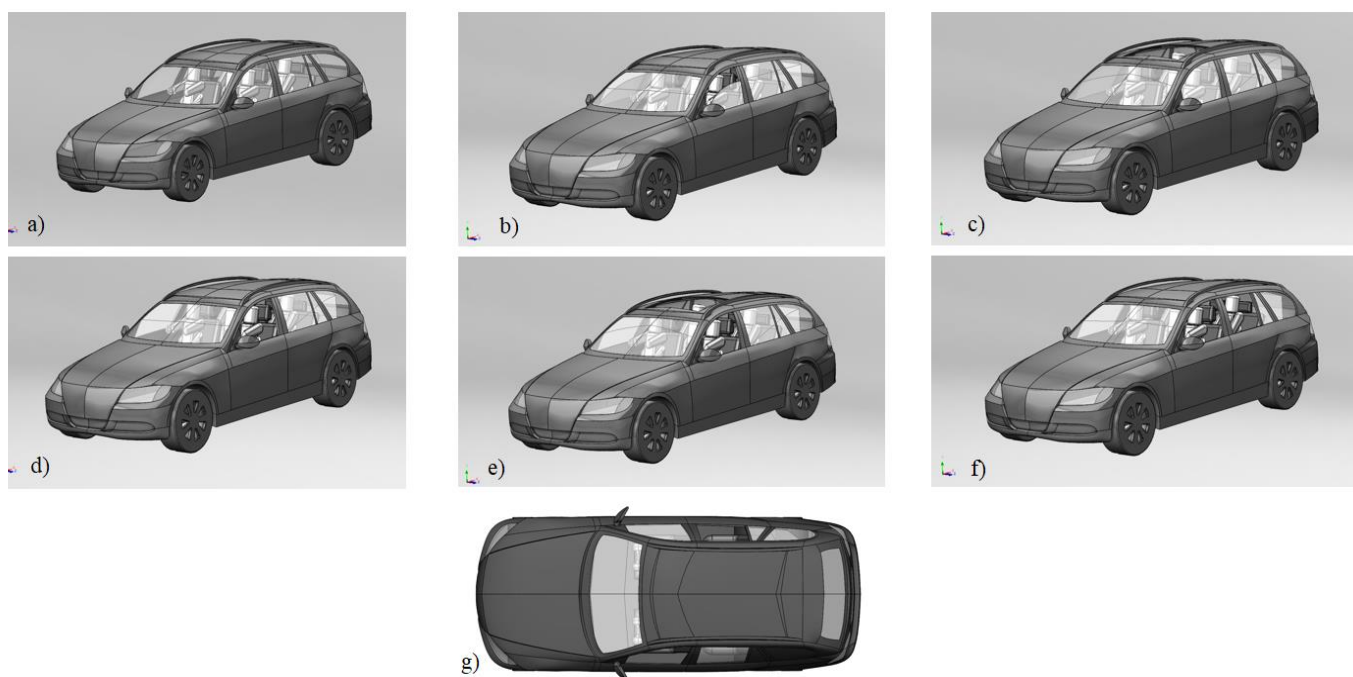
2014 metais automobilių inžinerijos draugija SAE atliko tyrimą, kurio metu tyrė degalų sąnaudų pokyčius automobiliui važiuojant skirtingais padangų slėgiais bei atidarytais langais [30]. Prieš tyrimą automobilio variklio ir alyvos temperatūra išildoma iki darbinės temperatūros, vėliau automobiliu važiuojama pastoviu greičiu 5 minutes. Tyrimo rezultatai parodė, kad važiuojant sedano tipo kėbulo automobiliu „Toyota Corolla“ 70 km/val. greičiu bei atidarius langus degalų sąnaudos padidėja 6,3 %, važiuojant 100 km/val. greičiu – 7,4 %, o važiuojant 130 km/val. – 8,8 %, lyginant jas su važiavimu uždarytais langais [30].

2. Važiavimo atidarytais langais įtakos automobilio aerodinaminiam pasipriešinimui ir degalų sąnaudoms tyrimas

Tyrimo metu analizuojamas „BMW E91“ universalso kėbulo automobilis. Remiantis išanalizuotomis modeliavimų metodikomis [31, 32, 33, 34, 35], tiriama, kokią įtaką automobilio aerodinaminiam pasipriešinimui turi važiavimas atidarytais transporto priemonės langais. Daugiausia dėmesio skiriama aerodinaminės pasipriešinimo jėgos ir pasipriešinimo koeficiento pokyčių analizei. Vėlesnėje tyrimo stadijoje, įvertinant aerodinaminių jėgų pokyčius, skaičiuojamas aerodinaminiam ir riedėjimo pasipriešinimui įveikti reikalingos galios dydis, procentinis degalų sąnaudų pokytis. Atlikus realų tyrimą su automobiliu nustatoma, kaip pasikeičia degalų sąnaudos važiuojant uždarytais bei atidarytais langais. Taip pat įvertinamos degalų sąnaudos važiuojant uždarytais langais bei įjungtu oro kondicionieriumi. Apibendrinant atliktą realų tyrimą ir jį palyginus su kompiuteriniais skaičiavimais, pateikiamos išvados, ar važiuojant atidarytais langais ir natūraliu būdu ventiliuojant automobilio saloną degalų sąnaudos yra mažesnės nei važiuojant uždarytais langais, bet naudojant oro kondicionierių.

2.1. 3D Modelio kūrimas

Pradedant tyrimą reikalingas 3D analizuojamo automobilio modelis ir skirtingos jo konfigūracijos su atidarytais langais ar stoglangiu, kad būtų galima atlikti kompiuterinius aerodinaminius skaičiavimus.



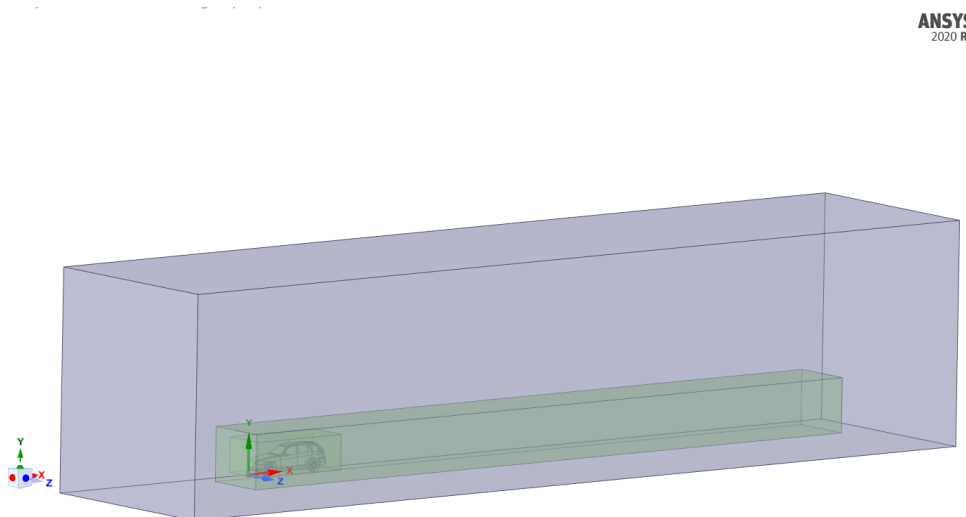
28 pav. Tiriamos modelių konfigūracijos ; a) – uždaryti langai; b) – atidaryti priekiniai langai iki pusės; c) – atidarytas stoglangis; d) – atidaryti priekiniai langai pilnai; e) – atidaryti priekiniai langai pilnai ir stoglangis; f) – atidaryti 4 langai pilnai; g) – atidarytas priekinis kairės pusės langas ir galinis dešinės pusės langas

3D automobilio modelis kuriamas naudojant *SolidWorks* programą. 3D modeliai ruošiami dirbant *surface* aplinkoje, vėliau jie perkeliama į *Ansys Fluent* programą, kurioje atliekamas aerodinaminis modeliavimas. Skirtingos automobilio konfigūracijos pateiktos 28 paveiksle.

2.2. Aerodinaminė analizė

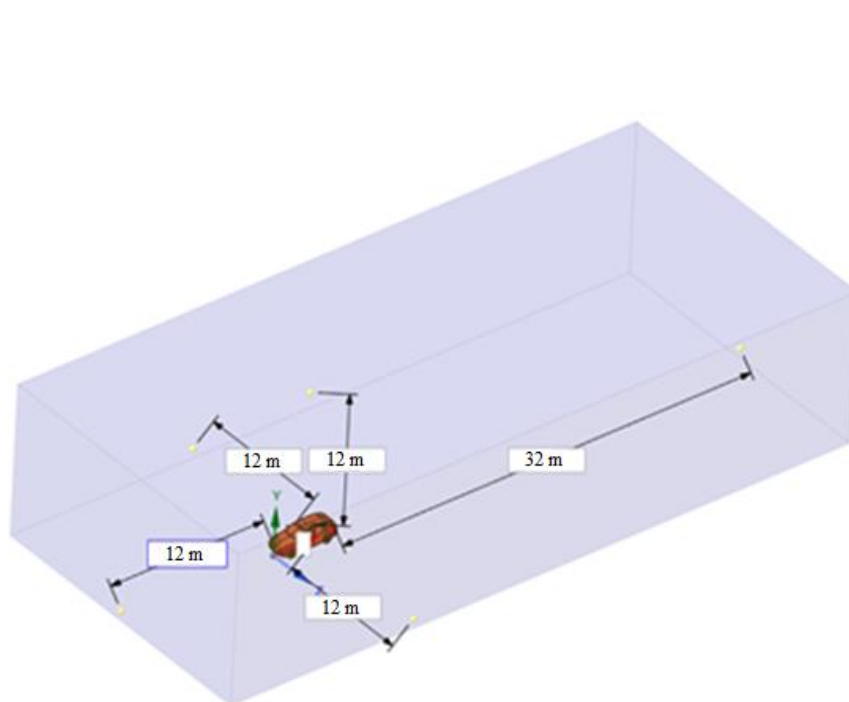
2.2.1. Modelio paruošimas

Aerodinaminė analizė atliekama naudojant programą *Ansys Fluent*. Pradžioje būtina paruošti aplinką aerodinaminei analizei. *Ansys* programos posistemėje *SpaceClaim* sukuriamas vėjo tunelis bei išskiriamos tam tikros svarbiausios automobilio zonos, vėliau naudojamos baigtinių elementų tinklelio kūrimo (29 pav.).



29 pav. *Ansys SpaceClaim* aplinkoje sukurtas vėjo tunelis bei išskirtos svarbiausios zonos

Simetriškiems modeliams aerodinamikos skaičiavimuose naudojama pusė automobilio paviršiaus, kadangi yra priskiriama simetrijos plokštuma ir taip sutaupoma nemaža dalis skaičiavimo kaštų, o asimetriškai konfigūracijai reikalinga skaičiuoti pilną modelį. Vėjo tunelio matmenys pateikti 30 paveiksle.

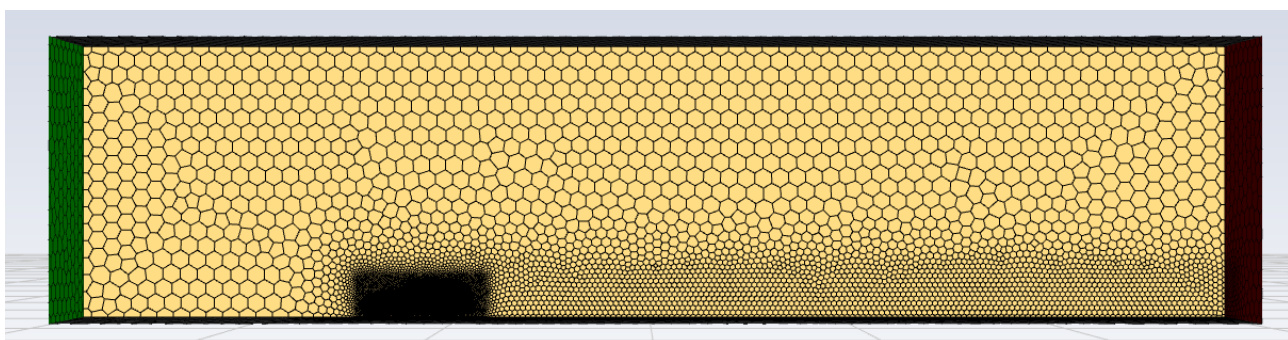


30 pav. Vėjo tunelio matmenys, L – automobilio ilgis

Norint užtikrinti taisyklingą srauto tėkmės aplink automobilį modeliavimą, reikalinga, kad vėjo tunelio matmenys būtų mažiausiai 3 transporto priemonės ilgiai į priekį, 3 ilgiai į šonus bei į viršų ir 8 ilgiai į galą, kadangi svarbu stebėti už automobilio esančio srauto tėkmę, kuri yra sutrikdoma dideliu atstumu už transporto priemonės. Į automobilio priekį ir šonus atstumas siekia 12 m, o į automobilio galą – 32 m.

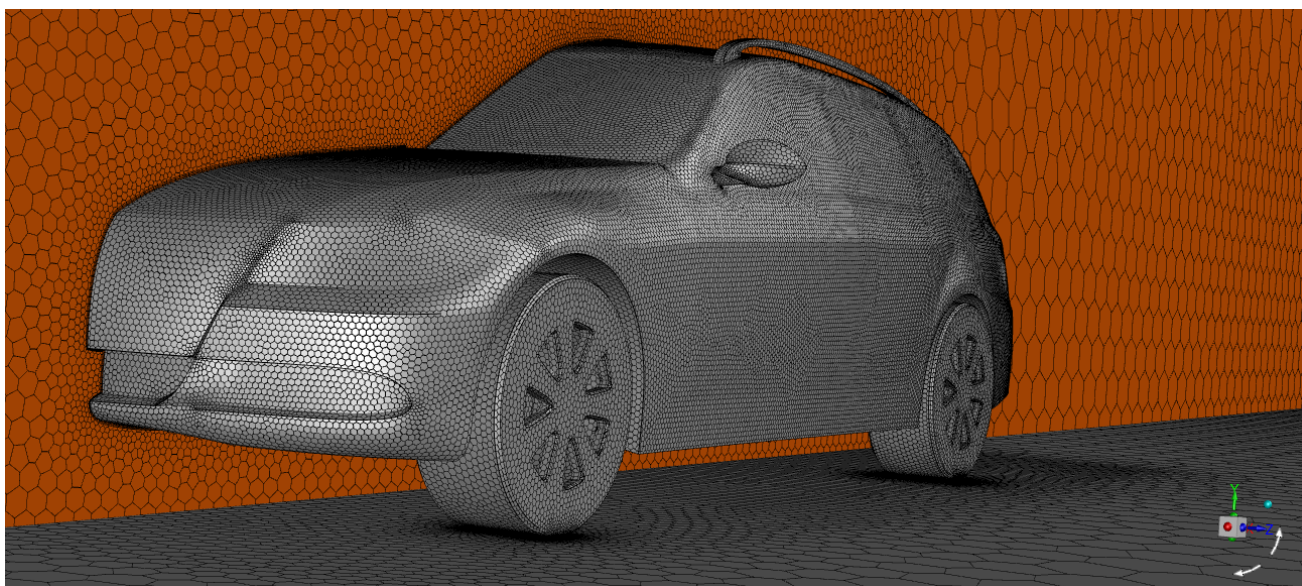
2.2.2. Baigtinių elementų tinklelio kūrimas

Baigtinių elementų tinklelio kūrime būtina atsižvelgti į tinklelio elementų kokybę, yra pagrindiniai du parametrai, kuriuos reikia užtikrinti: *skewness* ir *minimum orthogonal quality*. Pirmasis parametras turi neviršyti 0,8 ribos, o antrasis turi būti daugiau 0,1 reikšmės [35]. Taip pat reikalinga naudoti tankesnę tinklę automobilio paviršiuje bei artimoje jį supančioje erdvėje, toliau tinklelis gali būti retesnis. Užtikrinus šiuos aspektus galima teigti, kad baigtinių elementų tinklelis atitinka aerodinaminių skaičiavimų reikalavimus.

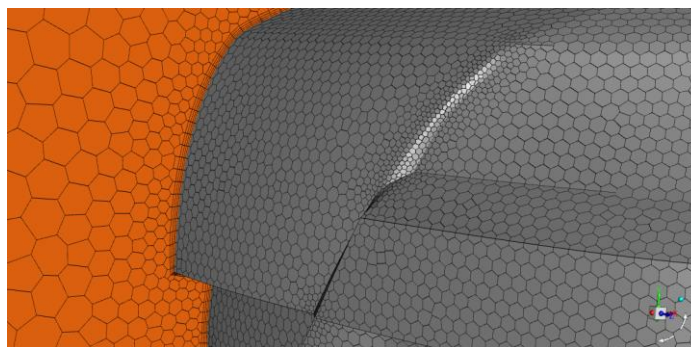


31 pav. Pilnas baigtinių elementų tinklelis

31 paveiksle matyti, kad šalia automobilio baigtinių elementų tinklelis tankus, o už automobilio einanti charakteringa srauto zona taip pat sutankinta, siekiant gauti tikslesnius rezultatus. Toli nuo transporto priemonės esančioje zonoje baigtinių elementų tinklelis ženkliai retesnis.



32 pav. Baigtinių elementų tinklelis automobilio paviršiuje ir šalia automobilio



33 pav. Automobilio paviršiuje esantis pasienio sluoksnis

33 paveiksle matyti, kad kuriant baigtinių elementų tinklą automobilio paviršiams yra suteikiamas pasienio sluoksnis, kur srautas, tekantis šalia paviršiaus, dėl molekulių trinties ir traukos jėgų prilimpa prie paviršiaus. Bendrai vienos pilnos modeliavimo aplinkos baigtinių elementų tinklelio parametrai pateikti 5 lentelėje.

5 lentelė. Baigtinių elementų tinklelio parametrai

Jungtinių taškų skaičius	Paviršių skaičius	Elementų skaičius	Elementų forma
8 074 690	12 627 542	2 726 378	<i>Poly-hexcore</i>

2.2.3. Modeliavimo nustatymai

Prieš atliekant skaičiavimus būtina apibrėžti modeliavimo nustatymus (6 lentelė).

6 lentelė. Aerodinaminio modeliavimo pagrindiniai nustatymai

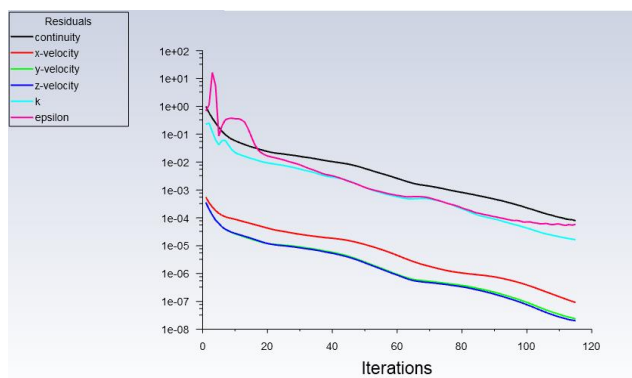
Analizuojamo kūno projekcijos plotas, m ²	2,112
Srauto greitis, m/s	8,3; 13,9; 19,4; 27,8; 36,1
Oro slėgis, Pa	101325
Srauto tėkmės modelis	<i>k-epsilon</i>
Srauto rūšis	oras
Aplinkos temperatūra, °C	15

Pasirenkamas *k-epsilon* skaičiavimų metodas. Šis metodas yra bene labiausiai paplitęs aerodinaminuose skaičiavimuose, geriausiai tinka tada, kai srautas teka apie kūną, kuris yra toliau nuo aplinkinių sienų. Automobilui ir jį supančiai aplinkai reikalinga priskirti kraštines sąlygas. Kiekvienu modeliuojamu greičiu programoje priskiriamas važiavimo greitis (m/s) srauto įėjime. Srauto išėjime nustatomas manometrinis išėjimo slėgis – 0 Pa (atitinka atmosferinio slėgio reikšmę). Turbulentiškumo intensyvumas parenkamas 0,5 %, o turbulentinio klampumo koeficientas – 2. Keliui, ant kurio stovi automobilis, priskiriamas greitis, kuriuo juda ir pats oro srautas, taip užtikrinama, kad prie kelio paviršiaus nesusidarytų pasienio sluoksnis. Priekiniams ir galiniams ratams priskiriamas sukimosi judesys. Šis greitis pateikiamas rad/s, apskaičiuojamas dalijant srauto greitį (m/s) iš automobilio ratų spindulio (m). Sukimosi ašis nustatoma modelio paruošimo stadijoje: *SpaceClaim* aplinkoje užfiksuojamos besisukančių ratų koordinatės. Aplinkinėms vėjo tunelio sienoms priskiriama praslystančių sienų funkcija. Kraštinių sąlygų priskyrimas pavaizduotas 1 priede.

Išsikeliami du pagrindiniai teorinių skaičiavimų tikslai – oro pasipriešinimo jėgos ir pasipriešinimo koeficiento apskaičiavimas.

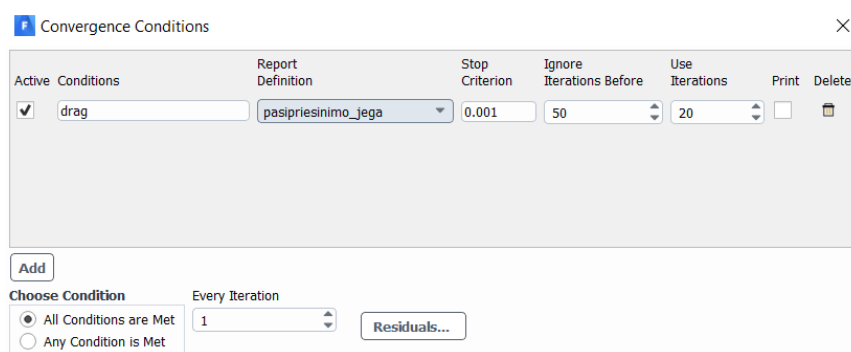
2.2.4. Rezultatų konvergavimas

Vienas svarbiausių aspektų aerodinaminėje analizėje – rezultatų tikslumo užtikrinimas. Norint teigti, kad rezultatai tikslūs – būtina, kad modeliavimo skaičiavimai po tam tikro iteracijų skaičiaus konverguotų – rezultatai nebekistų sprendžiant daugiau iteracijų. Rezultatų konvergavimą užtikrina programa, stebinti kintamųjų parametų tolygumą iteracijų metu (34 pav.)

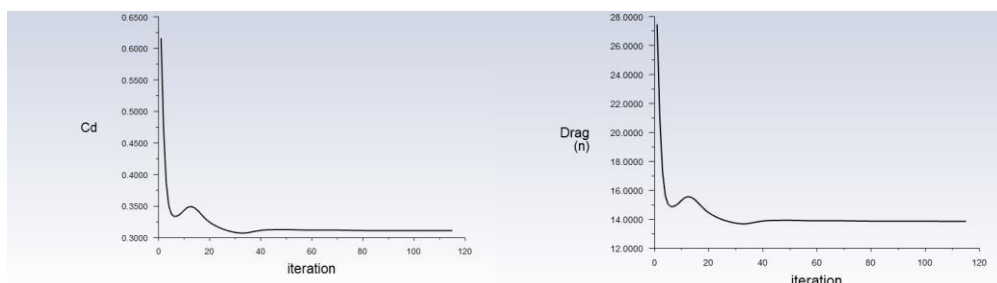


34 pav. Skaičiavimo kintamųjų tolygumas ir konvergavimas

Teoriškai teigiama, kad skaičiavimai konvergavo, kai visi kintamieji peržengia 10^{-3} esančią ribą. Tiesa, norint pilnai užtikrinti rezultatų tikslumą, reikalinga priskirti konvergavimo funkciją išsikeltiems tikslams, šiuo atveju pasipriešinimo jėgos ir pasipriešinimo koeficiento apskaičiavimui (35 pav.).



35 pav. Konvergavimo funkcijos priskyrimas oro pasipriešinimo jėgos skaičiavimui

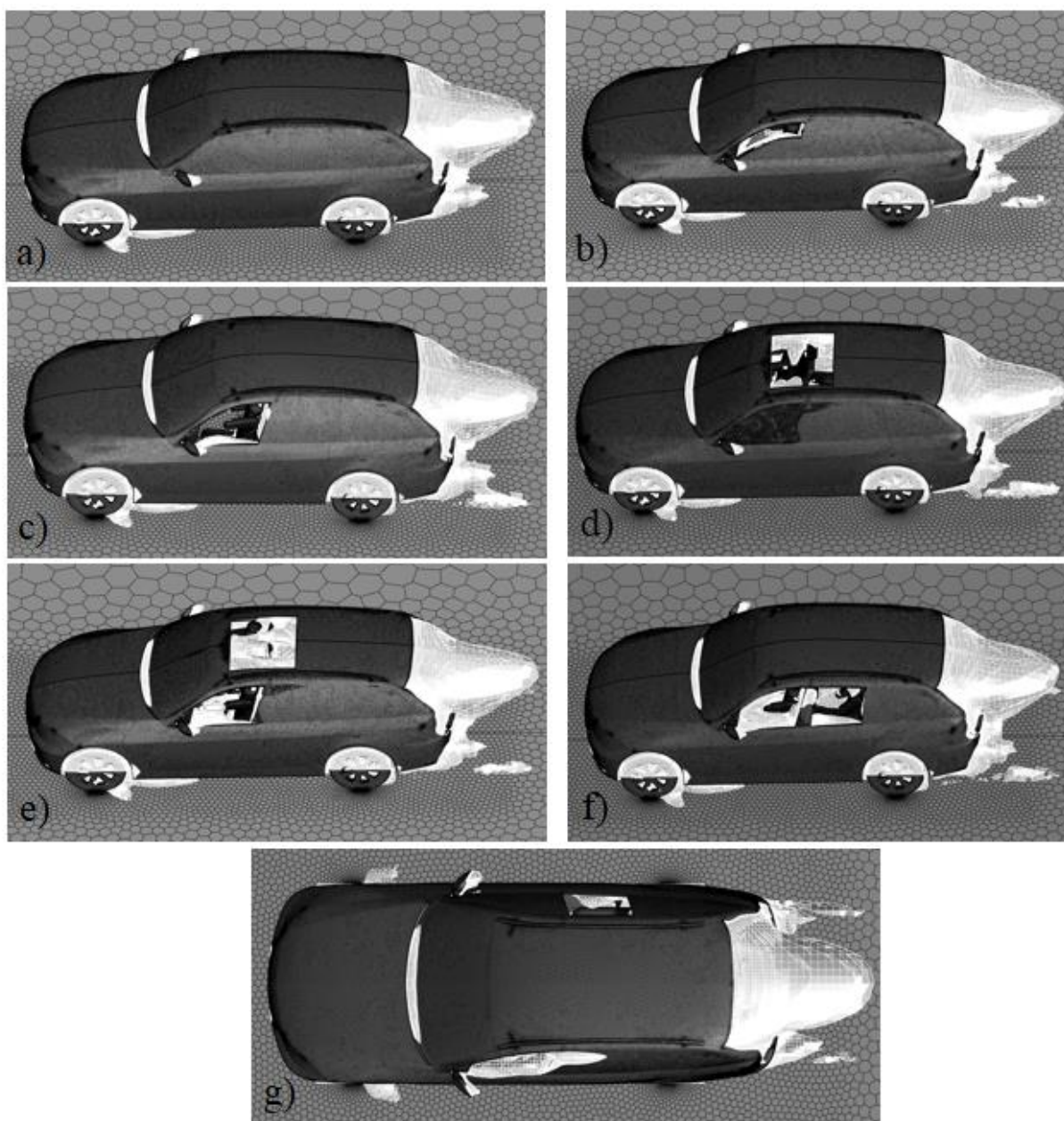


36 pav. Oro pasipriešinimo jėgos ir pasipriešinimo koeficiento kitimas iteracijų metu

Oro pasipriešinimo jėgai priskiriamas konvergavimo kriterijus: skaičiavimai laikomi baigtais ir tiksliais, kai oro pasipriešinimo jėga nustoja kisti 0,001 dydžio intervale 20 iteracijų iš eilės. Į pirmąsias 50 iteracijų neatsižvelgiama, kadangi dažnu atveju pirmosiose iteracijose rezultatai stipriai kinta, kol skaičiavimai pradeda tolygėti (36 pav.).

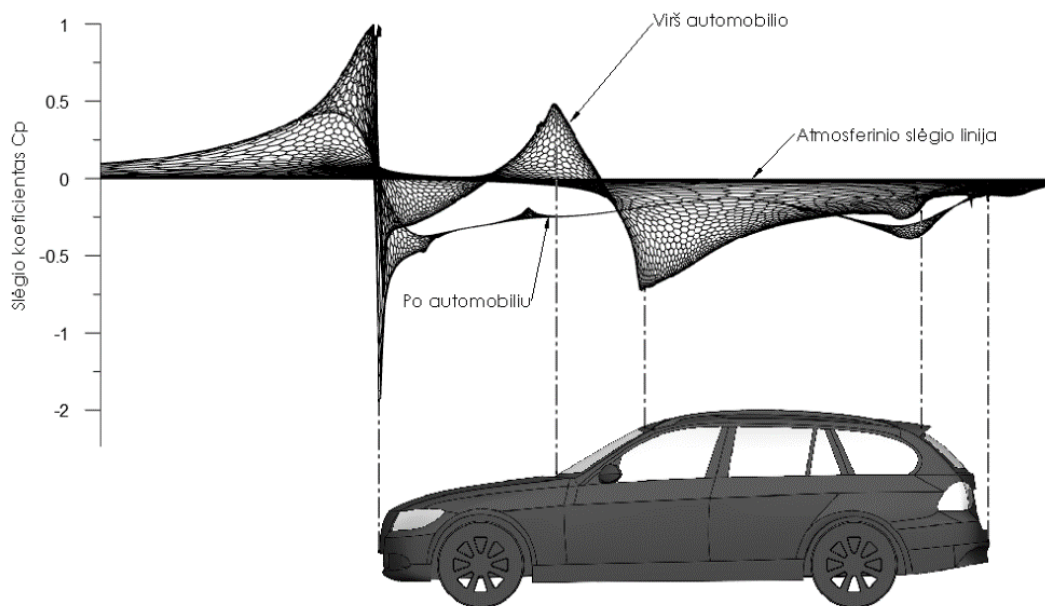
2.3. Grafiniai rezultatai

Pirmiausia aptariamos srauto tėkmės grafinės charakteristikos, kuriose matyti aerodinaminio srauto elgesys skirtinguose modeliuose (37 pav.).

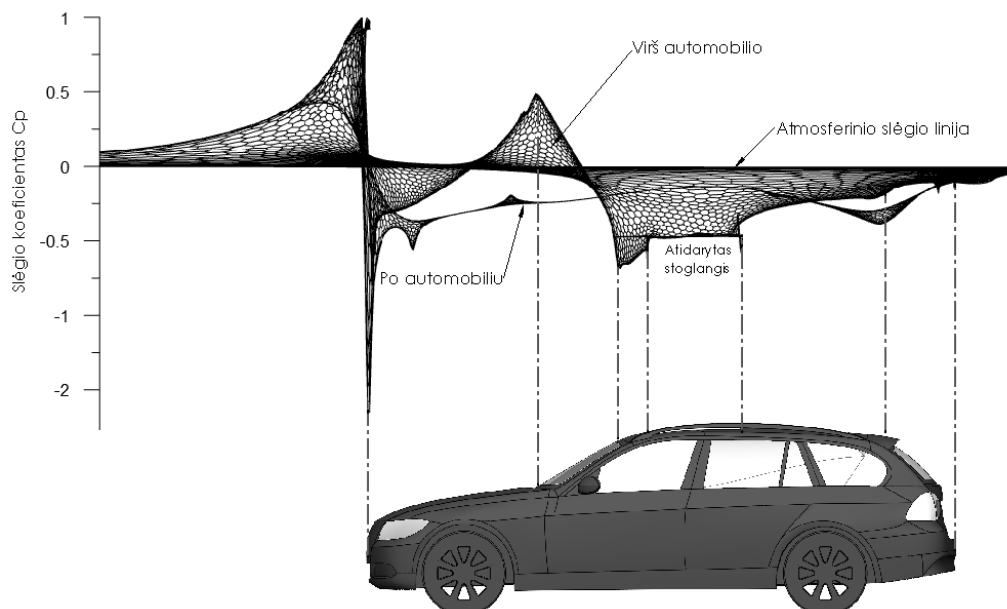


37 pav. Recirkuliaciniai regionai modeliuose; a) – uždaryti langai; b) – atidaryti priekiniai langai iki pusės; c) – atidaryti priekiniai langai pilnai; d) – atidarytas stoglangis; e) – atidaryti priekiniai langai pilnai ir stoglangis; f) – atidaryti 4 langai pilnai; g) – atidarytas priekinis kairės pusės langas ir galinis dešinės pusės langas

Recirkuliaciniai regiono parodo, kuriose vietose srauto tėkmė atitrūksta nuo aptekamo paviršiaus [35]. Kaip matyti, didžiausias srauto tėkmės atitrūkimas vyksta ties automobilio ratais bei galinėje jo dalyje. Kėbuluose su atidarytais langais srautas ties atviromis langų ertmėmis atitrūksta ir teka į automobilio saloną, sukuriama naujos turbulentinės zonos, o tai sukelia didesnę oro pasipriešinimą nei uždaro kėbulo atveju, kur srautas tolygiau apteka visą automobilio paviršių.

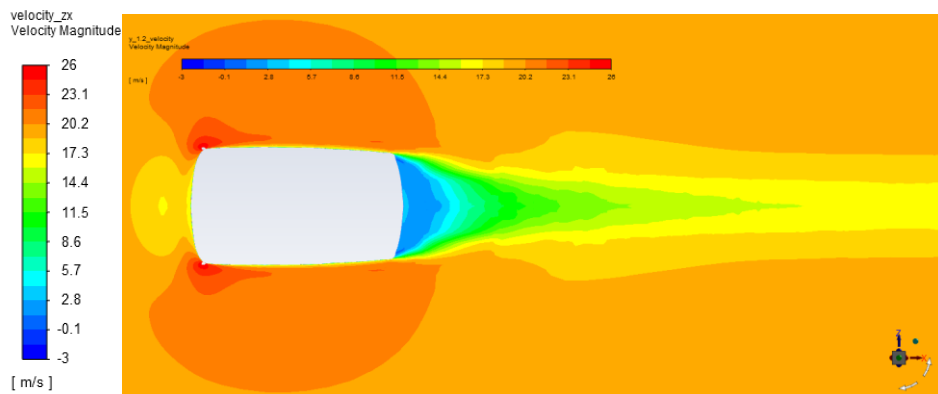


38 pav. Tekančio srauto slėgio koeficiento pasiskirstymas virš kėbulo ir po juo, langai uždaryti



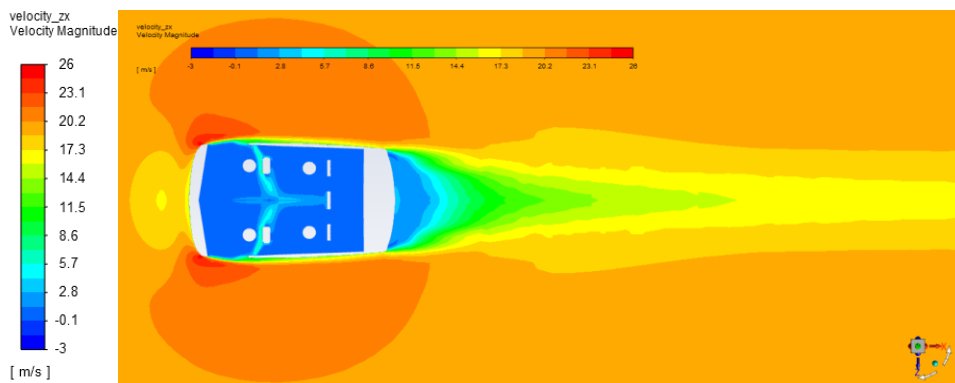
39 pav. Tekančio srauto slėgio koeficiento pasiskirstymas virš kėbulo ir po juo, atidarytas stoglangis ir priekiniai langai pilnai

38 ir 39 paveiksluose pavaizduotas slėgio koeficiento kitimas apie tiriamo automobilio kėbulą dviem skirtingais atvejais – kai važiuojama visais uždarytais langais bei atidarius stoglangį ir priekinius langus. Pirmuoju atveju matoma, kad slėgis staigiai pakyla kai srautas sutinka kliūtį – priekinį bamperį, toliau slėgis krenta ir ties variklio gaubto ir priekinio stiklo susijungimo vieta vėl pakyla dėl drastiškai besikeičiančios srauto tekėjimo krypties. Oras didžiausią greitį pasiekia ties priekinio stiklo susijungimo vieta su automobilio stogu, tą rodo ir šioje vietoje esantis stipriai neigiamas slėgio koeficientas. Judant link transporto priemonės galo slėgis pamažu artėja prie atmosferinio slėgio linijos ir už automobilio susilygina su ja. Kai atidarytas stoglangis ir priekiniai langai, slėgio koeficiento kitimas išlieka panašus, tačiau aiškiai matyti ties atidaryto stoglangio vieta esanti atkarpa, čia srautas yra sutrikdomas ir slėgis, užuot tolygiai artėdamas link atmosferinės ribos, stagnuoja.



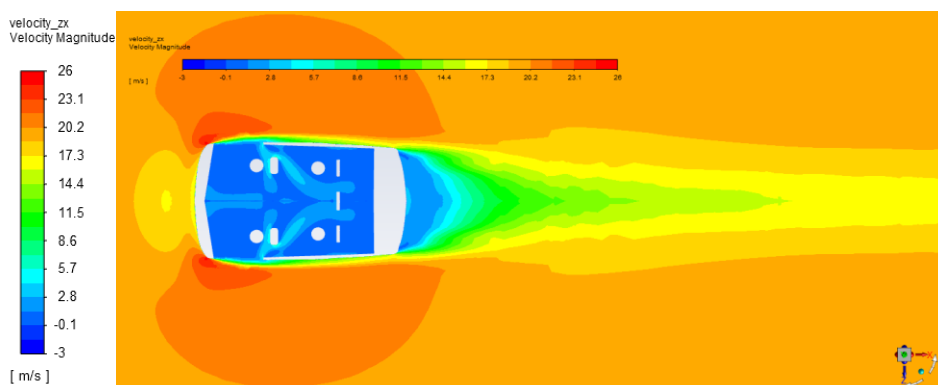
40 pav. Srauto greitis automobilio plokštumoje 1,2 metro aukštyje, visi langai uždaryti

40 paveiksle pateikta srauto tėkmė ties automobilio langais žvelgiant iš viršaus, srauto greitis įėjime – 19,4 m/s. Matyti, kad srautas apteka automobilio paviršių tolygiai be didesnių trukdžių, srautas nepatenka į automobilio saloną, kadangi visi langai uždaryti.



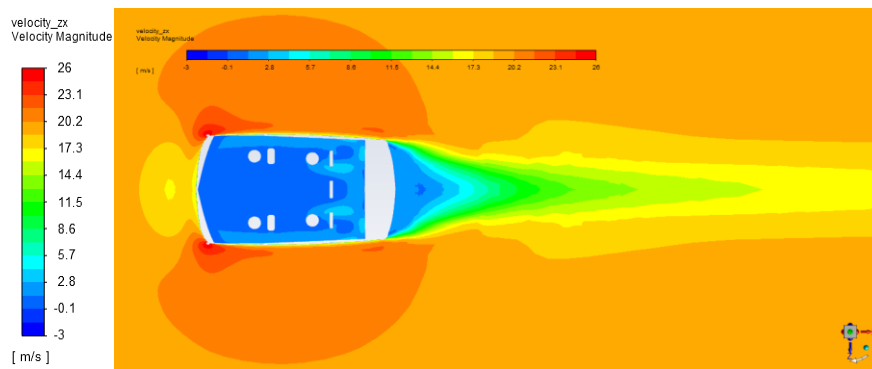
41 pav. Srauto greitis automobilio plokštumoje 1,2 metro aukštyje, priekiniai langai atidaryti iki pusės

Atidarius priekinius langus iki pusės (41 pav.) pastebima, kad ties langų ertmėmis srauto greitis mažėja (žalia spalva), oras įteka į automobilio saloną per priekinius langus, juda pro keleivį ar vairuotoją link salono galo, o ten susitikę du srautai stumia vienas kitą žemyn, teka link automobilio priekio ir išteka pro langų priekinę dalį į išorę.



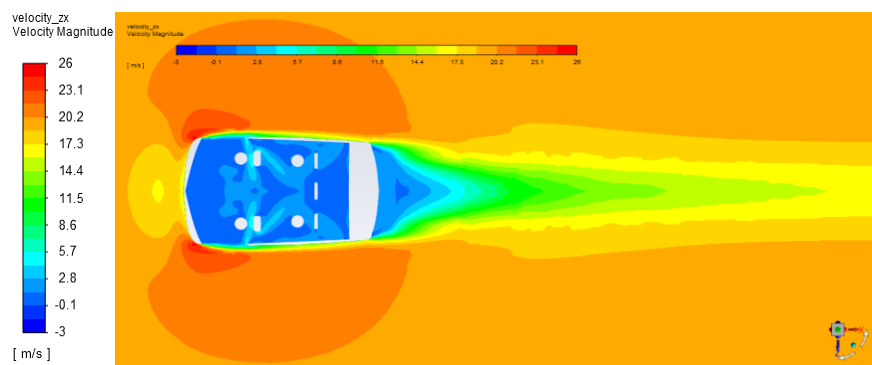
42 pav. Srauto greitis automobilio plokštumoje 1,2 metro aukštyje, priekiniai langai atidaryti pilnai

Pilnai atidarius priekinius langus (42 pav.) srautas elgiasi panašiai kaip ir iki pusės atidarytų priekinių langų atveju, tiesa, į automobilio saloną patenka didesnis srauto kiekis, todėl ties langų ertmėmis matyti didesnis žalios spalvos plotas: srautas dar ženkliau stabdomas.



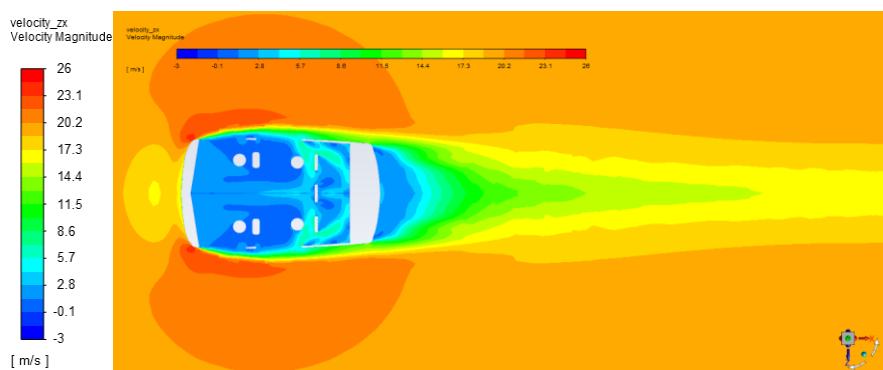
43 pav. Srauto greitis automobilio plokštumoje 1,2 metro aukštyje, atidarytas stoglangis

Kai atidarytas tik stoglangis (43 pav.), matyti, kad srautas už automobilio labiau stabdomas nei ankstesniais aptartais atvejais (mėlyna spalva už automobilio), tačiau mažiau sutrikdoma srauto tėkmė automobilio šonuose (nėra žalios spalvos plotų, kurie reiškia srauto sulėtėjimą). Srautas patenka į saloną per stoglangį, tekėdamas į apačią sukasi, pasiekia priekinę salono dalį bei kylant į viršų dalis srauto išteka į išorę, dalis toliau lieka cirkuliuoti automobilio viduje.



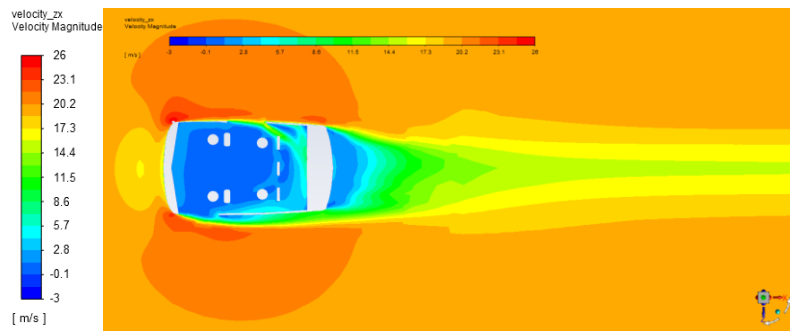
44 pav. Srauto greitis automobilio plokštumoje 1,2 metro aukštyje, atidaryti priekiniai langai ir stoglangis

Važiuojant atidarytais priekiniais langais pilnai ir stoglangiu oro pasipriešinimas dar padidėja, tai matyti ir 44 paveiksle. Šiuo atveju dėl stoglangio susidaro ilgesnė turbulentinio srauto tėkmė už automobilio ir srautas stabdomas šonuose dėl atidarytų langų.



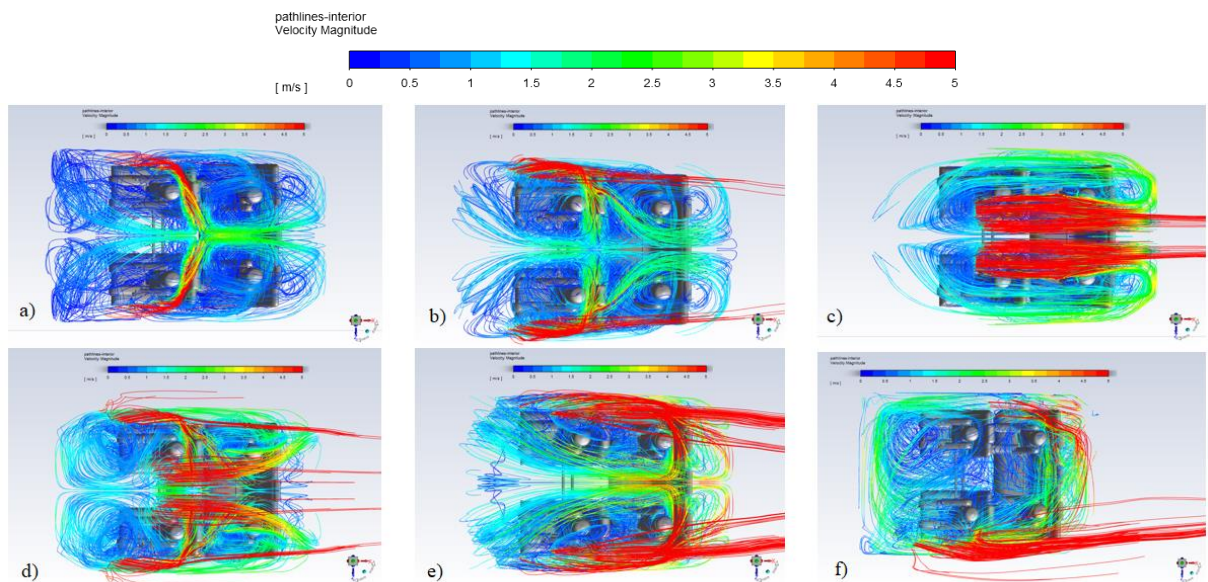
45 pav. Srauto greitis automobilio plokštumoje 1,2 metro aukštyje, visi keturi langai atidaryti pilnai

Atidarius visus 4 langus pilnai (45 pav.) matomas ryškus srauto stabdymas šoninėse automobilio dalyse (žalia spalva). Salone oro srautas pasiekia didesnę greitį nei ankstesniose aptartose konfigūracijose.



46 pav. Srauto greitis automobilio plokštumoje 1,2 metro aukštyje, langai atidaryti asimetriškai

Asimetriškai atidarius langus (46 pav.) matoma, kad srautas įteka į automobilio saloną per galinį dešinį langą, juda link galinės dalies bei toliau cirkuliuoja automobilio salone kol, pasiekęs priekinį langą, išteka į išorę. Automobilio šoninėse dalyse matyti, kad srautas daugiausia stabdomas kairėje pusėje, kur atidarytas priekinis langas ir kur oras išteka iš automobilio, o ties galiniu dešiniu langu, kur srautas įteka, išorinėje transporto priemonės dalyje srautas greičio praranda mažiau ir sparčiau pasiekia galinę kėbulo dalį. Tai paaiškina ir už transporto priemonės matomą netolygų srauto srovių stabdymo pasiskirstymą, kairėje automobilio pusėje esantis srautas stabdomas ženkliai daugiau.

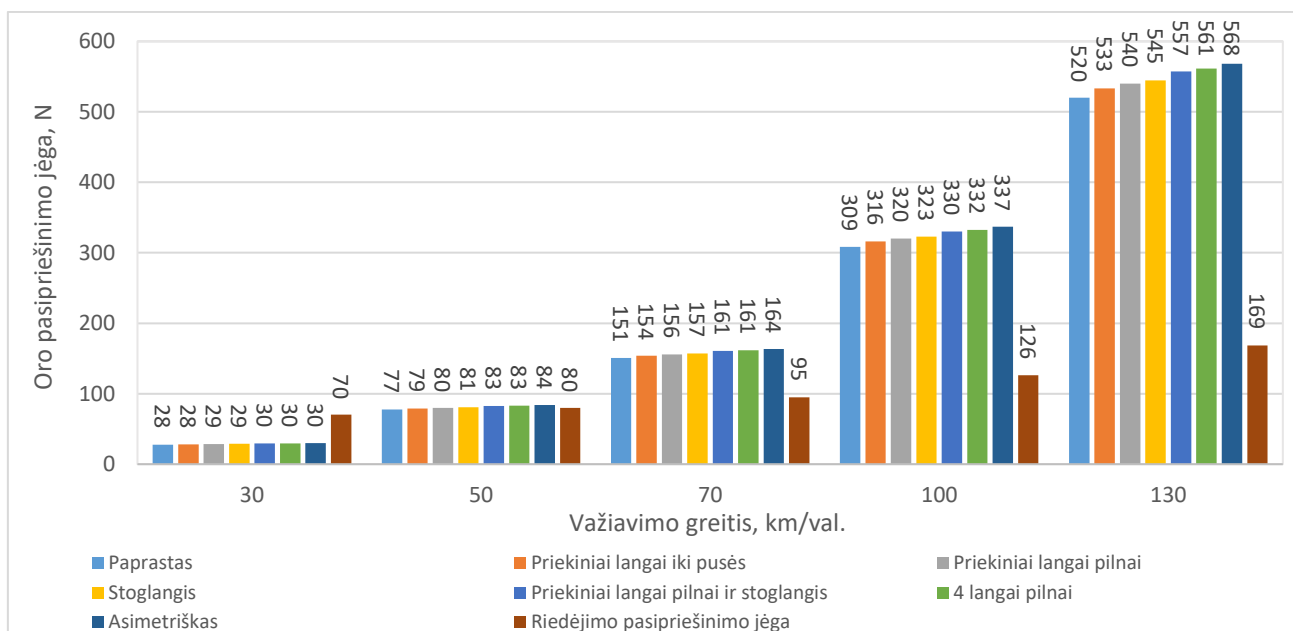


47 pav. Srauto tėkmė automobilyje, greitis 70 km/val.; a) – atidaryti priekiniai langai iki pusės; b) – atidaryti priekiniai langai pilnai; c) – atidarytas stoglangis; d) – atidaryti priekiniai langai pilnai ir stoglangis; e) – atidaryti 4 langai pilnai; f) – atidarytas priekinis kairės pusės langas ir galinis dešinės pusės langas

47 paveiksle matyti, kad didžiausią srauto greitį salone bei geriausią ventiliaciją pasiekia modeliai su visais keturiais atidarytais langais bei su pilnai atidarytais priekiniais langais ir stoglangiu. Visais atvejais daugiausia srauto atitenka galinei automobilio salono daliai, kur oras, atsitrenkęs į galines sėdynes, keičia tekėjimo kryptį bei yra nukreipiamas į priekinę transporto priemonės dalį, kurioje srauto greitis mažėja iki minimumo ir išsisklaido salone arba išteka atgal į išorę pro priekinius langus. Važiuojant atidarius transporto priemonės langus asimetriškai (f variantas) matyti, kad oras patenka į automobilį pro galinį dešinį langą, o išteka pro priekinį kairįjį langą. Tai sukelia tiek srauto greičio, tiek slėgio skirtumus kėbulo dešinėje ir kairėje pusėje, dėl to oro pasipriešinimo koeficientas pasiekia didesnę reikšmę nei visų keturių atidarytų langų atveju. Vaizdesnis srauto aptekėjimas apie uždarytais langais ir asimetriškai atidarytais langais judančius automobilius pavaizduotas 2–5 prieduose.

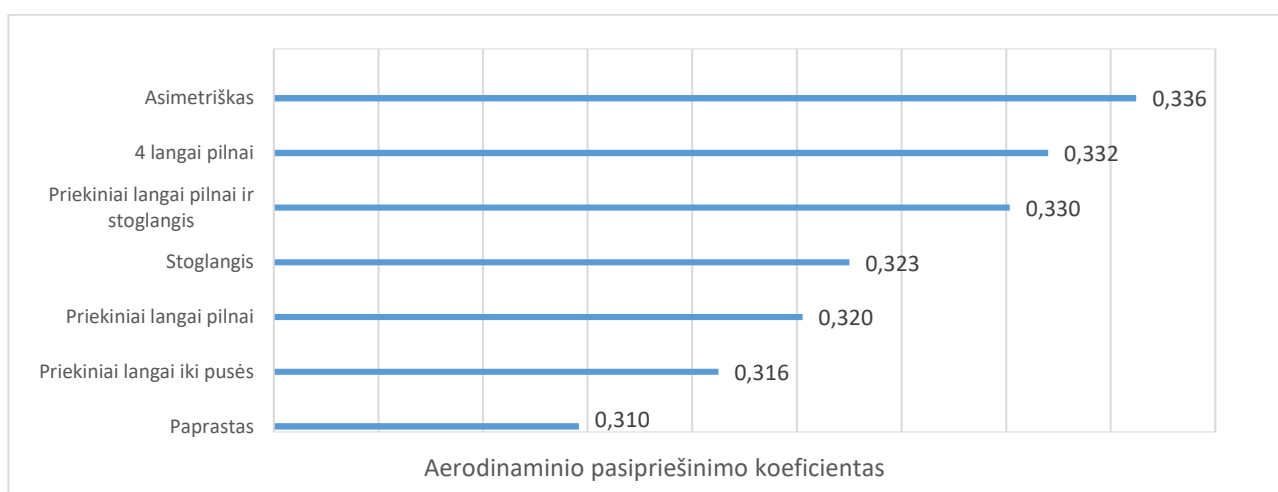
2.4. Skaitiniai rezultatai

Aerodinaminė analizė atliekama 5 skirtingais važiavimo greičiais su kiekvienu modeliu: 30 km/val., 50 km/val., 70 km/val., 100 km/val. ir 130 km/val. Analizės metu tiriama, kaip pasikeičia oro pasipriešinimo jėga ir oro pasipriešinimo koeficientas (48, 49 pav.).



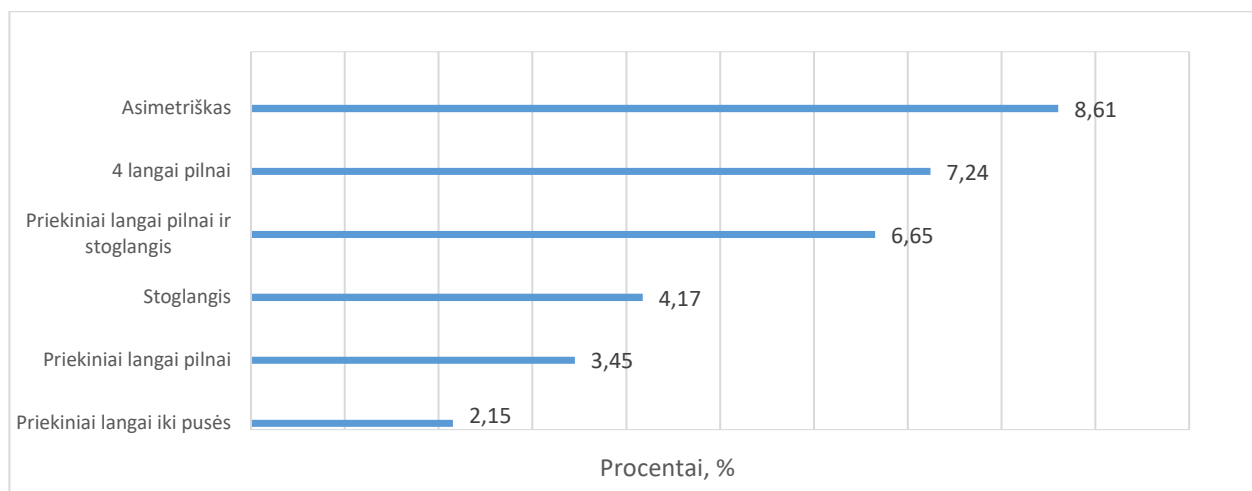
48 pav. Oro pasipriešinimo jėgos kitimas važiuojant uždarytais ar skirtingu būdu atidarytais langais bei pasipriešinimas riedėjimui

48 paveiksle matyti oro pasipriešinimo jėgos kitimas skirtinguose modeliuose skirtingais važiavimo greičiais. Grafikas atspindi, kad žymesnis jėgos pasikeitimas pradeda ryškėti peržengus 70 km/val. važiavimo greitį. Mažiausią oro pasipriešinimo jėgą generuoja paprastas modelis su visais uždarytais langais, o didžiausią – asimetriškas modelis su atidarytu priekiniu kairės pusės langu ir galiniu dešiniu langu. Grafike taip pat pateikta riedėjimo pasipriešinimo jėga, kuri nežymiai kinta didėjant važiavimo greičiui, matyti, kad esant didesniems važiavimo greičiams didžiausią įtaką sudaro oro pasipriešinimas.



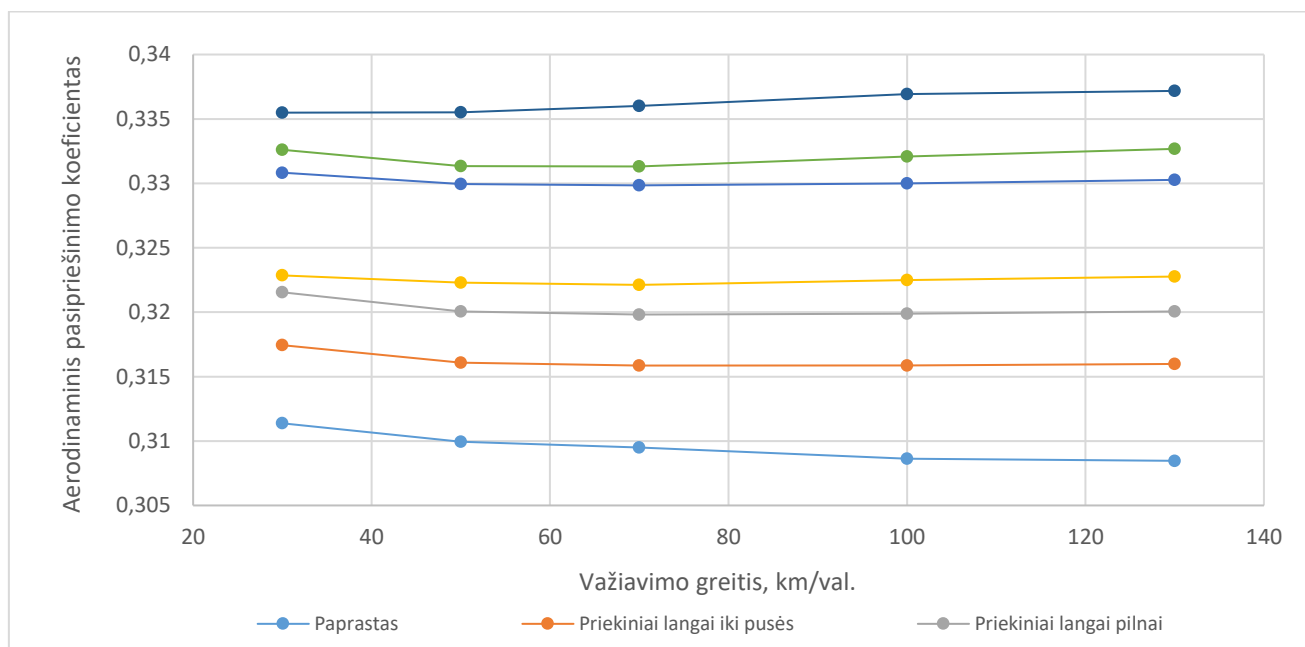
49 pav. Aerodinaminio pasipriešinimo koeficientas važiuojant uždarytais ar skirtingu būdu atidarytais langais

49 paveiksle matyti, kad uždaro kėbulo aerodinaminio pasipriešinimo koeficientas yra 0,310, o didžiausią pasipriešinimo koeficientą turi modelis su asimetriškai atidarytais langais – 0,336. Taip pat galima teigti, kad kuo daugiau atidarytų langų, tuo aerodinaminio pasipriešinimo koeficientas didesnis.



50 pav. Procentinis aerodinaminio oro pasipriešinimo koeficiento padidėjimas važiuojant skirtingu būdu atidarytais langais

50 paveiksle matyti, kad aerodinaminis pasipriešinimo koeficientas gana ženkliai didėja važiuojant atidarytais langais. Mažiausias pokytis nuo uždaro modelio yra važiuojant priekiniais langais atidarytais iki pusės – 2,15 %, o didžiausias – važiuojant asimetriškai atidarytais langais: priekiniu kairiu ir galiniu dešiniu, tokiu būdu aerodinaminis oro pasipriešinimo koeficientas padidėja 8,61 %.



51 pav. Aerodinaminio pasipriešinimo koeficiento kitimas važiuojant uždara ar skirtingu būdu atidarytais langais skirtinguose greičiuose

51 paveiksle pateiktas aerodinaminio pasipriešinimo koeficiento kitimas modeliuose važiuojant skirtingais greičiais. Galima išskirti, kad uždarame kėbule didėjant greičiui aerodinaminis koeficientas šiek tiek mažėja, o kėbuluose su atidarytais langais – nežymiai didėja.

2.5. Degalų sąnaudų įvertinimas

Norint įvertinti degalų sąnaudų procentinį pokytį, pirmiausia reikalinga apskaičiuoti bendrą riedėjimo ir oro pasipriešinimo jėgą. Riedėjimo pasipriešinimo jėga apskaičiuojama naudojantis anksčiau aptarta (12) formule [36]:

$$F_r = mgc; \quad (12)$$

čia m – automobilio masė (kg);

g – laisvojo kritimo pagreitis (m/s^2);

c – pasipriešinimo riedėjimui koeficientas.

Pasipriešinimo riedėjimui koeficientas priklauso nuo važiavimo greičio bei padangų slėgio, jis apskaičiuojamas naudojantis (16) formule [36]:

$$c = \left(0,005 + \frac{1}{p}\right) \left(0,01 + 0,0095 \left(\frac{v}{100}\right)^2\right); \quad (16)$$

čia p – padangos slėgis (bar);

v – važiavimo greitis (km/val.).

Naudojantis (16) ir (12) formulėmis apskaičiuojamas pasipriešinimo riedėjimui koeficientas ir pasipriešinimo riedėjimui jėga važiuojant 30 km/val. greičiu:

$$c = \left(0,005 + \frac{1}{2,3}\right) \left(0,01 + 0,0095 \left(\frac{30}{100}\right)^2\right) = 0,005$$

$$F_r = 1500 \cdot 9,81 \cdot 0,005 = 70,247 \text{ N}$$

Apskaičiavus pasipriešinimą riedėjimui bei žinant modeliavimo metu apskaičiuotą oro pasipriešinimo jėgą, galima suskaičiuoti bendrą pasipriešinimo jėgą, kadangi teigiama, kad automobilis važiuoja tolygiu greičiu tiesiame kelyje, todėl inercijos bei posvyrio kampo jėgų nevertiname (7 lentelė).

Pasipriešinimui įveikti reikalinga galia važiuojant 30 km/val. greičiu apskaičiuojama naudojantis anksčiau aptarta (13) formule [20]:

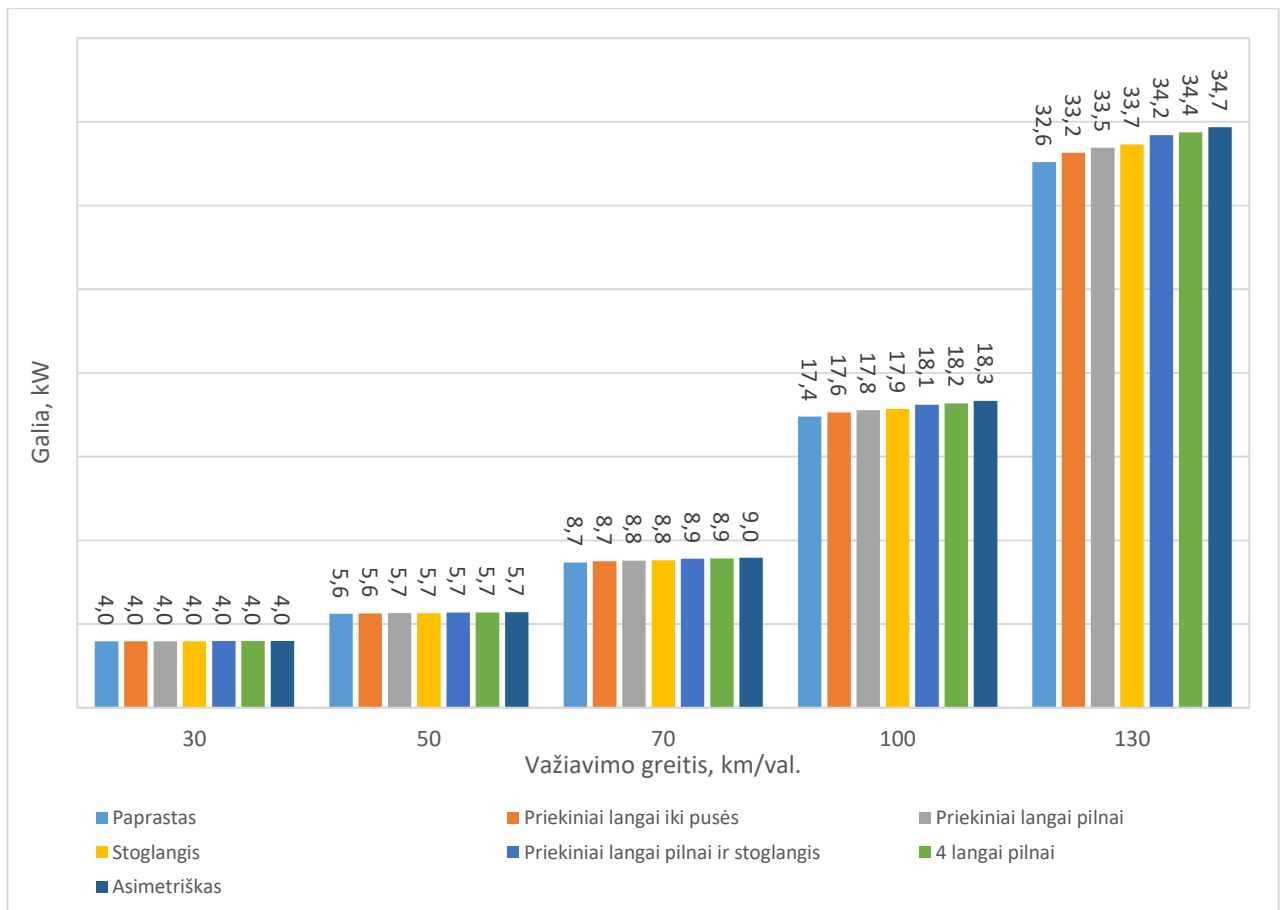
$$P_T = \frac{F_p V}{\eta_m} + P_E = \frac{97,996 \cdot 8,3}{0,86} + 3000 = 3968 \text{ W}$$

Skaičiuojant reikalingą galią įveikti pasipriešinimo jėgoms, priimame, kad visi kiti automobilio prietaisai – P_E (oro kondicionierius išjungtas) – naudoja 3 kW energijos. 52 paveiksle matyti apskaičiuota bendram pasipriešinimui įveikti reikalinga galia.

7 lentelėje pateikta visų važiavimo konfigūracijų apskaičiuota bendra oro pasipriešinimo ir riedėjimo pasipriešinimo jėga.

7 lentelė. Apskaičiuota bendra pasipriešinimo jėga visuose greičiuose

Modelio tipas	Greitis, km/val.	Oro pasipriešinimo jėga, N	Riedėjimo pasipriešinimo koeficientas	Riedėjimo pasipriešinimo jėga, N	Bendra pasipriešinimo jėga, N
Paprastas	30	27,748	0,005	70,247	97,996
	50	77,465	0,005	80,084	157,549
	70	150,685	0,006	94,838	245,523
	100	308,553	0,009	126,192	434,746
	130	520,020	0,011	168,612	688,632
Priekiniai langai atidaryti iki pusės	30	28,316	0,005	70,247	98,563
	50	79,078	0,005	80,084	159,162
	70	153,930	0,006	94,838	248,768
	100	316,085	0,009	126,192	442,277
	130	533,189	0,011	168,612	701,802
Priekiniai langai atidaryti pilnai	30	28,682	0,005	70,247	98,929
	50	80,072	0,005	80,084	160,155
	70	155,853	0,006	94,838	250,692
	100	320,095	0,009	126,192	446,287
	130	540,058	0,011	168,612	708,670
Atidarytas stoglangis	30	28,799	0,005	70,247	99,046
	50	80,632	0,005	80,084	160,715
	70	156,975	0,006	94,838	251,814
	100	322,713	0,009	126,192	448,905
	130	544,638	0,011	168,612	713,250
Atidaryti priekiniai langai pilnai ir stoglangis	30	29,510	0,005	70,247	99,757
	50	82,545	0,005	80,084	162,629
	70	160,739	0,006	94,838	255,578
	100	330,233	0,009	126,192	456,426
	130	557,306	0,011	168,612	725,919
Visi keturi langai atidaryti pilnai	30	29,669	0,005	70,247	99,916
	50	82,894	0,005	80,084	162,978
	70	161,455	0,006	94,838	256,293
	100	332,312	0,009	126,192	458,504
	130	561,369	0,011	168,612	729,981
Asimetriškas	30	29,897	0,005	70,247	100,144
	50	83,858	0,005	80,084	163,941
	70	163,591	0,006	94,838	258,429
	100	336,842	0,009	126,192	463,034
	130	568,424	0,011	168,612	737,036



52 pav. Pasipriešinimui įveikti reikalinga galia važiuojant uždarytais ar skirtingu būdu atidarytais langais

52 paveiksle matyti, kad važiuojant mažais greičiais bendram pasipriešinimui įveikti reikalingas galios kiekis beveik nesikeičia, o ryškesnis padidėjimas atsiranda tik peržengus 70 km/val. važiavimo greitį. Važiuojant 50 km/val. greičiu uždaru kėbulu pasipriešinimui įveikti reikalinga 5,6 kW energijos, o asimetriškai atidarius langus – 5,7 kW, bet, esant 130 km/val. greičiui ir važiuojant uždarytais langais – 32,6 kW, o atidarytais asimetriškai – 34,7 kW.

Tiksliai įvertinti degalų sąnaudų efektyvumą yra sudėtinga. Supaprastintas metodas padeda apytiksliai įvertinti degalų sąnaudų pokyčius dėl aerodinaminio pasipriešinimo jėgos pasikeitimo:

$$KMPL = \frac{V \eta_t E_F}{P_T 10^6} = \frac{8,3 \cdot 0,32 \cdot 39,7 \cdot 10^6}{3,986 \cdot 10^6} = 26,571 \text{ km/l}; \quad (14)$$

čia $KMPL$ – degalų efektyvumas, išreiškiamas nuvažiuotais kilometrais litrai degalų (km/l);

V – automobilio greitis (m/s);

η_t – šiluminis dyzelinio variklio efektyvumas, apytiksliai priimamas 32 % [20];

E_F – degalų energijos kiekis (J/l) (dyzeliniams degalams priimama $39,7 \cdot 10^6$ J/l [20]);

P_T – galia, reikalinga įveikti pasipriešinimui (kW).

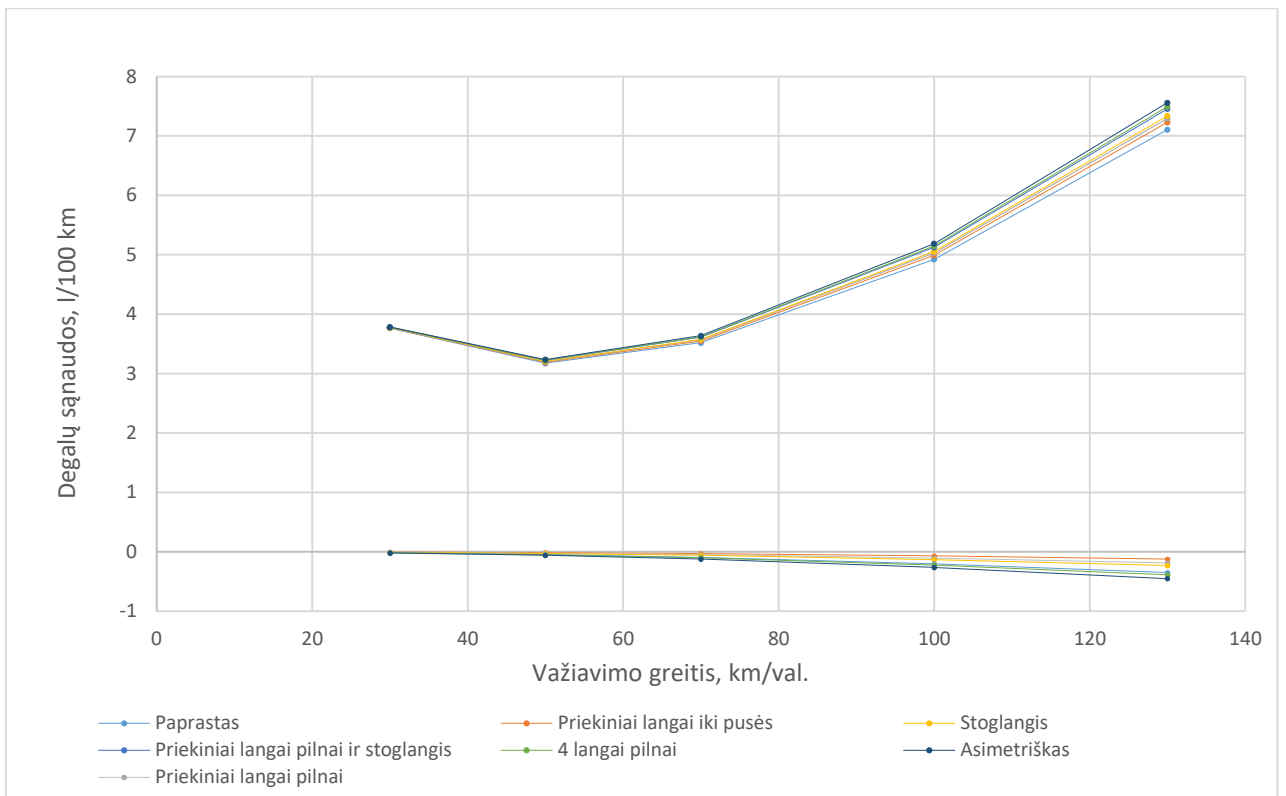
Degalų sąnaudas litrais šimtui kilometrų galima apskaičiuoti pagal (17) formulę:

$$LPKM = \frac{100}{KMPL} = \frac{100}{26,571} = 3,763 \text{ l/100 km} \quad (17)$$

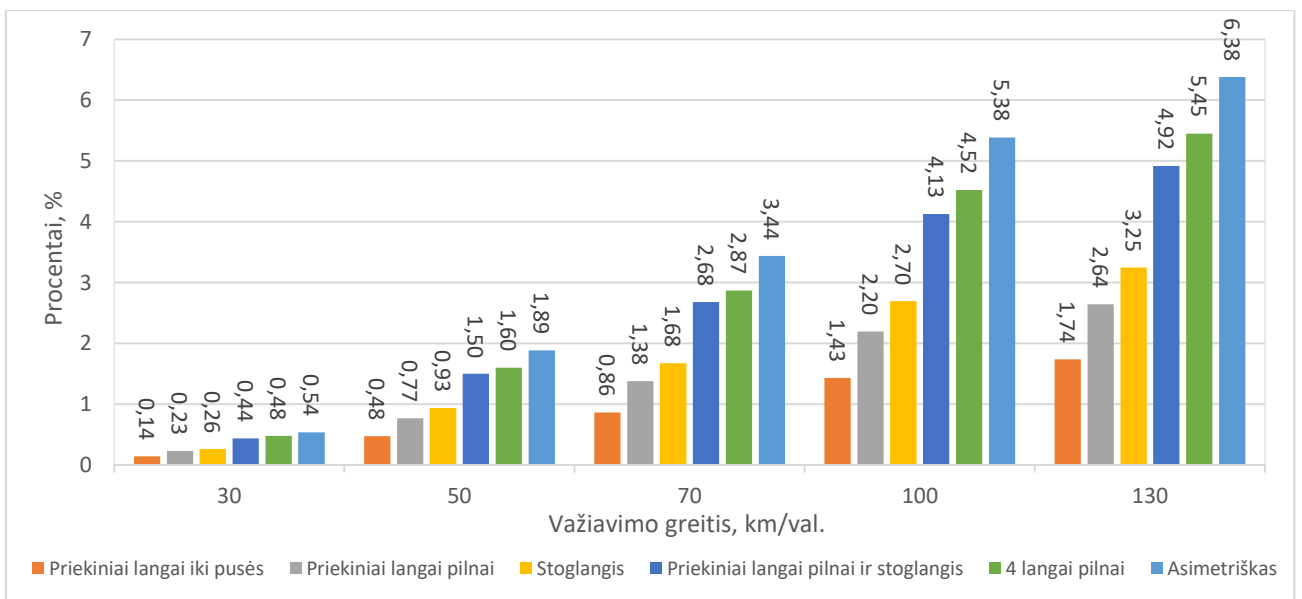
8 lentelėje matyti, kad mažiausios degalų sąnaudos – važiuojant 50 km/val. greičiu. Bendra tendencija išlieka vienoda visuose skaičiavimuose: mažiausios degalų sąnaudos yra paprasto uždaro kėbulo, kurios svyruoja nuo 3,8 l/100 km iki 7,1 l/100 km, priklausomai nuo važiavimo greičio. Didžiausios degalų sąnaudos yra automobiliui važiuojant asimetriškai atidarytais langais – jos svyruoja nuo 3,8 l/100 km mažesniuose greičiuose iki 7,6 l/100 km – didesniuose.

8 lentelė. Degalų sąnaudos skirtinguose modeliuose

Modelio tipas	Greitis, km/val.	Degalų sąnaudos, l/100 km
Paprastas	30	3,763
	50	3,175
	70	3,518
	100	4,923
	130	7,107
Priekiniai langai atidaryti iki pusės	30	3,769
	50	3,190
	70	3,548
	100	4,994
	130	7,231
Priekiniai langai atidaryti pilnai	30	3,772
	50	3,200
	70	3,566
	100	5,032
	130	7,295
Atidarytas stoglangis	30	3,773
	50	3,205
	70	3,577
	100	5,056
	130	7,338
Atidaryti priekiniai langai pilnai ir stoglangis	30	3,780
	50	3,223
	70	3,612
	100	5,127
	130	7,457
Visi keturi langai atidaryti pilnai	30	3,781
	50	3,226
	70	3,619
	100	5,146
	130	7,495
Asimetriškas	30	3,784
	50	3,235
	70	3,639
	100	5,188
	130	7,561



53 pav. Degalų sąnaudos l/100 km ir degalų sąnaudų l/100 km praradimas važiuojant uždarytais ar skirtingu būdu atidarytais langais



54 pav. Degalų sąnaudų procentinis padidėjimas važiuojant skirtingu būdu atidarytais langais

53 paveiksle matomos teorinės degalų sąnaudos važiuojant skirtingomis modelio konfigūracijomis, o 54 paveiksle – procentinis degalų sąnaudų pokytis lyginant su modeliu, kur visi langai uždaryti. Galima teigti, kad važiuojant atidarius priekinius langus iki pusės degalų sąnaudos pakinta nežymiai – iki 1 % mažesniuose greičiuose ir iki 2 % didesniuose. Važiuojant atidarius langus asimetriškai – priekinį kairįjį langą ir galinį dešinį – generuojamas didesnis oro pasipriešinimas nei atidarius visus keturis langus pilnai, o tai įtakoja ir didžiausią degalų sąnaudų pokytį: važiuojant 100 km/val. greičiu degalų sąnaudos pakyla 5,38 %, o 130 km/val. – 6,38 %.

2.6. Realus automobilio „BMW E91“ degalų sąnaudų pokyčio tyrimas

Atliekamas realus tyrimas su „BMW E91“ automobiliu. Tyrimui pasirenkamas 4,2 kilometrų ilgio kelio ruožas (55 pav.), apibrėžiami pradžios ir pabaigos taškai. Prieš tyrimą automobilio variklis įšildomas iki darbinės temperatūros. Automobiliu įsibėgėjama iki tam tikro užsiduoto greičio, įjungiamas pastovaus greičio palaikymo sistema. Pasiekus pradžios tašką atnaujinamas automobilio vidutinių degalų sąnaudų l/100 km skaičiavimas. Ruožo atkarpa pastovaus greičio palaikymo sistemos veikimo režimu pravažiuojama nekintančiu greičiu. Pasiekus atkarpos pabaigos tašką užfiksuojama, kokia degalų sąnaudų reikšmė atvaizduojama automobilio kompiuterio ekrane. Taip atkarpa pravažiuojama keturiais skirtingais važiavimo greičiais – 50 km/val., 70 km/val., 100 km/val., 130 km/val. – ir trimis skirtingais variantais: uždarytais langais, atidarytais 4 langais pilnai ir pilnu pajėgumu įjungus oro kondicionierių. Pasirinktas kelio ruožas važiuojamas tiek pirmyn (pirma kryptis), tiek atgal (antra kryptis). Atlikus pirmąjį bandymą 4 skirtingais greičiais ir 3 skirtingomis važiavimo konfigūracijomis abiem kryptimis, tyrimas kartojamas ir tokiu pačiu principu atliekamas antras bandymas.

9 lentelė. Tiriama automobilio charakteristikos

Variklis	1995 cm ³ dyzelinis 4 cilindrų variklis
Masė, kg	1500
Galia, kW	120
Oro pasipriešinimo koeficientas	0,31
Pavarų dėžė	automatinė 6 pavarų
Važiuojančių žmonių skaičius	2

Tokio tyrimo metu labai svarbios tyrimo sąlygos (10 lentelė). Tiesa, atliekant realų tyrimą ganėtinai sudėtinga visų važiavimo metu užtikrinti vienodas sąlygas, kadangi nuolatos keičiasi vėjo gūšiai, svyruoja aplinkos temperatūra, sudėtinga išlaikyti idealiai vienodą važiavimo trajektoriją ir greitį. Tyrimas atliekamas nakties metu, 23–4 val., taip užtikrinamos kuo ramesnės sąlygos (vėjas, temperatūra) bei išvengiama aplinkinių automobilių, kurie trukdytų tinkamam tyrimo atlikimui.

10 lentelė. Tyrimo sąlygos

Oro temperatūra, °C	6
Vėjo kryptis	pietryčių
Vėjo greitis, m/s	2
Vėjo pobūdis	tolygus, mažai kintantis, reti nedideli gūšiai
Kelio danga	asfaltas
Maršruto reljefas	Viena nuokalnė ir viena įkalnė, daugiausia horizontalus, be posūkių

55 paveiksle matyti tyrimo maršrutas. Kelio atkarpa yra 4,2 km ilgio, daugiausia tiesi su viena įkalne (6 %) ir nuokalne (6 %). Kelio danga kokybiška, neseniai perklota nauja asfalto danga, o šalia kelio vyrauja besikeičiantys medžių masyvai ir lygus laukai.



55 pav. Tyrimo maršrutas

Tyrimo maršruto žemėlapyje (55 pav.) pateikti pirmos bei antros važiavimų krypčių pradžios ir pabaigos taškai, vėjo kryptis. Tiesa, vėjas tyrimo metu labai nedidelis (iki 2 m/s), todėl važiavimo rezultatuose pirma ar antra kryptimi jo įtaka nepastebima.

2.6.1. Realus automobilio „BMW E91“ degalų sąnaudų pokyčio tyrimo rezultatai

11 ir 12 lentelėse pateikti pirmojo ir antrojo važiavimų degalų sąnaudų rezultatai, o 13 lentelėje – abiejų važiavimų rezultatų vidurkiai. Vidurkių lentelėje matyti, kad mažiausios degalų sąnaudos visose modifikacijose yra važiuojant 70 km/val. greičiu, o didžiausios, natūralu – važiuojant 130 km/val. greičiu. Degalų sąnaudos judant 50 km/val. greičiu atidarius langus beveik nepakinta, lyginant su važiavimu uždarytais langais, tačiau galima teigti, kad važiuojant su įjungtu oro kondicionieriumi degalų sąnaudų padidėjimas šiame greityje yra ženklus. Didesnis degalų sąnaudų pokytis važiuojant atidarytais 4 langais pilnai pasireiškia prie 70 km/val. greičio, o greitį toliau didinant, pokytis taip pat didėja (56 pav.).

11 lentelė. Pirmo važiavimo degalų sąnaudų rezultatai

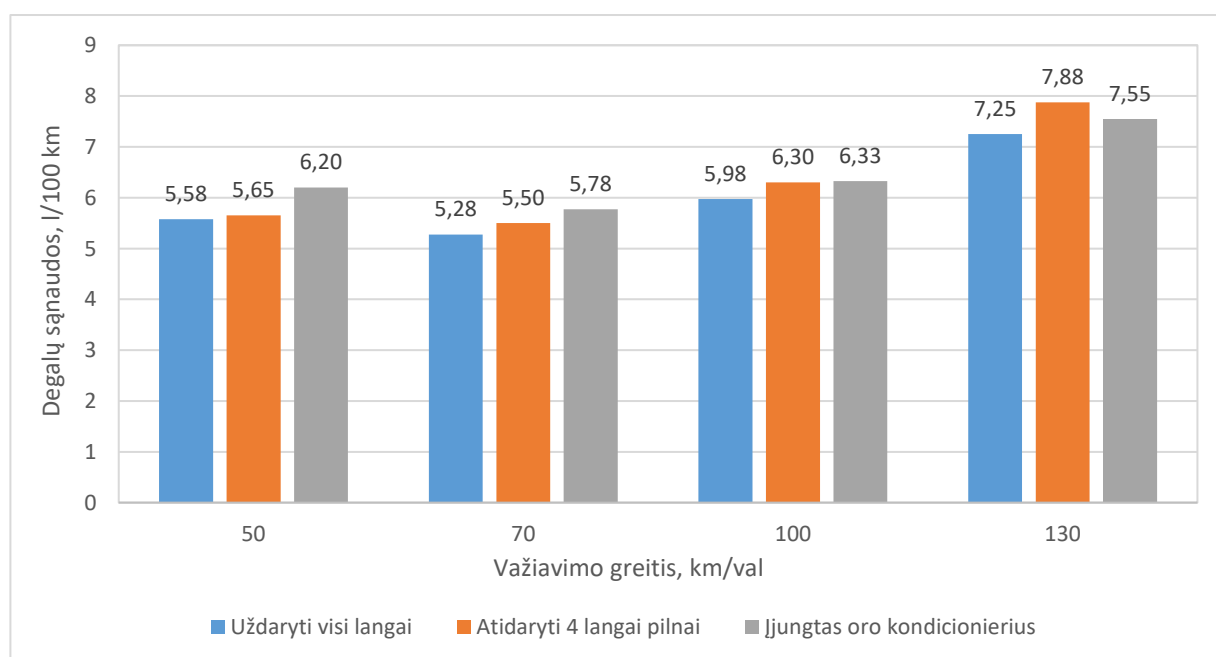
Modifikacija	Uždaryti langai		Atidaryti langai		Įjungtas oro kondicionierius	
	1 kryptis	2 kryptis	1 kryptis	2 kryptis	1 kryptis	2 kryptis
50	5,3	5,9	5,4	5,9	6,2	6,2
70	5,0	5,6	5,3	5,8	5,7	5,9
100	6,0	5,9	6,3	6,2	6,4	6,2
130	7,3	7,1	8,0	7,9	7,7	7,5

12 lentelė. Antro važiavimo degalų sąnaudų rezultatai

Modifikacija	Uždaryti langai		Atidaryti langai		Įjungtas oro kondicionierius	
	1 kryptis	2 kryptis	1 kryptis	2 kryptis	1 kryptis	2 kryptis
50	5,4	5,7	5,5	5,8	6,3	6,1
70	5,1	5,4	5,3	5,6	5,7	5,8
100	6,1	5,9	6,4	6,3	6,4	6,3
130	7,4	7,2	7,9	7,7	7,7	7,3

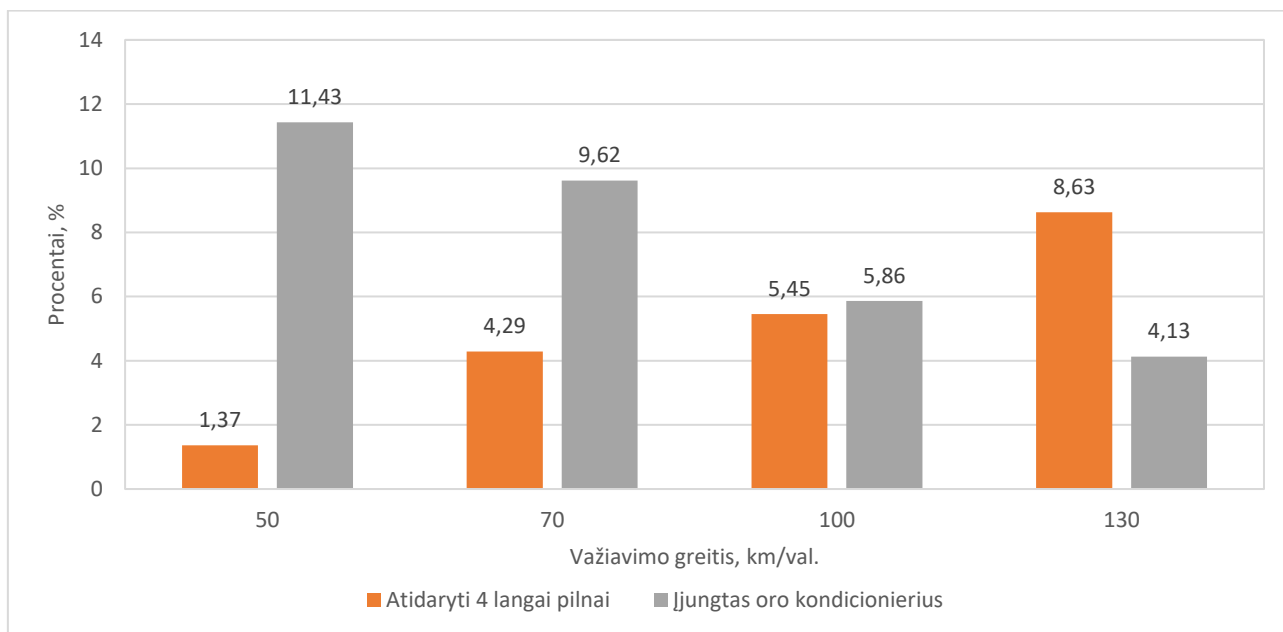
13 lentelė. Abiejų važiavimų degalų sąnaudų vidurkiai

Modifikacija	Uždaryti langai		Atidaryti langai		Įjungtas oro kondicionierius	
	1 kryptis	2 kryptis	1 kryptis	2 kryptis	1 kryptis	2 kryptis
50	5,35	5,80	5,45	5,85	6,25	6,15
70	5,05	5,50	5,30	5,70	5,70	5,85
100	6,05	5,90	6,35	6,25	6,40	6,25
130	7,35	7,15	7,95	7,80	7,70	7,40



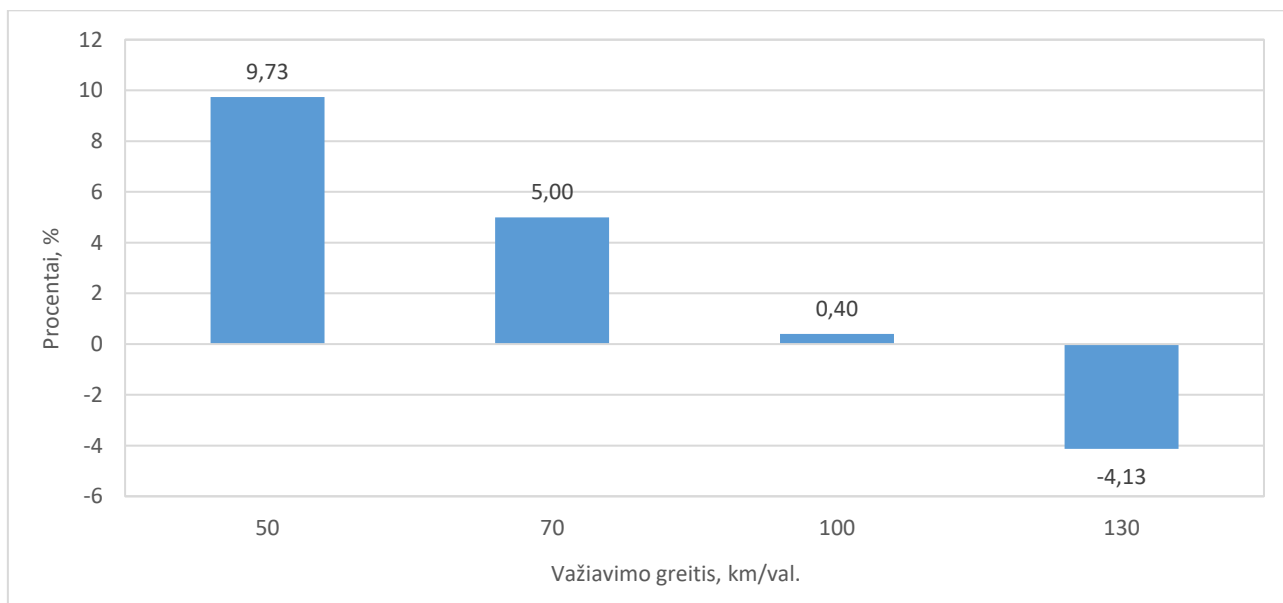
56 pav. Realaus tyrimo metu nustatytos degalų sąnaudos

56 paveiksle matyti degalų sąnaudų važiuojant uždarytais langais, atidarytais 4 langais pilnai ir įjungtu oro kondicionieriumi abiejų krypčių vidurkiai. Atidarius visus 4 langus mažesniuose greičiuose degalų sąnaudos padidėja 0,07–0,22 l/100 km, o važiuojant 130 km/val. greičiu – 0,62 l/100 km. Tiesia, važiavimas įjungus oro kondicionierių mažesniuose greičiuose dar labiau didina degalų sąnaudas (57 pav.).



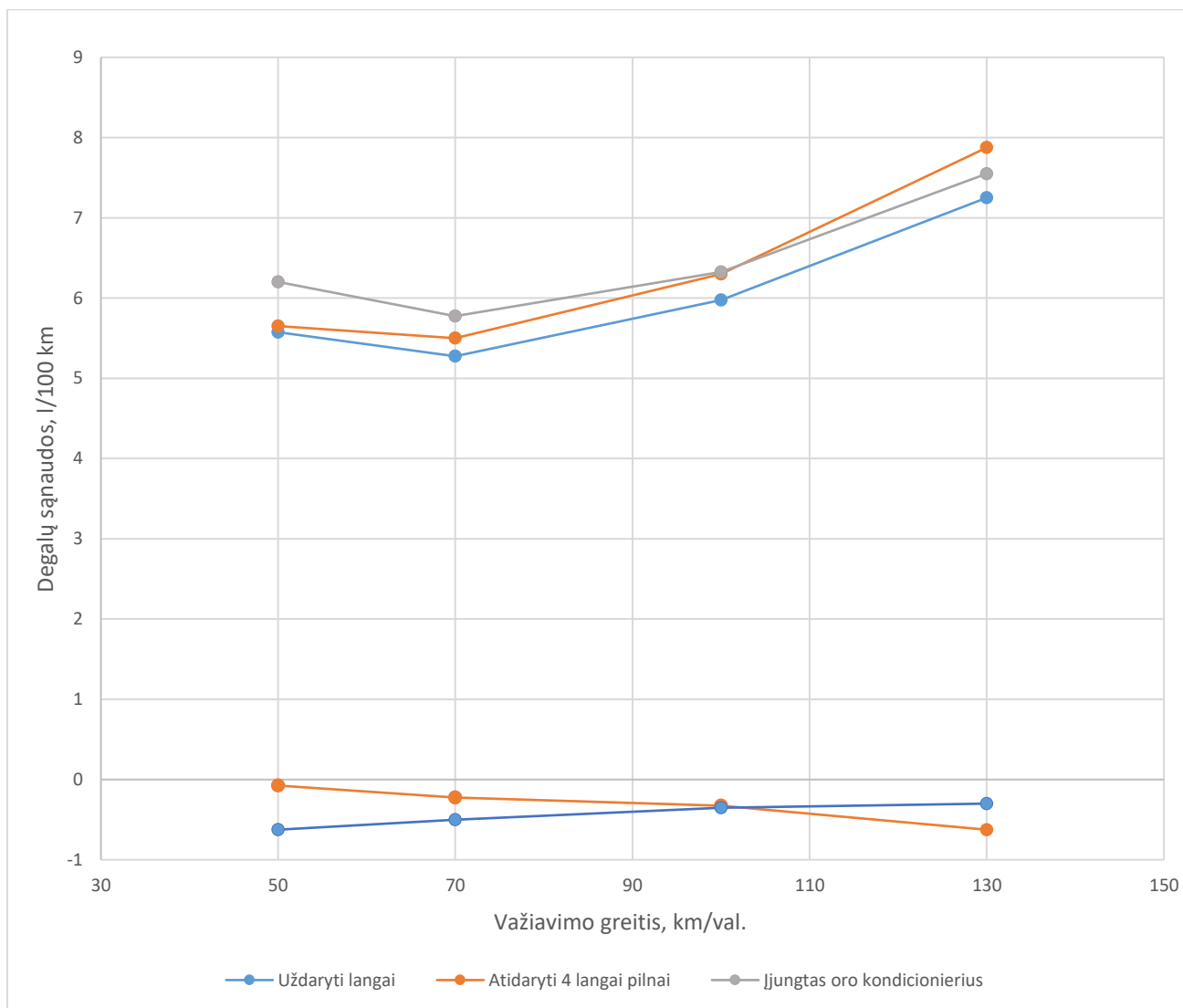
57 pav. Realaus tyrimo metu nustatytas procentinis degalų sąnaudų padidėjimas važiuojant atidarytais 4 langais ar įjungtu oro kondicionieriumi, lyginant su važiavimu uždarytais langais

Kaip matyti 57 ir 58 paveiksluose, oro kondicionieriaus įtaka degalų sąnaudoms, didėjant važiavimo greičiui, mažėja, o atidarytų langų – didėja. Peržengus apie 100 km/val. greičio ribą, oro kondicionieriaus įjungimas jau yra efektyvesnis degalų sąnaudų atžvilgiu nei atidaryti 4 langai (58, 59 pav.).



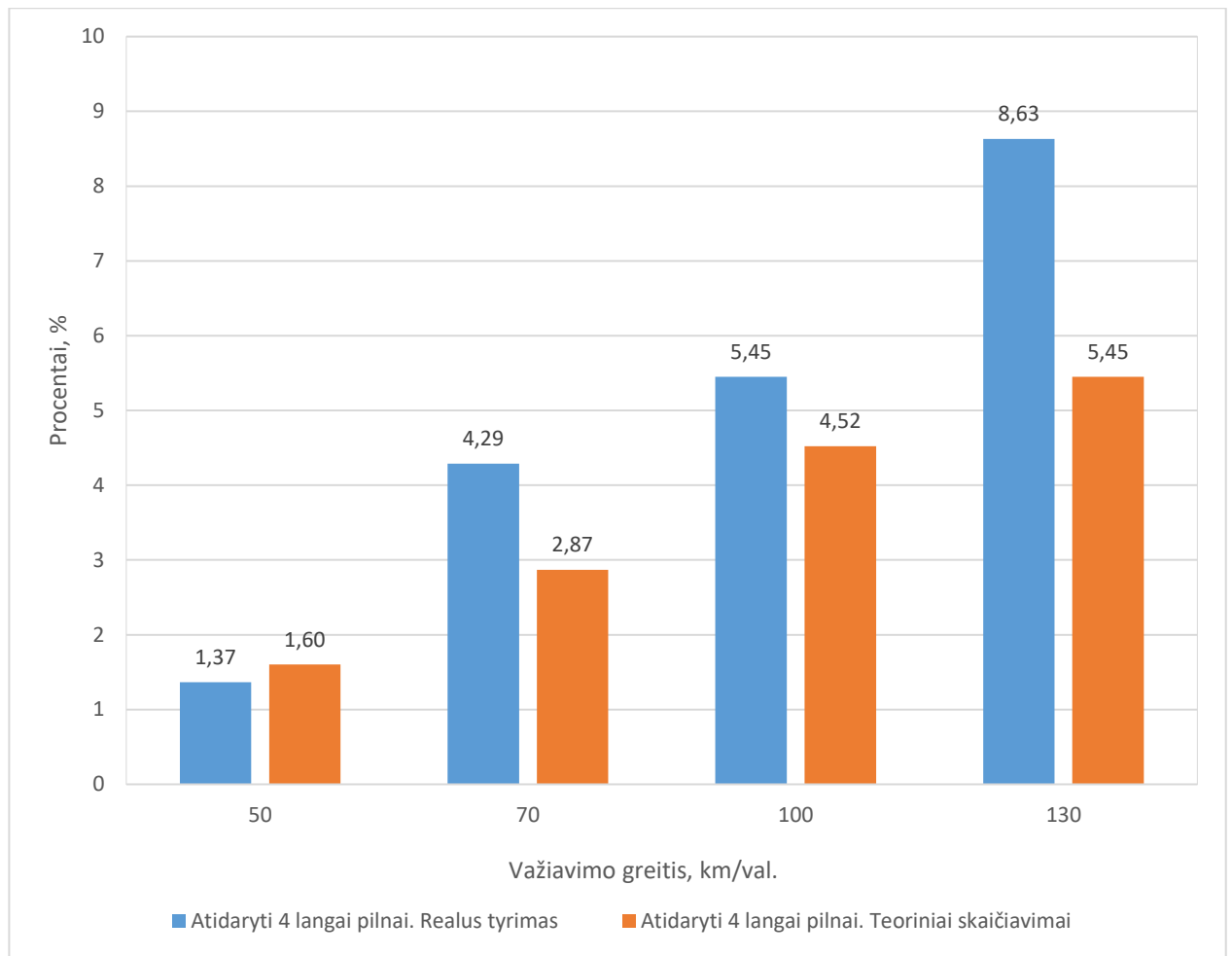
58 pav. Realaus tyrimo metu nustatytas procentinis degalų sąnaudų skirtumas važiuojant įjungus oro kondicionierių, lyginant su važiavimu atidarytais 4 langais

Remiantis 56–58 paveikslais galima teigti, kad oro kondicionieriaus įjungimas didžiausią įtaką degalų sąnaudoms turi važiuojant mažesniais greičiais, o atidaryti langai – važiuojant didesniais greičiais. Judant 50 km/val. greičiu degalų sąnaudos su įjungtu oro kondicionieriumi padidėja 11,4 %, kai atidarius 4 langus – 1,4 %, bei atitinkamai važiuojant 130 km/val. greičiu – 4,1 % ir 8,6 %. Daugelyje mokslinių straipsnių ar atliktų tyrimų [37, 38, 39] teigiama, kad ekonomiškiau yra važinėti atidarytais langais iki 100 km/val. greičio, o didesniuose greičiuose oro pasipriešinimo jėga dėl atidarytų langų smarkiai išauga, todėl oro kondicionieriaus įtaka yra mažesnė.



59 pav. Realaus tyrimo metu nustatytos degalų sąnaudos l/100 km ir degalų sąnaudų l/100 km praradimas važiuojant skirtingais metodais

59 paveiksle galima vaizdžiai matyti, kaip kinta degalų efektyvumas l/100 km skirtingose važiavimo modifikacijose. Oranžinė linija atspindi važiavimą atidarytais langais, o pilka – su įjungtu oro kondicionieriumi. Matyti, kad važiuojant 50 km/val. greičiu atidarytų langų poveikis degalų sąnaudoms labai nedidelis, o įjungto oro kondicionieriaus – ženklus. Pasiėkus 70 km/val. greitį pastebima, kad atidarytų langų poveikis didėja, o oro kondicionieriaus – mažėja. Ties 100 km/val. greičio kreivės susikerta: degalų sąnaudų padidėjimas abiem atvejais yra vienodas. Toliau didėjant greičiui važiavimas atidarytais langais lemia didesnę degalų sąnaudų padidėjimą, lyginant su įjungtu oro kondicionieriumi.



60 pav. Realaus tyrimo metu nustatytas ir teoriškai apskaičiuotas procentinis degalų sąnaudų padidėjimas, lyginant su važiavimu uždarytais langais

60 paveiksle pateiktas teorinių modeliavimų rezultatų pagrindu apskaičiuotų ir realaus tyrimo metu nustatytų degalų sąnaudų procentinis padidėjimas. Galima teigti, kad rezultatai panašūs. Degalų sąnaudų padidėjimo tendencija abiem atvejais išlieka vienoda: didėjant važiavimo greičiui degalų sąnaudų procentinis pokytis didėja. Važiuojant 50 km/val. greičiu realaus tyrimo metu nustatytas padidėjimas – 1,37 %, teoriškai apskaičiuotas – 1,6 %, atitinkamai važiuojant 70 km/val. greičiu – 4,29 % ir 2,87 %, 100 km/val. – 5,45 % ir 4,52 %, 130 km/val. – 8,63 ir 5,45 %. Teoriškai apskaičiuoti degalų sąnaudų pokyčiai šiek tiek mažesni, tai gali įtakoti modeliavimo metu naudojamo modelio geometriniai netikslumai, nepakankamai tiksliai atkartotos realaus tyrimo sąlygos bei sudėtingas teorinis degalų sąnaudų įvertinimas. Taip pat teoriniuose skaičiavimuose teigiama, kad transporto priemonė juda idealiai lygiu keliu tiesiai ir visiškai nėra vėjo, o realaus tyrimo metu neįmanoma užtikrinti tokių sąlygų, kadangi pučia vėjas, retkarčiais atsiranda nedidelių jo gūsių, sunku išlaikyti idealiai lygią važiavimo trajektoriją, tyrimo ruože yra įkalnė bei nuokalnė, o tai įtakoja degalų sąnaudų procentinį pokytį.

Tyrimo apibendrinimas ir rezultatų palyginimas

Teorinių modeliavimų metu nustatyta, kad atidaryti langai didina oro pasipriešinimo jėgą, o didėjant važiavimo greičiui, jėgos pokytis didėja. Ištirta, kad didžiausią įtaką oro pasipriešinimui turi asimetriškas langų atidarymas. Darbe nustatytas degalų sąnaudų pokytis, kurį įtakoja važiavimas skirtingais būdais atidarytais langais ar stoglangiu. Nustatytas galios kiekis, kurio reikia įveikti pasipriešinimo jėgą važiuojant automobiliu, bei kaip jis kinta, jei yra atidaromi langai.

Realaus tyrimo metu išsiaiškinta, kad oro kondicionieriaus įjungimas didžiausią įtaką degalų sąnaudoms (padidėjimas) turi mažesniuose greičiuose (iki 70 km/val.), vėliau pokytis mažėja, ir atvirkščiai, atidarius langus mažesniuose greičiuose įtaka yra nedidelė, o ženkliai pasireiškia tik dideliuose greičiuose (100 km/val. ir daugiau).

Realaus tyrimo rezultatai parodė, kad važiuojant pilnai atidarius 4 langus degalų sąnaudos padidėja daugiau, nei apskaičiuota teoriškai. Tokius rezultatus gali įtakoti realaus tyrimo metu pasirinkta nedidelio ilgio kelio atkarpa, jos reljefo ypatumai, pučiantis vėjas ar teorinių skaičiavimų bei modeliavimų metu nepakankamai tiksliai atkartotos realaus tyrimo sąlygos.

Atliekant tokio tipo tyrimą taip pat būtų galima analizuoti dėl atidarytų langų ar įjungto oro kondicionieriaus didėjančias degalų sąnaudas bei dėl to į atmosferą išmetamų kenksmingų dalelių padidėjusį kiekį [40]. Taip pat galima ištirti, kaip keičiasi aerodinaminio pasipriešinimo jėga, kai modeliuojamoje aplinkoje keičiama vėjo kryptis [41]. Atliekant tokio tipo tyrimus vertėtų įsigilinti, kokią įtaką langų atidarymas turi oro pasipriešinimo jėgai, kai transporto priemonė važiuoja kitų eisme dalyvaujančių transporto priemonių kolonoje.

Atlikto tyrimo metu nustatytus rezultatus galima pritaikyti praktikoje. Šiuo metu ypač kylant degalų kainoms, pasaulio visuomenės ieško būdų, kaip sumažinti degalų sąnaudas. Remiantis šio tyrimo metu gautais rezultatais, nedideliu greičiu (iki 100 km/val.) važinėjant automobiliu su atidarytais langais, o ne su įjungtu oro kondicionieriumi galima sumažinti degalų suvartojimą 5–10 %.

[27] šaltinyje analizuojamas oro pasipriešinimo koeficiento pokytis automobilio langus atidarant skirtingais lygiais. Tyrėjai nustatė, kad atidarius langus pilnai oro pasipriešinimo koeficientas padidėja 7 %. Šiame darbe *Ansys Fluent* programa nustatyta, kad pilnai atidarius langus oro pasipriešinimo koeficientas padidėja 7,2 % – rezultatai beveik identiški.

Automobilių inžinierių asociacijos SAE atlikto realaus tyrimo [29] rezultatai parodė, kad važiuojant lengvuju automobiliu įjungtas oro kondicionierius padidina degalų sąnaudas ženkliu nei važiavimas atidarytais langais. Šiame darbe realaus tyrimo metu nustatyta, kad, važiuojant iki 100 km/val. greičiu, oro kondicionierius padidina degalų sąnaudas daugiau, nei važiavimas pilnai atidarius 4 langus, o oro kondicionieriaus įjungimas efektyvesnis degalų sąnaudų atžvilgiu yra viršijęs apytiksliai 100 km/val. greitį. Galima teigti, kad tyrimo rezultatai dalinai sutampa.

Lyginant automobilių inžinierių bendrijos atlikto tyrimo [30] rezultatus su gautais šio tyrimo metu matyti, kad rezultatai labai panašūs. SAE tyrėjai nustatė, kad važiuojant sedano kėbulo automobiliu 70 km/val. greičiu atidarytais langais, degalų sąnaudos padidėja 6,3 %, 100 km/val. – 7,4 %, o 130 km/val. – 8,8 %. Šiame tyrime nustatytas padidėjimas prie 70 km/val. greičio – 4,29 %, 100 km/val. – 5,45 %, o 130 km/val. – 8,63 %.

Išvados

1. Nustatyta, kad transporto priemonės važiavimo metu skirtingu būdu atidaryti langai didina automobilio aerodinaminį pasipriešinimo koeficientą: uždaro modelio koeficientas yra 0,310, kai priekiniai langai atidaryti iki pusės – 0,316, priekiniai langai atidaryti pilnai – 0,320, atidarytas stoglangis – 0,323, atidaryti priekiniai langai pilnai ir atidarytas stoglangis – 0,330, atidaryti visi keturi langai pilnai – 0,332, atidarytas priekinis kairys langas ir galinis dešinys langas – 0,336.
2. Nustatyta, kad automobiliui važiuojant atidarytais langais aerodinaminė pasipriešinimo jėga didėja: uždaro kėbulo aerodinaminė pasipriešinimo jėga važiuojant 100 km/val. greičiu siekia 308 N, važiuojant visais keturiais atidarytais langais – 332 N, o važiuojant atidarius langus asimetriškai – 337 N.
3. Teoriškai nustatytas procentinis degalų sąnaudų padidėjimas skirtinguose modeliuose važiuojant 100 km/val. greičiu: kai langai atidaryti iki pusės – 1,43 %, kai priekiniai langai atidaryti pilnai – 2,20 %, kai atidarytas stoglangis – 2,70 %, kai atidaryti priekiniai langai pilnai ir atidarytas stoglangis – 4,13 %, kai atidaryti visi keturi langai pilnai – 4,52 %, kai atidarytas priekinis kairys langas ir galinis dešinys langas – 5,38 %.
4. Ištirta, kad įjungtas oro kondicionierius ženkliai didina degalų sąnaudas važiuojant lėčiau, o didinant greitį pokytis mažėja: 50 km/val. – 11,43 % padidėjimas, 70 km/val. – 9,62 %, 100 km/val. – 5,86 %, 130 km/val. – 4,13 %. Važiuojant atidarius 4 langus pilnai, priešingai įjungtam oro kondicionieriui, didėjant greičiui degalų sąnaudų pokytis didėja: 50 km/val. – 1,37 % padidėjimas, 70 km/val. – 4,29 %, 100 km/val. – 5,45 %, 130 km/val. – 8,63 %.
5. Realus važiavimo uždarytais langais, atidarytais langais ir įjungtu oro kondicionieriumi tyrimo metu nustatyta, kad degalų sąnaudų padidėjimas yra didesnis nei teoriškai apskaičiuotas. Teoriškai apskaičiuotas procentinis degalų sąnaudų padidėjimas atidarius 4 langus važiuojant 50 km/val. greičiu yra 1,6 %, 70 km/val. – 2,87 %, 100 km/val. – 4,52 %, o 130 km/val. – 5,45 %. Realus tyrimo metu nustatytas degalų sąnaudų padidėjimas judant 50 km/val. greičiu – 1,37 %, 70 km/val. – 4,29 %, 100 km/val. – 5,45 %, o 130 km/val. – 8,63 %. Tai gali lemti tyrimo metu vyravęs vėjas bei važiavimo atkarpoje esantis reljefas, įkalnės ir nuokalnės, kadangi teoriniuose skaičiavimuose teigiama, kad automobilis važiuoja idealiai lygia kelio danga ir vėjas nepučia.
6. Nustatyta, kad stengiantis sumažinti degalų sąnaudas važinėjant nedideliu greičiu (50–70 km/val.) patartina važiuoti atidarius langus, bet neįjungus oro kondicionieriaus. Tačiau užmiestyje, o ypač, kur greitis viršija 100 km/val., ekonomiškiau važiuoti įjungus oro kondicionierių ir uždarytais langais.

Literatūros sąrašas

1. Wood, Richard M. Impact of advanced aerodynamic technology on transportation energy consumption. SAE transactions, 2004, 854-874.
2. Wiley, John; Sons, Joseph Katz. Automotive aerodynamics San Diego State University. 2016.
3. Paknys, Leopoldas. Transporto priemonių aerodinamikos pagrindai. Kaunas: Technologija, 1999.
4. Caricos [interaktyvus]. [žiūrėta 2021-05-15]. Prieiga per: https://www.caricos.com/cars/m/mercedes-benz/2015_mercedes-benz_class_sb/images/24.html.
5. Sigma Rockets Learning Center [interaktyvus]. [žiūrėta 2021-05-15]. Prieiga per: <http://learn.sigmarockets.com/lessons/understanding-aerodynamics-with-the-educator-rocket/>.
6. Lasauskas, Eduardas. Skrydžio principai. Vilnius. Technika, 2008, 114-116.
7. NASA [interaktyvus]. [žiūrėta 2021-05-15]. Prieiga per: <https://www.grc.nasa.gov/www/k-12/airplane/boundlay.html>.
8. Vasamsetti, Subrahmanyam. Streamlining and Aerodynamic Performance Add-on Devices of Sports Cars.
9. Science Trends [interaktyvus]. [žiūrėta 2021-05-16]. Prieiga per: <https://sciencetrends.com/the-difference-between-laminar-and-turbulent-flow/>.
10. Revision science [interaktyvus]. [žiūrėta 2021-05-16]. Prieiga per: <https://revisionscience.com/a2-level-level-revision/physics-level-revision/force-motion/drag-terminal-velocity/streamlines-turbulence>.
11. Nuclear Power For Everybody [interaktyvus]. [žiūrėta 2021-05-17]. Prieiga per: <https://www.nuclear-power.net/nuclear-engineering/fluid-dynamics/reynolds-number/critical-reynolds-number/>.
12. Heisler, Heinz. Advanced vehicle technology. Elsevier, 2002
13. The Contact Patch [interaktyvus]. [žiūrėta 2021-05-17]. Prieiga per: <https://the-contact-patch.com/book/road/c1416-aerodynamic-forces>.
14. TECS [interaktyvus]. [žiūrėta 2021-05-19]. Prieiga per: <https://www.tec-science.com/mechanics/gases-and-liquids/drag-coefficient-friction-and-pressure-drag/>.
15. Hassan, Saud. Aerodynamics Investigation of Rear Vehicle (Backlight angle). 2014. PhD Thesis. Teesside University.
16. slideshare [interaktyvus]. [žiūrėta 2021-05-19]. Prieiga per: <https://www.slideshare.net/friendsrtg/vehicle-body-engineering-aerodynamics>.
17. Alam, Firoz & Chowdhury, Harun & Moria, Hazim & Watkins, Simon. (2010). Effects of Vehicle Add-Ons on Aerodynamic Performance. 186.
18. Hol, P.A. and Agrewale, M.R., "Aerodynamic Analysis of Passenger Car with Luggage Carrier (Roof Rack)," SAE Technical Paper 2019-26-0067, 2019.
19. Chowdhury, Harun, et al. Impact of vehicle add-ons on energy consumption and greenhouse gas emissions. Procedia engineering, 2012, 49: 294-302.
20. Patidar, A., Gupta, U., and Bansal, A., "Fuel Efficiency Improvement of Commercial Vehicle by Investigating Drag Resistance," SAE Technical Paper 2015-01-2893, 2015.

21. Hucho, W.-H., Hannemann, K., Martinez Schramm, J., & Williamson, C. (2007). Aerodynamics. Springer Handbook of Experimental Fluid Mechanics.
22. NASA [interaktyvus]. [žiūrēta 2021-05-22]. Prieiga per: <https://www.grc.nasa.gov/www/k-12/airplane/tunpart.html>.
23. SHI, Xueqing, et al. Assessing On-Road Emission Flow Pattern under Car-Following Induced Turbulence Using Computational Fluid Dynamics (CFD) Numerical Simulation. Sustainability, 2019.
24. Krishnani, Pramod Nari. CFD study of drag reduction of a generic sport utility vehicle. 2009. Master's Thesis. American Society of Mechanical Engineers.
25. SIMSCALE [interaktyvus]. [žiūrēta 2021-05-23]. Prieiga per: <https://www.simscale.com/docs/tutorials/aerodynamic-simulation-vehicle/>.
26. Ali, Jaffar Syed Mohamed, et al. Study on the effect of window opening on the drag characteristics of a car. International Journal of Vehicle Systems Modelling and Testing, 2014, 9.3-4: 311-320.
27. Buscariolo, Filipe Fabian, et al. Windows Opening Influence on the Drag Coefficient of a Hatchback Vehicle. SAE Technical Paper, 2015.
28. Nikam, K. C.; Borse, S. L. Study of Air Flow through a Open Windows Bus Using OpenFOAM.
29. Vox [interaktyvus]. [žiūrēta 2021-12-01]. Prieiga per: <https://www.vox.com/2014/5/24/5745364/why-rolling-down-your-cars-windows-is-more-fuel-efficient-than-using>.
30. Thomas, John F.; Huff, Shean P.; West, Brian H. Fuel economy and emissions effects of low tire pressure, open windows, roof top and hitch-mounted cargo, and trailer. Oak Ridge National Lab.(ORNL), Oak Ridge, TN (United States), 2014.
31. Yelmule, M. M.; Kale, S. R.; Veeravalli, S. V. Aerodynamics of a bus with open windows. International Journal of Heavy Vehicle Systems, 2009, 16.4: 459-488.
32. Sivaraj, G.; Parammasivam, K. M.; Suganya, G. Reduction of aerodynamic drag force for reducing fuel consumption in road vehicle using basebleed. Journal of Applied Fluid Mechanics, 2018, 11.6: 1489-1495.
33. Katsoulos, Christiana L. An experimental study on drag reduction of aftermarket additions on an SUV. 2017.
34. Chen, Ye-gang; Wang, Xiang-hong; Zhou, Yao-ming. Numerical investigation on aerodynamic noises of the lateral window in vehicles. Journal of Vibroengineering, 2017, 19.8: 6502-6518.
35. Ansys Inovation Courses [interaktyvus]. [žiūrēta 2022-03-01]. Prieiga per: <https://courses.ansys.com/index.php/courses/aerodynamics-of-an-fsae-car/lessons/geometry-preparation-in-ansys-spaceclaim-lesson-1-2/>.
36. The Engineering ToolBox [interaktyvus]. [žiūrēta 2021-12-01]. Prieiga per: https://www.engineeringtoolbox.com/rolling-friction-resistance-d_1303.html.
37. Leasing [interaktyvus]. [žiūrēta 2021-12-01]. Prieiga per: <https://leasing.com/car-leasing-news/which-is-better-for-fuel-economy-windows-open-or-ac-on/>.
38. Weilenmann, Martin F., et al. Influence of mobile air-conditioning on vehicle emissions and fuel consumption: A model approach for modern gasoline cars used in Europe. Environmental science & technology, 2005, 39.24: 9601-9610.

39. Lee, Jungwoo, et al. Effect of the air-conditioning system on the fuel economy in a gasoline engine vehicle. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering*, 2013, 227.1: 66-77.
40. Kim, Chul-Ho. A streamlined design of a high-speed coach for fuel savings and reduction of carbon dioxide. *International Journal of Automotive Engineering*, 2011, 2.4: 101-107.
41. Favre, Tristan. Numerical investigation of unsteady crosswind aerodynamics for ground vehicles. 2009. PhD Thesis. KTH.

Priedai

1 priedas. Kraštinių sąlygų priskyrimas modeliavimui *Ansys Fluent* programoje

Įėjimo greičio priskyrimas srautui:

The screenshot shows the 'Velocity Inlet' panel in Ansys Fluent. The 'Zone Name' is 'inlet'. The 'Momentum' tab is selected. The 'Velocity Specification Method' is 'Magnitude, Normal to Boundary'. The 'Reference Frame' is 'Absolute'. The 'Velocity Magnitude (m/s)' is set to 8.3. The 'Supersonic/Initial Gauge Pressure (pascal)' is set to 0. Under the 'Turbulence' section, the 'Specification Method' is 'Intensity and Viscosity Ratio', 'Turbulent Intensity (%)' is 0.5, and 'Turbulent Viscosity Ratio' is 2.

Manometrinio slėgio priskyrimas srautui išėjime:

The screenshot shows the 'Pressure Outlet' panel in Ansys Fluent. The 'Zone Name' is 'outlet'. The 'Momentum' tab is selected. The 'Backflow Reference Frame' is 'Absolute'. The 'Gauge Pressure (pascal)' is set to 0. The 'Pressure Profile Multiplier' is 1. The 'Backflow Direction Specification Method' is 'Normal to Boundary'. The 'Backflow Pressure Specification' is 'Total Pressure'. There are four unchecked checkboxes: 'Prevent Reverse Flow', 'Radial Equilibrium Pressure Distribution', 'Average Pressure Specification', and 'Target Mass Flow Rate'. Under the 'Turbulence' section, the 'Specification Method' is 'Intensity and Viscosity Ratio', 'Backflow Turbulent Intensity (%)' is 0.5, and 'Backflow Turbulent Viscosity Ratio' is 2.

Judančio kelio priskyrimas:

F Wall ×

Zone Name
ground

Adjacent Cell Zone
enclosure-enclosure1

Momentum Thermal Radiation Species DPM Multiphase UDS Wall Film Potential Structure

Wall Motion

Stationary Wall
 Moving Wall

Motion

Relative to Adjacent Cell Zone Speed (m/s) 8,3
 Absolute

Direction

X 1
Y 0
Z 0

Shear Condition

No Slip
 Specified Shear
 Specularity Coefficient
 Marangoni Stress

Wall Roughness

Roughness Models

Standard
 High Roughness (Icing)

Sand-Grain Roughness

Roughness Height (m) 0
Roughness Constant 0,5

Sukimosi judesio priskyrimas galiniam ratui:

F Wall ×

Zone Name
rear-wheel

Adjacent Cell Zone
enclosure-enclosure1

Momentum Thermal Radiation Species DPM Multiphase UDS Wall Film Potential Structure

Wall Motion

Stationary Wall
 Moving Wall

Motion

Relative to Adjacent Cell Zone Speed (rad/s) 25,857
 Absolute

Rotation-Axis Origin

X (m) 3,5165081
Y (m) 0,3231309
Z (m) 0,7485341

Rotation-Axis Direction

X 0
Y 0
Z 1

Shear Condition

No Slip
 Specified Shear
 Specularity Coefficient
 Marangoni Stress

Wall Roughness

Roughness Models

Standard
 High Roughness (Icing)

Sand-Grain Roughness

Roughness Height (m) 0
Roughness Constant 0,5

Sukimosi judesio priskyrimas priekiniam ratui:

f Wall ×

Zone Name
front-wheel

Adjacent Cell Zone
enclosure-enclosure1

Momentum Thermal Radiation Species DPM Multiphase UDS Wall Film Potential Structure

Wall Motion

Stationary Wall
 Moving Wall

Motion

Relative to Adjacent Cell Zone
 Absolute

Speed (rad/s) 25.857

Rotation-Axis Origin

Translational
 Rotational
 Components

X (m) 0.7485081
Y (m) 0.3231309
Z (m) 0.7485341

Rotation-Axis Direction

X₀
Y₀
Z₁

Shear Condition

No Slip
 Specified Shear
 Specularity Coefficient
 Marangoni Stress

Wall Roughness

Roughness Models

Standard
 High Roughness (Icing)

Sand-Grain Roughness

Roughness Height (m) 0
Roughness Constant 0,5

Praslystančių sienų sąlygos priskyrimas aplinkinėms vėjo tunelio sienoms:

f Wall ×

Zone Name
tunnel-walls

Adjacent Cell Zone
enclosure-enclosure1

Momentum Thermal Radiation Species DPM Multiphase UDS Wall Film Potential Structure

Wall Motion

Stationary Wall
 Moving Wall

Motion

Relative to Adjacent Cell Zone

Shear Condition

No Slip
 Specified Shear
 Specularity Coefficient
 Marangoni Stress

Shear Stress

X-Component (pascal) 0
Y-Component (pascal) 0
Z-Component (pascal) 0

Wall Roughness

Roughness Models

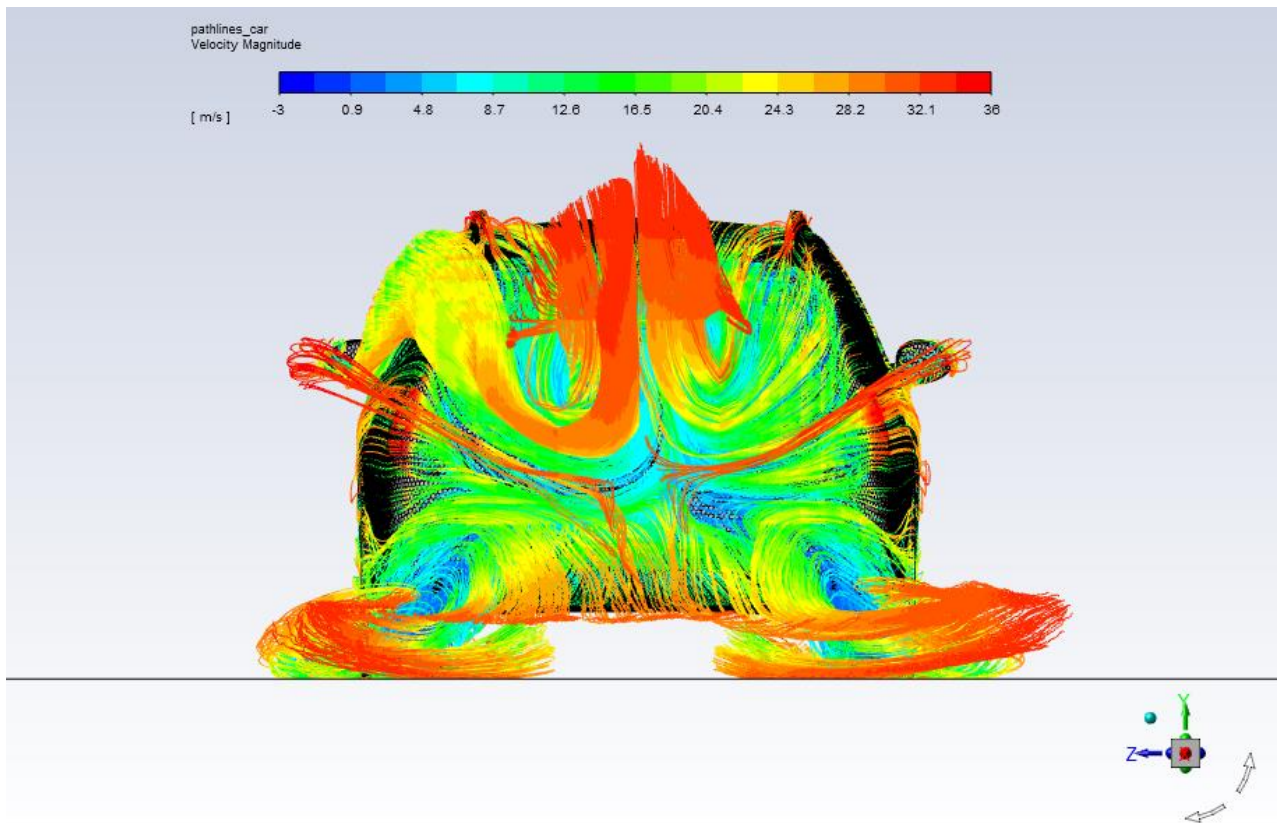
Standard
 High Roughness (Icing)

Sand-Grain Roughness

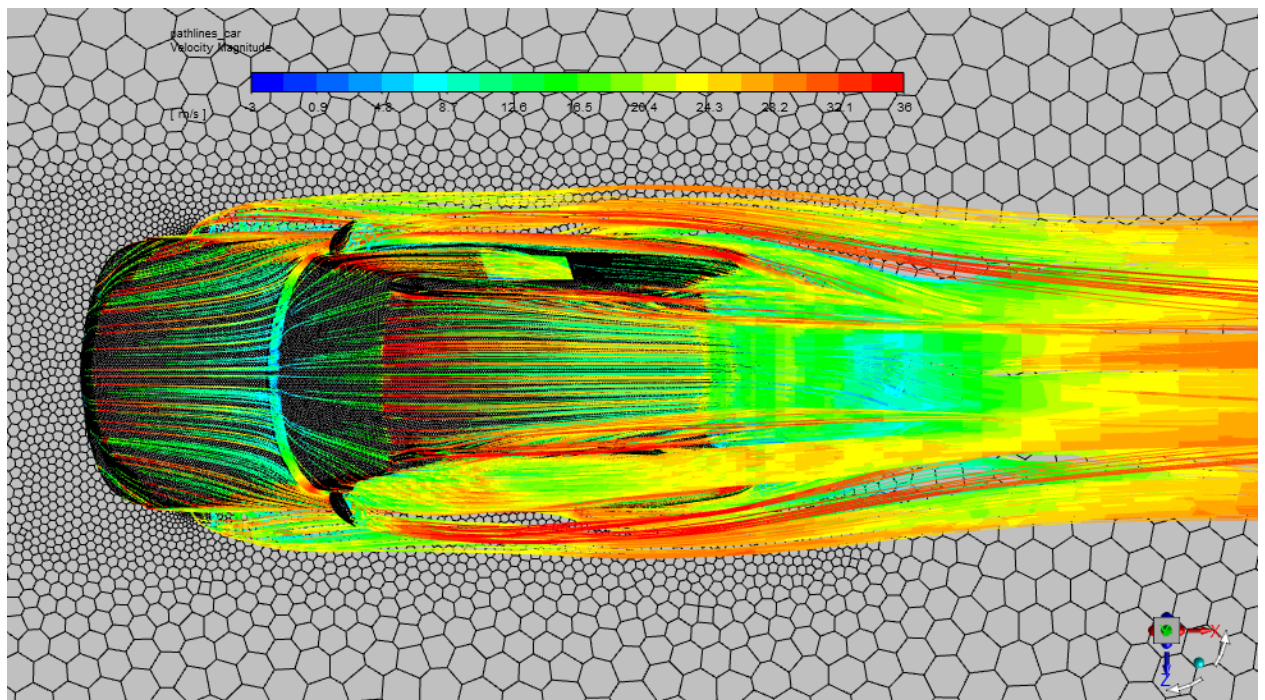
Roughness Height (m) 0
Roughness Constant 0,5

2 priedas. Srauto tėkmės linijos apie modelį su asimetriškai atidarytais langais

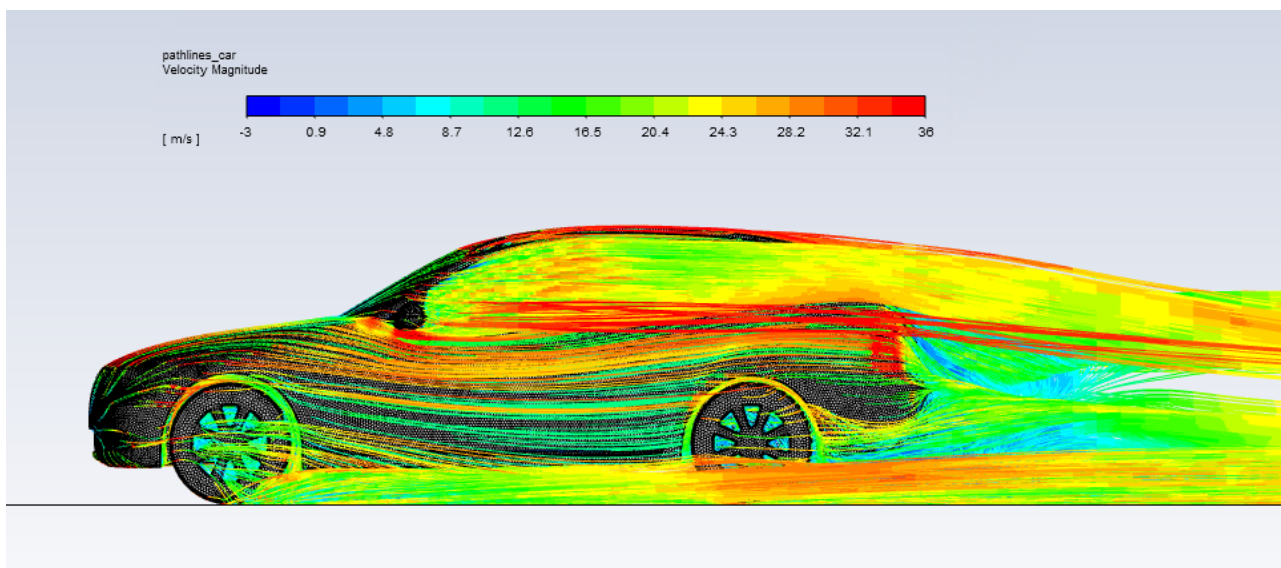
Srauto tėkmės linijos žiūrint iš automobilio galo:



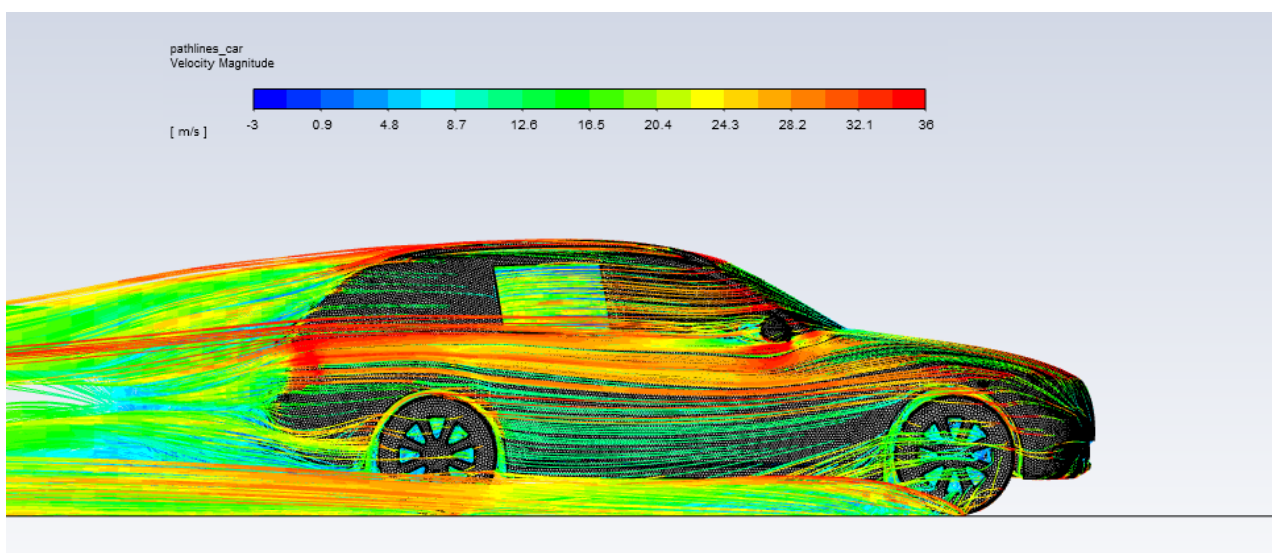
Srauto tėkmės linijos žiūrint iš automobilio viršaus:



Srauto tēkmēs linijas žiūrint iš automobilio kairės pusės:

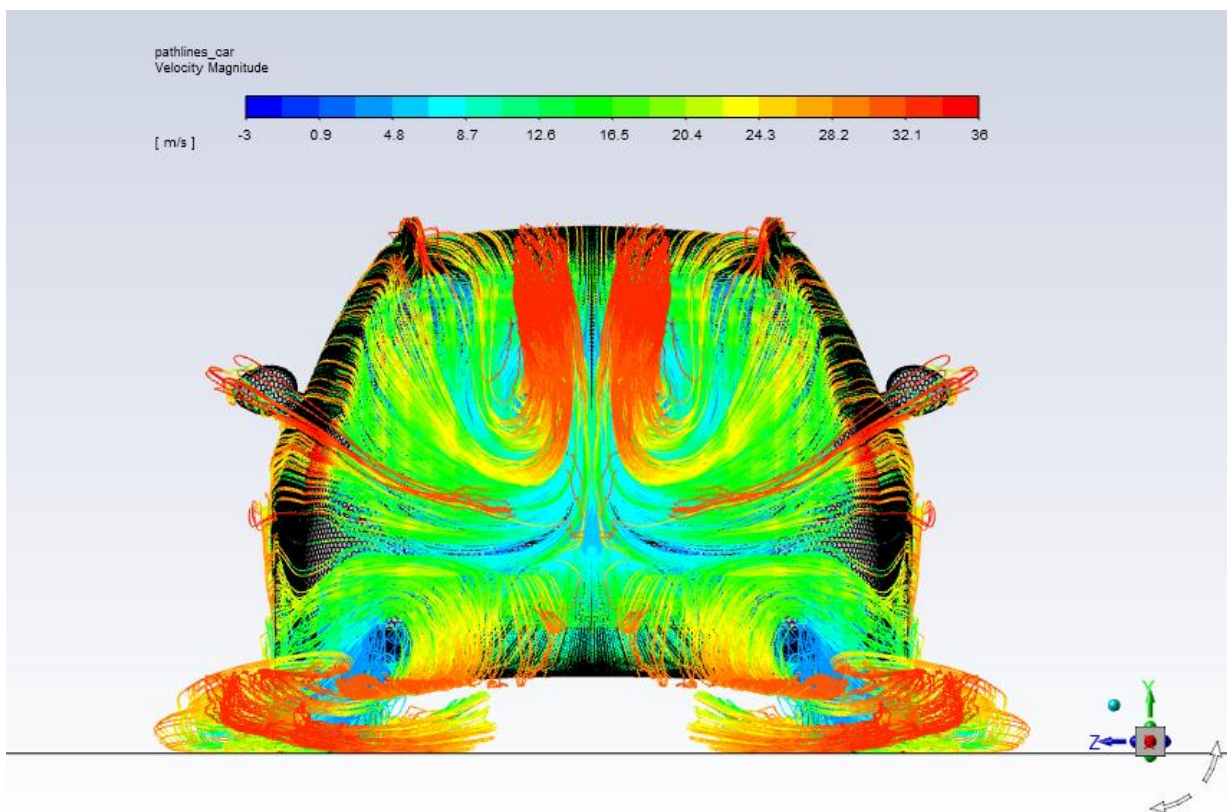


Srauto tēkmēs linijas žiūrint iš automobilio dešinės pusės:

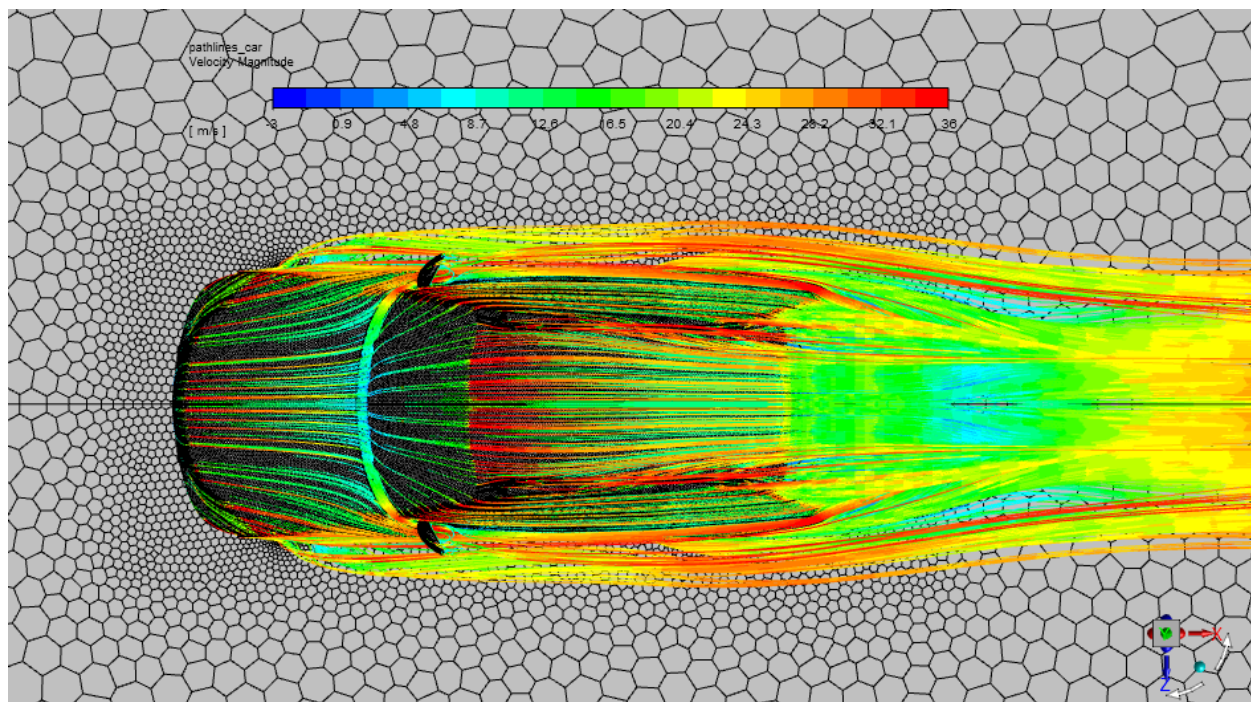


3 priedas. Srauto tėkmės linijos apie modelį su uždarytais langais

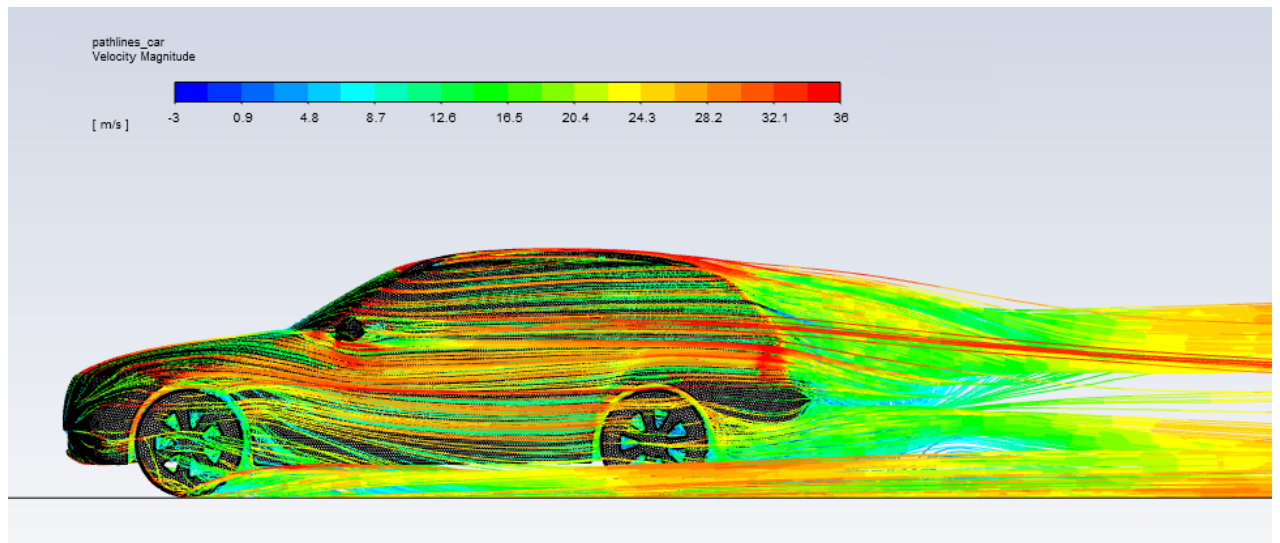
Srauto tėkmės linijos žiūrint iš automobilio galo:



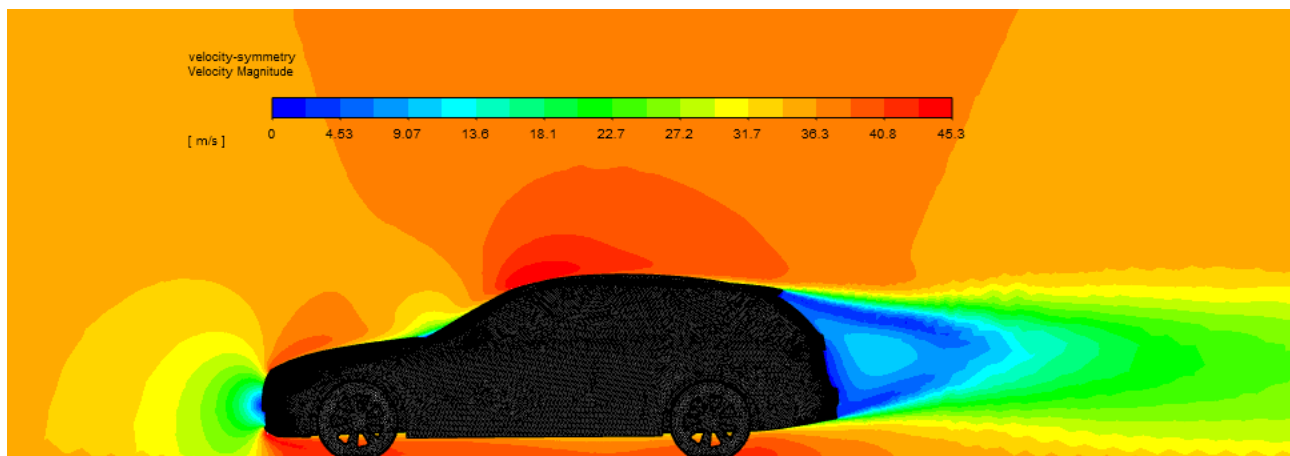
Srauto tėkmės linijos žiūrint iš automobilio viršaus:



Srauto tėkmės linijos žiūrint iš automobilio šoninės projekcijos:

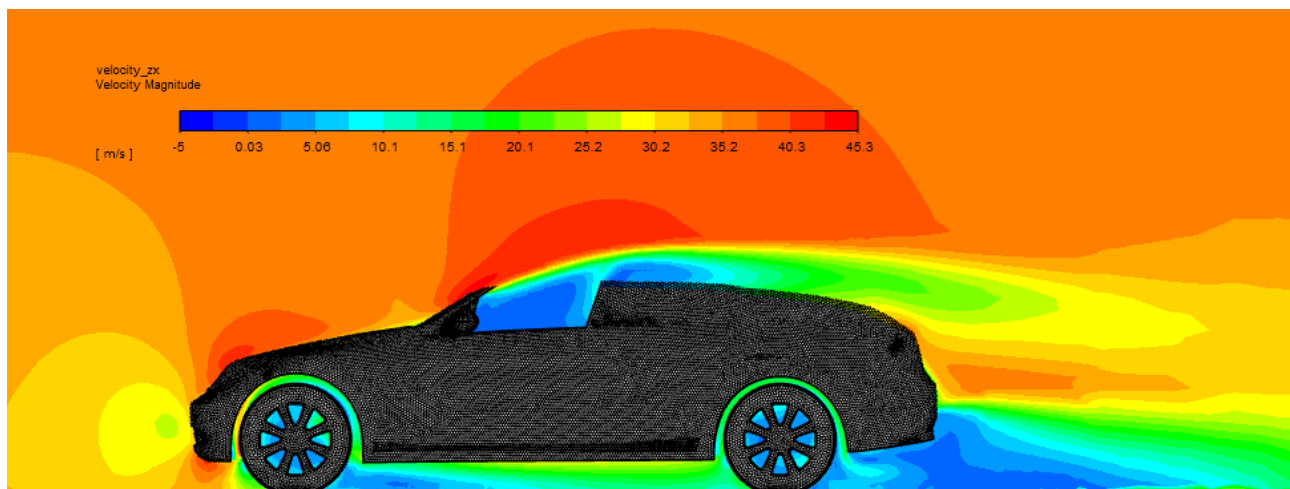


4 priedas. Srauto tėkmės greičio atvaizdavimas simetrinėje plokštumoje, modelis su uždarytais langais



5 priedas. Srauto tėkmės greičio atvaizdavimas plokštumoje ties atidarytais langais, modelis su asimetriškai atidarytais langais

Srauto tėkmės greičio atvaizdavimas plokštumoje ties atidarytais langais iš automobilio kairės pusės:



Srauto tėkmės greičio atvaizdavimas plokštumoje ties atidarytais langais iš automobilio dešinės pusės:

