



Kauno technologijos universitetas

Panevėžio technologijų ir verslo fakultetas

Sportinio automobilio aerodinaminių savybių tyrimas

Baigiamasis magistro studijų projektas

Mantas Mileris

Projekto autorius

Doc. dr. Dainius Vaičiulis

Vadovas

Panevėžys, 2021



Kauno technologijos universitetas

Panevėžio technologijų ir verslo fakultetas

Sportinio automobilio aerodinaminių savybių tyrimas

Baigiamasis magistro studijų projektas

Transporto priemonių inžinerija (6211EX021)

Mantas Mileris

Projekto autorius

Doc. dr. Dainius Vaičiulis

Vadovas

Recenzentas

Panevėžys, 2021



Kauno technologijos universitetas

Panevėžio technologijų ir verslo fakultetas

Mantas Mileris

Sportinio automobilio aerodinaminių savybių tyrimas

Akademinio sąžiningumo deklaracija

Patvirtinu, kad:

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

Mantas Mileris

Patvirtinta elektroniniu būdu



Kauno technologijos universitetas
Panevėžio technologijų ir verslo fakultetas

TVIRTINU
TVKC vadovė
Doc. dr. Nida Kvedaraitė

Baigiamojo magistro projekto užduotis

Diplomantui *Mantui Mileriui*

Baigiamojo projekto tema lietuvių kalba

SPORTINIO AUTOMOBILIO AERODINAMINIŲ SAVYBIŲ TYRIMAS

Baigiamojo projekto tema anglų kalba

INVESTIGATION OF SPORTS CAR AERODYNAMIC CHARACTERISTICS

Patvirtinta 2021 m. balandžio 2 d. dekanų potvarkiu Nr. V25-13-13.

Parengto baigiamojo projekto įkėlimo į Lietuvos akademinės elektroninės bibliotekos informacinės sistemos (eLABa) talpyklą ir Moodle aplinką terminas iki 2021 m. gegužės 31 d.

Duomenys, reikalavimai ir sąlygos baigiamajam projektui

Tyrimą atlikti bent prie penkių skirtingų važiavimo greičių, įvertinant automobilio galinio spoilerio geometrijos įtaką ir aplinkos sąlygas. Skaičiavimams naudoti CFD (skaičiuojamąją skysčių/dujų tekėjimo dinamiką).

Baigiamasis magistro projektas turi atitikti KTU Panevėžio technologijų ir verslo fakulteto baigiamųjų projektų formaliuosius reikalavimus.

Baigiamojo projekto užduotys / uždaviniai, kurie turi būti atskleisti projekte

- 1. Išnagrinėti mokslinius darbus/tyrimus susijusius sportinių automobilių aerodinamika.*
- 2. Nustatyti važiavimo greičio, galinio spoilerio geometrijos ir aplinkos sąlygų įtaką sportinio automobilio aerodinamiams pasipriešinimo ir kėlimo/prispaudimo rodikliams.*

Vadovas: Lekt. dr. Dainius Vaičiulis
(vadovo pareigos, vardas, pavardė, parašas)

Užduotį gavau: Mantas Mileris
(studento vardas, pavardė, parašas)

2021 m. balandžio 19 d.

Mileris, Mantas. Sportinio automobilio aerodinaminių savybių tyrimas. Magistro studijų baigiamasis projektas / vadovas doc. dr. Dainius Vaičiulis; Kauno technologijos universitetas, Panevėžio technologijų ir verslo fakultetas.

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

Reikšminiai žodžiai: aerodinamika, sportinio automobilio aerodinamika, aerodinamikos tyrimas.

Panevėžys, 2021. 60 p.

Santrauka

Motorinėmis transporto priemonėmis buvo pradėta varžytis dar XIX a. pabaigoje. Atsirandant vis daugiau skirtingų varžybų rūšių, automobilių inžinieriai ėmė kurti ir nuolatos tobulinti specialius automobilius, kurie skirti konkrečiai varžybų trasoms. Tokiuose automobiliuose diegiami įvairūs inžineriniai sprendimai, kurie gerina vienokius ar kitokius techninius parametrus. Priklausomai nuo varžybų pobūdžio, automobiliai ruošiami skirtingai. Tačiau yra vienas rodiklis, kurį gerina kiekvieno sportinio automobilio kūrėjas. Tai – aerodinamika.

Aerodinamika yra mokslas, tiriantis oro molekulių sąveiką su kietųjų kūnų paviršiais. Sportinių automobilių tyrimuose, nagrinėjant jų aerodinamines savybes, yra tiriami keli pagrindiniai dydžiai: aerodinaminė pasipriešinimo jėga, aerodinaminė prispaudimo jėga ir pasinaudojant šiomis jėgomis apskaičiuojami jų koeficientai. Visi šie dydžiai priklauso nuo daugelio faktorių, tokių kaip automobilio kėbulo forma, papildomų aerodinaminių komponentų kiekis ir išdėstymas bei aplinkos sąlygos.

Šiame tyrime nagrinėjamas vienas iš sportiniuose automobiliuose naudojamų aerodinaminių komponentų – galinis aptakas. Šio komponento paskirtis yra sukurti prispaudimo jėgą, kuri spausdų galinius ratus prie kelio paviršiaus taip pagerinant automobilio sukibimą ir valdomumo savybes. Nagrinėjant galinio aptako įtaką bendrai automobilio aerodinamikai, koreguotas vieno iš jo elementų posvyrio (arba atakos) kampas bei geometrija (profilio forma). Taip pat ištirta įvairių aplinkos parametrų, tokių kaip aukštis virš jūros lygio, oro drėgmė bei oro temperatūra, įtaka bendrajai automobilio aerodinamikai.

Tyrimai atlikti programinio paketo *Solidworks 2020* priedu *Flow Simulation*. Paketo terpėje sudarytas virtualus vėjo tunelis, kuriame atlikti tyrimai prie 10 skirtingų oro tėkmės greičių nuo 5 m/s iki 50 m/s. Atlikus tyrimus nustatyta, kad su pradiniu galinio aptako variantu geriausias aerodinamines savybes automobilis turės prie 31° atakos kampo. Sukūrus ir ištyrus 2 papildomus aptako variantus nustatyta, kad pradinis variantas turėjo geriausias aerodinamines savybes t.y. apie 2 % mažesnę pasipriešinimo koeficientą ir apie 8 % didesnę prispaudimo koeficientą lyginant visus 3 variantus tarpusavyje. Tiriant aplinkos sąlygas nustatyta, kad didinant oro temperatūrą nuo -20 °C iki +20 °C aerodinaminiai koeficientai išauga apie 16 %, didinant aukštį virš jūros lygio nuo 0 m iki 2250 m koeficientai sumažėja apie 24 %, o didinant santykinę oro drėgmę – nuo 0 % iki 100 %, koeficientai sumažėja apie 1 %.

Mileris, Mantas. Investigation of Sports Car Aerodynamic Characteristics. Master's Final Degree Project / supervisor doc. dr. Dainius Vaičiulis; Panevėžys Faculty of Technologies and Business, Kaunas University of Technology.

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

Keywords: aerodynamics, aerodynamics of a sports vehicle, reasearch of aerodynamics.

Panevėžys, 2021. 60 p.

Summary

The first races in which motorised vehicles were utilised started in the late 19th Century. Since more and more different kinds of races came to popularity, vehicle engineers started developing special vehicles which were designed specifically for racing. Such vehicles had all sorts of different technologies dedicated for improving lots of different technical characteristics. All of the vehicles were based on a specific race type and designed to perform best in those exact conditions. But one of the characteristics was especially studied and constantly improved on every single one of the vehicles. That characteristic is – aerodynamics.

Aerodynamics is a study based on interaction between air molecules and the surface of solid bodies. While researching the sports cars, few of the main characteristics that are studied are: aerodynamic drag, aerodynamic downforce and their corresponding coefficients which are calculated based on those forces. All of those characteristics depend on many factors such as vehicle body shape, different kinds of additional aerodynamic components and their configurations as well as the impact of the environment.

In this study, one of the aerodynamic components used in almost all sports vehicles – rear spoiler, was studied. The purpose of the rear spoiler is to generate downforce which puts pressure on the rear wheels to help with traction and handling. While studying the impact of a rear spoiler on the aerodynamics of a vehicle, the angle of attack as well as the geometry of one of the main elements was changed. Also, the impact of different environmental characteristics, such as temperature, altitude and humidity, was studied.

All of the studies were performed using the *Flow Simulation* add-in on *Solidworks 2020* software. Using the software, a virtual wind tunnel was constructed, that was used for all of the studies which were performed with the speeds ranging from 5 m/s to 50 m/s. After the studies it was concluded that the starting rear spoiler had best results with the angle of attack at 31 degrees. After developing and studying 2 additional rear spoilers it was concluded that the starting spoiler had the best results: around 2 % lower drag and around 8 % higher downforce while comparing all of the rear spoilers together. While studying the environmental impact it was concluded that rising the temperature from -20 °C to +20 °C, the drag and downforce coefficients increase by around 16 %, rising the altitude from 0 m to 2250 m the coefficients decrease by around 24 % and rising the humidity from 0 % to 100 %, the coefficients decrease by around 1 %.

Turinys

Lentelių sąrašas	8
Paveikslų sąrašas	9
Įvadas.....	11
1. Teorinė dalis – mokslinės literatūros analizė	12
1.1. Aerodinamikos tyrimo metodai	13
1.1.1. Vėjo tuneliai	13
1.1.2. Kompiuterinė skysčių dinamikos analizė	14
1.2. Galinio aptako tyrimai	14
1.3. Galinio difuzoriaus tyrimai.....	15
1.4. Konceptinių bei realių automobilių tyrimai	16
1.4.1. SAE studentų formulės tyrimas.....	17
1.4.2. Vienas iš tyrimų su ARTeC PEC 2011 EmoC automobiliu.....	19
1.4.3. Filadelfijos universiteto studentų formulės projektas.....	20
1.4.4. Nascar Generation 6 automobilio tyrimas	21
1.4.5. Konceptinio sportinio automobilio tyrimas.....	22
1.5. Apibendrinimas	22
2. Tiriamoji dalis.....	24
2.1. Tyrimo metodika	24
2.2. 3D modelis.....	25
2.3. Tyrimas.....	26
2.3.1. Galinio aptako posvyrio (atakos) kampo įtaka bolido aerodinamikai.....	26
2.3.2. Galinio aptako profilio formos įtaka bolido aerodinamikai	31
2.3.3. Kelio įtaka bolido aerodinamikai	36
2.3.4. Aplinkos temperatūros įtaka bolido aerodinamikai.....	38
2.3.5. Aukščio virš jūros lygio įtaka bolido aerodinamikai.....	40
2.3.6. Oro drėgmės įtaka automobilio aerodinamikai	42
Išvados	45
Literatūros sąrašas	46
Priedai.....	48
1 priedas. Galinio aptako elemento atakos kampo įtakos bolido aerodinamikai tyrimo rezultatai	48
2 priedas. Galinio aptako profilio formos įtakos bolido aerodinamikai tyrimo rezultatai	51
3 Priedas. Kelio įtakos bolido aerodinamikai tyrimo rezultatai	54
4 Priedas. Oro temperatūros įtakos bolido aerodinamikai tyrimo rezultatai	55
5 Priedas. Aukščio virš jūros lygio įtakos bolido aerodinamikai tyrimo rezultatai.....	56
6 Priedas. Oro drėgnumo įtakos bolido aerodinamikai tyrimo rezultatai.....	57

Lentelių sąrašas

1 lentelė. Oro slėgio priklausomybė nuo oro temperatūros [19].....	38
2 lentelė. Atmosferos lėgio priklausomybė nuo aukščio virš jūros lygio [26].....	40
3 lentelė. Pasipriešinimo ir prispaudimo koeficientų priklausomybė nuo aptako atakos kampo	48
4 lentelė. Pasipriešinimo ir prispaudimo koeficientų priklausomybė nuo patikslinto atakos kampo	49
5 lentelė. Pirmosios galinio aptako profilio modifikacijos tyrimo rezultatai	51
6 lentelė. Antrosios galinio aptako profilio modifikacijos tyrimo rezultatai	53
7 lentelė. Tyrimo rezultatai vertinant kelio įtaką	54
8 lentelė. Pasipriešinimo ir prispaudimo koeficientų priklausomybė nuo oro temperatūros.....	55
9 lentelė. Pasipriešinimo ir prispaudimo koeficientų priklausomybė nuo aukščio virš jūros lygio..	56
10 lentelė. Pasipriešinimo ir prispaudimo koeficientų priklausomybė nuo važiavimo greičio, kai santykinė oro drėgmė yra 0 %	57
11 lentelė. Pasipriešinimo ir prispaudimo koeficientų priklausomybė nuo važiavimo greičio, kai santykinė oro drėgmė yra 50 %	58
12 lentelė. Pasipriešinimo ir prispaudimo koeficientų priklausomybė nuo važiavimo greičio, kai santykinė oro drėgmė yra 100 %	59

Paveikslų sąrašas

1 pav. Vienos pirmųjų automobilių lenktynių – „The Vanderbilt Cup Race“, 1906 m. [1]	12
2 pav. Pasipriešinimo (dešinėje) ir kėlimo (kairėje) koeficientų priklausomybė nuo testavimo kameros paviršiaus judesio vėjo tunelyje [7]	13
3 pav. DRS aptako kompiuterinės analizės, XFOIL duomenų bazės bei Ohajo valstijos universiteto (OST) duomenų palyginimas. Vaizduojama kėlimo bei pasipriešinimo koeficientų priklausomybė nuo atakos kampo (A) bei paklaidos (B) [9]	15
4 pav. Dviejų identiškų automobilių greičių palyginimas su suporjektuotu DRS bei be jo. Vientisa linija vaizduoja automobilį su DRS, brūkšninė – be DRS. [9].....	15
5 pav. Turbulentinės kinetinės energijos priklausomybė nuo difuzoriaus šoninio kampo (kairėje, vaizdas iš modelio galo) ir skersinio kampo iliustravimas (dešinėje, vaizdas iš difuzoriaus viršaus) [11]	16
6 pav. Slėgio pasiskirstymo (A) bei turbulentinės kinetinės energijos (B) palyginimai su difuzoriumi ir be jo [11]	16
7 pav. Vėjo greičio ir aerodinaminio pasipriešinimo kitimas laike [12]	17
8 pav. A tipo (be priekinio aptako) ir B tipo (su priekiniu aptaku) slėgio pasiskirstymas [12].....	17
9 pav. A ir B modelių pasipriešinimo ir prispaudimo jėgų palyginimas [12].....	18
10 pav. Pradinio modelio (juoda spalva), modelio su išpjauta sėdyne (raudona spalva) ir modelio su išpjauta sėdyne bei priekiniu aptaku (žalia spalva) aerodinaminio pasipriešinimo koeficientų palyginimas [13].....	18
11 pav. Pirminio modelio (viršuje kairėje), modelio su išpjova sėdynėje (viršuje dešinėje) bei modelio su išpjova sėdyneje ir priekiniu aptaku (apačioje) statinio slėgio pasiskirstymas formulės paviršiuje [13].....	19
12 pav. Automobilio tyrimas be priekinių ratų (A) ir su priekiniais ratais (B) [14].....	19
13 pav. Pradiniai formulės kėbulo variantai (A) ir (B) bei galutinis variantas (C) [15].....	20
14 pav. COMSOL <i>Multiphysics</i> programinio paketo sugeneruotos oro tėkmės linijos [15].....	21
15 pav. Bolido 3D modelis [23].....	25
16 pav. Atakos kampo vizualizacija.....	26
17 pav. Tyrime naudojami galinio aptako atakos kampo variantai	26
18 pav. Modelio baigtinių elementų tiklelis.....	27
19 pav. Bolido priekinis skerspjūvio plotas	28
20 pav. Oro tėkmės greičio (viršuje) ir perteklinio slėgio (apačioje) pasiskirstymas, kai oro tėkmės greitis yra 50 m/s, o atakos kampas 31°	28
21 pav. Aerodinaminio pasipriešinimo ir prispaudimo koeficientų priklausomybė nuo galinio aptako atakos kampo	29
22 pav. Aerodinaminio pasipriešinimo ir prispaudimo koeficientų priklausomybė nuo oro tekės (važiavimo) greičio.....	29
22 pav. Patikslintas atakos kampo verčių diapazonas.....	30
24 pav. Aerodinaminio pasipriešinimo ir prispaudimo koeficientų priklausomybė nuo patikslinto galinio aptako atakos kampo	30
25 pav. Aerodinaminio pasipriešinimo ir prispaudimo koeficientų priklausomybė nuo oro tekės (važiavimo) greičio.....	31
26 pav. Modifikuoti galinio aptako elemento skerspjūviai.....	32
27 pav. Galinio aptako elemento modifikacijų tyrimo variantai.....	32

28 pav. „VAR 1“ aptako pasipriešinimo ir prispaudimo koeficientų priklausomybė nuo posvyrio (atakos) kampo	33
29 pav. „VAR 1“ pasipriešinimo ir prispaudimo koeficientų priklausomybė nuo važavimo greičio	33
30 pav. „VAR 2“ aptako pasipriešinimo ir prispaudimo koeficientų priklausomybė nuo posvyrio (atakos) kampo	34
31 pav. „VAR 2“ pasipriešinimo ir prispaudimo koeficientų priklausomybė nuo važavimo greičio	34
32 pav. Aerodinaminio pasipriešinimo ir prispaudimo koeficientų palyginimas	35
33 pav. Virtualus vėjo tunelis nevertinant (viršuje) ir vertinant (apačioje) kelio įtaką.....	36
34 pav. Pradinio galinio aptako varianto aerodinaminio pasipriešinimo ir prispaudimo koeficientų palyginimas.....	37
35 pav. „VAR1“ galinio aptako varianto aerodinaminio pasipriešinimo ir prispaudimo koeficientų palyginimas.....	37
36 pav. „VAR2“ galinio aptako varianto aerodinaminio pasipriešinimo ir prispaudimo koeficientų palyginimas.....	38
37 pav. Aerodinaminių pasipriešinimo ir prispaudimo koeficientų priklausomybė nuo oro temperatūros	39
38 pav. Aerodinaminio pasipriešinimo ir prispaudimo koeficientų priklausomybė nuo aukščio virš jūros lygio.....	41
39 pav. Pradinio galinio aptako varianto aerodinaminio pasipriešinimo ir prispaudimo koeficientų priklausomybė nuo važavimo greičio.....	42
40 pav. „VAR1“ galinio aptako varianto aerodinaminio pasipriešinimo ir prispaudimo koeficientų priklausomybė nuo važavimo greičio.....	43
41 pav. „VAR2“ galinio aptako varianto aerodinaminio pasipriešinimo ir prispaudimo koeficientų priklausomybė nuo važavimo greičio.....	43
42 pav. Aerodinaminių pasipriešinimo ir prispaudimo koeficientų priklausomybė nuo oro drėgmės prie 50 m/s važavimo greičio	44

Įvadas

Tyrimo tema: sportiniai automobiliai yra konstruojami jau nuo senų laikų ir juose nuolatos diegiami vis modernesni technologiniai sprendimai siekiant pagerinti vienokius ar kitokius techninius parametrus. Tobulinant automobilius gerinamos valdomumo savybės, įvairiais metodais didinama variklio galia, montuojama saugumo įranga. Visi šie pakeitimai yra daromi siekiant automobilių padaryti kaip įmanoma konkurencingesni. Vienas svarbiausių rodiklių, kuris aprėpia beveik visas automobilių tobulinimo sritis, yra aerodinamiškumas. Automobilis, turintis geras aerodinamines savybes, turės nedidelį oro pasipriešinimą, ko pasekoje variklio galia bus išnaudojama optimaliau. Tai pat, tinkamai suprojektuotas automobilis geriau spaudžiamas prie kelio t. y. susidarys geresnis padangų sukibimas su kelio danga. Visa tai pasiekama pasinaudojant papildomais aerodinaminiais komponentais.

Tyrimo problema: papildomais aerodinaminiais komponentais vaidinami įvairūs priekiniai bei galiniai aptakai, difuzoriai, sukūrių generatoriai bei kiti aerodinamines savybes gerinantys komponentai. Tačiau, vien papildomų komponentų panaudojimas automobilyje nepadaro jo efektyvesniu. Labai svarbu teisingas komponentų išdėstymas ant automobilio kėbulo, tinkama jų geometrija (forma) bei teisingas suregulavimas. Tam, kad šie papildomi komponentai atliktų savo darbą tinkamai, juos sureguliuojant būtina atlikti tyrimus ir nustatyti kaip kinta aerodinaminiai parametrai priklausomai nuo suregulavimo taip surandant tinkamiausią suregulavimo poziciją.

Šiame tyrime tiriama skirtingų bolido galinio aptako suregulavimo variantų įtaka aerodinaminiam rodikliams siekiant nustatyti optimaliausią suregulavimo poziciją. Taip pat tiriama skirtingų formų aptako elementai, siekiant nustatyti tinkamiausią. Visi tyrimai atliekami prie keletos skirtingų oro tėkmės greičių bei vertinant skirtingas aplinkos sąlygas.

Tyrimo objektas: „F-1“ bolido kėbulas su galiniu aptaku.

Tyrimo tikslas: pasinaudojant kompiuterine skysčių dinamikos analize ištirti „F-1“ bolido skirtingų galinio aptako konfigūracijų bei aplinkos įtaką bendriems automobilio aerodinaminiam rodikliams.

Tyrimo uždaviniai:

1. Išnagrinėti mokslinę literatūrą, susijusią su sportinių automobilių aerodinaminių savybių tyrimais;
2. Pasirinkti arba susidaryti tiriamąjį automobilio 3D modelį;
3. Susidaryti ir aprašyti tyrimo metodiką;
4. Ištirti automobilio galinį aptaką bei skirtingas jo konfigūracijas prie skirtingų oro tėkmės greičių;
5. Pateikti tyrimo rezultatus, juos išanalizuoti bei sudaryti išvadas.

Darbo ataskaita sudaryta iš įvado, dviejų skyrių, išvadų, naudotos literatūros sąrašo bei priedų. Ataskaitos apimtis – 60 puslapių, kuriuose yra: 42 paveikslai, 12 lentelių bei 6 priedai.

Konferencijose skaityti pranešimai:

Mileris, Mantas. Aerodinaminių komponentų įtaka sportinio automobilio aerodinamikai. 21-oji tarptautinė studentų mokslinių darbų konferencija „Technologijų ir verslo aktualijos – 2021“. Panevėžys: Kauno technologijos universitetas, 2021 m. balandžio 23 d.

1. Teorinė dalis – mokslinės literatūros analizė

Automobilių sportas – tai sporto šakų visuma, kai varžomasi įvairaus tipo motorinėmis transporto priemonėmis. Automobilių lenktynės prasidėjo dar XIX a. pabaigoje, tai paskatino inžinierius kurti ir tobulinti sportinius automobilius.



1 pav. Vienos pirmųjų automobilių lenktynių – „The Vanderbilt Cup Race“, 1906 m. [1]

J. Katzas publikacijoje „Aerodynamics of Race Cars“ pažymi, kad dėl XX a. pradžioje kurtų automobilių plataus spektro automobilių sporte atsirado daugybė skirtingų sričių. Nors ir iš pažiūros automobilių sportui naudojamos transporto priemonės yra skirtingos, tačiau, anot J. Katzo, jas visas sieja vienas rodiklis, kurio gerinimo siekia kiekvienas tokį automobilį projektuojantis inžinierius. Tas rodiklis yra – aerodinamika [2].

Aerodinamika – tai mokslas, kuris tiria oro judėjimą ir jėgas, veikiančias aptekamą kūną [3]. Pasak R. Machinio [4], automobiliui judant dėl oro srautų judėjimo, automobilio kėbulą ima veikti papildomos jėgos, kurios pasiskirsto į šias grupes:

- Aerodinaminis pasipriešinimas (angl. *aerodynamic drag*) – ši aerodinaminė jėga dedamoji yra atsakinga už automobilio lėtėjimą dėl oro trinties su automobilio kėbulo paviršiumi.
- Aerodinaminė kėlimo jėga (angl. *aerodynamic lift*) – ši jėga stengiasi „pakelti“ automobilį t.y. sumažinti jo ratų sukibimą su važiuojamąja danga.
- Aerodinaminė prispaudimo jėga (angl. *aerodynamic downforce*) – nuo jos dydžio priklauso kaip stipriai automobilis yra spaudžiamas prie kelio paviršiaus.

Gilinant konkrečiai į sportinius automobilius, pirmieji du rodikliai (pasipriešinimas ir kėlimas) siejami išlaikyti kaip įmanoma mažesni, o trečiasis (prispaudimas) – kaip įmanoma didesnis [4]. Deja, beveik visais atvejais didinant prispaudimo jėgą, išauga ir pasipriešinimo jėga, todėl svarbu automobilį suprojektuoti taip, kad būtų išlaikomas balansas tarp visų šių rodiklių.

Aerodinaminės savybės sportiniuose automobiliuose gali būti gerinamos tokiais būdais [3]: keičiant automobilio kėbulo formą bei pridodant papildomus aerodinaminis elementus, tokius kaip aptakai, difuzoriai, sukurių generatoriai ir kt. Visus aerodinaminis sportinių automobilių komponentus mokslininkai tiria jau daugybę metų pasitelkdami įvairiausių tyrimo metodų, skaičiavimų modelių bei techninę įrangą, kurią naudojant galima modeliuoti automobilio judėjimą ir sisteminti tyrimų rezultatus, pagal kuriuos gali būti atliekami pakeitimai automobilio konfigūracijoje.

1.1. Aerodinamikos tyrimo metodai

1.1.1. Vėjo tuneliai

Pasak J. Katzo [2], dar 1960 m., kuomet projektuojant sportinius automobilius aerodinamika jau turėjo didelę reikšmę, projektuojant lėktuvus buvo naudojama speciali įranga, skirta aerodinaminių savybių tyrimams. Ta įranga – vėjo tuneliai. Ilgai netruko, kol vėjo tuneliai pradėti naudoti ne tik lėktuvų tyrimams, bet ir sportinių automobilių gamyboje.

Vėjo tunelis – tai speciali patalpa, skirta dirbtinai sukurti oro tėkmę, kurią naudojant galima atkartoti automobilio judėjimą erdvėje ir taip tirti jo aerodinamines savybes. V. Senfto bei Gilliano darbe [5] vėjo tuneliai išskiriami į dvi pagrindines grupes:

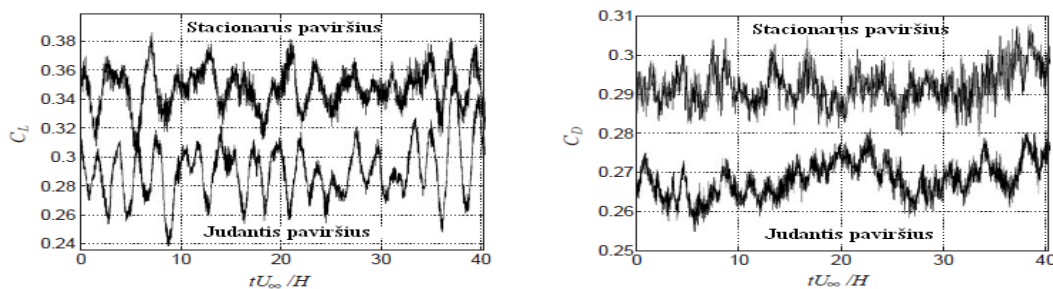
- Atviro ciklo vėjo tuneliai: šio tipo vėjo tuneliuose oras viena turbina yra imamas iš vėjo tunelį supančios aplinkos ir kita turbina gražinamas į tą pačią aplinką.
- Uždaro ciklo vėjo tuneliai: kaip ir nurodo šio tunelio pavadinimas, oro srautas juda uždaru ciklu t. y. turbina surenka ir siunčia tą patį oro srautą pakartotiniam panaudojimui.

Pradinėse vėjų tunelių testavimo stadijose susidurta su viena problema – kadangi sportinių automobilių kėbulai dažniausiai yra sąlyginai arti žemės, dėl to oro srautas negali lengvai tekėti pro ermes, esančias po automobiliu, todėl iškreipiami matavimo rezultatai.

Šią problemą bandyta spręsti vėjo tuneliuose įrengiant judančius žemės paviršius [2]. Šio tipo vėjo tuneliai pasižymėjo tuo, kad vietoje stacionaraus vėjo tunelio paviršiaus panaudota diržinė pavara, kuri sukurdavo judančio kelio paviršiaus efektą. Diržas judėdavo tokiu pačiu greičiu kaip oro srautas vėjo tunelyje, taip sukuriant tikro važiavimo efektą.

Norint nustatyti, kokią įtaką vėjo tunelio testams turi judantis paviršius, 2005 m. Gotenburgo mieste Švedijoje, Chalmerso technologijų universitete, taikomiosios mechanikos fakultete, studentai Siniša Krajnovičius ir Larsas Davidsonas atliko tyrimą, pavadinimu „Influence of floor motions in wind tunnels on aerodynamics of road vehicles“ [6].

Šio tyrimo metu tyrėjai pasinaudojo matematiniais LES (angl. *Large eddy simulation*) modeliais turbulencijos parametrus skaičiuoti. Jie suprojektavo testinio modelio kėbulą. Pagrindinis pasirinktos kėbulo formos aspektas – hečbeko tipo kėbulo galas su 25 laipsniais pasvirusiu galiniu langu. Galiausiai, buvo atlikti tyrimai tiek su stacionariu tiek su judančiu žemės paviršiumi. Tyrėjų rezultatai pavaizduoti **2 pav.**



2 pav. Pasipriešinimo (dešinėje) ir kėlimo (kairėje) koeficientų priklausomybė nuo testavimo kameros paviršiaus judesio vėjo tunelyje [7]

Tyrėjai galiausiai pateikė išvadas, kuriose nurodoma, kad naudojant 3 kartus sumažintą automobilio modelį su hečbeko tipo 25 laipsniais pasvirusiu galu, nustatyta, kad tunelis su judančiu paviršiumi leido pasipriešinimą sumažinti 8 % bei kėlimą sumažinti 16 %. Iš to galima spręsti, kad tuneliai su judančiu pagrindu yra tikslesni sportinių automobilių aerodinaminiam tyrimams atlikti.

1.1.2. Kompiuterinė skysčių dinamikos analizė

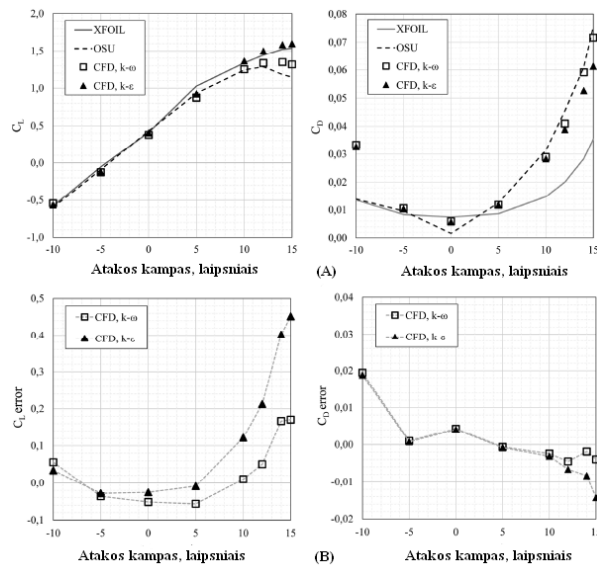
Remiantis J. Katzo [2] publikacijoje pateiktais duomenimis, kompiuterinė analizė sportinių automobilių aerodinamikoje tampa vis dažniau naudojama dėl kelių priežasčių:

- Sparčiai augančios kompiuterinių sistemų galimybės bei prieinamumas.
- Tiriamąjį objektą galima tirti daugybę kartų pakartotinai be jokių papildomų išteklių.
- Tyrimai gali būti atliekami dar prieš automobilio gamybos procesą.

Pasak autoriaus, norint efektyviai panaudoti kompiuterinę analizę aerodinamikos tyrimams, reikia nustatyti kokias lygtis (Eulerio, Naviero-Stokeso ir kt.) naudoti bei kaip tiksliai pasinaudojant jomis galima apskaičiuoti norimus dydžius. Tuomet reikia nustatyti ir pasirinkti šių lygčių sprendimo algoritmus, kurie leistų gauti norimus sprendinius. Įvairūs matematiniai skaitiniai metodai yra pateikiami 1993 m. Klauso A. Hoffmano bei Steve T. Chiango leidinyje „Computational Fluid Dynamics“ (CFD) [8]. Jame autoriai pateikia daugumą skaičiavimo algoritmų, pagal kuriuos rašomos programos kompiuterinei aerodinaminių dydžių analizei.

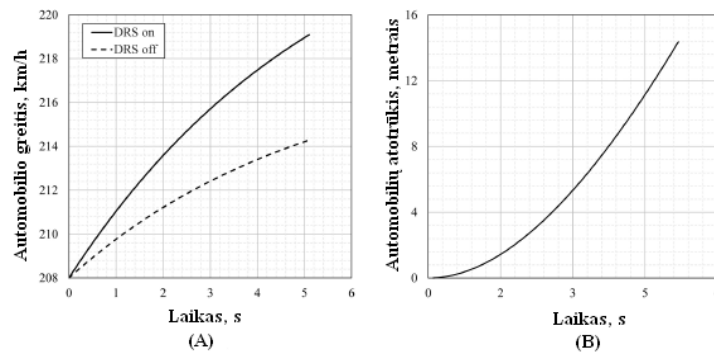
1.2. Galinio aptako tyrimai

Automobilių sporto srityje galinių aptakų projektavimas ir tyrimai gana dažnai analizuojama tema. Pavyzdžiui, tyrėjai Mauro Dimastrogiovanni, Giulio Reina ir Andreas Burzoni iš Salento universiteto Italijoje 2018 m. atliko tyrimą, susijusį su „Formulėje-1“ naudojama technologija – aerodinaminio pasipriešinimo mažinimo sistema (angl. *drag reduction system (DRS)*) [9]. Šios technologijos principas yra galinio aptako atakos kampo keitimas siekiant sumažinti aerodinaminį pasipriešinimą, dėl to galima išvystyti didesnę pagreitį. Ši funkcija dažniausiai naudojama tiesiosiose lenktynių trasos vietose, siekiant aplenkti varžovą pasinaudojant „oro kišene“. Pirmiausia tyrėjai išanalizavo jau esamas konstrukcijas ir jas palygino tarpusavyje, siekdami surasti optimalų variantą. Tuomet, viena iš konstrukcijų importuota į *ANSYS 19.1 Academic* programinį paketą, kuriuo naudojantis atlikta plokštuminė (2D) kompiuterinė analizė. Rezultatai palyginami su *XFOIL* duomenų baze, kurioje laikomi daugelio aerodinaminių tunelių tyrimų rezultatai. Iš to tyrėjai nustatė, kad tinkamiausias tyrimo modelis – turbulencinis modelis (angl. *turbulence model (TM)*). Atliekant tyrimą, aptako atakos kampas buvo keičiamas nuo -10 laipsnių iki +15 laipsnių, naudojant 50 m/s vėjo greitį (kuris atitinka apie $1,5 \times 10^6$ Reinoldso skaičių). Pasinaudojant sugeneruotais duomenimis, tyrėjai sudarė 3D modelį bei atliko kompiuterinę skysčių dinamikos analizę dviem skirtingais turbulenciniais tyrimo modeliais ($k-\omega$ TM ir $k-\varepsilon$ TM). Tyrimo rezultatai vaizduojami **3 pav.**



3 pav. DRS aptako kompiuterinės analizės, XFOIL duomenų bazės bei Ohajo valstijos universiteto (OST) duomenų palyginimas. Vaizduojama kėlimo bei pasipriešinimo koeficientų priklausomybė nuo atakos kampo (A) bei paklaidos (B) [9]

Pagal gautus duomenis tyrėjai atliko konstrukcinius patobulinimus bei keletą testų pasinaudodami kompiuterine analize. Galiausiai, buvo palyginti 2 identiški automobiliai, kurių vienas naudojo sukurtą DRS sistemą, o kitas tos sistemos nenaudojo. Jų greičio priklausomybė pavaizduota **4 pav.**



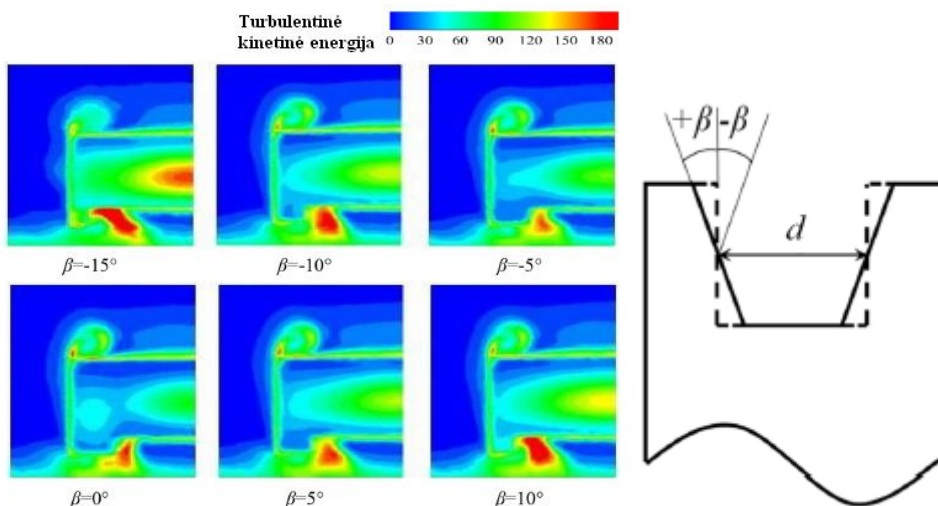
4 pav. Dviejų identišku automobilių greičių palyginimas su suporjektuotu DRS bei be jo. Vientisa linija vaizduoja automobilį su DRS, brūkšninė – be DRS. [9]

1.3. Galinio difuzoriaus tyrimai

Kitas iš primontuojamų elementų, naudojamų sportinių automobilių aerodinaminėms savybėms pagerinti – galinis difuzorius. Difuzorius sportiniuose automobiliuose yra priemonė, montuojama automobilio galinėje apatinėje dalyje, skirta pagerinti automobilio aerodinamines savybes, leidžiant tolygiai pakeisti oro tekėjimo greitį iš labai didelio po automobilio dugnu į sąlyginai mažą už automobilio galo [10].

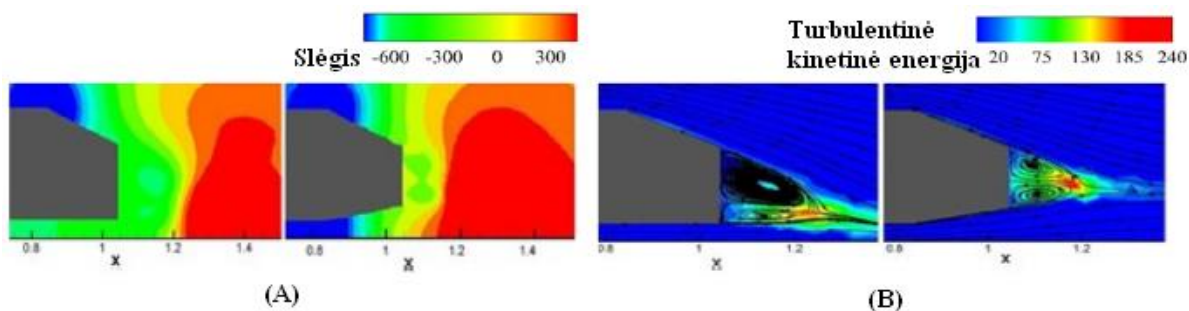
Tyrėjai Huangas Taimingas, Zhuangas Xiaodongas, Wanas Zhongminas ir Gu Zhengqi iš Hunano universiteto Kinijoje 2019 m. tyrė viengubo kanalo tipo difuzoriaus įtaką automobilio aerodinaminiam pasipriešinimui [11]. Pirmiausia, tyrėjai pasiruošė paprastą tiriamąjį modelį. Modelio geometrijai jie pasirinko taip vadinamą Ahmedo modelį (angl. *Ahmed model*) kuris yra tam tikrų matmenų bei turi 25 laipsnio galinę dalį. Skaičiavimams atlikti tyrėjai pasirinko vidutinį

Reinoldso (angl. *Reinolds-averaged*) metodą su Naviero-Stokeso lygtimis. Modeliavimą tyrėjai atliko programiniu paketu *ANSYS Fluent*. Toliau tyrėjai sukonstravo realų modelį ir atliko analogiškus tyrimus realiame vėjo tunelyje Hunano universitete Kinijoje. Modeliavimo metu gauti rezultatai palyginti su vėjo tunelio rezultatais, nustatyta, kad paklaida siekia mažiau nei 2 %. Pasinaudodami kompiuterine analize, paremta k-ε turbulenciniu modeliu, tyrėjai atliko daugybę bandymų ieškodami optimalių difuzoriaus geometrinių charakteristikų. Vienas iš bandymų pavaizduotas **5 pav.**, kuriame vaizduojama turbulentinės energijos priklausomybė nuo difuzoriaus skersinio kampo. Iš grafikų matyti, kad kampui artėjant nuo -15 link 0 laipsnių, kinetinės energijos kiekis mažėja, o kampui didėjant link +10 laipsnių, energijos kiekis pradeda augti.



5 pav. Turbulentinės kinetinės energijos priklausomybė nuo difuzoriaus šoninio kampo (kairėje, vaizdas iš modelio galo) ir skersinio kampo iliustravimas (dešinėje, vaizdas iš difuzoriaus viršaus) [11]

Galiausiai, tyrėjai nustatė, kad optimalūs difuzoriaus geometriniai parametrai yra tokie: difuzoriaus plotis – 237 mm, kanalo plotis – 202 mm, išilginis posvyrio kampas 10,46 laipsnio, skersinis posvyrio kampas – 0 laipsnių. Su tokių matmenų difuzoriumi, aerodinaminis pasipriešinimas sumažėjo nuo 0,286 iki 0,270 t.y. 5,3 %. Tyrimo rezultatai pavaizduoti **6 pav.**



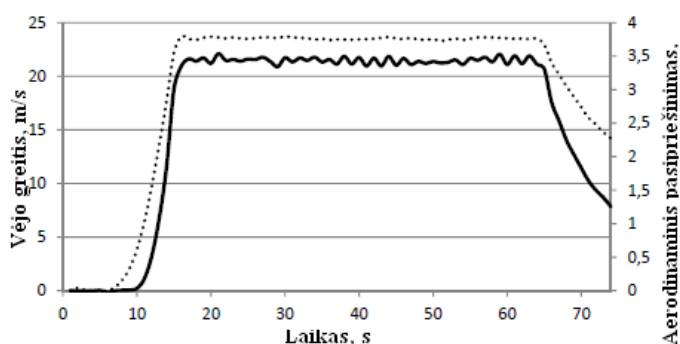
6 pav. Slėgio pasiskirstymo (A) bei turbulentinės kinetinės energijos (B) palyginimai su difuzoriumi ir be jo [11]

1.4. Konceptinių bei realių automobilių tyrimai

Dažnu atveju, mokslininkai atlieka tyrimus ne atskiroms kūbulo dalims, tačiau visai transporto priemonei kaip bendram junginiui. Tokie tyrimai leidžia išsiaiškinti bendras automobilio aerodinamines savybes bei nustatyti ne tik konkrečių elementų įtaką, bet ir jų sąveiką tarpusavyje.

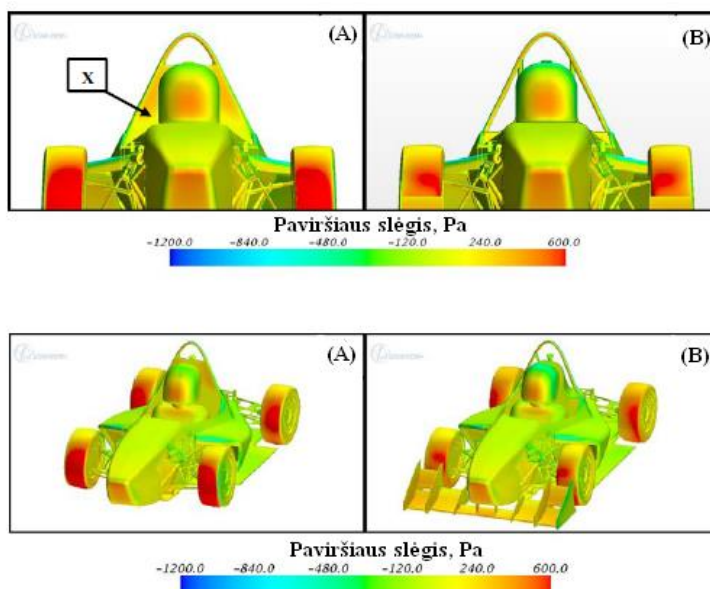
1.4.1. SAE studentų formulės tyrimas

Perugijos bei Guglielmo Marconi universitetų tyrėjai Francesco Marianis, Claudio Paggianis, Francesco Risis ir Lorenzo Scappaticcis 2014 m. atliko aerodinaminę analizę su SAE studentų formule [12]. Tyrėjai iš pradžių atliko eksperimentinį tyrimą vėjo tunelyje, kurio rezultatai pateikti **7 pav.** ir vėliau gautus duomenis palygino su skaitiniais metodais gautais duomenimis. Eksperimentinei daliai tyrėjai pasigamino 1:1 mastelio formulės priekinės dalies modelį be aptakų. Testų metu pasirinktas 85 km/h vėjo greitis ir iš viso atlikti 5 testai. Susumavus surinktus duomenis nustatyta pasipriešinimo koeficiento vertė – 0,106.

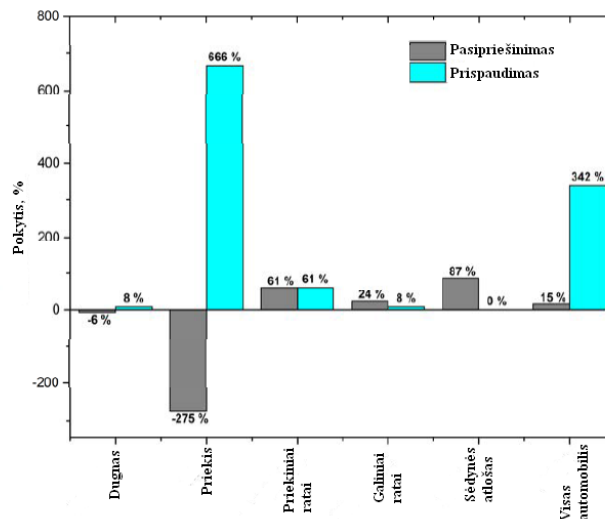


7 pav. Vėjo greičio ir aerodinaminio pasipriešinimo kitimas laike [12]

Skaitiniam eksperimentui atlikti, tyrėjai pasinaudojo vėjo tunelyje sugeneruotais duomenimis ir taip sumodeliavo transporto priemonės 3D modelį. Tyrimo eiga paremta SST (angl. *shear stress transport*) $k-\omega$ turbulentine modeliu. Tyrimo rezultatai pavaizduoti **8 pav.**, procentinis A ir B modelių palyginimas pateiktas **9 pav.**



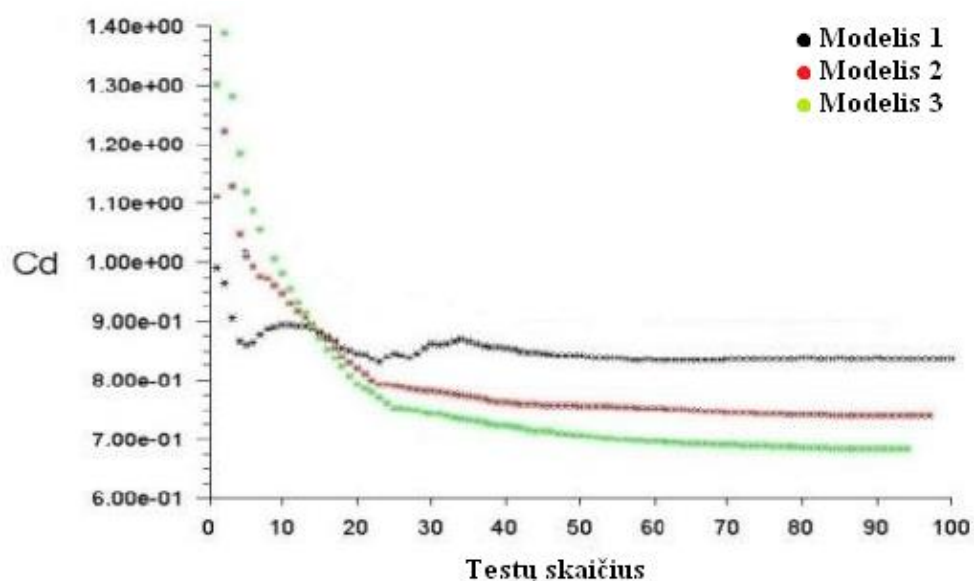
8 pav. A tipo (be priekinio aptako) ir B tipo (su priekiniu aptaku) slėgio pasiskirstymas [12]



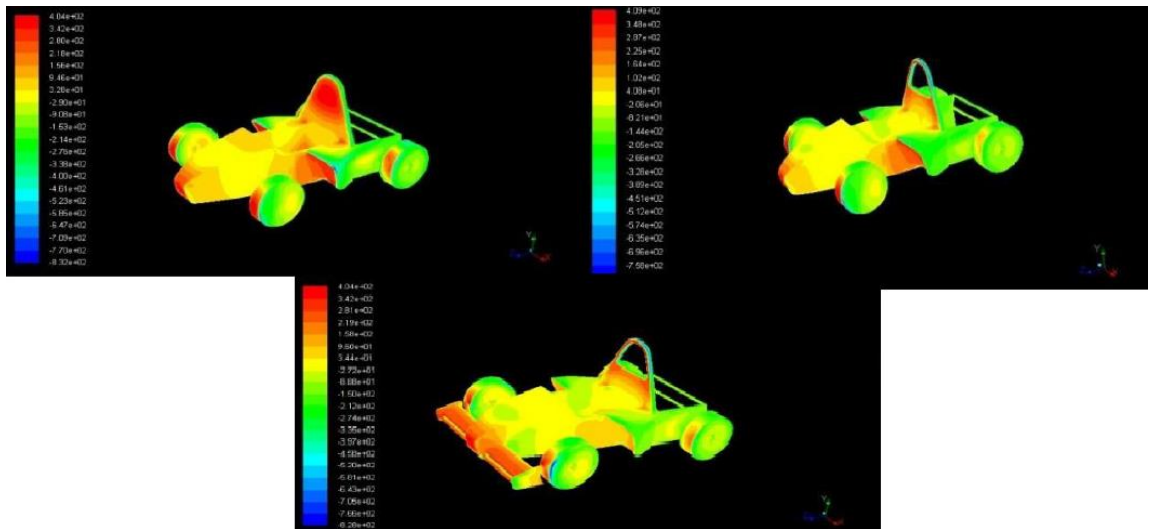
9 pav. A ir B modelių pasipriešinimo ir prispaudimo jėgų palyginimas [12]

Iš grafiko, pavaizduoto 9 pav., akivaizdu, kad priekinio aptako pridėjimas ženkliai pagerino prispaudimo jėgą priekinėje formulės dalyje, ko pasekoje buvo pagerintos bendros formulės aerodinaminės charakteristikos, t. y. aerodinaminiam pasipriešinimui išaugus 15 %, aerodinaminis prispaudimas išauga net 342 %.

Panašų tyrimą 2014 m. su ta pačia SAE formule atliko ir VIT universiteto Indijoje tyrėjai Snehas Hetawalas, Mandaris Gophaneas, Ajayus B.K. ir Yagnavalkya Mukkamala [13]. Šioje publikacijoje tyrėjai, pasinaudodami kompiuterinės analizės programiniu paketu *ANSYS Fluent*, tyrė SAE formulės aerodinamines savybes. Pasinaudojant SST4 lygčių modeliu atlikti tyrimai trims skirtingiems modeliams. Tyrėjų gauti rezultatai pateikti 10 pav. Pradinio modelio pasipriešinimo koeficientas – 0,85, modelio su išpjova sėdynėje – 0,75, modelio su išpjova sėdynėje bei priekiniu aptaku – 0,7. Didžiausią įtaką prispaudimo jėgos išaugimui sudarė priekinio aptako primontavimas, kas leido ne tik padidinti prispaudimo jėgą, bet ir sumažinti oro pasipriešinimą. Taip pat, tyrėjai atliko statinio slėgio pasiskirstymo formulės paviršiaus plote matavimus (žr. 11 pav.).



10 pav. Pradinio modelio (juoda spalva), modelio su išpjauta sėdyne (raudona spalva) ir modelio su išpjauta sėdyne bei priekiniu aptaku (žalia spalva) aerodinaminio pasipriešinimo koeficientų palyginimas [13]



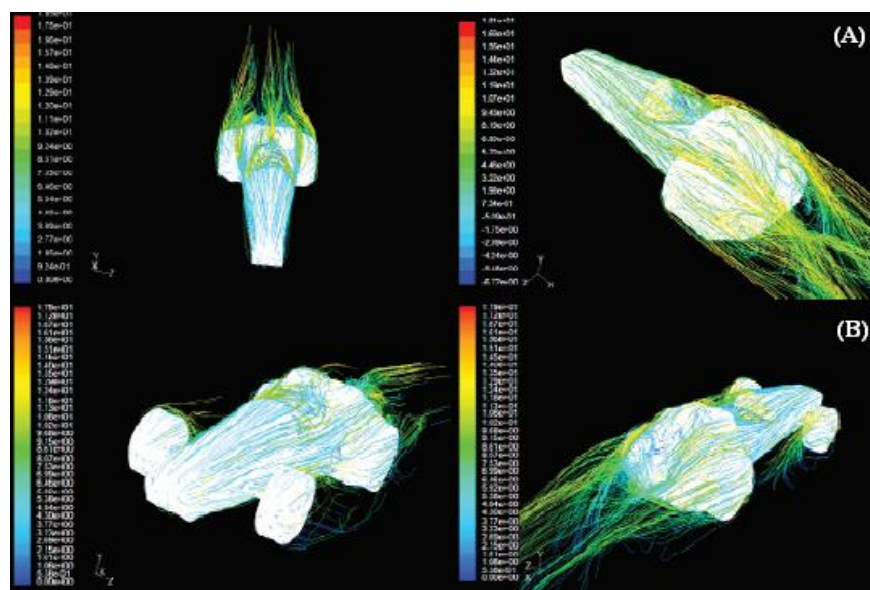
11 pav. Pirminio modelio (viršuje kairėje), modelio su išpjova sėdynėje (viršuje dešinėje) bei modelio su išpjova sėdyneje ir priekiniu aptaku (apačioje) statinio slėgio pasiskirstymas formulės paviršiuje [13]

Galiausiai, tyrėjai pateikė tyrimo išvadas, kuriose teigia, kad atlikus modifikacijas buvo nustatyta:

- Aerodinaminis pasipriešinimo koeficientas sumažėjo nuo 0,85 iki 0,7;
- Aerodinaminis prispaudimo koeficientas padidėjo nuo 0,2 iki 0,25;
- Statinio slėgio vertė vairuotojo galvos zonoje sumažėjo nuo 340 Pa iki 80 Pa.

1.4.2. Vienas iš tyrimų su ARTeC PEC 2011 EmoC automobiliu

2012 m., MARA technologijų universitete Malaizijoje, tyrėjai Rizalis E. M. Nasiras, Firdausas Mohamadas, Ramlanas Kasiranas, M. Shahrmanas Adenanas, M. Faizalis, Mohamedas, M. Hanifas Matas, Amiras R. A. Ghanis atliko tyrimą pavadinimu „Aerodynamics of ARTeC’s PEC 2011 EMO-C Car“ [14]. Kompiuterinei analizei tyrėjai pasirinko *ANSYS Fluent* programinį paketą, o eksperimentui – vėjo tunelį ir 10 kartų sumažintą automobilio modelį. Tyrėjai *GAMBIT* programiniu paketu sudarė transporto priemonės 3D modelį ir jo duomenis importavo į *ANSYS Fluent* programinį paketą skaičiavimams atlikti. Tyrėjai analizavo du transporto priemonės variantus: su priekinėmis padangomis ir be jų (žr. 12 pav.).



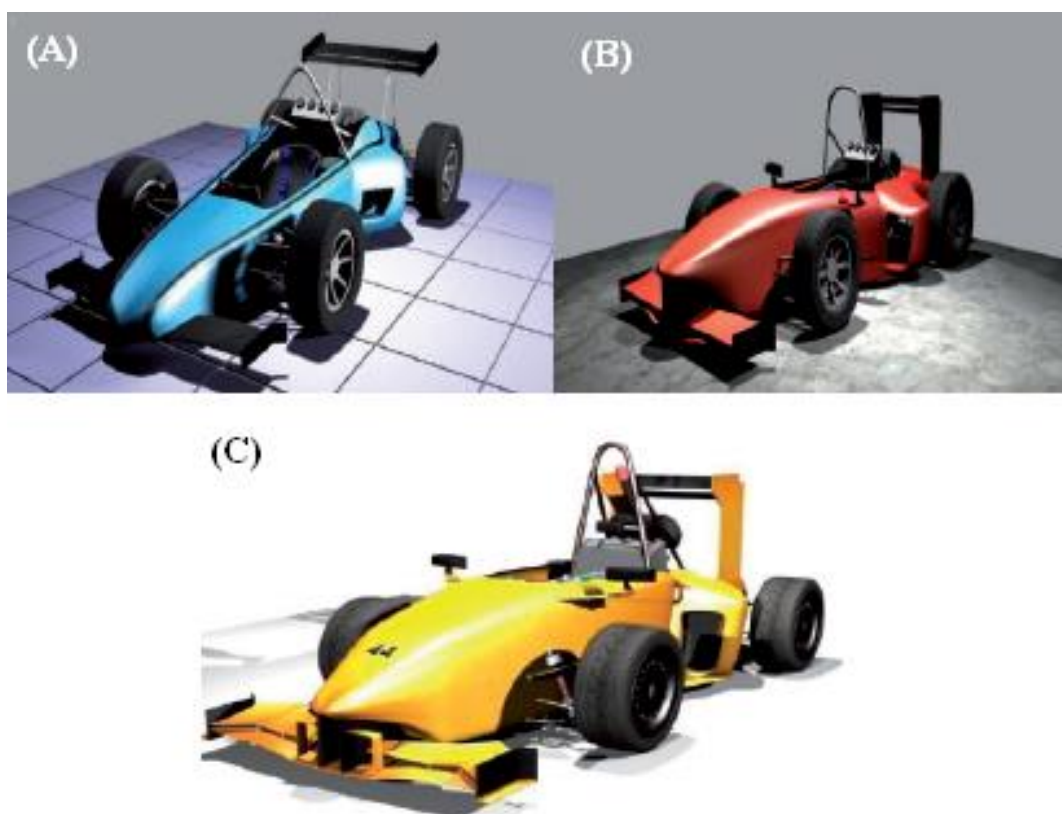
12 pav. Automobilio tyrimas be priekinių ratų (A) ir su priekiniais ratais (B) [14]

Pirmu atveju nustatytas pasipriešinimo koeficientas yra 0,312, o antru – 0,42. Tuomet atliktas tyrimas vėjo tunelyje, esant 10-30 m/s vėjo srauto greičiui, kai oro tankis 1,17-1,18 kg/m³. Atlikus keletą skirtingų matavimų, tyrėjai nustatė vidutinę aerodinaminio pasipriešinimo vertę 0,48. Tyrėjai palygino gautus rezultatus ir padarė tokias išvadas:

- Ribinių elementų metodu (angl. *Boundary element method*) nustatytas aerodinaminio pasipriešinimo koeficientas – 0,42;
- Eksperimentiniu metodu vėjo tunelyje nustatytas aerodinaminio pasipriešinimo koeficientas – 0,48;
- Skirtumas tarp abiejų metodų yra 12,5 %;
- Priekiniai ratai sudaro 25,7 % viso aerodinaminio pasipriešinimo;
- Važiuojant 40 km/h greičiu, dėl aerodinaminio pasipriešinimo reikalinga variklio galia išauga 20 %.

1.4.3. Filadelfijos universiteto studentų formulės projektas

2014 m. Filadelfijos universiteto Jordanijoje tyrėjai Munzeras SY Ebaidas, Shathas Ammouras ir Kutias JM Al-khishalis siekė suprojektuoti tam tikrus reikalavimus atitinkančią transporto priemonę, kuri galėtų dalyvauti 2014 m. Jungtinėje Karalystėje vykusiame renginyje „Formula Student competition 2014“ [15]. Projektavimo metu numatyti skirtingi aerodinaminių elementų išdėstymo variantai, jų tipai bei aerodinaminis transporto priemonės tyrimas pasinaudojant CFD kompiuterine analize.

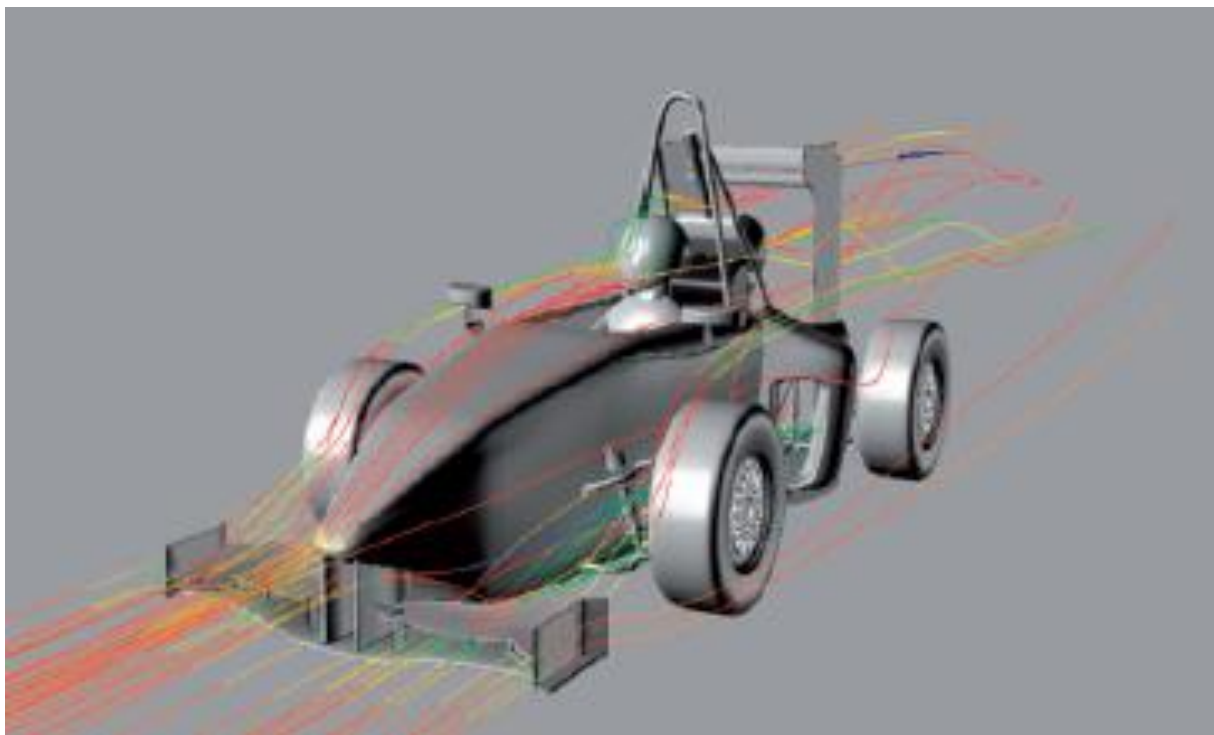


13 pav. Pradiniai formulės kėbulo variantai (A) ir (B) bei galutinis variantas (C) [15]

Pirmiausia tyrėjai sukūrė 2 pradinius 3D modelius programiniame pakete *Rhinoceros 3D V4.0* (žr. 13 pav., (A) ir (B)). Su kiekvienu modeliu atlikti tyrimai programiniame pakete *COMSOL*

Multiphysics ir padaryti atitinkami pakeitimai aerodinaminiuose komponentuose (žr. **14 pav.**). Galiausiai atliktas galutinis aerodinaminis tyrimas ir nustatyti tokie parametrų dydžiai [15]:

- Prispaudimo jėga – 572 N;
- Pasipriešinimo jėga – 72 N;
- Pasipriešinimo koeficientas – 0,59;
- Kėlimo koeficientas – -0,2.



14 pav. COMSOL *Multiphysics* programinio paketo sugeneruotos oro tėkmės linijos [15]

1.4.4. Nascar Generation 6 automobilio tyrimas

2018 m. Šiaurės Karolinos universiteto Jungtinėse Amerikos Valstijose tyrėjai Chenas Fu, Patrickas Boundsas, Christianas Selentas ir Mesbahas Uddinas atliko tyrimą, kurio metu, pasinaudojant turbulentinių modelių kompiuterine analize, tyrė „NASCAR“ lenktynių automobilio aerodinamines charakteristikas tam tikrais lenktynių momentais [16]. Pirmiausia tyrėjai programiniame pakete *ANSA BETA CAE* sukūrė ir optimizavo automobilio 3D modelį, kurį vėliau importavo į *STAR-CCM+* programinį paketą ir atliko CFD modeliavimą. Tyrimams pasirinkti keli 3D modelio pozicijos variantai, atitinkantys tam tikrus „NASCAR“ lenktynių momentus:

- 0°, -1°, -2° ir -3° kėbulo posūkio kampai, imituojantys važiavimą vienu iš trasos posūkiu;
- 2,5 mm, 7,5 mm ir 19 mm priekinės dalies aukštis nuo žemės, imituojantis atitinkamai stabdymą, tolygų važiavimą ir greitėjimą.

Simuliacijos skaičiavimams atlikti tyrėjai naudojami trims populiariausiais turbulentiniais modeliais ir jų rezultatus lygino tarpusavyje:

- *k-ε* (RKE) turbulentinis modelis;
- Abe-Kondoho-Nagano *k-ε* (AKN) turbulentinis modelis;
- *Shear stress transport k-ε* (SST) turbulentinis modelis;

Tuomet tyrėjai atliko matavimus kiekvienam iš pasirinktų automobilio konfigūracijos variantų su kiekvienu iš naudojamų turbulentinių modelių. Galiausiai tyrėjai pateikė išvadą, kad tiksliausias turbulentinis modelis iš visų tirtų variantų – SST k- ϵ , kurio pasinaudojant pakankamai tiksliai nustatyti aerodinaminių savybių pasikeitimai keičiant automobilio konfigūraciją.

1.4.5. Konceptinio sportinio automobilio tyrimas

Dar vienas tyrimas atliktas 2019 m. Coventrio universitete Jungtinėje Karalystėje. Jį atliko M. Dickisonas, M. Ghaleehas, S. Miladis, S. Subbakrishna, L. T. Wenas ir M. Al Qubeissis [17]. Šiame tyrime tyrėjai CFD pagalba analizavo konceptinio sportinio automobilio aerodinamines charakteristikas. Transporto priemonės 3D modelis sudarytas pasinaudojant *Star-CCM+* programiniu paketu. Pasirinkti virtualaus vėjo tunelio matmenys: $2L \times 8L \times 2L$, kur L – sumodeliuoto automobilio kėbulo ilgis. Virtualiame tunelyje pasirinkta tokia automobilio padėtis :

- 2L nuo tunelio pradžios iki kėbulo priekio;
- 5L nuo kėbulo galo iki tunelio galo;
- 1L nuo kėbulo centro iki tunelio šoninių sienų;
- 2L – tunelio plotis;
- 2L – tunelio aukštis.

Matavimams atlikti tyrėjai pasitelkė vidutinį Reinoldso Naviero-Strokeso (angl. *Reynolds-averaged-Navier-Stroke*) lygčių modelį kuris paremtas standartiniu k- ϵ turbulentiniu modeliu. Analizė atlikta trims skirtingiems variantams: automobiliui kaip pilnaviduriam kūnui (A); automobiliui su visais papildomais komponentais (variklis, važiuoklė ir t.t.) (B); automobiliui su visais papildomais komponentais bei galiniu aptaku (C). Visiems tyrimams pasirinktas 40 m/s vėjo greitis.

Tuomet tyrėjai, išanalizavę gautus duomenis, pradėjo automobilio komponentų modifikavimą, siekiant pagerinti aerodinamines charakteristikas. Patobulinti tokie komponentai kaip priekinės dalies ventiliacinių kiaurymių išdėstymas ir kiekis, valstybinio numerio pozicija, šoninių oro angų forma bei pozicija, stogo aukštis bei forma, galinis aptakas ir kt.

Galiausiai tyrėjai pateikė išvadą, kad automobilio prispaudimo jėga ir koeficientas sėkmingai pagerinti su sąlyginai nedideliu pasipriešinimo koeficiento vertės išaugimu. Galutinio modelio pasipriešinimo koeficiento vertė gauta 0,438 su 566,18 N prispaudimo jėga. Tai suteikia automobiliui pakankamą stabilumą realioms testavimo sąlygoms.

1.5. Apibendrinimas

Išanalizavus keletą mokslinių straipsnių, tyrimų aprašymų, projektų eigos ataskaitų bei kitų mokslinės literatūros leidinių, galima daryti tokį apibendrinimą:

1. Pagrindiniai du metodai, naudojami sportinių automobilių aerodinamikos tyrimuose yra: eksperimentinis metodas vėjo tunelyje, su (dažniausiai) pagal mastelį sumažintu transporto priemonės modeliu bei kompiuterinė skysčių dinamika. Lyginant daugelio tyrimų rezultatus, galima susidaryti nuomonę, kad dabartinės kompiuterinės skysčių dinamikos technologijos yra gana artimos tyrimams vėjo tuneliuose, nors jos ir neįvertina visų galimų kintamųjų, veikiančių realiomis sąlygomis. Dėl šios priežasties galima teigti, kad naudojantis kompiuterine skysčių dinamika gauti rezultatai bus pakankamai arti tiesos ir juos galima naudoti tyrime.
2. Keletoje iš publikacijų tyrėjai pažymėjo, kad nors ir dažniausiai aerodinaminiai tyrimai yra atliekami su visu transporto priemonės modeliu, dažnu atveju verta atskirai iširti ir kiekvieną iš

- svarbesnių papildomų aerodinaminių komponentų (tokių kaip aptakai, difuzoriai ir kt.). Tai leidžia dar prieš tyrimą suprojektuoti ir atlikti reikiamus pakeitimus atskiriems komponentams tam, kad bendroje automobilio tyrimo stadijoje būtų žinoma, kad tie komponentai veikia kaip įmanoma efektyviai ir jų koreguoti nebereikia.
3. Populiariausias metodas, naudojamas skaitinėje sportinių automobilių aerodinamikos analizėje yra vidutinis Reinoldso Naviero-Strokso (angl. Reynolds-averaged-Navier-Stroke) lygčių metodas, o dažniausiai naudojami turbulentiniai modeliai yra: standartinis $k-\varepsilon$ (RKE) turbulentinis modelis; Abe-Kondoho-Naganoso $k-\varepsilon$ (AKN) turbulentinis modelis; *Shear stress transport* $k-\varepsilon$ (SST) turbulentinis modelis.
 4. Remiantis visų išnagrinėtų tiriamųjų straipsnių pagalba, galima teigti, kad labiausiai tiriami ir nagrinėjami aerodinaminiai rodikliai yra:
 - Aerodinaminis pasipriešinimo koeficientas ir jėga;
 - Aerodinaminis kėlimo (prispaudimo) koeficientas ir jėga;
 - Statinis slėgis automobilio kėbulo paviršiuje.
 5. Tiriant sportinį automobilį naudojant kompiuterinę skysčių dinamiką, verta atskirai ištirti automobilį, kaip vientisą pilnavidurį kūną, bei automobilį su visais papildomais komponentais. Tai leidžia nustatyti komponentų įtaką bendrai sportinio automobilio aerodinamikai.

2. Tiriamoji dalis

2.1. Tyrimo metodika

Pirmajame skyriuje išanalizavus mokslinę literatūrą bei susipažinus su įvairiais mokslininkų ir tyrėjų atliktais tyrimais nuspręsta, kad šiam tyrimui atlikti pasitelkiama tokia metodika ir priimamos tokios prielaidos:

- tyrimams atlikti pasitelkiama skaičiuojamoji skysčių/dujų tekėjimo dinamika (angl. *Computational Fluid Dynamics – CFD*). Siekiant sutaupyti kaštų, laiko ir dėl sudėtingo prieinamumo prie vėjo tunelių įrangos, kompiuterinė skysčių dinamika pasirinkta kaip priimtinausias tyrimo metodas. Šis metodas leis tyrimą atlikti daug kartų pakartotinai, keičiant skirtingus rodiklius nesunaudojant kaštų naujų modelių gamybai;
- dujų tekėjimo dinamikai realizuoti panaudojamas kompiuterinio paketo *SolidWorks 2020* priedas *Flow Simulation*. Šio priedo paskirtis yra greitai, sąlyginai tiksliai ir nesunkiai atkurti skysčių ir dujų tėkmę aplink (arba pro) kūnus, siekiant apskaičiuoti bei išmatuoti jų savybes ir galimybes [18];
- virtualaus vėjo tunelio, kuriame atliekami tyrimai, parametrai:
 - automobilio modelio pozicionavimas virtualiame tunelyje pasirinktas remiantis 1.4.5 poskyryje aprašyto tyrimo duomenimis: 2L nuo tunelio pradžios iki automobilio pradžios, 5L nuo automobilio galo iki tunelio pabaigos, 1L nuo automobilio šonų iki tunelio šonų, 2L tunelio plotis ir 2L tunelio aukštis. Čia L – naudojamo automobilio modelio ilgis;
 - virtualaus tunelio terpė – oras, kurio tankis $1,204 \text{ kg/m}^3$ [19];
 - Oro tėkmės tipas – mišrus (laminarinis¹ ir turbulentinis²);
 - Priimama prielaida, kad oras tyrimo laikotarpiu yra nespūdas;
 - Tiriamojo automobilio modelio paviršiaus šiurkštumas – nevertinamas;
 - Tiriamojo automobilio modelio paviršiaus būseną – adiabatine³;
 - Vairuotojo įtaka oro tekmei – nevertinama;

Siekiant ištirti automobilio aerodinamines savybes, su jo 3D modeliu atliekami keli tyrimai, apimantys skirtingus komponentus arba modelį veikiančius veiksniai. Pirmasis tyrimas atliekamas keičiant automobilio modelio galinio aptako elemento posvyrio (atakos⁴) kampą. Pasirenkamos kelios skirtingos atakos kampo vertės ir kiekviena iš jų ištiriama prie skirtingų oro tėkmės greičių. Tokiu būdu ištiriamas galinio aptako elemento atakos kampo diapazonas siekiant nustatyti tokį kampą, prie kurio pasiekiamas didžiausias prispaudimo koeficientas.

Sekantis tyrimas atliekamas su galiniu aptaku, keičiant vieno iš jo aerodinaminių elementų geometrinius parametrus t. y. jo profilio formą. Tokiu būdu siekiama ištirti kokią įtaką aerodinaminiam komponentams turi tokios profilio ypatybės kaip profilio išgaubtumas, kraštinių užapvalinimas ir kt. dydžiai.

¹ Laminarinis tekėjimas – skysčio arba dujų klampusis tekėjimas tarpusavyje nesimaišančiais plonais sluoksniais [20].

² Turbulentinis tekėjimas – skysčio, dujų arba plazmos tekėjimas, kurio metu srauto greitis, temperatūra, slėgis, tankis ir kiti parametrai kiekviename srauto taške kinta netvarkingai [21].

³ Adiabatine būseną – kuomet tarp kūno paviršiaus ir aplinkos nevyksta šilumos mainai [22].

⁴ Atakos kampas – kampas tarp laisvojo srauto krypties ir elemento profilio stygos [23].

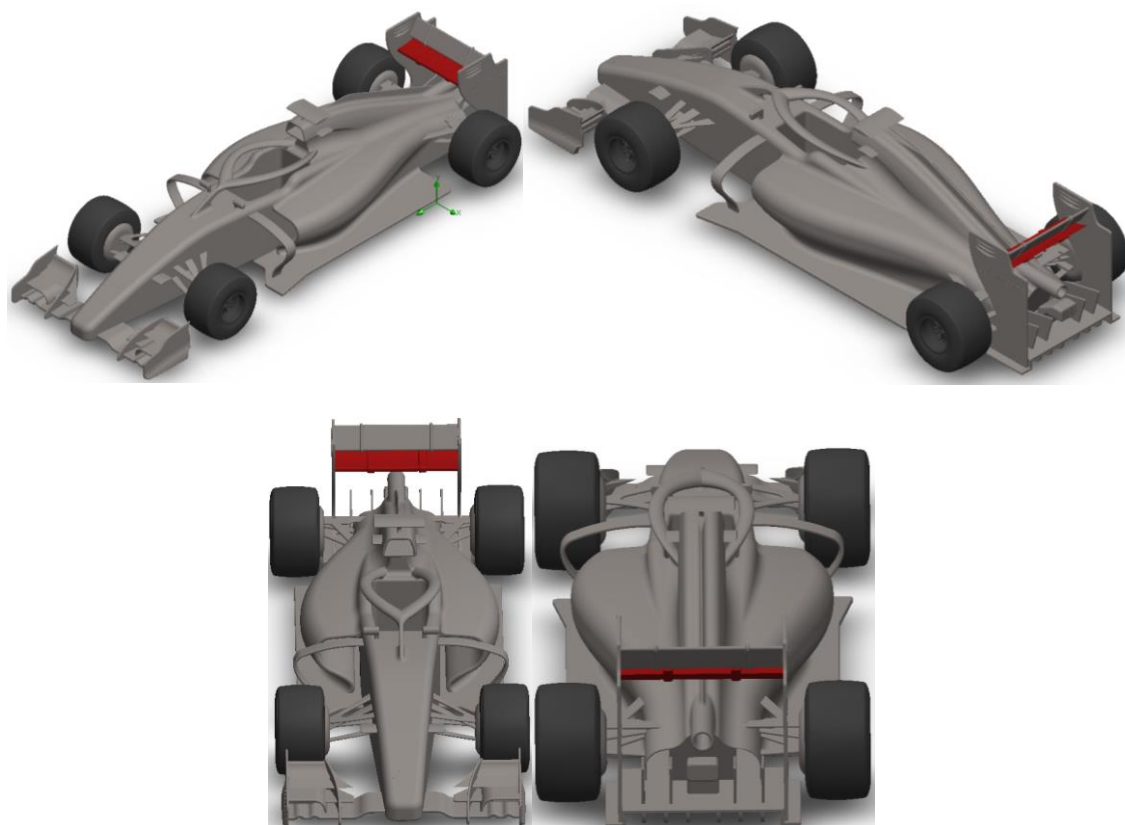
Toliau tiriama kelio paviršiaus įtaka bendriems automobilio aerodinaminiais rodikliams, analizuojant identiškus automobilio 3D modelius, kai automobilio ratai liečia kelio paviršių ir kai automobilis „kabo“ ore. Tokiu būdu galima nustatyti kokią įtaką bendrai automobilio aerodinamikai turi kelias.

Galiausiai atliekamas tyrimas keičiant automobilį supančios aplinkos parametrus. Siekiant nustatyti kokią įtaką bendrai automobilio aerodinamikai turi judėjimas skirtingose aplinkos sąlygose, keičiami tokie parametrai kaip oro temperatūra, aukštis virš jūros lygio bei oro drėgnumas.

Kiekviename iš aukščiau aprašytų tyrimų matuojami arba skaičiuojami tie patys aerodinaminiai dydžiai arba parametrai, kurie atsiranda automobiliui judant [4]. Vienas iš jų yra aerodinaminė pasipriešinimo jėga, kuri atsiranda dėl oro molekulių trinties su automobilio kėbulo paviršiumi. Sekantis dydis yra aerodinaminė prispaudimo jėga, kuri, dėl įvairių aerodinaminių komponentų, tokių kaip aptakai, spaudžia automobilį prie kelio paviršiaus. Tyrimų pagalba nustatius šias dvi jėgas, pasinaudojant jų skaitinėmis vertėmis, apskaičiuojami atitinkamai aerodinaminiai pasipriešinimo ir prispaudimo koeficientai. Pastarieji dydžiai lyginami keičiant automobilio ar jo aplinkos parametrus.

2.2. 3D modelis

Atlikus mokslinės literatūros analizę pastebėta, kad nagrinėtoje literatūroje dažniausiai tiriamas sportinio automobilio kėbulo tipas yra „F-1“ formulės bolidai arba į šį kėbulą panašios transporto priemonės [12-15]. Tokio tipo bolidai turi daug aerodinaminių komponentų bei skirtingų jų konfigūracijų, kurias keičiant galima išgauti skirtingas aerodinamines savybes. Dėl šios priežasties pasirinktas būtent tokio tipo kėbulo bolidas.



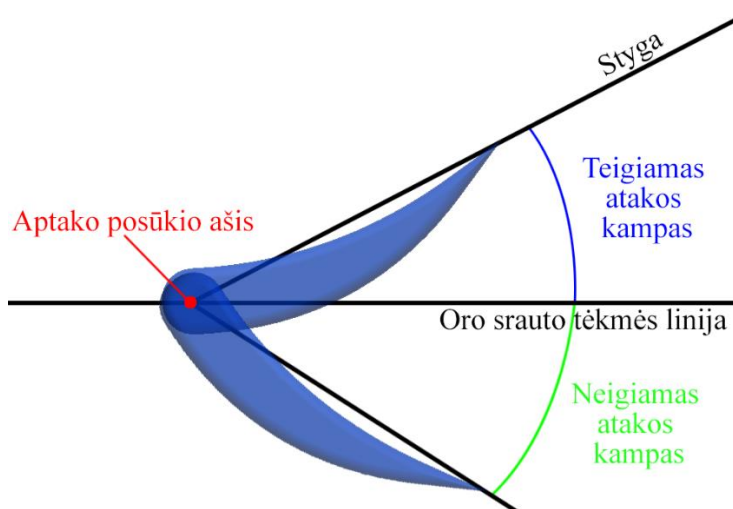
15 pav. Bolido 3D modelis [23]

Tyrimams atlikti naudojamas Šeileš Rojaus (Shaylesh Roy) sukurtas bolido 3D modelis [23] (žr. **15 pav.**). Šį modelį sudaro keletas skirtingų aerodinaminių elementų (galinis ir priekinis aptakai, galinis difuzorius).

2.3. Tyrimas

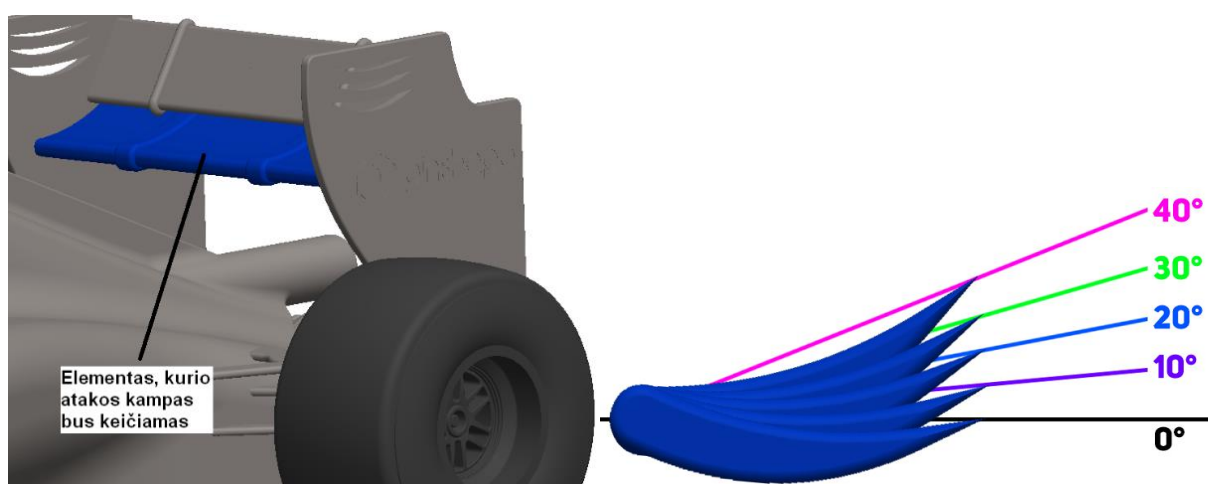
2.3.1. Galinio aptako posvyrio (atakos) kampo įtaka bolido aerodinamikai

Kadangi atakos kampas apibrėžiamas kaip kampas tarp oro srauto tėkmės linijos ir aptako profilio stygos [24], šiame tyrime priimsime, kad nustatant atakos kampo vertę, oro srauto tėkmės linija brėžiama horizontaliai, per aptako elemento posūkio ašies liniją. Kampo vertės teigiamos, kai kampas virš oro srauto krypties linijos ir neigiamas – kai vertės žemiau šios linijos (žr. **16 pav.**).



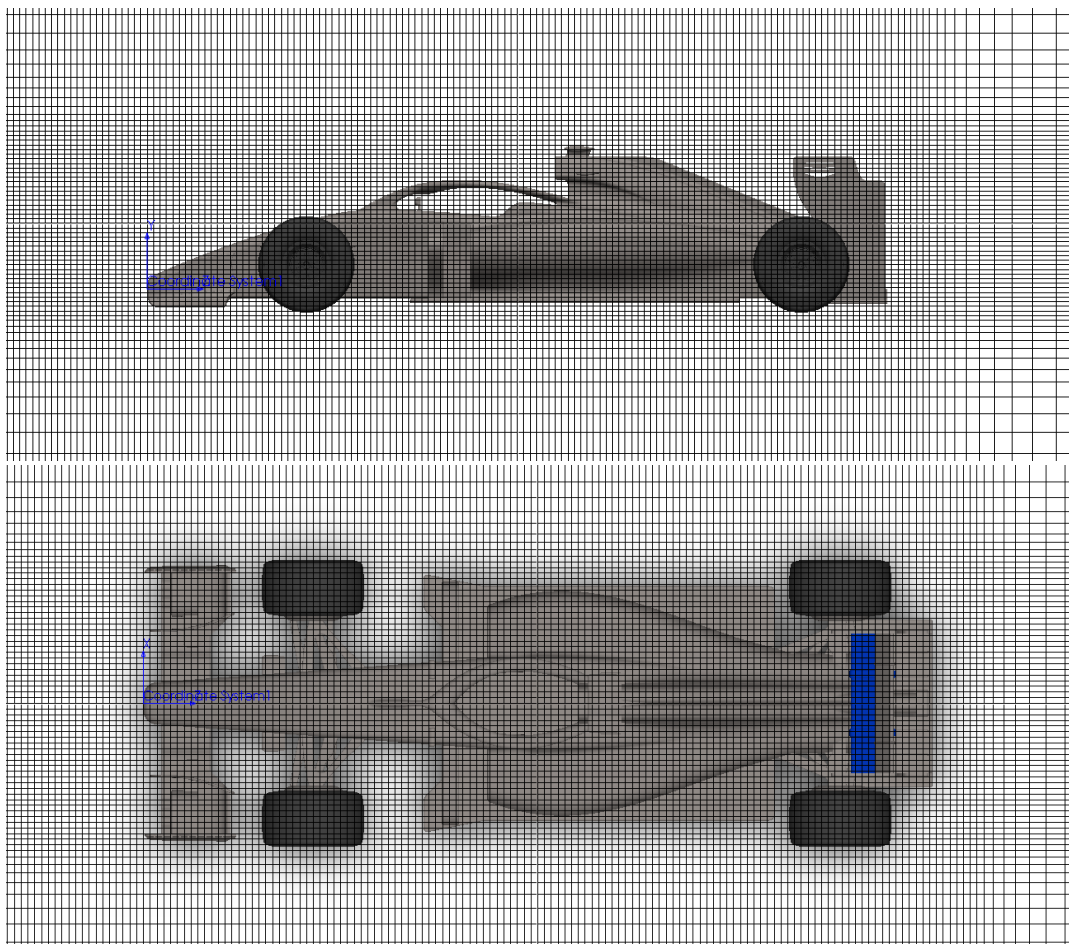
16 pav. Atakos kampo vizualizacija

Pirmajai tyrimo daliai atlikti, pasirinkto bolido 3D modelis modifikuotas į 5 variantus: 0°, 10°, 20°, 30° ir 40° galinio aptako elemento atakos kampai su oro tėkmės linija (žr. **17 pav.**). Toks režis pasirinktas todėl, nes viršutinė vertė (40°) yra maksimalus elemento posūkis nekontaktuojant su kitu galinio aptako elementu, o apatinė vertė (0°) – nes mažesnės vertės atakos kampas sportiniuose automobiliuose neatlieka naudingo darbo t. y. nespaudžia automobilio prie kelio paviršiaus.



17 pav. Tyrime naudojami galinio aptako atakos kampo variantai

Siekiant užtikrinti kaip įmanoma tikslesnius tyrimo duomenis, CFD tiriamojo modelio tinklelis pasirinktas netolygaus tankio. Tinklelis sutankintas zonose aplink bolido kėbulą ir praretintas toliau nuo kėbulo esančiose zonose (žr. **18 pav.**). Tokiu būdu oro tėkmės, kur jos tikslumas yra svarbus (aplink bolido kėbulą), rodikliai gaunami didesnio tikslumo nei tolesnėse zonose, kur jos tėkmės rodiklių tikslumas nėra toks svarbus nustatant aerodinamines pasipriešinimo ir prispaudimo jėgas.



18 pav. Modelio baigtinių elementų tinklelis

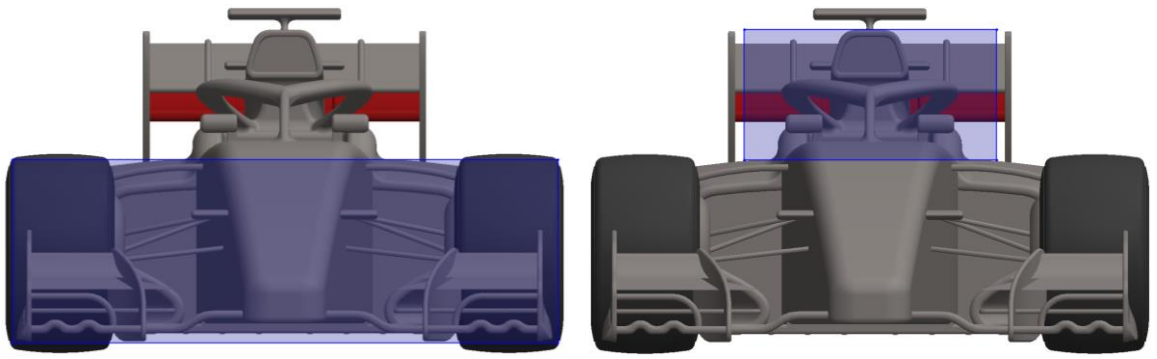
Šioje tyrimo dalyje analizuojama aerodinaminio pasipriešinimo bei aerodinaminio kėlimo/prispaudimo koeficientų priklausomybė nuo bolido galinio aptako atakos kampo bei oro tėkmės (važiavimo) greičio. Šie koeficientai apskaičiuojami pagal formules [25]:

$$C_D = \frac{2F_D}{\rho v^2 A};$$

$$C_L = \frac{2F_L}{\rho v^2 A};$$

čia F_D – aerodinaminė pasipriešinimo jėga, N; F_L – aerodinaminė prispaudimo jėga, N; ρ – oro tankis, kg/m^3 ; v – oro tėkmės greitis, m/s; A – priekinis skerspjūvio plotas, m^2 .

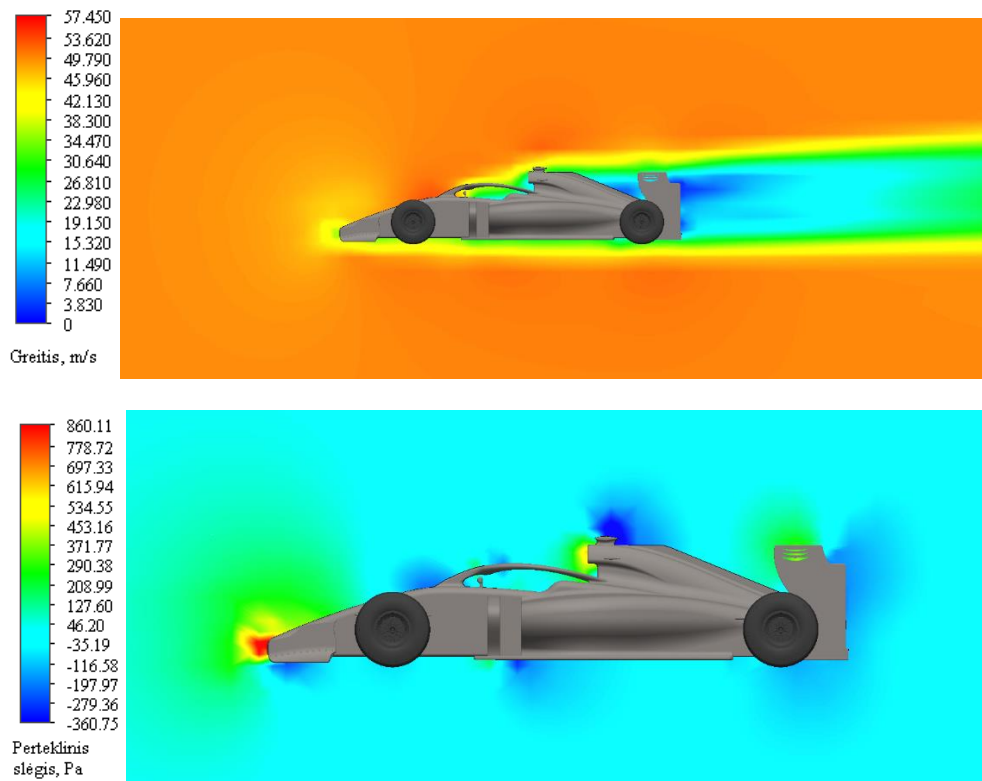
Dydžiai F_D ir F_L šiame tyrime nustatomi pasinaudojant CFD, sprendžiant erdvinį dujų tekėjimo dinamikos uždavinį programiniu paketu *SolidWorks Flow Simulation*. Plotas A apskaičiuotas sudedant dvi bolido sritis – viršutinę ir apatinę (žr. **19 pav.**). Sričių dydžiai parinkti taip, kad į sritį patenkančios tuščios erdmės maždaug „atsvertų“ į sritį nepatenkančių komponentų skerspjūvio plotą.



19 pav. Bolido priekinis skerspjūvio plotas

Pagal **19 pav.** pateiktas schemas, apatinės dalies plotas yra $1,027 \text{ m}^2$, o viršutinės – $0,351 \text{ m}^2$. Todėl, bendras bolido priekinis skerspjūvio plotas priimtas lygus $1,378 \text{ m}^2$.

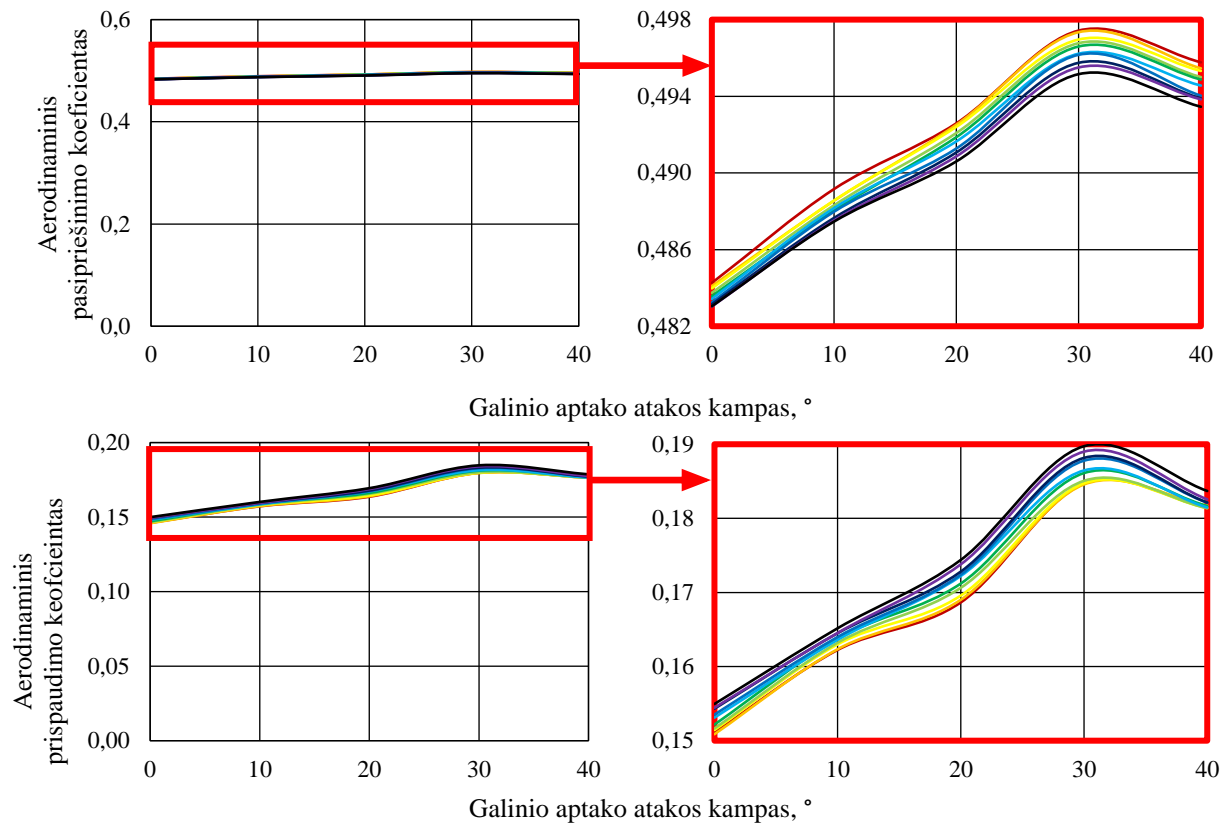
Perteklinio slėgio⁵ ir oro tėkmės greičio pasiskirstymas kai važiavimo greitis yra 50 m/s , o atakos kampas 30° , pateiktas **20 pav.** Žvelgiant į oro tėkmės greičio pasiskirstymą (viršuje) pastebima, kad greitis sumažėja už bolido esančiose zonose ir išauga virš bolido. Aukšto perteklinio slėgio zonos yra bolido priekyje, ties oro paėjimo anga bei ties galiniu aptaku. Tokia kitimo tendencija išlieka prie visų oro tėkmės bei atakos kampo verčių.



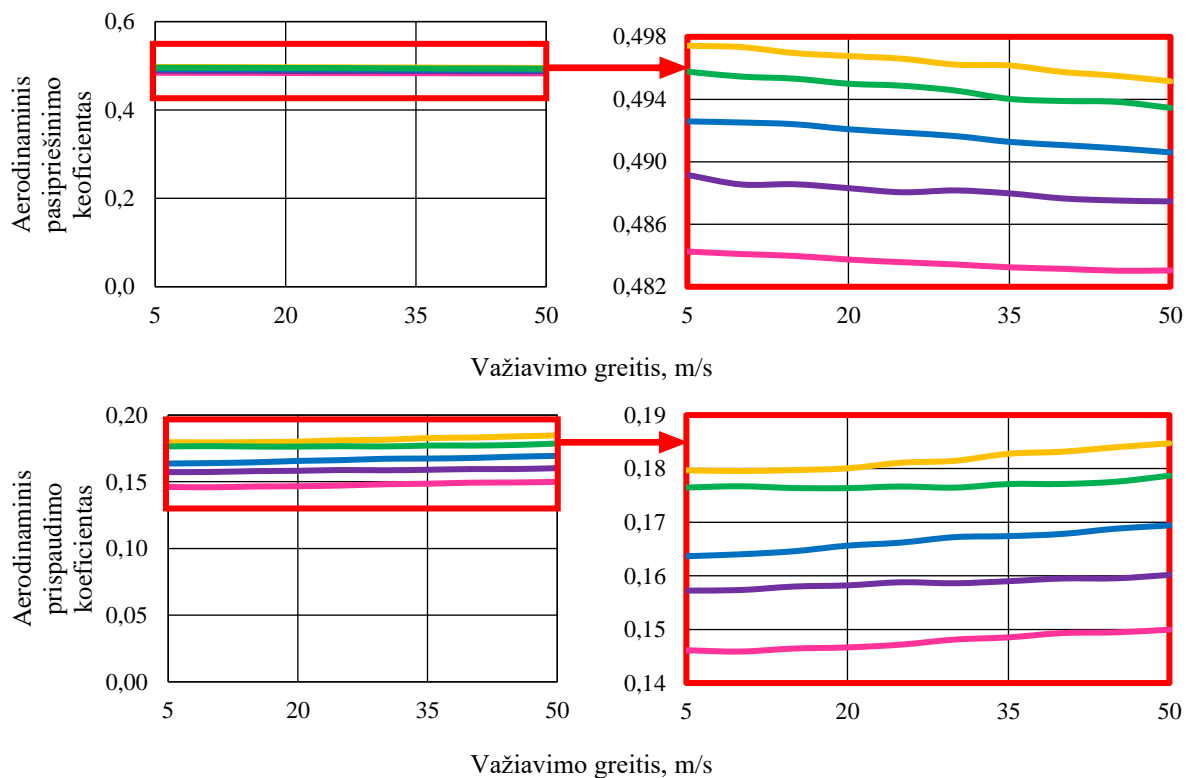
20 pav. Oro tėkmės greičio (viršuje) ir perteklinio slėgio (apačioje) pasiskirstymas, kai oro tėkmės greitis yra 50 m/s , o atakos kampas 30°

Prie pasirinktų atakos kampo verčių nustatyti F_D , F_L , C_D ir C_L pateikiami **3 lentelėje** (žr. **1 priedą**).

⁵ Perteklinis slėgis – absoliutinio ir atmosferos slėgių skirtumas [29]



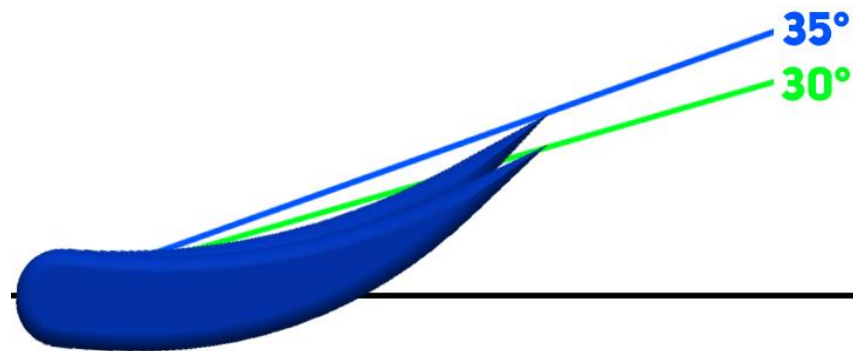
21 pav. Aerodinaminio pasipriešinimo ir prispaudimo koeficientų priklausomybė nuo galinio aptako atakos kampo, kai oro tėkmės (važiavimo greitis) yra: (—) – 5 m/s, (—) – 10 m/s, (—) – 15 m/s, (—) – 20 m/s, (—) – 25 m/s, (—) – 30 m/s, (—) – 35 m/s, (—) – 40 m/s, (—) – 45 m/s ir (—) – 50 m/s



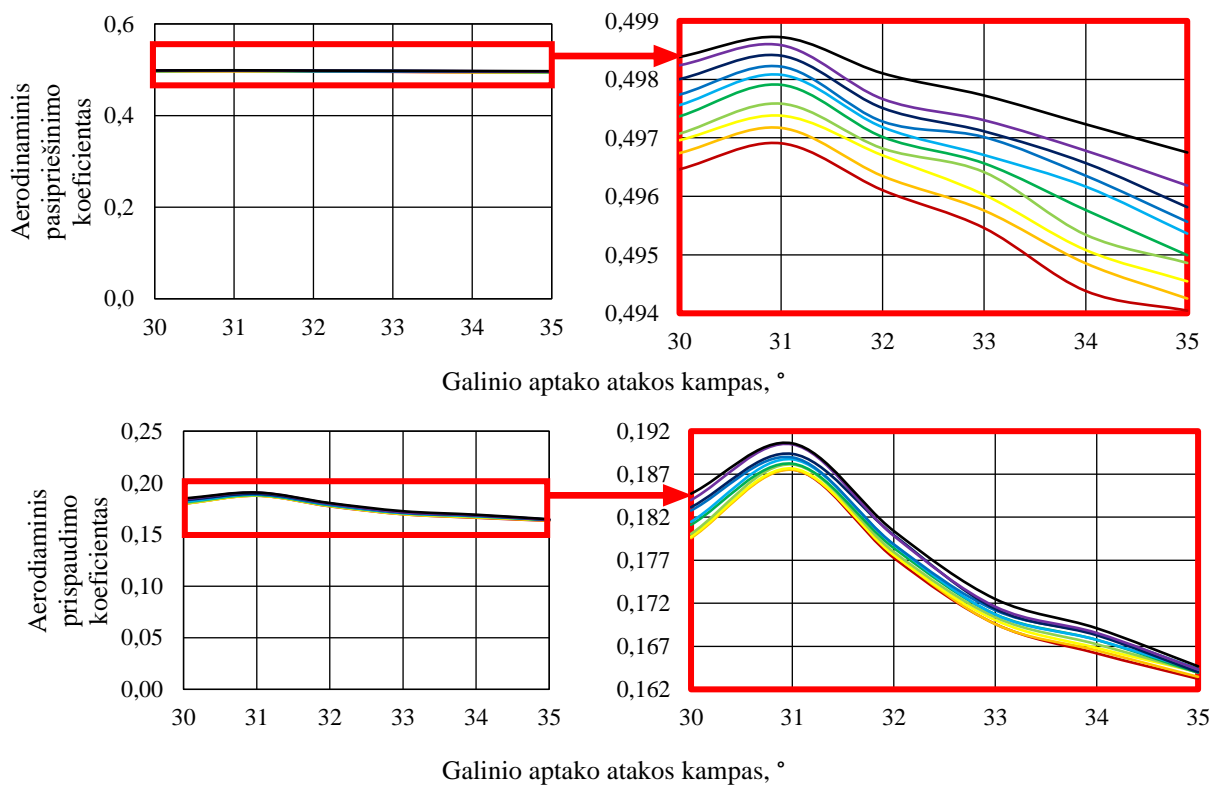
22 pav. Aerodinaminio pasipriešinimo ir prispaudimo koeficientų priklausomybė nuo oro tėkmės (važiavimo) greičio, kai atakos kampas yra: (—) – 0°, (—) – 10°, (—) – 20°, (—) – 30° ir (—) – 40°

Aerodinaminio pasipriešinimo ir prispaudimo koeficientų priklausomybė nuo atakos kampo ir važiavimo greičio atvaizduota grafikuose (žr. **21** ir **22 pav.**). Analizuojant šiuos grafikus galima pastebėti, kad padidinus atakos kampą nuo 0° iki maždaug 30° , aerodinaminis pasipriešinimo koeficientas išauga apie 2,6 %, o prispaudimo – apie 22,9 %, toliau didinant atakos kampą (nuo 30° iki 40°), pasipriešinimo ir prispaudimo koeficientai ima mažėti: sumažėja atitinkamai 0,4 % ir 2,5 %.

Kadangi projektuojant sportinius automobilius ir modeliuojant jų aerodinames savybes siekiama, kad aerodinaminis pasipriešinimo koeficientas būtų kaip įmanoma mažesnis, tuo pat metu turint kaip įmanoma didesnę prispaudimo koeficientą, iš **21-22 pav.** pateiktų rezultatų galima spręsti, kad palankiausias aerodinaminės savybės susidaro, kai atakos kampas yra apytiksliai $30-35^\circ$.

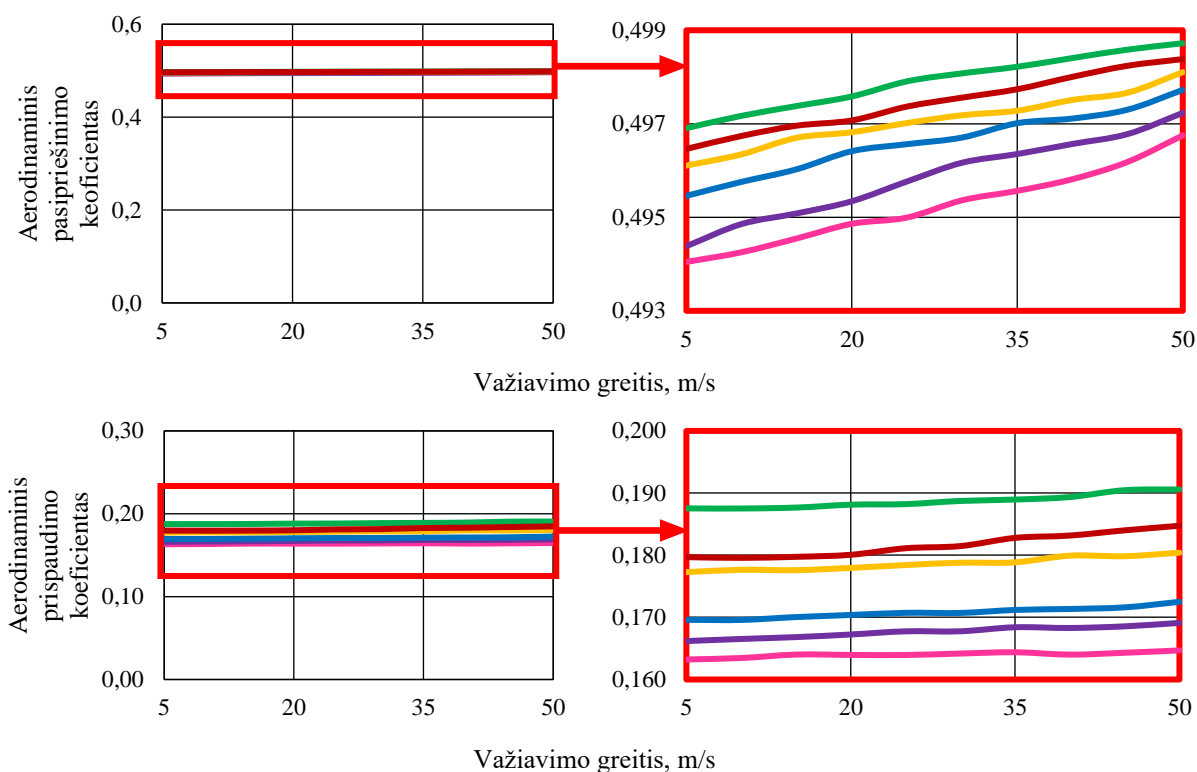


23 pav. Patikslintas atakos kampo verčių diapazonas



24 pav. Aerodinaminio pasipriešinimo ir prispaudimo koeficientų priklausomybė nuo patikslinto galinio aptako atakos kampo, kai oro tėkmės (važiavimo greitis) yra: (—) – 5 m/s, (—) – 10 m/s, (—) – 15 m/s, (—) – 20 m/s, (—) – 25 m/s, (—) – 30 m/s, (—) – 35 m/s, (—) – 40 m/s, (—) – 45 m/s ir (—) – 50 m/s

Siekiant nustatyti atakos kampą, prie kurio pasiekama didžiausia aerodinaminio prispaudimo vertė, tyrimas yra pakartojamas atakos kampą keičiant ribose nuo 30° iki 35° žingsniu kas 1° (žr. **23 pav.**). Tiriama prie tokių pačių oro tėkmės (važiavimo) greičio verčių. Patikslinto tyrimo rezultatai pateikiami **4 lentelėje** (žr. **1 priedą**).



25 pav. Aerodinaminio pasipriešinimo ir prispaudimo koeficientų priklausomybė nuo oro tėkmės (važiavimo) greičio, kai patikslintas atakos kampas yra: (—) – 35°, (—) – 34°, (—) – 33°, (—) – 32°, (—) – 31° ir (—) – 30°

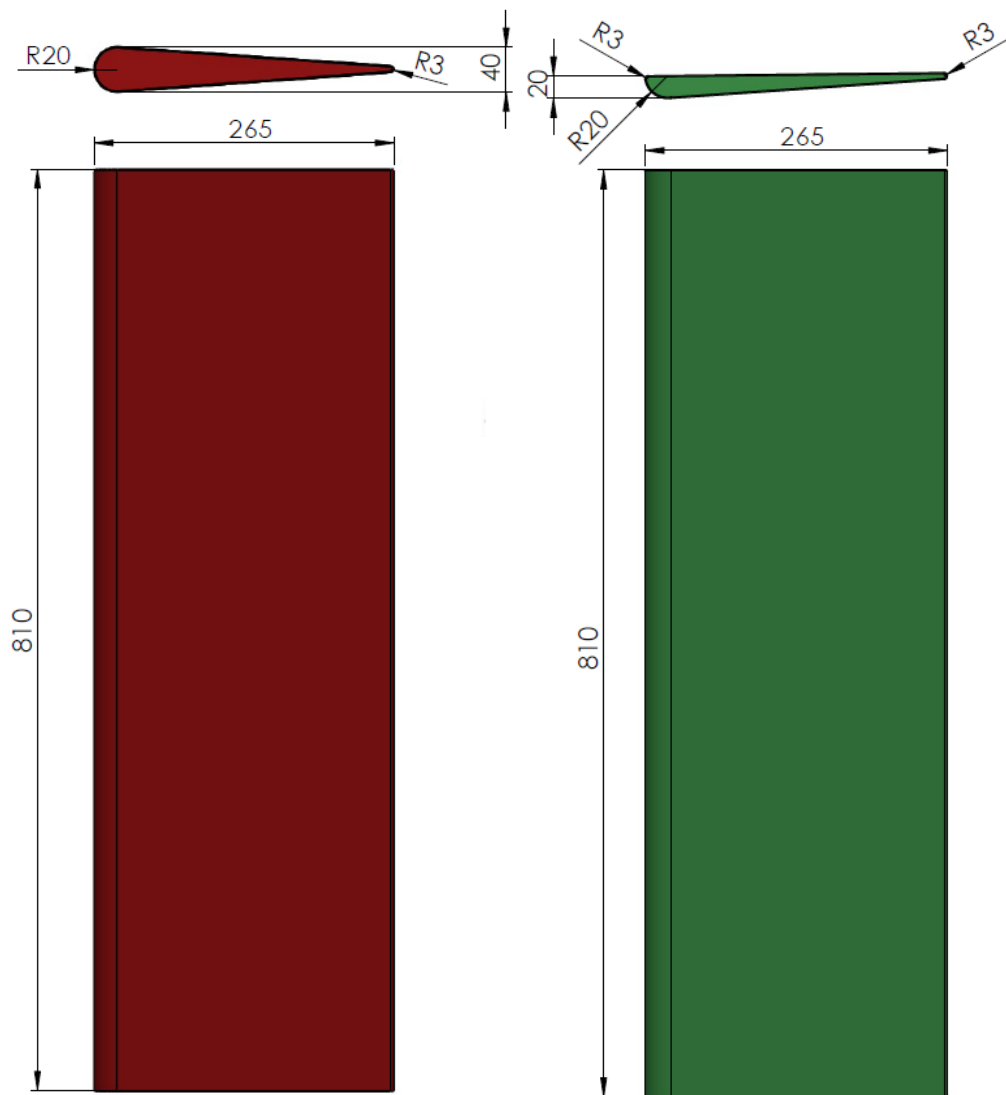
Aerodinaminio pasipriešinimo ir prispaudimo koeficientų priklausomybė nuo patikslinto atakos kampo ir važiavimo greičio pateikta **24** ir **25 pav.** Iš grafikų matosi, kad didžiausias prispaudimo koeficientas gaunamas, kai galinio aptako atakos kampas yra 31°.

Iš šių duomenų galima daryti išvadą, kad esant tokiai bolido ir galinio aptako konstrukcijai, palankiausias aerodinamines sąlybes bolidas turės kai galinio aptako atakos kampas yra 31°.

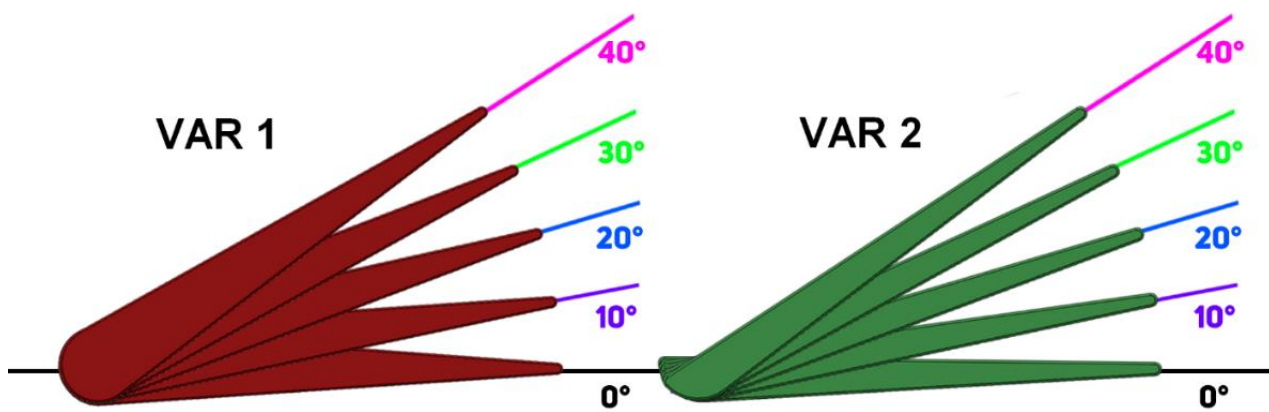
2.3.2. Galinio aptako profilio formos įtaka bolido aerodinamikai

Sportinių automobilių aptakų projektavime yra naudojama keletas skirtingų profilio formų. Visus profilius sieja vienas bendras požymis – lašo (sparno) forma arba forma, artima lašui. Tokios formos aptakai sukuria didžiausią prispaudimo jėgą ir veikia efektyviausiai. Sekančio tyrimo metu ištirti modifikuoti galinio aptako elemento profiliai (žr. **26 pav.**).

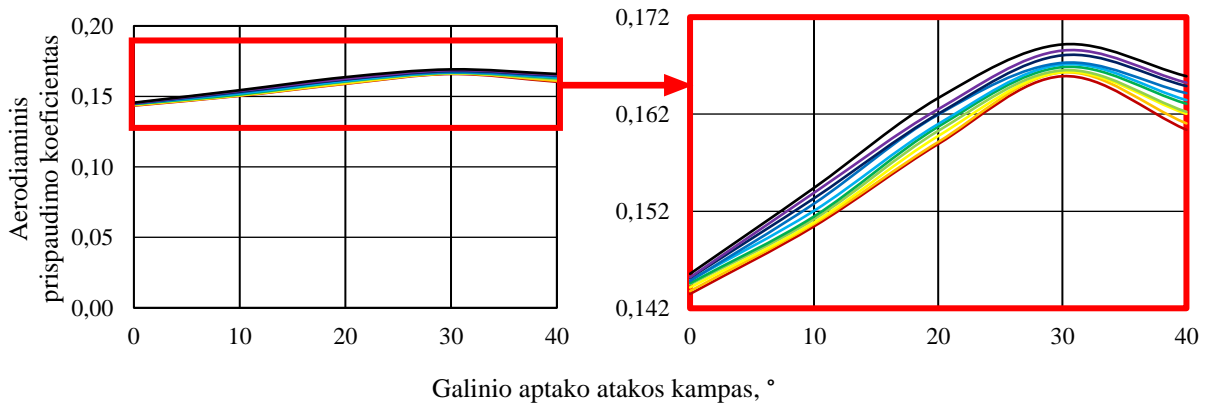
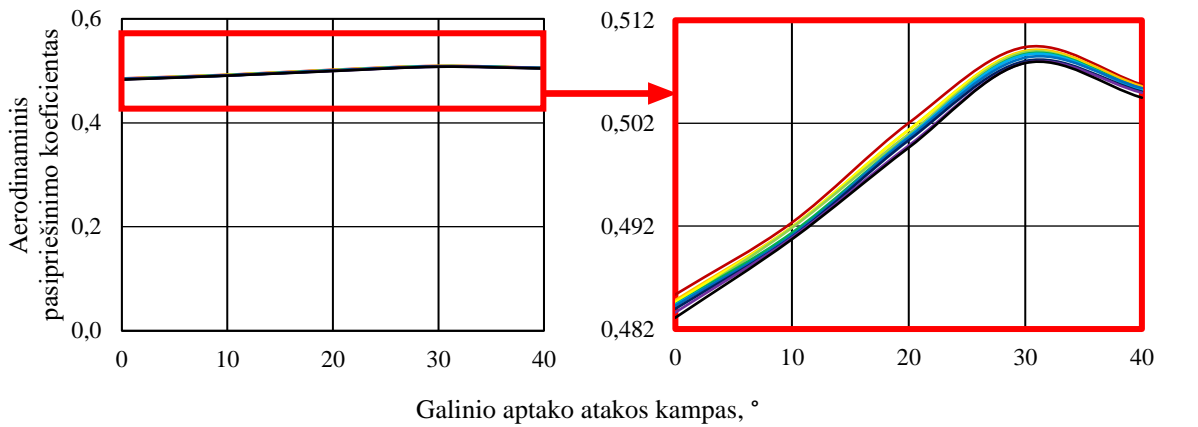
Siekiant patikrinti šių profilių įtaką bolido aerodinamikai bei palyginti juos tarpusavyje, atliekamas tyrimas su bolidu, kuriame panaudoti modifikuoti galinio aptako elementai su skirtingais atakos kampais (žr. **27 pav.**). Su modifikuotais aptakais nustatyti F_D , F_L , C_D ir C_L pateikiami **5** ir **6 lentelėse** (žr. **2 priedą**). „VAR1“ ir „VAR2“ aptakų modifikacijų pasipriešinimo ir prispaudimo koeficientų priklausomybės nuo aptako atakos kampo pateiktos atitinkamai **28**, **29**, **30** ir **31 pav.**



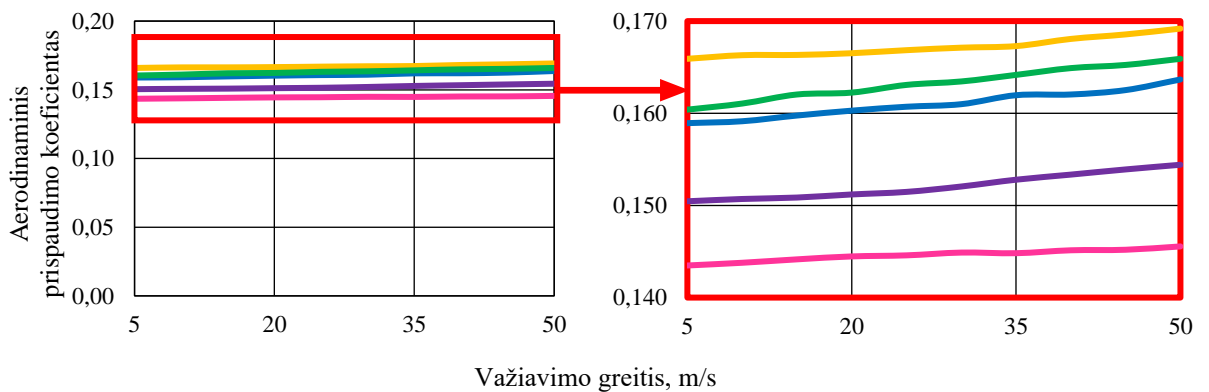
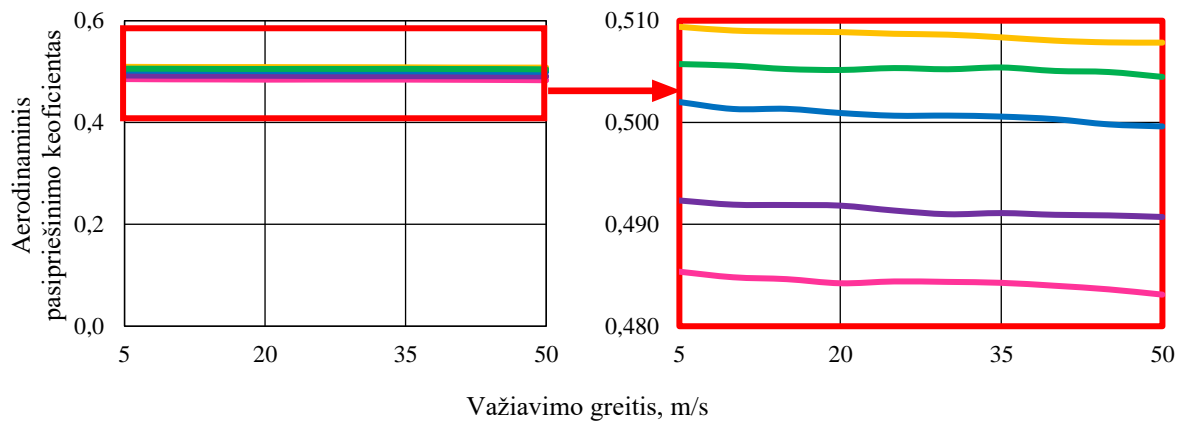
26 pav. Modifikuoti galinio aptako elemento skerspjūviai



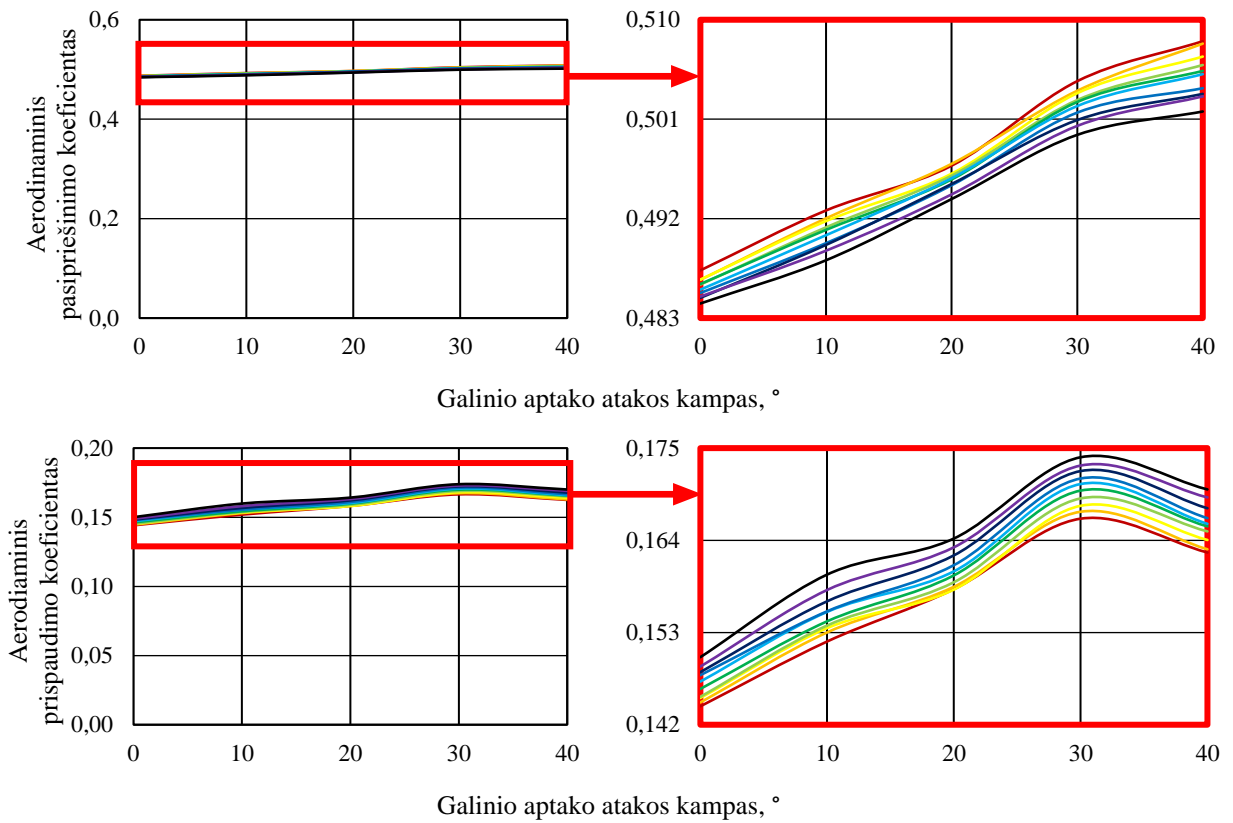
27 pav. Galinio aptako elemento modifikacijų tyrimo variantai



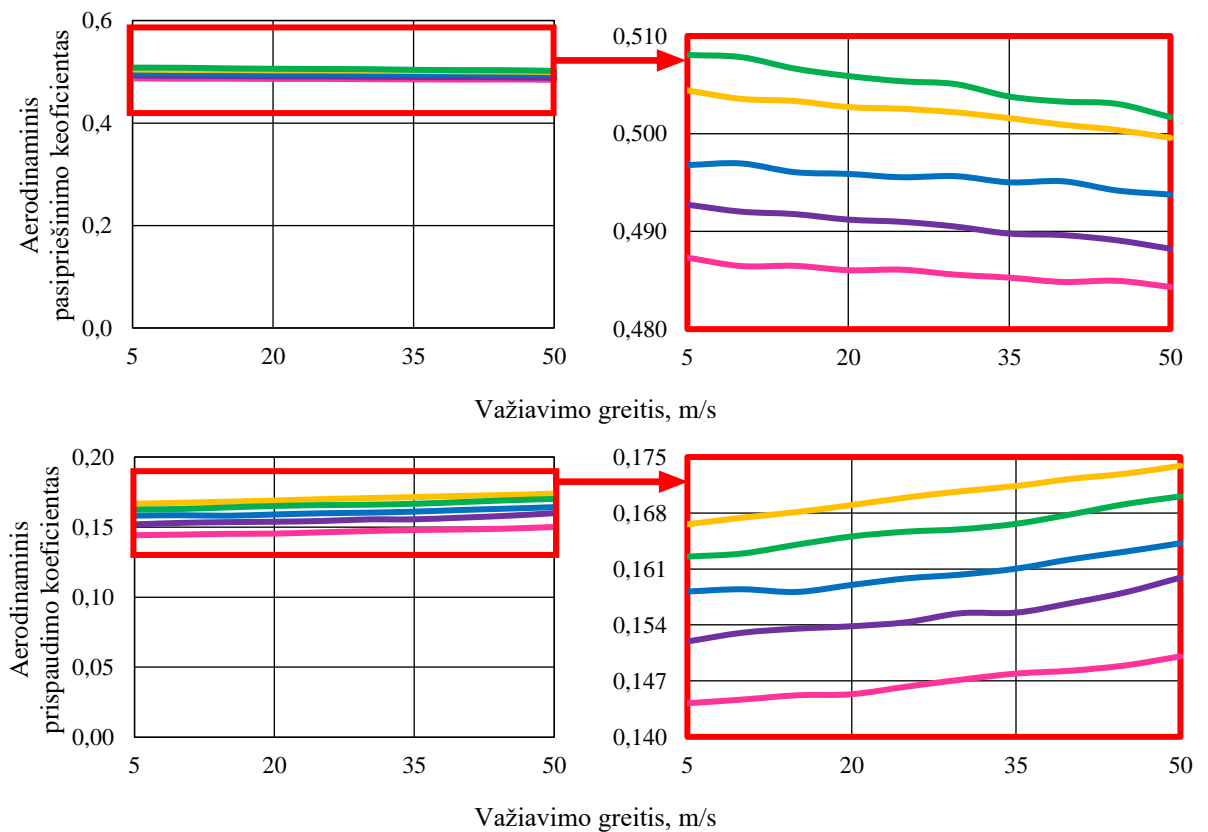
28 pav. „VAR 1“ aptako pasipriešinimo ir prispaudimo koeficientų priklausomybė nuo posvyrio (atakos kampo, kai oro tėkmės (važiavimo greitis) yra: (—) – 5 m/s, (—) – 10 m/s, (—) – 15 m/s, (—) – 20 m/s, (—) – 25 m/s, (—) – 30 m/s, (—) – 35 m/s, (—) – 40 m/s, (—) – 45 m/s ir, (—) – 50 m/s



29 pav. „VAR 1“ pasipriešinimo ir prispaudimo koeficientų priklausomybė nuo važiavimo greičio, kai atakos kampas yra: (—) – 0°, (—) – 10°, (—) – 20°, (—) – 30° ir (—) – 40°



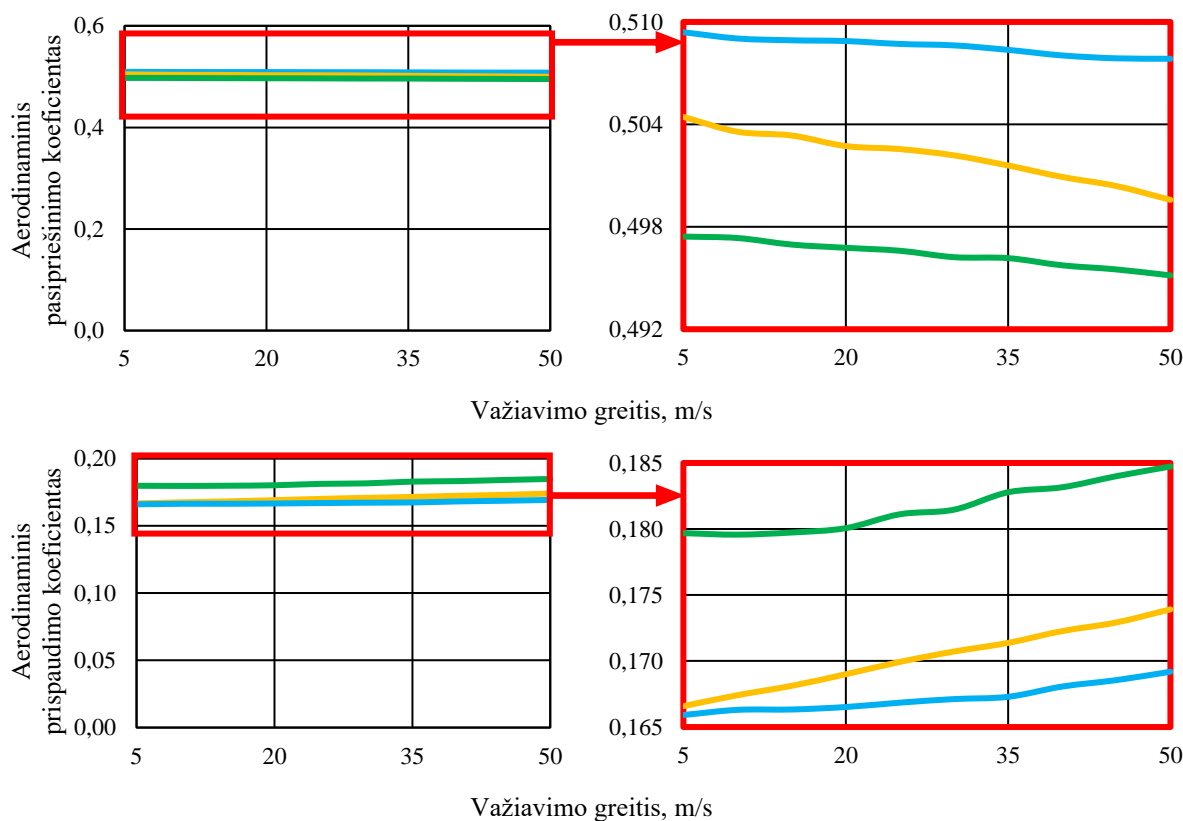
30 pav. „VAR 2“ aptako pasipriešinimo ir prispaudimo koeficientų priklausomybė nuo posvyrio (atakos) kampo, kai oro tėkmės (važiavimo greitis) yra: (—) – 5 m/s, (—) – 10 m/s, (—) – 15 m/s, (—) – 20 m/s, (—) – 25 m/s, (—) – 30 m/s, (—) – 35 m/s, (—) – 40 m/s, (—) – 45 m/s ir, (—) – 50 m/s



31 pav. „VAR 2“ pasipriešinimo ir prispaudimo koeficientų priklausomybė nuo važiavimo greičio, kai atakos kampas yra: (—) – 0°, (—) – 10°, (—) – 20°, (—) – 30° ir (—) – 40°

Pagal **28 pav.** grafikų duomenis, „VAR1“ aptako modifikacijos pasipriešinimo ir prispaudimo koeficientai ribose nuo 0° iki 30° atitinkamai išauga 5 % ir 15,6 %, o ribose nuo 30° iki 40° atitinkamai sumažėja 0,7 % ir 2,4 %. Palygimui, pradinio aptako varianto pasipriešinimo koeficientai ribose nuo 0° iki 30° išaugo atitinkamai 2,7 % ir 22,9 %, o ribose nuo 30° iki 40° atitinkamai sumažėjo 0,4 % ir 2,6 %. Sprendžiant iš to, kad pradinio aptako varianto pasipriešinimo koeficientas išaugo mažiau, o prispaudimo – daugiau, galima daryti išvadą, kad pradinis variantas yra tinkamesnis šiam bolidui.

Analogiškai žvelgiant į **30 pav.** grafikus, „VAR2“ aptako atakos kampą didinant iki 30° pasipriešinimo koeficientas išauga 3,4 % (lyginant su pradinio varianto 2,7 %), o prispaudimo koeficientas – 16 % (lyginant su pradinio varianto 22,9 %). Ribose nuo 30° iki 40°, „VAR2“ aptako pasipriešinimo koeficientas išauga 0,6 %, o pasipriešinimo – sumažėja 2,5 % (pradinio – atitinkamai 0,4 % ir 2,6 %). Taip pat kaip ir „VAR1“ aptako atveju, pradinis aptakas turi mažesnę pasipriešinimo ir didesnę prispaudimo koeficientus. Tačiau, „VAR2“ aptakas tose pačiose atakos kampo ribose turi mažesnes pasipriešinimo koeficiento vertes bei didesnes prispaudimo koeficiento vertes nei „VAR1“ aptakas. Iš to galima spręsti, kad šio aptako atliekamas naudingasis darbas (prispaudimas prie kelio) yra didesnis nei „VAR1“.



32 pav. Aerodinaminio pasipriešinimo ir prispaudimo koeficientų palyginimas, kai galinio aptako atakos kampas yra 30°, o aptako variantai: (—) – „VAR1“ modifikacija, (—) – „VAR2“ modifikacija ir (—) – pradinis)

Analizuojant **29 pav.** pateiktus duomenis, galima daryti išvadą, kad tiek pasipriešinimo tiek prispaudimo koeficientų priklausomybė nuo važiavimo greičio yra artima tiesinei priklausomybei. Važiavimo greitį padidinus 10 kartų (nuo 5 m/s iki 50 m/s), pasipriešinimo koeficientas sumažėja apie 0,4 %, o prispaudimo – išauga apie 2,5 %. Tuo tarpu pradinio aptako atitinkamai sumažėja 0,4

% ir išauga 2,4 %. Iš to galima spręsti, kad tiek „VAR1“, tiek pradinės aptako modifikacijų pasipriešinimo ir prispaudimo priklausomybė nuo oro tėkmės greičio yra artima viena kitai.

Važiavimo greitis, m/s

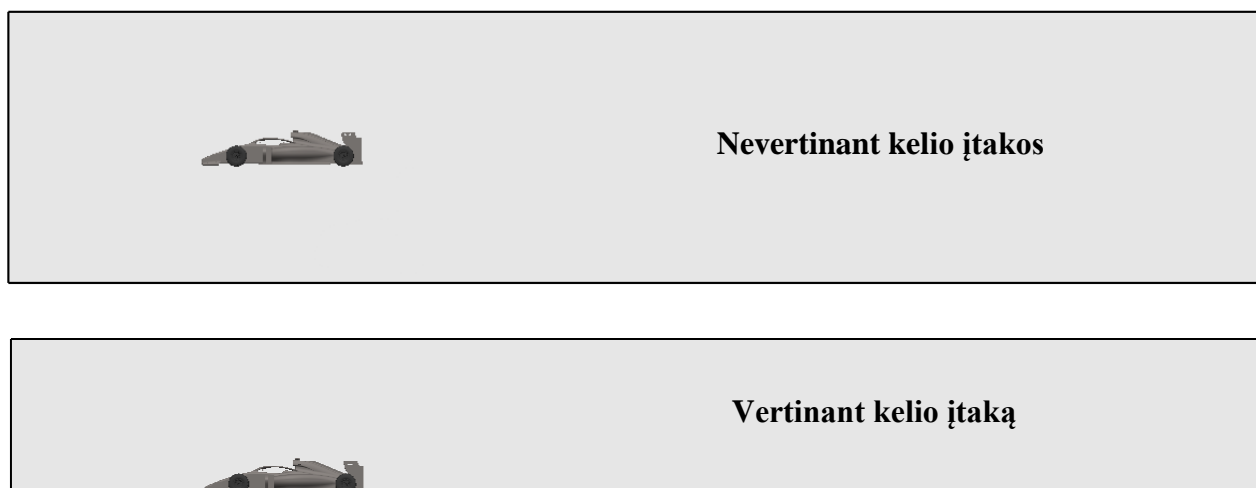
31 pav. grafikuose pavaizduota „VAR2“ aptako pasipriešinimo ir prispaudimo koeficientų priklausomybė nuo oro tėkmės greičio. Važiavimo greitį padidinus nuo 5 m/s iki 50 m/s, pasipriešinimo koeficientas sumažėja 0,9 %, o prispaudimo – išauga 4,4 % (pradinio aptako atitinkamai 0,4 % sumažėja ir 2,4 % išauga). Šiuo atveju galima pastebėti, kad pasipriešinimo koeficientui išliekant sąlyginai tokiam pačiam (vos 0,5 % skirtumas), prispaudimo koeficientas išauga beveik 2 kartus daugiau lyginant su pradiniu aptako variantu. Iš to galima spręsti, kad „VAR2“ aptakas, remiantis priklausomybe nuo oro tėkmės greičio, yra pranašesnis už „VAR1“ aptaką.

Taip pat, **29 pav.** ir duomenis būtų galima paaiškinti taip, kad didinant važiavimo greitį, oro srauto tėkmė aplink bolidą pasikeičia iš turbulentinės į laminarinę. Dėl šios priežasties, oro srautai mažiau sukūriuoja taip sumažindami pasipriešinimo koeficiento vertę ir tuo pačiu, dėl efektyvesnės oro tėkmės, išauga prispaudimo koeficientas.

2.3.3. Kelio įtaka bolido aerodinamikai

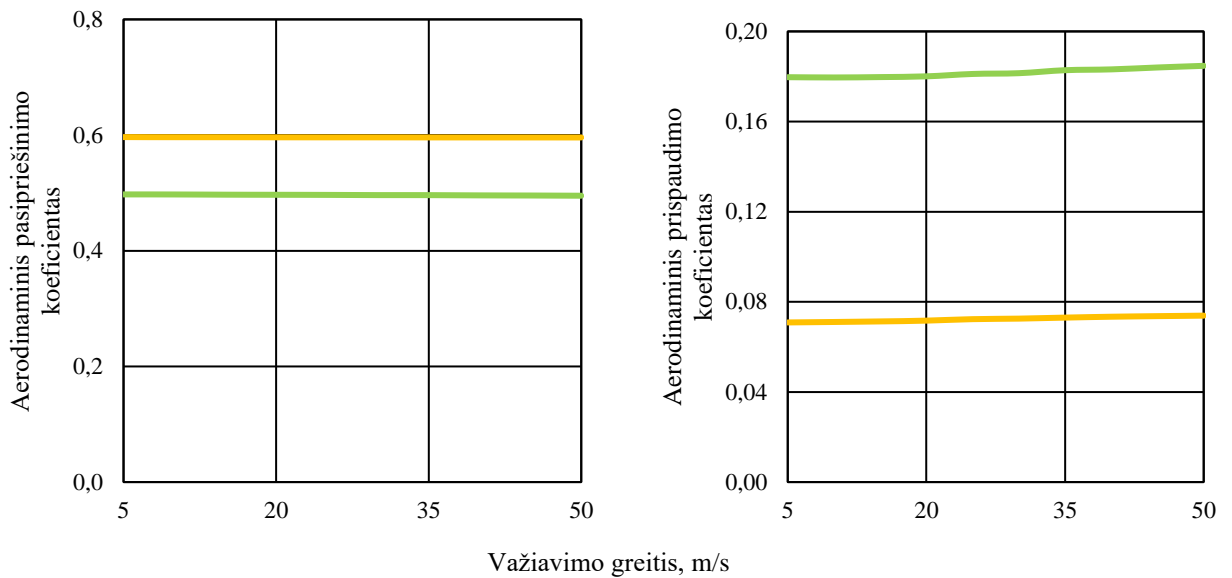
Iki šiol visi tyrimai atlikti nevertinant kelio įtakos aerodinaminiam rodikliams t. y. priimta, kad bolidas kabo ore. Realioje aplinkoje tokių sąlygų bolidas neturi, todėl svarbu patikrinti, kokią įtaką aerodinaminiam rodikliams turi kelio paviršius. Kai į tyrimus įtraukiamas kelias, oro tėkmė aplink bolidą pasikeičia, po bolidu susidaro didesnė slėgio zona, ko paskoje pasikeičia prispaudimo ir pasipriešinimo jėgų vertės.

Norint šį reiškinį patikrinti, virtualus vėjo tunelis modifikuotas taip, kad po bolidu esanti zona šiek tiek siektų padangos paviršių (žr. **33 pav.**).



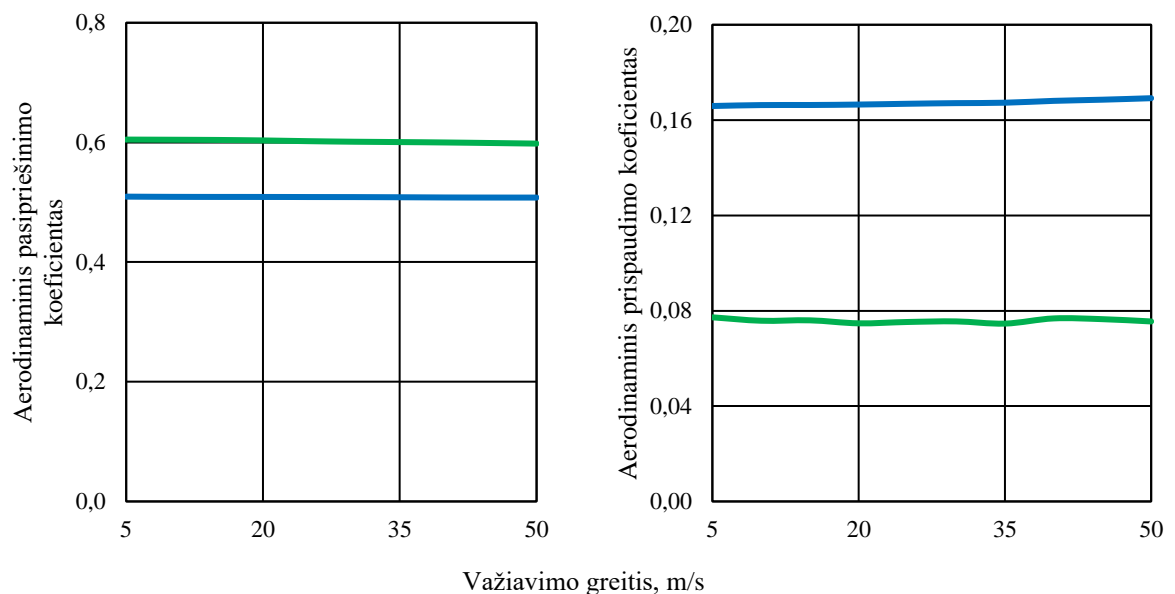
33 pav. Virtualus vėjo tunelis nevertinant (viršuje) ir vertinant (apačioje) kelio įtaką

Ši vėjo tunelio modifikacija pritaikyta visiems trimis tirtiems galinio aptako variantams (pradiniam, „VAR1“ modifikacijai ir „VAR2“ modifikacijai) ir pakartotinai atliktas tyrimas prie 10 skirtingų oro tėkmės greičių nuo 5 m/s iki 50 m/s. Šiam tyrimui atlikti pasirinkti galinio aptako variantai su 30° atakos kampais. Toks pasirinkimas atliktas dėl to, kad prie maždaug 30° visi tirti aptako variantai turi didžiausią prispaudimo koeficientą. Nustatyti F_D , F_L , C_D ir C_L pateikiami **7 lentelėje** (žr. **3 priedą**).



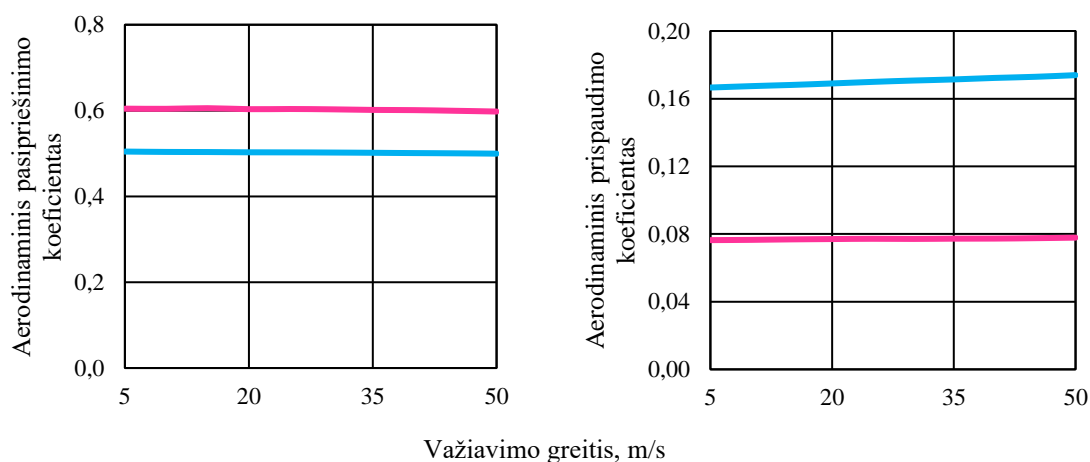
34 pav. Pradinio galinio aptako varianto aerodinaminio pasipriešinimo ir prispaudimo koeficientų palyginimas, kai: (—) – kelio įtaka vertinama ir (—) – kelio įtaka nevertinama

Analizuojant **34 pav.** galima matyti, kad vertinant kelią, pasipriešinimo ir prispaudimo rodikliai ženkliai pasikeičia. Kelio įtaka padidina pasipriešinimo koeficientą ir sumažina prispaudimo koeficientą. Pradiniam galinio aptako variantui, pridėjus kelio įtaką, pasipriešinimo koeficientas išauga 20,1 %, o prispaudimo koeficientas sumažėja net 60,2 %.



35 pav. „VAR1“ galinio aptako varianto aerodinaminio pasipriešinimo ir prispaudimo koeficientų palyginimas, kai: (—) – kelio įtaka vertinama ir (—) – kelio įtaka nevertinama

Pagal **35 pav.** vaizduojamus duomenis, „VAR1“ aptako modifikacijai pridėjus kelio įtaką pasipriešinimo koeficientas išauga 18,3 %, o prispaudimo – sumažėja 54,3 %. Iš to galima spręsti, kad pirmajai aptako modifikacijai kelias turi šiek tiek mažesnę įtaką nei pradiniam variantui.



36 pav. „VAR2“ galinio aptako varianto aerodinaminio pasipriešinimo ir prispaudimo koeficientų palyginimas, kai: (—) – kelio įtaka vertinama ir (—) – kelio įtaka nevertinama

36 pav. pavaizduota antrosios galinio aptako modifikacijos pasipriešinimo ir prispaudimo koeficientų palyginimas įvertinant kelio įtaką ir jos nevertinant. Iš grafikų gauta, kad pasipriešinimo koeficientas išauga 20 %, o prispaudimo sumažėja 54,7 %.

Įvertinus šiame tyrime gautus duomenis, galima daryti išvadą, kad kelio būvimas automobilio aerodinamikai turi didelę įtaką. Pridėjus kelią, suprastėjo visų trijų galinio aptako variantų aerodinaminiai rodikliai. Didžiausias pokytis pastebėtas pradiniam galinio aptako variantui, o mažiausias – „VAR1“ aptako variantui.

2.3.4. Aplinkos temperatūros įtaka bolido aerodinamikai

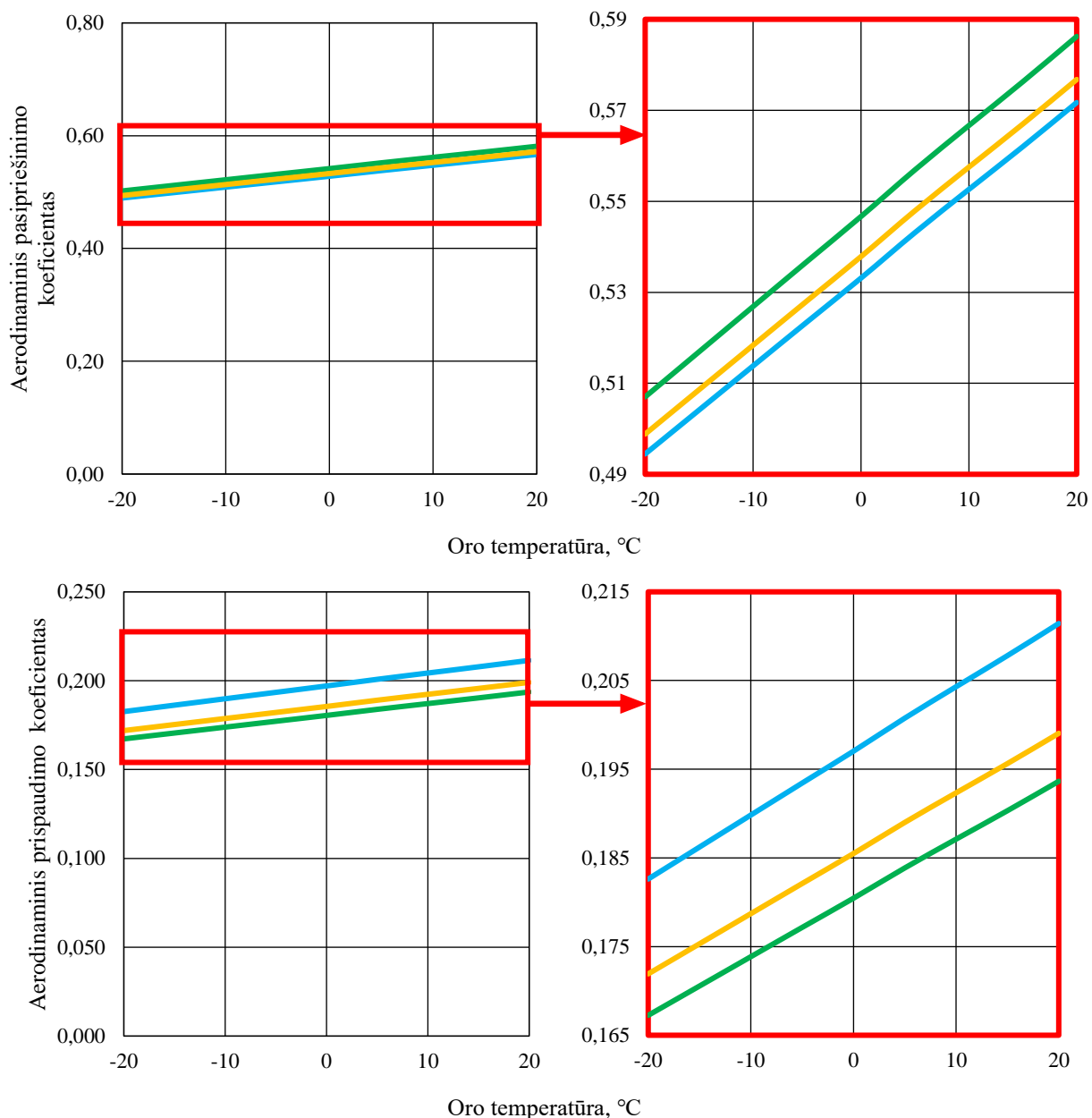
Aplinka, kurioje sportinis automobilis juda, taip pat įtakoja jo aerodinaminis rodiklius. Priklausomai nuo aplinkos savybių, prieš varžybas automobiliai gali būti sureguliuojami skirtingai. Todėl svarbu ištirti kokią įtaką aplinkos parametrai turi aerodinaminėms rodikliams. Vienas iš parametru, kuriam kintant keičiasi ir automobilio aerodinaminio pasipriešinimo ir prispaudimo koeficientų vertės, yra oro tankis. Šis dydis priklauso nuo oro drėgmės, atmosferos slėgio bei temperatūros.

Sekančiame tyrime ištirta pasipriešinimo ir prispaudimo koeficientų priklausomybė nuo oro temperatūros. Kintant oro temperatūrai, keičiasi oro tankio vertė (žr. **1 lentelė**).

1 lentelė. Oro tankio priklausomybė nuo oro temperatūros [19]

Temperatūra, °C	Tankis, kg/m ³	Grafinis atvaizdavimas
-20	1,394	
-15	1,367	
-10	1,341	
-5	1,316	
0	1,292	
5	1,268	
10	1,246	
15	1,225	
20	1,204	

Siekiant nustatyti kaip kinta pasipriešinimo ir prispaudimo koeficientai kintant oro tankiui, kiekvienas galinio aptako variantas ištirtas su oro tankio vertėmis, atitinkančiomis temperatūras nuo -20 laipsnių pagal Celsijų iki 20 laipsnių pagal Celsijų, žingsniu kas 5 laipsnius. Tyrime naudoti aptakų variantai su 30 laipsnių atakos kampų, prie 50 m/s oro tėkmės greičio. Nustatyti C_D ir C_L pateikiami **8 lentelėje** (žr. **4 priedą**).



37 pav. Aerodinaminių pasipriešinimo ir prispaudimo koeficientų priklausomybė nuo oro temperatūros, kai galinio aptako variantas yra: (—) – pradinis, (—) – „VAR1“ modifikacija ir (—) – „VAR2“ modifikacija

Analizuojant šio tyrimo duomenis (žr. **37 pav.**) akivaizdu, kad aerodinaminių pasipriešinimo ir prispaudimo koeficientų priklausomybė nuo oro temperatūros yra tiesinė. Temperatūrą padidinus 40-čia laipsnių pagal Celsijų (nuo -20 °C iki 20 °C), pasipriešinimo ir prispaudimo koeficientai išauga atitinkamai 15,8 % ir 15,6 %. Nors ir iš pirmo žvilgsnio tiek prispaudimo tiek pasipriešinimo koeficientams išaugus sąlyginai vienodu dydžiu atrodytų, kad bolido aerodinaminės savybės iš pagrindų nepasikeitė, tačiau dėl didesnių jėgų verčių susidaro didesnė apkrova aerodinaminiam

komponentams ko pasekoje jie gali greičiau dilti ar net būti sugadinti. Bet verta paminėti, kad ypač žemose temperatūrose kiti bolido komponentai, tokie kaip padangos, praranda efektyvumą. Todėl, norint kad bolidas funkcionuotų kaip įmanoma geriau, jį reikėtų eksploatuoti kuo žemesnėje temperatūroje, tačiau įvertinant kitų komponentų, tokių kaip padangos, savybes.

2.3.5. Aukščio virš jūros lygio įtaka bolido aerodinamikai

Dar vienas iš rodiklių, nuo kurių priklauso automobilio aerodinaminiai dydžiai, yra aukštis virš jūros lygio. Kuo automobilis yra aukščiau virš jūros lygio, tuo mažesnis atmosferos slėgis, o kintant atmosferos slėgiui, keičiasi pasipriešinimo ir prispaudimo jėgų ir atitinkamai jų koeficientų vertės.

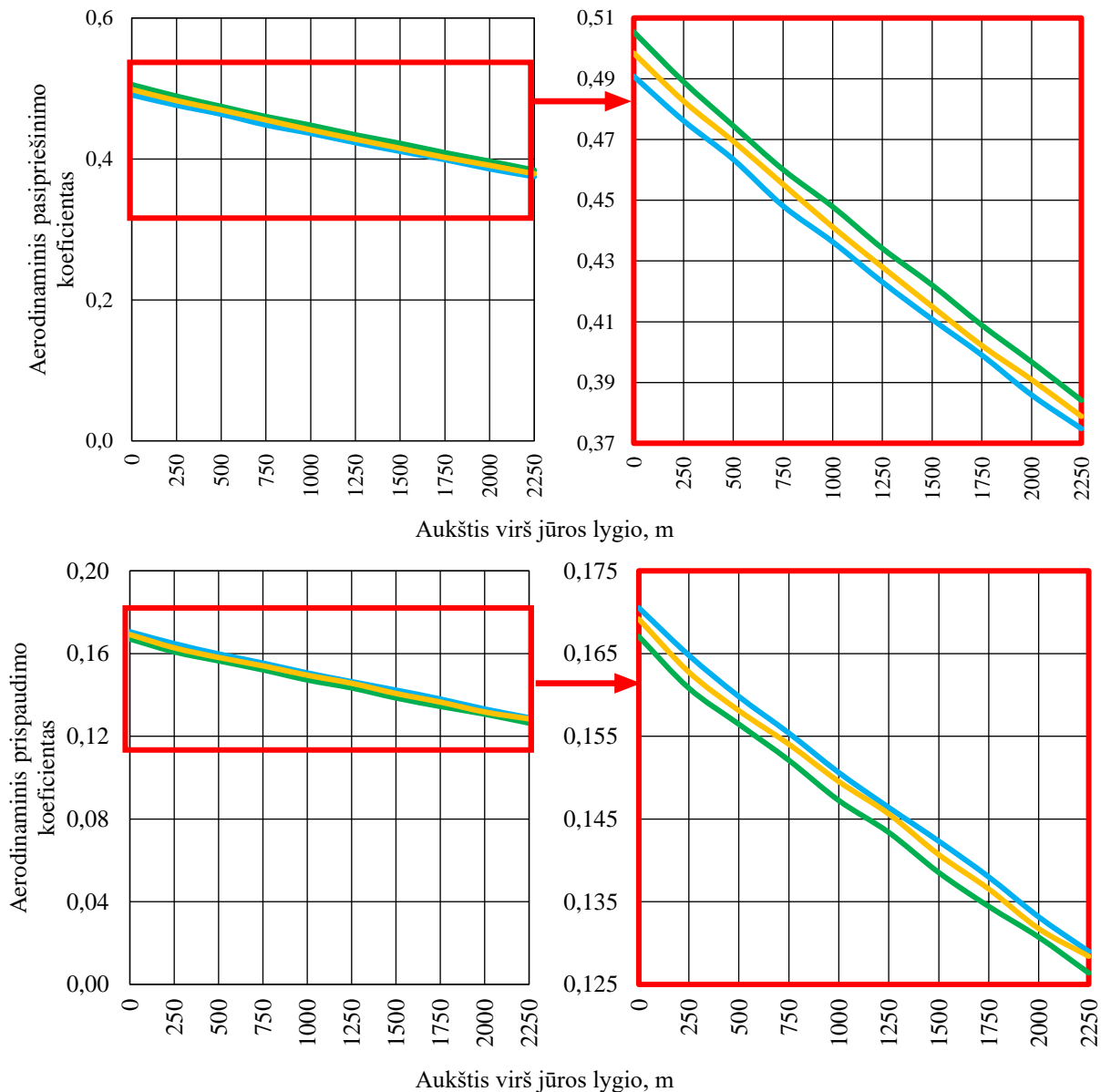
Dabartiniame F-1 lenktynių sezone yra naudojamos 23 lenktynių trasos, kurių aukščių virš jūros lygio amplitudė yra gana didelė. Aukščiausia trasa yra Meksikoje, kurios aukščiausias taškas yra 2229 m virš jūros lygio, o tuo tarpu žemiausia trasa yra Azerbaidžene, Baku mieste, kurios žemiausias taškas siekia 24,7 m žemiau jūros lygio [27].

Siekiant nustatyti kokią įtaką aerodinaminiam pasipriešinimo ir prispaudimo koeficientams turi aukštis virš jūros lygio, atliktas tyrimas esant skirtingiems atmosferos slėgiams. Slėgio priklausomybė nuo aukščio virš jūros lygio pateikta **2 lentelėje**. Pasirinktos aukščio virš jūros lygio vertės nuo 0 m (artima žemiausiai F-1 lenktynių trasai) iki 2250 m (artima aukščiausiai F-1 lenktynių trasai) žingsniu kas 250 m.

2 lentelė. Atmosferos slėgio priklausomybė nuo aukščio virš jūros lygio [26]

Aukštis virš jūros lygio, m	Atmosferinis slėgis, Pa	Grafinis atvaizdavimas
0	101325	
250	98408	
500	95559	
750	92777	
1000	90061	
1250	87409	
1500	84822	
1750	82297	
2000	79832	
2250	77429	

Tyrimui atlikti panaudoti trys galinio aptako variantai: pradinis, „VAR1 modifikacija ir „VAR2“ modifikacija su 30 laipsnių atakos kampais. Tyrimas atliktas prie 50 m/s oro tėkmės greičio, kai oro temperatūra 20 laipsnių pagal Celsijų. Nustatyti F_D , F_L , C_D ir C_L pateikiami **9 lentelėje** (žr. **5 priedą**).



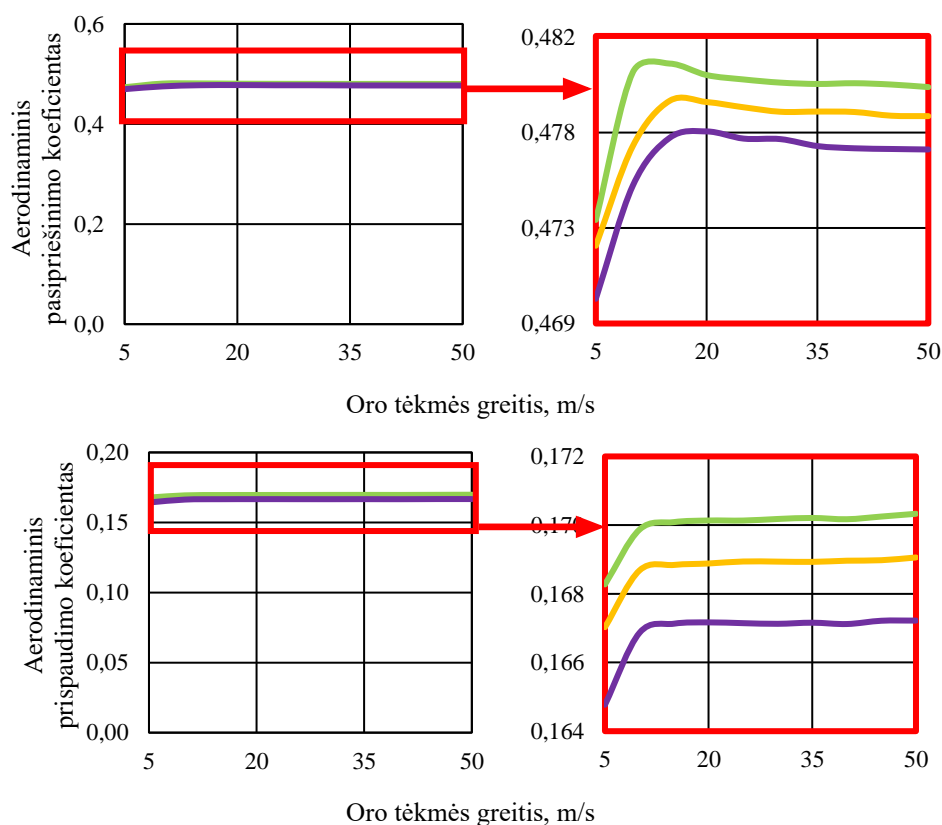
38 pav. Aerodinaminio pasipriešinimo ir prispaudimo koeficientų priklausomybė nuo aukščio virš jūros lygio, kai galinio aptako variantas yra: (—) – pradinis, (—) – „VAR1“ modifikacija ir (—) – „VAR2“ modifikacija

Žvelgiant į šio tyrimo duomenis (žr. **38 pav.**) galima pastebėti, kad, kaip ir priklausomybė nuo temperatūros, pasipriešinimo ir prispaudimo koeficientų priklausomybė nuo aukščio virš jūros lygio yra artima tiesinei. Didinant aukštį virš jūros lygio, pasipriešinimo ir prispaudimo koeficientai mažėja. Aukštį padidinus beveik 10 kartų, aerodinaminis pasipriešinimo koeficientas sumažėja atitinkamai: pradiniam aptako variantui 23,6 %, „VAR1“ aptako variantui 24 % ir „VAR2“ aptako variantui 23,8 %. Aerodinaminio prispaudimo koeficiento priklausomybė yra panaši: pradinio aptako koeficientas sumažėja 24,4 %, „VAR1“ – 24,3 % ir „VAR2“ – 24,1 %. Iš duomenų galima spręsti, kad visų aptako variantų duomenys kinta sąlyginai vienodai.

Šiuos duomenis galima paaiškinti taip, kad esant didesniai aukščiui virš jūros lygio, oras yra retesnis, ko pasekoje susidaro mažesnė trintis tarp oro molekulių ir bolido kūbulo, todėl aerodinaminės jėgos sumažėja.

2.3.6. Oro drėgmės įtaka automobilio aerodinamikai

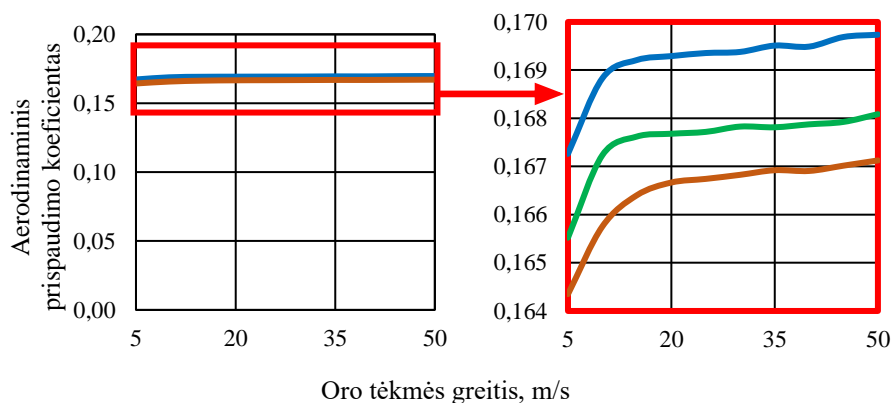
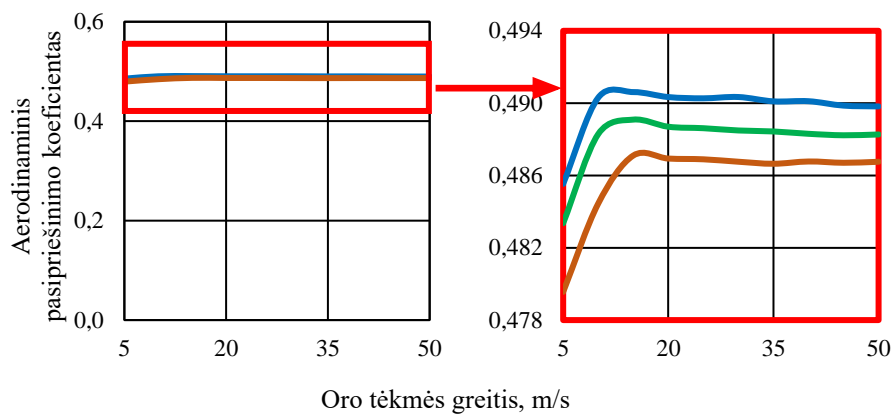
Kitas iš aplinką apibūdinančių parametru, nuo kurio priklauso bolido aerodinaminių jėgų dydžiai, yra oro drėgnumas. Kintant oro drėgnumui, keičiasi oro tankis ko pasekoje yra įtakojami aerodinaminiai rodikliai. Solidworks 2020 priede *Flow Simulation* yra įdiegta funkcija, kuri leidžia imituoti santykinį oro drėgnumą⁶. Šiam tyrimui atlikti tarpusavyje palygintos 3 skirtingos situacijos: kai santykinis oro drėgnumas yra 0 %, 50 % ir 100 %. Santykinė oro drėgmė vertinama prie 20 °C temperatūros ir 101325 Pa slėgio. Visais atvejais tiriami 3 skirtingi galinio aptako variantai (pradinis, „VAR1“ modifikacija ir „VAR2“ modifikacija) su 30 laipsnių atakos kampais prie 10 skirtingų oro tėkmės greičių nuo 5 m/s iki 50 m/s. Prie 0 %, 50 % ir 100 % santykinio drėgnumo nustatyti F_D , F_L , C_D ir C_L pateikiami atitinkamai 10, 11 ir 12 lentelėse (žr. 6 priedą).



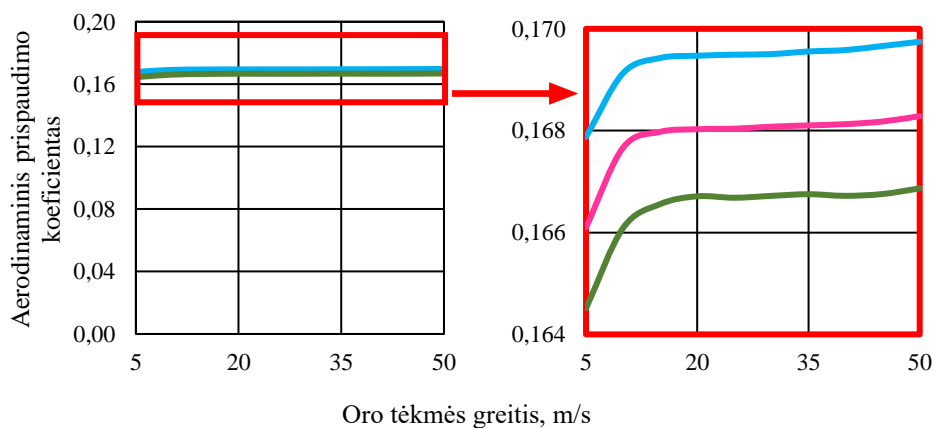
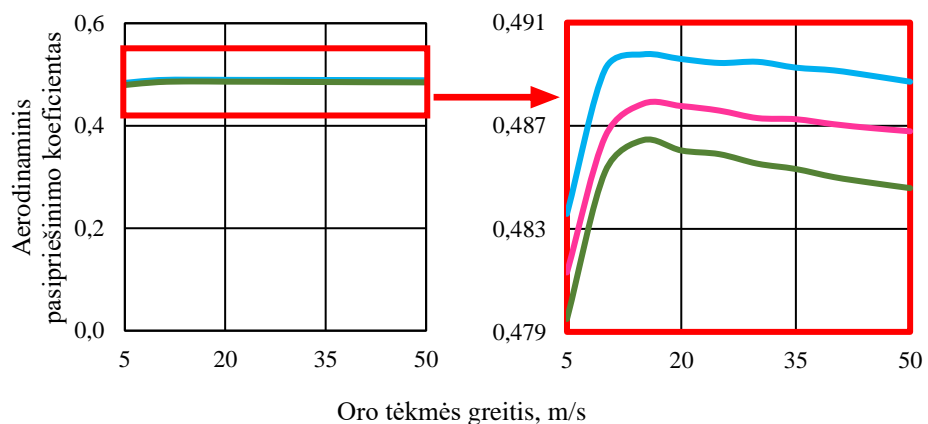
39 pav. Pradinio galinio aptako varianto aerodinaminio pasipriešinimo ir prispaudimo koeficientų priklausomybė nuo važiavimo greičio, kai santykinis oro drėgnumas yra: (—) – 0 %, (—) – 50 % ir (—) – 100 %

Grafikuose, pateiktuose 39, 40 ir 41 pav., pavaizduota atitinkamai pradinio, „VAR1“ ir „VAR2“ galinių aptakų pasipriešinimo ir prispaudimo koeficientų priklausomybė nuo važiavimo greičio. Kiekviena iš kreivių vaizduoja skirtingas santykinio oro drėgnumo vertes. Žvelgiant į duomenis galima pastebėti, kad įvertinus oro drėgnumą, ribose nuo 5 m/s iki maždaug 15 m/s koeficientų vertės sparčiai auga (išauga vidutiniškai apie 1,4 %), o ribose nuo 15 m/s iki 50 m/s kinta sąlyginai tolygiai (vidutiniškai sumažėja 0,4 %). Iš to galima spręsti apie tai, kad vertinant oro drėgnumą, pradinio laiko momentu (kai bolidas pradeda judėti), jį veikia mažesnės aerodinaminės jėgos.

⁶ Santykinis oro drėgnumas – vandens garų kiekis ore [28]

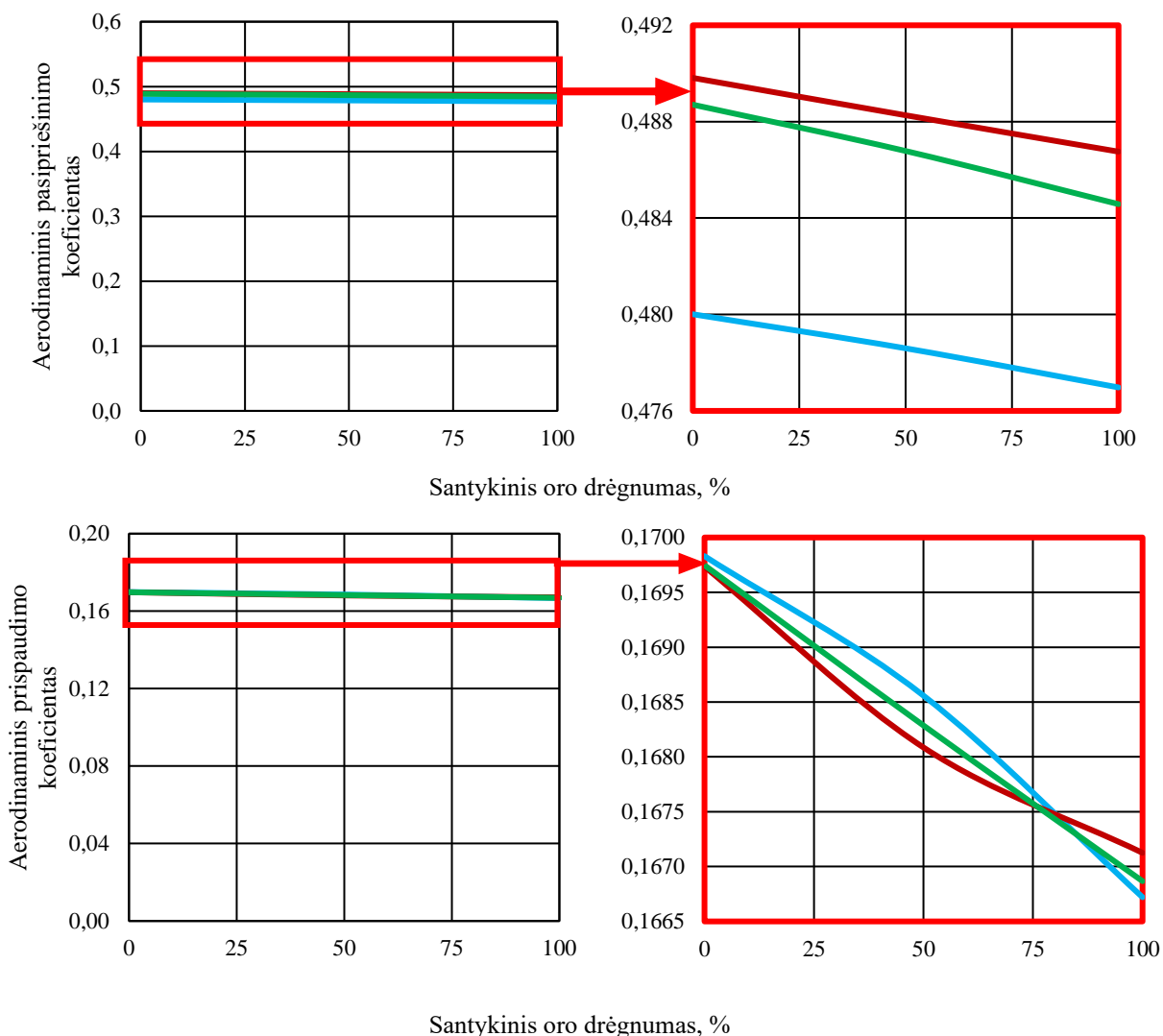


40 pav. „VAR1“ galinio aptako varianto aerodinaminio pasipriešinimo ir prispaudimo koeficientų priklausomybė nuo važiuavimo greičio, kai santykinis oro drėgnumas yra: (—) – 0 %, (—) – 50 % ir (—) – 100 %



41 pav. „VAR2“ galinio aptako varianto aerodinaminio pasipriešinimo ir prispaudimo koeficientų priklausomybė nuo važiuavimo greičio, kai santykinis oro drėgnumas yra: (—) – 0 %, (—) – 50 % ir (—) – 100 %

Žvelgiant į 42 pav. pateiktą grafiką galima pastebėti, kad didėjant santykinei oro drėgmei, tiek pasipriešinimo tiek prispaudimo koeficientai mažėja. Tai galima paaiškinti tuo, kad sauso oro tankis yra didesnis negu drėgno oro, o iš to seka, kad didėjant oro drėgnumui mažėja jo tankis ir kartu su juo aerodinaminės pasipriešinimo jėgos.



42 pav. Aerodinaminių pasipriešinimo ir prispaudimo koeficientų priklausomybė nuo oro drėgmės prie 50 m/s važiavimo greičio, kai galinio aptako variantas yra: (—) – pradinis, (—) – „VAR2“ ir (—) – „VAR1“

Pagal 42 pav. paveikslo duomenis, santykinę oro drėgnumą padidinus nuo 0 % iki 100 %, aerodinaminis pasipriešinimo koeficientais sumažėja atitinkamai: pradiniam galinio aptako variantui 0,7 %, „VAR1“ ir „VAR2“ apatakams po 0,8 %. Tuo tarpu aerodinaminis prispaudimo koeficientas sumažėja 1,8% pradiniam galinio aptako variantui, 1,6 % „VAR1“ aptakui ir 1,7 % „VAR2“ aptakui. Kaip ir ankstesniuose tyrimuose, iš visų trijų tirtų galinio aptako variantų, palankiausias aerodinamines savybes (mažiausią pasipriešinimo ir didžiausią prispaudimo koeficientus) turi pradinis aptako variantas.

Remiantis pateiktais duomenimis t. y. kad pasipriešinimo koeficiento vertė sumažėjo mažiau nei prispaudimo koeficiento, galima daryti išvadą, kad bolidui tinkamesnė aplinka yra kai oro drėgmė yra kuo mažesnė. Tuomet išlaikomas palankesnis pasipriešinimo ir prispaudimo koeficientų santykis.

Išvados

1. Išanalizavus mokslinę literatūrą padaryta išvada, kad apžvelgtuose moksliniuose leidiniuose dažniausiai tiriamas sportinio automobilio kėbulas yra „F-1“ bolido tipo, o tyrimus galima atlikti dviem pagrindiniais metodais: vėjo tunelyje arba taikant kompiuterinę skysčių/dujų srautų tekėjimo dinamiką.
2. Ištyrus pasirinkto bolido 3D modelio galinio aptako įtaką bendroms bolido aerodinaminėms savybėms keičiant jo atakos kampą nuo 0 laipsnių iki 40 laipsnių, nustatyta, kad palankiausias aerodinamines savybes šis konkretus modelis turi prie 31 laipsnio atakos kampo. Ribose nuo 0 iki 30, aerodinaminis pasipriešinimo koeficientas išauga 2,6 %, o aerodinaminis prispaudimo koeficientas – 22,9%. Ribose nuo 30 iki 40, koeficientai ima mažėti ir sumažėja atitinkamai 0,4 % ir 2,5 %.
3. Ištyrus du papildomus galinio aptako profilio variantus ir palyginus juos su pradiniu galiniu aptaku buvo padaryta išvada, kad pradinis aptakas yra tinkamiausias šiam konkrečiam bolidui ir turi apytikliai 2,5 % mažesnę pasipriešinimo koeficientą ir 7,9 % didesnę prispaudimo koeficientą.
4. Atlikus tyrimus bei lyginant rezultatus kai bolidas „kabo“ ore ir kai jo ratai liečia kelio paviršių nustatyta, kad vertinant kelią aerodinaminiai rodikliai stipriai suprastėja. Pridėjus kelią, nemodifikuoto bolido pasipriešinimo koeficientas išauga 20,1 %, o prispaudimo sumažėja 60,2 %. Pirmojo modifikuoto aptako atitinkamai 18,3 % ir 54,3 %, o antrosios modifikacijos – 20 % ir 54,7 %.
5. Ištyrus oro temperatūros įtaką aerodinaminiam rodikliams nustatyta, kad bolidas turės geresnes aerodinamines savybes prie žemesnės temperatūros. Temperatūrą padidinus nuo -20 °C iki +20 °C, aerodinaminis pasipriešinimo koeficientas išauga 15,6 %, o aerodinaminis prispaudimo koeficientas – 15,8 %.
6. Analizuojant bolido aerodinaminius rodiklius keičiant aukštį virš jūros lygio nustatyta, kad kuo aukščiau juda automobilis, tuo mažesnę pasipriešinimą jis patiria. Aukštį virš jūros lygio padidinus nuo 0 m iki 2250 m, visų trijų bolido variantų aerodinaminis pasipriešinimo koeficientas sumažėja vidutiniškai 23,8 %, o aerodinaminis prispaudimo koeficientas – vidutiniškai 24,3 %.
7. Tiriant, kokią įtaką pasipriešinimo ir prispaudimo koeficientams turi oro drėgmė nustatyta, kad didinant santykinį oro drėgnumą, pasipriešinimo ir prispaudimo koeficientai nežymiai mažėja. Padidinus santykinę drėgmę nuo 0 % iki 100 %, pasipriešinimo koeficientai visiems trimis bolido variantams sumažėja 0,7-0,8 %, o prispaudimo koeficientai – 1,6-1,8 %.

Literatūros sąrašas

1. Vienu iš pirmųjų lenktynių iliustracija. [interaktyvus]. [žiūrėta 2020-05-18]. Prieiga per internetą: <https://bit.ly/2X7QRcf>
2. **KATZ, Joseph**, *Aerodynamics of race cars*. [interaktyvus]. San Diego State University, 2006. [žiūrėta 2020-05-18]. DOI:10.1146/annurev.fluid.38.050304.092016. Prieiga per internetą: <https://bit.ly/3cJ2Jlr>
3. Aerodinamikos sąvokos aprašymas. [interaktyvus]. [žiūrėta 2020-05-18]. Prieiga per internetą: <https://bit.ly/3bGkmY1>
4. **MACHIN, Richard**, *Introduction to Racecar Aerodynamics*. [interaktyvus]. Institute of Mechanical Engineers, 2016. [žiūrėta 2020-05-18] Prieiga per internetą: <https://bit.ly/2ZlsB98>
5. **SEFT, V., GILLIAN, MA.**, *Recent advances and test processes in automotive and motorsports aerodynamic development*. [interaktyvus]. Journal Mechanical Engineering Science, 2019. [žiūrėta 2020-05-18] DOI:10.1177/0954406219875770. Prieiga per internetą: <https://bit.ly/2WFfvSw>
6. **KRAJNOVIČ, Siniša, DAVIDSON, Lars**, *Influence of floor motions in wind tunnels on aerodynamics of road vehicles*. [interaktyvus]. Chalmers University of Technology, 2005. [žiūrėta 2020-05-18] DOI:10.1016/j.jweia.2005.05.002. Prieiga per internetą: <https://bit.ly/3cHsNDR>
7. Pasipriešinimo ir kėlimo koeficientų priklausomybės nuo paviršiaus judesio vėjo tunelyje iliustracija. [interaktyvus]. [žiūrėta 2020-05-18]. Prieiga per internetą: <https://bit.ly/3cHsNDR>
8. **HOFFMAN, Klaus A. ir CHIANG, Steve T.**, „*Computational Fluid Dynamics*“. [interaktyvus]. Engineering Education System, 2000. [žiūrėta 2020-05-18]. ISBN 0-9623731-0-9. Prieiga per internetą: <https://bit.ly/3dVwiqf>
9. **DIMASTROGIOVANNI, Mauro, REINA, Giulio, BURZONI, Andrea**, *An improved active drag reduction system for formula race cars*. [interaktyvus]. Journal Automobile Engineering, 2020. [žiūrėta 2020-05-23]. DOI: 10.1177/0954407019862913. Prieiga per internetą: <https://bit.ly/2ZssYyY>
10. Automobilinio difuzoriaus sąvokos paaiškinimas. [interaktyvus]. [žiūrėta 2020-05-23]. Prieiga per internetą: <https://bit.ly/3cYKIFV>
11. **TAIMING, Huang, XIAODONG, Zhuang, ZHONGMIN, Wan, ZHENGQI, Gu**, *Experimental and numerical investigations of the vehicle aerodynamic drag with single-channel rear diffuser*. [interaktyvus]. Journal Automobile Engineering, 2020. [žiūrėta 2020-05-23]. DOI:10.1177/0954407019893849. Prieiga per internetą: <https://bit.ly/2LUZeTr>
12. **MARIANI, Francesco, PAGGIANI, Claudio, RISI, Francesco, SCAPPATICCI, Lorenzo**, „*Formula-SAE Racing Car: Experimental and Numerical Analysis of the External Aerodynamics*“. [interaktyvus]. Procedia, 2015. [žiūrėta 2020-05-23]. DOI:10.1016/j.egypro.2015.12.111. Prieiga per internetą: <https://bit.ly/3bYpSW6>
13. **HETEWAL, Sneh, GOPHANE, Mandar, B.K., Ajay, MUKKAMALA, Yagnavalkya**, „*Aerodynamic Study of Formula SAE Car*“. [interaktyvus]. Procedia Engineering, 2014. [žiūrėta 2020-05-23]. DOI:10.1016/j.proeng.2014.12.398. Prieiga per internetą: <https://bit.ly/2Zue2QX>
14. **NASIR, Rizal E. M., FIRDAUS, Mohamad, RAMLAN, Kasiran, SHAHRIMAN, Adenan M., FAIZAL Mohamed M., HANIF Mat M., AMIR, R. A. Ghani**, „*Aerodynamics of ARTeC's*

- PEC 2011 EMO-C Car*". [interaktyvus]. Procedia Engineering, 2012. [žiūrėta 2020-05-25]. DOI:10.1016/j.proeng.2012.07.382. Prieiga per internetą: <https://bit.ly/2LWlxbl>
15. **MUNZER, SY Ebaid, SHATHA, Ammoura, KUTIABA, JM Al-khishali**, „*Design, build, and test a formula student racing car: An educational engineering exercise at Philadelphia University*“. [interaktyvus]. International Journal of Mechanical Engineering Education, 2016. [žiūrėta 2020-05-25]. DOI:10.1177/0306419015624984. Prieiga per internetą: <https://bit.ly/2Xpwwgk0>
 16. **FU, Chen, BOUNDS, Patrick, SALENT, Christian, UDDIN, Mesbah**, „*Turbulence modeling effects on the aerodynamic characterizations of a NASCAR Generation 6 racecar subject to yaw and pitch changes*“. [interaktyvus]. Journal Automobile Engineering, 2019. [žiūrėta 2020-05-25]. DOI:10.1177/0954407019826475. Prieiga per internetą: <https://bit.ly/2TzufAq>
 17. **DICKINSON, Mike, GHALEEH, Mohammad, MILADY, Soliman, SUBBAKRISHNA, Shreeharsha, TAN, Lit Wen, QUBEISSI, Mansour Al**, „*Investigation into the Aerodynamic Performance of a ConceptSports Car*“. [interaktyvus]. Journal of Applied Fluid Mechanics, 2020. [žiūrėta 2020-05-25]. DOI:10.29252/jafm.13.02.30179. Prieiga per internetą: <https://bit.ly/2yAlvmu>
 18. Solidworks 2020 priedo Flow Simulation aprašymas. [interaktyvus]. [žiūrėta 2021-03-29]. Prieiga per internetą: <https://bit.ly/3flUfLh>
 19. Oro tankio skaičiuoklė. [interaktyvus]. [žiūrėta 2021-03-29]. Prieiga per internetą: <https://bit.ly/3fo0zC5>
 20. Laminarinio tekėjimo sąvokos paaiškinimas. [interaktyvus]. [žiūrėta 2021-04-06]. Prieiga per internetą: <https://bit.ly/3rUr0li>
 21. Turbulentinio tekėjimo sąvokos paaiškinimas. [interaktyvus]. [žiūrėta 2021-04-06]. Prieiga per internetą: <https://bit.ly/39OADvI>
 22. Adiabinės būsenos sąvokos paaiškinimas. [interaktyvus]. [žiūrėta 2021-04-06]. Prieiga per internetą: <https://bit.ly/2OneCg4>
 23. **ROY, Shaylesh**, Sportinio automobilio 3D modelis. [interaktyvus]. [žiūrėta 2021-04-12]. Prieiga per internetą: <https://bit.ly/3h3vsdO>
 24. **LASAUSKAS, Eduardas**. *Skrydžio principai*. Vilniaus Technika, 2008, pp 19-20. ISBN 978-9955-28-255-6. Prieiga per internetą: <https://bit.ly/3urEp68> [žiūrėta 2021-04-06]
 25. Aerodinaminio pasipriešinimo ir kėlimo/prispaudimo koeficientų formulė. [interaktyvus]. [žiūrėta 2021-04-20]. Prieiga per internetą: <https://go.nasa.gov/3ryr4se>
 26. Slėgio priklausomybės nuo aukščio virš jūros lygio skaičiuoklė. [interaktyvus]. [žiūrėta 2021-05-05]. Prieiga per internetą: <https://bit.ly/3ej8EqM>
 27. F-1 lenktynėse naudojamų lenktynių trasų aukščiai virš jūros lygio. [interaktyvus]. [žiūrėta 2021-05-05]. Prieiga per internetą: <https://f1.com/3eSAUQ4>
 28. Santykinės oro drėgmės sąvokos paaiškinimas. [interaktyvus]. [žiūrėta 2021-05-11]. Prieiga per internetą: <https://bit.ly/3f8FwSb>
 29. Perteklinio slėgio sąvokos paaiškinimas. [interaktyvus]. [žiūrėta 2021-05-18]. Prieiga per internetą: <https://bit.ly/2T2WAlv>

Priedai

1 priedas. Galinio aptako elemento atakos kampo įtakos bolido aerodinamikai tyrimo rezultatai

3 lentelė. Pasipriešinimo ir prispaudimo koeficientų priklausomybė nuo aptako atakos kampo

Oro tėkmės greitis v , m/s	Pasipriešinimo jėga F_D , N	Prispaudimo jėga F_L , N	Pasipriešinimo koeficientas C_D	Prispaudimo koeficientas C_L
0° atakos kampas				
5	10,04	3,03	0,4843	0,1461
10	40,16	12,10	0,4841	0,1459
15	90,33	27,33	0,4840	0,1464
20	160,52	48,66	0,4837	0,1466
25	250,72	76,30	0,4836	0,1472
30	360,93	110,58	0,4834	0,1481
35	491,08	150,93	0,4832	0,1485
40	641,27	198,18	0,4831	0,1493
45	811,41	251,06	0,4830	0,1495
50	1001,78	310,99	0,4830	0,1500
10° atakos kampas				
5	10,14	3,26	0,4892	0,1572
10	40,53	13,05	0,4886	0,1573
15	91,19	29,49	0,4886	0,1580
20	162,03	52,50	0,4883	0,1582
25	253,04	82,33	0,4880	0,1588
30	364,47	118,42	0,4882	0,1586
35	495,88	161,58	0,4880	0,1590
40	647,26	211,71	0,4877	0,1595
45	818,96	268,00	0,4875	0,1595
50	1010,94	332,18	0,4875	0,1602
20° atakos kampas				
5	10,22	3,39	0,4916	0,4926
10	40,86	13,61	0,4922	0,4925
15	91,91	30,72	0,4924	0,4924
20	163,28	54,96	0,4927	0,4921
25	255,02	86,17	0,4928	0,4919
30	367,06	124,85	0,4930	0,4916
35	499,24	170,12	0,4930	0,4913
40	651,79	222,75	0,4932	0,4911
45	824,58	283,56	0,4932	0,4909
50	1017,45	351,31	0,4935	0,4906

3 lentelės tęsinys

Oro tėkmės greitis v , m/s	Pasipriešinimo jėga F_D , N	Prispaudimo jėga F_L , N	Pasipriešinimo koeficientas C_D	Prispaudimo koeficientas C_L
30° atakos kampas				
5	10,32	3,73	0,4974	0,1797
10	41,26	14,90	0,4973	0,1796
15	92,76	33,55	0,4970	0,1797
20	164,84	59,75	0,4968	0,1801
25	257,47	93,90	0,4966	0,1811
30	370,48	135,48	0,4962	0,1815
35	504,21	185,74	0,4962	0,1828
40	658,00	243,11	0,4957	0,1832
45	832,37	309,09	0,4955	0,1840
50	1026,89	383,11	0,4952	0,1847
40° atakos kampas				
5	10,28	3,66	0,4958	0,1765
10	41,10	14,66	0,4955	0,1767
15	92,45	32,92	0,4953	0,1764
20	164,25	58,52	0,4950	0,1764
25	256,58	91,60	0,4949	0,1767
30	369,24	131,75	0,4946	0,1765
35	502,03	180,00	0,4940	0,1771
40	655,54	235,11	0,4939	0,1771
45	829,57	298,28	0,4938	0,1776
50	1023,36	370,58	0,4935	0,1787

4 lentelė. Pasipriešinimo ir prispaudimo koeficientų priklausomybė nuo patikslinto atakos kampo

Oro tėkmės greitis v , m/s	Pasipriešinimo jėga F_D , N	Prispaudimo jėga F_L , N	Pasipriešinimo koeficientas C_D	Prispaudimo koeficientas C_L
30° atakos kampas				
5	10,32	3,73	0,4974	0,1797
10	41,26	14,90	0,4973	0,1796
15	92,76	33,55	0,4970	0,1797
20	164,84	59,75	0,4968	0,1801
25	257,47	93,90	0,4966	0,1811
30	370,48	135,48	0,4962	0,1815
35	504,21	185,74	0,4962	0,1828
40	658,00	243,11	0,4957	0,1832
45	832,37	309,09	0,4955	0,1840
50	1026,89	383,11	0,4952	0,1847

4 lentelės tęsinys

Oro tėkmės greitis v , m/s	Pasipriešinimo jėga F_D , N	Prispaudimo jėga F_L , N	Pasipriešinimo koeficientas C_D	Prispaudimo koeficientas C_L
31° atakos kampas				
5	10,31	3,89	0,4969	0,1875
10	41,24	15,56	0,4972	0,1875
15	92,84	35,03	0,4974	0,1877
20	165,11	62,42	0,4976	0,1881
25	258,15	97,59	0,4979	0,1882
30	371,87	140,90	0,4981	0,1887
35	506,29	192,01	0,4982	0,1889
40	661,53	251,33	0,4984	0,1894
45	837,55	319,94	0,4986	0,1905
50	1034,29	395,24	0,4987	0,1906
32° atakos kampas				
5	10,29	3,68	0,4961	0,1773
10	41,17	14,74	0,4963	0,1776
15	92,71	33,15	0,4967	0,1776
20	164,86	59,05	0,4968	0,1780
25	257,69	92,50	0,4970	0,1784
30	371,20	133,48	0,4972	0,1788
35	505,34	181,74	0,4973	0,1788
40	660,34	238,81	0,4975	0,1799
45	836,00	302,09	0,4977	0,1798
50	1033,01	374,11	0,4981	0,1804
33° atakos kampas				
5	10,28	3,52	0,4955	0,1696
10	41,13	14,07	0,4958	0,1696
15	92,58	31,74	0,4960	0,1700
20	164,72	56,53	0,4964	0,1704
25	257,45	88,52	0,4966	0,1707
30	370,84	127,45	0,4967	0,1707
35	505,07	173,96	0,4970	0,1712
40	659,81	227,43	0,4971	0,1713
45	835,39	288,27	0,4973	0,1716
50	1032,23	357,73	0,4977	0,1725
34° atakos kampas				
5	10,25	3,45	0,4944	0,1662
10	41,05	13,81	0,4949	0,1665

4 lentelės tęsinys

Oro tėkmės greitis v , m/s	Pasipriešinimo jėga F_D , N	Prispaudimo jėga F_L , N	Pasipriešinimo koeficientas C_D	Prispaudimo koeficientas C_L
15	92,41	31,14	0,4951	0,1668
20	164,37	55,49	0,4953	0,1672
25	257,04	86,97	0,4958	0,1677
30	370,44	125,24	0,4962	0,1678
35	504,40	171,13	0,4964	0,1684
40	659,09	223,37	0,4966	0,1683
45	834,52	283,14	0,4968	0,1686
50	1031,21	350,70	0,4972	0,1691
35° atakos kampas				
5	10,25	3,39	0,4940	0,1632
10	41,00	13,56	0,4943	0,1635
15	92,31	30,61	0,4945	0,1640
20	164,21	54,40	0,4949	0,1640
25	256,64	85,00	0,4950	0,1639
30	369,84	122,57	0,4954	0,1642
35	503,60	167,04	0,4956	0,1644
40	658,09	217,68	0,4958	0,1640
45	833,52	276,00	0,4962	0,1643
50	1030,21	341,52	0,4968	0,1647

2 priedas. Galinio aptako profilio formos įtakos bolido aerodinamikai tyrimo rezultatai

5 lentelė. Pirmosios galinio aptako profilio modifikacijos tyrimo rezultatai

Oro tėkmės greitis v , m/s	Pasipriešinimo jėga F_D , N	Prispaudimo jėga F_L , N	Pasipriešinimo koeficientas C_D	Prispaudimo koeficientas C_L
0° atakos kampas				
5	10,07	2,98	0,4854	0,1435
10	40,22	11,93	0,4848	0,1438
15	90,45	26,91	0,4846	0,1441
20	160,67	47,94	0,4842	0,1445
25	251,15	74,96	0,4844	0,1446
30	361,62	108,17	0,4844	0,1449
35	492,11	147,16	0,4843	0,1448
40	642,37	192,63	0,4840	0,1451
45	812,41	243,90	0,4836	0,1452
50	1001,91	301,86	0,4831	0,1456
10° atakos kampas				
5	10,21	-3,12	0,4923	0,1505

5 lentelės tęsinys

Oro tėkmės greitis v , m/s	Pasipriešinimo jėga F_D , N	Prispaudimo jėga F_L , N	Pasipriešinimo koeficientas C_D	Prispaudimo koeficientas C_L
10	40,81	12,50	0,4919	0,1507
15	91,81	28,16	0,4919	0,1509
20	163,20	50,17	0,4918	0,1512
25	254,76	78,53	0,4914	0,1515
30	366,58	113,52	0,4910	0,1521
35	499,07	155,27	0,4911	0,1528
40	651,62	203,53	0,4909	0,1533
45	824,61	258,54	0,4909	0,1539
50	1017,71	320,24	0,4907	0,1544
20° atakos kampas				
5	10,41	3,30	0,5020	0,1589
10	41,59	13,20	0,5013	0,1591
15	93,58	29,82	0,5013	0,1598
20	166,22	53,19	0,5009	0,1603
25	259,58	83,32	0,5007	0,1607
30	373,81	120,19	0,5007	0,1610
35	508,69	164,58	0,5006	0,1620
40	664,08	215,07	0,5003	0,1620
45	839,62	273,00	0,4998	0,1625
50	1036,15	339,42	0,4996	0,1637
30° atakos kampas				
5	10,56	-3,44	0,5094	0,1659
10	42,23	13,80	0,5090	0,1663
15	94,99	31,05	0,5089	0,1663
20	168,86	55,25	0,5089	0,1665
25	263,75	86,51	0,5087	0,1668
30	379,74	124,77	0,5086	0,1671
35	516,60	170,00	0,5084	0,1673
40	674,31	223,07	0,5080	0,1681
45	853,14	283,15	0,5079	0,1686
50	1053,21	350,88	0,5078	0,1692
40° atakos kampas				
5	10,49	3,33	0,5081	0,1625
10	41,94	13,36	0,5078	0,1629
15	94,31	30,24	0,5067	0,1640
20	167,62	53,84	0,5059	0,1651

5 lentelės tęsinys

Oro tėkmės greitis v , m/s	Pasipriešinimo jėga F_D , N	Prispaudimo jėga F_L , N	Pasipriešinimo koeficientas C_D	Prispaudimo koeficientas C_L
25	262,01	84,55	0,5054	0,1657
30	377,21	122,03	0,5051	0,1660
35	513,60	166,82	0,5038	0,1666
40	670,37	218,87	0,5033	0,1678
45	848,26	277,59	0,5031	0,1691
50	1046,23	344,08	0,5017	0,1701

6 lentelė. Antrosios galinio aptako profilio modifikacijos tyrimo rezultatai

Oro tėkmės greitis v , m/s	Pasipriešinimo jėga F_D , N	Prispaudimo jėga F_L , N	Pasipriešinimo koeficientas C_D	Prispaudimo koeficientas C_L
0° atakos kampas				
5	10,11	2,99	0,4873	0,1442
10	40,35	12,00	0,4865	0,1447
15	90,80	27,10	0,4865	0,1452
20	161,28	48,23	0,4860	0,1453
25	252,02	75,84	0,4861	0,1463
30	362,53	109,86	0,4856	0,1472
35	493,14	150,31	0,4853	0,1479
40	643,51	196,81	0,4848	0,1483
45	814,64	250,20	0,4849	0,1489
50	1004,43	311,21	0,4843	0,1501
10° atakos kampas				
5	10,22	3,15	0,4927	0,1519
10	40,82	12,69	0,4920	0,1530
15	91,79	28,66	0,4918	0,1535
20	162,99	51,05	0,4912	0,1538
25	254,56	80,02	0,4910	0,1543
30	366,21	116,07	0,4905	0,1555
35	497,72	158,06	0,4898	0,1555
40	649,87	208,02	0,4896	0,1567
45	821,61	265,55	0,4891	0,1581
50	1012,54	331,65	0,4882	0,1599
20° atakos kampas				
5	10,30	3,28	0,4968	0,1582
10	41,23	13,15	0,4970	0,1585
15	92,59	29,51	0,4961	0,1581
20	164,55	52,76	0,4959	0,1590

6 lentelė tęsinys

Oro tėkmės greitis v , m/s	Pasipriešinimo jėga F_D , N	Prispaudimo jėga F_L , N	Pasipriešinimo koeficientas C_D	Prispaudimo koeficientas C_L
25	256,93	82,86	0,4955	0,1598
30	370,06	119,68	0,4957	0,1603
35	503,04	163,65	0,4950	0,1610
40	657,19	215,30	0,4951	0,1622
45	830,17	274,10	0,4942	0,1632
50	1024,03	340,56	0,4938	0,1642
30° atakos kampas				
5	10,46	3,45	0,5044	0,1666
10	41,77	13,89	0,5036	0,1674
15	93,95	31,38	0,5033	0,1681
20	166,82	56,08	0,5027	0,1690
25	260,56	88,11	0,5026	0,1699
30	374,93	127,46	0,5022	0,1707
35	509,72	174,15	0,5016	0,1714
40	664,87	228,65	0,5009	0,1723
45	840,58	290,48	0,5004	0,1729
50	1036,07	360,67	0,4996	0,1739
40° atakos kampas				
5	10,54	3,37	0,5081	0,1625
10	42,13	13,52	0,5078	0,1629
15	94,57	30,62	0,5067	0,1640
20	167,87	54,77	0,5059	0,1651
25	262,02	85,89	0,5054	0,1657
30	377,09	123,91	0,5051	0,1660
35	511,97	169,35	0,5038	0,1666
40	668,01	222,76	0,5033	0,1678
45	845,07	284,10	0,5031	0,1691
50	1040,46	352,71	0,5017	0,1701

3 Priedas. Kelio įtakos bolido aerodinamikai tyrimo rezultatai

7 lentelė. Tyrimo rezultatai vertinant kelio įtaką

Oro tėkmės greitis v , m/s	Pasipriešinimo jėga F_D , N	Prispaudimo jėga F_L , N	Pasipriešinimo koeficientas C_D	Prispaudimo koeficientas C_L
Pradinis variantas				
5	12,37	1,47	0,5965	0,0708
10	49,47	5,89	0,5963	0,0711

7 lentelės tęsinys

Oro tėkmės greitis v , m/s	Pasipriešinimo jėga F_D , N	Prispaudimo jėga F_L , N	Pasipriešinimo koeficientas C_D	Prispaudimo koeficientas C_L
15	111,30	13,31	0,5963	0,0713
20	197,82	23,78	0,5962	0,0717
25	309,06	37,49	0,5961	0,0723
30	445,04	54,16	0,5961	0,0725
35	605,65	74,18	0,5960	0,0730
40	790,97	97,41	0,5959	0,0734
45	1001,12	123,71	0,5960	0,0736
50	1235,82	153,20	0,5959	0,0739
„VAR1“ modifikacija				
5	12,54	1,60	0,6047	0,0772
10	50,14	6,29	0,6045	0,0758
15	112,76	14,18	0,6041	0,0760
20	200,19	24,80	0,6033	0,0747
25	312,17	39,03	0,6021	0,0753
30	448,83	56,40	0,6012	0,0755
35	610,31	75,83	0,6006	0,0746
40	796,25	101,93	0,5999	0,0768
45	1006,25	128,48	0,5990	0,0765
50	1240,22	156,61	0,5980	0,0755
„VAR2“ modifikacija				
5	12,54	1,58	0,6045	0,0764
10	50,11	6,35	0,6041	0,0766
15	113,02	14,34	0,6055	0,0768
20	200,17	25,56	0,6033	0,0770
25	312,96	40,02	0,6036	0,0772
30	450,13	57,57	0,6029	0,0771
35	611,28	78,51	0,6015	0,0773
40	797,71	102,62	0,6010	0,0773
45	1007,03	130,26	0,5995	0,0775
50	1239,61	161,47	0,5977	0,0779

4 Priedas. Oro temperatūros įtakos bolido aerodinamikai tyrimo rezultatai

8 lentelė. Pasipriešinimo ir prispaudimo koeficientų priklausomybė nuo oro temperatūros

Oro temperatūra, °C	Oro tankis, kg/m ³	Pasipriešinimo koeficientas C_D	Prispaudimo koeficientas C_L
Pradinis variantas			
-20	1,394	0,4277	0,1596

8 lentelės tęsinys

Oro temperatūra, °C	Oro tankis, kg/m ³	Pasipriešinimo koeficientas C_D	Prispaudimo koeficientas C_L
-15	1,367	0,4361	0,1627
-10	1,341	0,4446	0,1659
-5	1,316	0,4530	0,1690
0	1,292	0,4614	0,1721
5	1,268	0,4702	0,1754
10	1,246	0,4785	0,1785
15	1,225	0,4867	0,1816
20	1,204	0,4952	0,1847
„VAR1“ modifikacija			
-20	1,394	0,4386	0,1461
-15	1,367	0,4473	0,1490
-10	1,341	0,4560	0,1519
-5	1,316	0,4646	0,1548
0	1,292	0,4733	0,1577
5	1,268	0,4822	0,1606
10	1,246	0,4907	0,1635
15	1,225	0,4991	0,1663
20	1,204	0,5078	0,1692
„VAR2“ modifikacija			
-20	1,394	0,4315	0,1502
-15	1,367	0,4400	0,1532
-10	1,341	0,4485	0,1561
-5	1,316	0,4571	0,1591
0	1,292	0,4656	0,1621
5	1,268	0,4744	0,1651
10	1,246	0,4827	0,1680
15	1,225	0,4910	0,1709
20	1,204	0,4996	0,1739

5 Priedas. Aukščio virš jūros lygio įtakos bolido aerodinamikai tyrimo rezultatai

9 lentelė. Pasipriešinimo ir prispaudimo koeficientų priklausomybė nuo aukščio virš jūros lygio

Aukštis virš jūros lygio, m	Atmosferos slėgis, Pa	Pasipriešinimo jėga F_D , N	Prispaudimo jėga F_L , N	Pasipriešinimo koeficientas C_D	Prispaudimo koeficientas C_L
Pradinis variantas					
0	101325	1029,73	357,75	0,4908	0,1705
250	98408	999,03	345,74	0,4762	0,1648
500	95559	972,34	335,27	0,4635	0,1598

9 lentelės tęsinys

Aukštis virš jūros lygio, m	Atmosferos slėgis, Pa	Pasipriešinimo jėga F_D , N	Prispaudimo jėga F_L , N	Pasipriešinimo koeficientas C_D	Prispaudimo koeficientas C_L
750	92777	940,22	326,00	0,4482	0,1554
1000	90061	915,32	315,98	0,4363	0,1506
1250	87409	887,54	307,11	0,4230	0,1464
1500	84822	861,82	298,57	0,4108	0,1423
1750	82297	837,13	289,50	0,3990	0,1380
2000	79832	809,59	279,36	0,3859	0,1332
2250	77429	786,39	270,60	0,3748	0,1290
„VAR1“ modifikacija					
0	101325	1060,31	350,49	0,5054	0,1671
250	98408	1025,98	337,40	0,4890	0,1608
500	95559	995,52	328,25	0,4745	0,1565
750	92777	965,31	319,11	0,4601	0,1521
1000	90061	939,63	308,89	0,4479	0,1472
1250	87409	910,82	300,80	0,4341	0,1434
1500	84822	885,50	290,62	0,4221	0,1385
1750	82297	857,78	282,03	0,4089	0,1344
2000	79832	832,41	274,23	0,3968	0,1307
2250	77429	805,91	265,15	0,3841	0,1264
„VAR2“ modifikacija					
0	101325	1045,66	354,91	0,4984	0,1692
250	98408	1012,60	341,47	0,4827	0,1628
500	95559	984,86	331,71	0,4694	0,1581
750	92777	955,17	323,18	0,4553	0,1540
1000	90061	925,58	313,70	0,4412	0,1495
1250	87409	897,92	305,48	0,4280	0,1456
1500	84822	870,67	295,16	0,4150	0,1407
1750	82297	843,75	286,45	0,4022	0,1365
2000	79832	820,16	276,39	0,3909	0,1317
2250	77429	794,87	269,38	0,3789	0,1284

6 Priedas. Oro drėgnumo įtakos bolido aerodinamikai tyrimo rezultatai

10 lentelė. Pasipriešinimo ir prispaudimo koeficientų priklausomybė nuo važavimo greičio, kai santykinė oro drėgmė yra 0 %

Oro tėkmės greitis v , m/s	Pasipriešinimo jėga F_D , N	Prispaudimo jėga F_L , N	Pasipriešinimo koeficientas C_D	Prispaudimo koeficientas C_L
Pradinis variantas				
5	9,82	3,48	0,4735	0,1678
10	39,88	14,05	0,4807	0,1694

10 lentelės tęsinys

Oro tėkmės greitis v , m/s	Pasipriešinimo jėga F_D , N	Prispaudimo jėga F_L , N	Pasipriešinimo koeficientas C_D	Prispaudimo koeficientas C_L
15	89,81	31,65	0,4812	0,1696
20	159,47	56,29	0,4806	0,1696
25	249,06	87,95	0,4804	0,1696
30	358,54	126,68	0,4802	0,1697
35	487,94	172,46	0,4802	0,1697
40	637,36	225,20	0,4802	0,1697
45	806,56	285,15	0,4801	0,1697
50	995,49	352,21	0,4800	0,1698
„VAR1“ modifikacija				
5	10,07	3,47	0,4855	0,1673
10	40,67	14,01	0,4903	0,1688
15	91,57	31,58	0,4906	0,1692
20	162,70	56,17	0,4903	0,1693
25	254,19	87,81	0,4903	0,1694
30	366,09	126,46	0,4903	0,1694
35	498,04	172,26	0,4901	0,1695
40	650,51	224,96	0,4901	0,1695
45	822,90	285,05	0,4899	0,1697
50	1015,83	352,01	0,4898	0,1697
„VAR2“ modifikacija				
5	10,03	3,48	0,4836	0,1679
10	40,58	14,03	0,4892	0,1691
15	91,42	31,62	0,4898	0,1694
20	162,46	56,23	0,4896	0,1695
25	253,76	87,88	0,4894	0,1695
30	365,44	126,55	0,4895	0,1695
35	497,18	172,30	0,4893	0,1696
40	649,24	225,09	0,4891	0,1696
45	821,34	285,01	0,4889	0,1697
50	1013,52	352,04	0,4887	0,1697

11 lentelė. Pasipriešinimo ir prispaudimo koeficientų priklausomybė nuo važavimo greičio, kai santykinė oro drėgmė yra 50 %

Oro tėkmės greitis v , m/s	Pasipriešinimo jėga F_D , N	Prispaudimo jėga F_L , N	Pasipriešinimo koeficientas C_D	Prispaudimo koeficientas C_L
Pradinis variantas				
5	9,79	3,45	0,4723	0,1665
10	39,58	13,95	0,4771	0,1682

11 lentelės tęsinys

Oro tėkmės greitis v , m/s	Pasipriešinimo jėga F_D , N	Prispaudimo jėga F_L , N	Pasipriešinimo koeficientas C_D	Prispaudimo koeficientas C_L
15	89,47	31,42	0,4793	0,1683
20	159,04	55,87	0,4793	0,1684
25	248,36	87,33	0,4790	0,1684
30	357,48	125,76	0,4788	0,1684
35	486,58	171,16	0,4788	0,1684
40	635,50	223,60	0,4788	0,1685
45	804,01	283,02	0,4786	0,1685
50	992,55	349,57	0,4786	0,1686
„VAR1“ modifikacija				
5	10,02	3,43	0,4834	0,1655
10	40,51	13,87	0,4883	0,1672
15	91,29	31,29	0,4891	0,1676
20	162,16	55,64	0,4887	0,1677
25	253,33	86,96	0,4886	0,1677
30	364,70	125,30	0,4885	0,1678
35	496,35	170,53	0,4884	0,1678
40	648,12	222,82	0,4883	0,1679
45	820,14	282,09	0,4882	0,1679
50	1012,61	348,59	0,4883	0,1681
„VAR2“ modifikacija				
5	9,98	3,44	0,4813	0,1661
10	40,36	13,91	0,4866	0,1677
15	91,06	31,35	0,4879	0,1680
20	161,85	55,76	0,4878	0,1680
25	252,80	87,12	0,4876	0,1680
30	363,81	125,49	0,4873	0,1681
35	495,15	170,83	0,4873	0,1681
40	646,47	223,16	0,4871	0,1681
45	817,93	282,52	0,4869	0,1682
50	1009,53	349,01	0,4868	0,1683

12 lentelė. Pasipriešinimo ir prispaudimo koeficientų priklausomybė nuo važavimo greičio, kai santykinė oro drėgmė yra 100 %

Oro tėkmės greitis v , m/s	Pasipriešinimo jėga F_D , N	Prispaudimo jėga F_L , N	Pasipriešinimo koeficientas C_D	Prispaudimo koeficientas C_L
Pradinis variantas				
5	9,74	3,41	0,4697	0,1643
10	39,42	13,80	0,4752	0,1664

12 lentelės tęsinys.

Oro tėkmės greitis v , m/s	Pasipriešinimo jėga F_D , N	Prispaudimo jėga F_L , N	Pasipriešinimo koeficientas C_D	Prispaudimo koeficientas C_L
15	89,13	31,10	0,4775	0,1666
20	158,56	55,30	0,4779	0,1667
25	247,57	86,40	0,4775	0,1666
30	356,48	124,40	0,4775	0,1666
35	484,87	169,36	0,4771	0,1667
40	633,16	221,15	0,4770	0,1666
45	801,28	280,06	0,4770	0,1667
50	989,19	345,76	0,4770	0,1667
„VAR1“ modifikacija				
5	9,95	3,41	0,4796	0,1643
10	40,19	13,75	0,4844	0,1658
15	90,92	31,06	0,4871	0,1664
20	161,58	55,30	0,4869	0,1667
25	252,44	86,45	0,4869	0,1667
30	363,41	124,55	0,4868	0,1668
35	494,53	169,63	0,4866	0,1669
40	646,09	221,53	0,4868	0,1669
45	817,58	280,56	0,4867	0,1670
50	1009,48	346,60	0,4868	0,1671
„VAR2“ modifikacija				
5	9,94	3,41	0,4795	0,1645
10	40,25	13,78	0,4852	0,1661
15	90,79	31,09	0,4864	0,1666
20	161,28	55,32	0,4860	0,1667
25	251,92	86,42	0,4859	0,1667
30	362,49	124,47	0,4855	0,1667
35	493,19	169,46	0,4853	0,1668
40	643,74	221,29	0,4850	0,1667
45	814,36	280,13	0,4848	0,1668
50	1004,96	346,06	0,4846	0,1669