



**Kauno technologijos universitetas**  
Mechanikos inžinerijos ir dizaino fakultetas

# **Aerodinaminių elementų ir jų komponuočių įtakos skirtingiems automobilių kėbulams tyrimas**

Baigiamasis magistro projektas

---

**Ignas Žalgiris Povilaitis**

Projekto autorius

**Prof. Sigitas Kilikevičius**

Vadovas

---

**Kaunas, 2026**



**Kauno technologijos universitetas**  
Mechanikos inžinerijos ir dizaino fakultetas

# **Aerodinaminių elementų ir jų komponuočių įtakos skirtingiems automobilių kėbulams tyrimas**

Baigiamasis magistro projektas  
Transporto priemonių inžinerija (6211EX021)

---

**Ignas Žalgiris Povilaitis**

Projekto autorius

**Prof. Sigitas Kilikevičius**

Vadovas

**Doc. Rolandas Makaras**

Recenzentas

---

**Kaunas, 2026**



**Kauno technologijos universitetas**

Mechanikos inžinerijos ir dizaino fakultetas

Ignas Žalgiris Povilaitis

## **Aerodinaminių elementų ir jų komponuočių įtakos skirtingiems automobilių kėbulams tyrimas**

Akademinio sąžiningumo deklaracija

Patvirtinu, kad:

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

Ignas Žalgiris Povilaitis

*Patvirtinta elektroniniu būdu*



Kaunas technologijos universitetas  
Mechanikos inžinerijos ir dizaino fakultetas

## Magistro baigiamojo projekto užduotis

Išduota studentui – Ignas Žalgiris Povilaitis

### 1. Projekto tema

Aerodinaminių elementų ir jų komponuočių įtakos skirtingiems automobilių kėbulams tyrimas

*(Lietuvių kalba)*

Research on the Influence of Aerodynamic Elements and Their Compositions on Different Car Body Types

*(Anglų kalba)*

### 2. Projekto tikslas ir uždaviniai

Tikslas: Ištirti įvairių aerodinaminių elementų ir jų komponuočių įtaką skirtingų automobilių kėbulų aerodinaminėms charakteristikoms.

Uždaviniai:

- Išanalizuoti šiuo metu naudojamus aerodinaminius elementus, skirtingus kėbulus, jų aerodinaminių charakteristikų nustatymo metodikas ir išskirti tyrimui aktualius kėbulų tipus bei elementus.
- Sumodeliuoti automobilių kėbulus tyrimui ir suprojektuoti automobilių aerodinaminius elementus.
- Sudaryti aerodinaminių elementų charakteristikų tyrimo metodiką ir skaičiuojamuosius aerodinaminius modelius, pagrįstus skaičiuojamosios fluidų dinamikos metodais.
- Atlikti skaitinius skirtingų kėbulų aerodinaminio aptekėjimo tyrimus ir nustatyti aerodinaminių elementų komponuočių įtaką jų aerodinaminėms charakteristikoms.

### 3. Pagrindiniai reikalavimai ir sąlygos

Išskirti aerodinaminių elementų komponuotes tinkamiausias kiekvienam tiriamam kėbului.

Pagrindinės siekiamos objekto parametrų reikšmės: pasipriešinimo ir prispaudimo jėgos, masė tenkanti ašims.

### 4. Papildomi reikalavimai projektui, ataskaitai ir jos priedams

Netaikoma

Projekto autorius

Ignas Žalgiris Povilaitis

2026-02-15

*(Vardas, Pavardė)*

*(Parašas)*

*(Data)*

Projekto vadovas

Sigitas Kilikevičius

2026-02-15

*(Vardas, Pavardė)*

*(Parašas)*

*(Data)*

Krypties studijų  
programų vadovas

Artūras Keršys  
(Vardas, Pavardė)

(Parašas)

2026-02-15  
(Data)

Povilaitis, Ignas Žalgiris. Aerodinaminių elementų ir jų komponuočių įtakos skirtingiems automobilių kėbulams tyrimas. Magistro baigiamasis projektas / vadovas prof. Sigitas Kilikevičius; Kauno technologijos universitetas, Mechanikos inžinerijos ir dizaino fakultetas.

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

Reikšminiai žodžiai: Aerodinamika, Kėbulai, Komponuotė Sparnas, Difuzorius, Priekinė lūpa, Galinis aptakas, Kompiuterine fluidu dinamika (CFD), Pasipriešinimo koeficientas, Prispaudimo koeficientas.

Kaunas, 2026. 83 p.

## Santrauka

Tyrimo tikslas – nustatyti papildomų aerodinaminių elementų poveikį skirtingiems kėbulams, žinant kėbulų su elementais aerodinamines charakteristikas, sudarytos komponuotės. Analizuotuose informaciniuose ir mokslinės literatūros šaltiniuose tiriami pavieniai elementai ar komponuotės vienam kėbului, bet nėra lyginama įtaka skirtingiems automobiliams ar kėbulams. Papildomi aerodinaminiai elementai daro skirtingą įtaką sedanui, universalui bei kupė, todėl sudaromos optimalios komponuotės kėbulams. Komponuotės sudaromos iš: galinio aptako, sparno, smulkios priekinės lūpos, sportinės priekinės lūpos, mažo kampo difuzoriaus ir sportinio difuzoriaus. Automobiliai projektuoti naudojant „SolidWorks 2025“ programinę įrangą, pagal „BMW F30“ gabaritinius matmenis, bet dizaino elementai projektuoti atsižvelgiant į įvairių gamintojų naujus produkcinius modelius. Papildomi aerodinaminiai elementai projektuoti apžvelgus esamus pritaikomus aerodinaminius elementus, visos detalės yra originalios, nekopijuotos nuo esamų dizainų. Automobilių ir papildomų aerodinaminių elementų modeliai laikomi bendriniais ir supaprastintais, nes neįvertinamos realybėje esančios erdmės. Tyrimai vykdyti naudojant „SolidWorks 2025“ programinę įrangą ir „FlowSimulation“ paketą, vertintas kelio dangos judėjimas bei ratų sukimasis, atitinkantys oro srauto greitį. Rezultatai lyginti tarpusavyje tarp kėbulų ir izoliuotai, atimant bazinio automobilio kėbulo aerodinamines charakteristikas iš automobilio su papildomais aerodinaminiais elementais ir jų komponuotėmis. Pavienių elementų tyrime nustatyta, kad galiniai viršutiniai elementai sudaro didžiausią įtaką automobilių aerodinaminėms charakteristikoms. Komponuotės sudaromos gatvės ir sportiniams automobiliams; abiejų tikslai – sukelti kuo didesnę papildoma prispaudimo jėga. Gatvės automobilio daugiausiai prispaudimo kėbului teikianti komponuotė sudaryta iš smulkios priekinės lūpos ir galinio aptako. Sportiniams universalui ir kupė galinio aptako ir sportinės priekinės lūpos komponuotė generavo daugiausiai prispaudimo, o sedanui sparno ir sportinės lūpos komplektas. Tyrimui projektuoti difuzoriai neteikė kėbulams prispaudimo jėgos. Universalio gatvės automobilio komponuotės su galiniu aptaku nedaug atsiliko nuo sportinių komplektacijų. Sedano sportinės komplektacijos generavo daugiau prispaudimo, nei gatvės automobilio iki 40%, kupė tik 20%. Difuzorius, nors pagal oro srauto linijas kreipė orą į viršų, negeneravo prispaudimo jėgos, todėl manoma, kad elemento geometrija ar pozicija nėra optimali.

Povilaitis, Ignas Žalgiris. Research on the Influence of Aerodynamic Elements and Their Compositions on Different Car Body Types. Master's Final Degree Project / supervisor Prof. Sigitas Kilikevičius; Faculty of Mechanical Engineering and Design, Kaunas University of Technology.

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

Keywords: Aerodynamics, Bodies, Composition, Wing, Diffuser, Splitter, Rear spoiler, Computational fluid dynamics (CFD), Drag coefficient, Downforce coefficient.

Kaunas, 2026. 83.

### **Summary**

The main objective of the study is to determine the effect of additional aerodynamic elements on different car bodies, knowing the aerodynamic characteristics of bodies with elements, the compositions are formed. The analyzed information and scientific literature sources study individual elements or compositions for one body, but do not compare the impact of elements on different cars or bodies. Additional aerodynamic elements have a different effect on sedans, station wagons and coupes, therefore optimal compositions are formed for each body. The compositions consist of: rear lip, wing, small front lip, sports front lip, low-angle diffuser and sports diffuser. Car models are designed using the "SolidWorks 2025" software, according to the overall dimensions of the "BMW F30", but the design elements are designed taking into account design elements of new production models of various manufacturers. Additional aerodynamic elements are designed after reviewing existing applicable aerodynamic elements, all details are original, not copied from existing ones. Models of cars and additional aerodynamic elements are considered generic, simplified, because cavities in reality are not evaluated. The studies were carried out using the "SolidWorks 2025" software and the "FlowSimulation" package, the movement of the road surface and the rotation of the wheels, corresponding to the air flow speed, were evaluated. The results were compared between bodies and in isolation, subtracting the aerodynamic characteristics of the base car body from the car with additional aerodynamic elements and their compositions. A study of individual elements found that the rear upper elements have the greatest impact on the aerodynamic characteristics of cars. The element sets are designed for street and sports cars, both with the goal of generating as much additional downforce as possible. The composition that provides the most downforce to the body of the street car consists of a small front lip and a rear fairing. For the sports station wagon and coupe, the composition of the rear lip and the sports front lip generated the most downforce, and for the sedan, the wing and sports lip set. The diffusers designed for the research did not provide downforce to the bodies. The compositions of the station wagon street car with a rear lip did not lag behind the sports configurations. The sports configuration of the sedan outperformed the street car by up to 40%, the coupe only by 20%. The diffuser, although it directed air upwards according to the airflow lines, did not generate downforce, so it is believed that the geometry or position of the element is not optimal.

## Turinys

<b>Lentelių sąrašas</b> .....	<b>9</b>
<b>Paveikslų sąrašas</b> .....	<b>10</b>
<b>Santrumpų ir terminų sąrašas</b> .....	<b>14</b>
<b>Įvadas</b> .....	<b>15</b>
<b>1. Skirtingų kėbulų ir aerodinaminių elementų aerodinaminės charakteristikos</b> .....	<b>16</b>
1.1. Automobilių aerodinamikos istorija.....	16
1.2. Automobilių kėbulų aerodinaminės savybės .....	16
1.2.1. Sedano formos ir aerodinaminės charakteristikos.....	16
1.2.2. Universalos formos ir aerodinaminės charakteristikos .....	17
1.2.3. Kupė formos ir aerodinaminės charakteristikos.....	17
1.2.4. Kitų kėbulų formos ir aerodinaminės charakteristikos.....	17
1.3. Automobilių aerodinaminiai elementai .....	17
1.3.1. Galiniai automobilio sparnai.....	18
1.3.2. Galiniai automobilio difuzoriai.....	19
1.3.3. Priekinio bamperio lūpos.....	20
1.3.4. Kiti papildomi aerodinaminiai elementai .....	21
1.4. Automobilių aerodinaminių charakteristikų tyrimas.....	21
1.4.1. Teorinis aerodinaminių charakteristikų nustatymas.....	22
1.4.2. Kiti aerodinaminių charakteristikų nustatymo būdai .....	23
<b>2. Tyrimo projektavimo dalis</b> .....	<b>28</b>
2.1. Kėbulų projektavimas.....	28
2.1.1. Sedano projektavimas.....	28
2.1.2. Universalos projektavimas .....	30
2.1.3. Kupė projektavimas.....	31
2.2. Papildomų aerodinaminių elementų projektavimas .....	32
2.2.1. Sparnų projektavimas .....	32
2.2.2. Difuzorių projektavimas .....	34
2.2.3. Priekinių bamperio lūpų projektavimas.....	37
<b>3. Aerodinaminių charakteristikų nustatymo metodologija ir tikslai</b> .....	<b>38</b>
3.1. Tyrimo parametrai.....	38
3.2. Aerodinaminių elementų pozicijos ant kėbulų .....	39
<b>4. Skaitiniai aerodinaminio aptekėjimo tyrimai</b> .....	<b>44</b>
4.1. Baziniai kėbulų be papildomų aerodinaminių elementų tyrimai .....	44
4.2. Pavienių elementų įtakos kėbulams tyrimas.....	48
4.2.1. Sedano papildomų aerodinaminių elementų tyrimai.....	48
4.2.2. Universalos papildomų aerodinaminių elementų tyrimai .....	50
4.2.3. Kupė papildomų aerodinaminių elementų tyrimai.....	53
4.3. Komponentų įtakos kėbulams tyrimas .....	60
4.3.1. Gatvės automobilio komponentų tyrimas.....	60
4.3.2. Sportinio automobilio komponentų tyrimas .....	69
<b>Išvados</b> .....	<b>80</b>
<b>Literatūros sąrašas</b> .....	<b>81</b>

## Lentelių sąrašas

<b>1 lentelė.</b> Sedano be papildomų aerodinaminių elementų sukeltos jėgos skirtinguose greičiuose .....	44
<b>2 lentelė.</b> Sedano be papildomų aerodinaminių elementų sukeltos jėgos skirtinguose greičiuose .....	45
<b>3 lentelė.</b> Sedano be papildomų aerodinaminių elementų sukeltos jėgos skirtinguose greičiuose .....	45
<b>4 lentelė.</b> Sedano su papildomais aerodinaminiais elementais aerodinaminės charakteristikos .....	50
<b>5 lentelė.</b> Sedano papildomų aerodinaminių elementų aerodinaminės charakteristikos .....	50
<b>6 lentelė.</b> Universalio su papildomais aerodinaminiais elementais aerodinaminės charakteristikos .....	52
<b>7 lentelė.</b> Universalio papildomų aerodinaminių elementų aerodinaminės charakteristikos .....	53
<b>8 lentelė.</b> Kupė su papildomais aerodinaminiais elementais aerodinaminės charakteristikos .....	55
<b>9 lentelė.</b> Kupė papildomų aerodinaminių elementų aerodinaminės charakteristikos .....	55
<b>10 lentelė.</b> Gatvės sedano su papildomų aerodinaminių elementų komponuotėmis aerodinaminės charakteristikos .....	62
<b>11 lentelė.</b> Gatvės sedano papildomų aerodinaminių elementų aerodinaminės charakteristikos .....	62
<b>12 lentelė.</b> Gatvės universalio su papildomų aerodinaminių elementų komponuotėmis aerodinaminės charakteristikos .....	64
<b>13 lentelė.</b> Gatvės universalio papildomų aerodinaminių elementų aerodinaminės charakteristikos .....	64
<b>14 lentelė.</b> Gatvės kupė su papildomų aerodinaminių elementų komponuotėmis aerodinaminės charakteristikos .....	66
<b>15 lentelė.</b> Gatvės kupė papildomų aerodinaminių elementų aerodinaminės charakteristikos .....	66
<b>16 lentelė.</b> Sportinio sedano su papildomų aerodinaminių elementų komponuotėmis aerodinaminės charakteristikos .....	71
<b>17 lentelė.</b> Sportinio sedano papildomų aerodinaminių elementų aerodinaminės charakteristikos .....	71
<b>18 lentelė.</b> Sportinio universalio su papildomų aerodinaminių elementų komponuotėmis aerodinaminės charakteristikos .....	73
<b>19 lentelė.</b> Sportinio universalio papildomų aerodinaminių elementų aerodinaminės charakteristikos .....	74
<b>20 lentelė.</b> Sportinio kupė su papildomų aerodinaminių elementų komponuotėmis aerodinaminės charakteristikos .....	75
<b>21 lentelė.</b> Sportinio kupė papildomų aerodinaminių elementų aerodinaminės charakteristikos .....	76

## Paveikslų sąrašas

<b>1 pav.</b> „Alfa Romeo“ automobilis su galiniu aptaku [7] .....	18
<b>2 pav.</b> „Porsche“ automobilis su dideliu sportiniu sparnu [8] .....	18
<b>3 pav.</b> „Ford“ automobilio difuzorius [9] .....	19
<b>4 pav.</b> „Ferrari“ automobilio dugnas ir difuzorius [10] .....	19
<b>5 pav.</b> „BMW“ automobilis su priekine bamperio lūpa [12] .....	20
<b>6 pav.</b> „Audi“ automobilis su sportine priekine lūpa [13] .....	21
<b>7 pav.</b> Studentiškos formulės tyrimas moderniam vėjo tunelyje [18] .....	23
<b>8 pav.</b> Skirtingų priekinio sparno iteracijų vaizdavimas [22] .....	24
<b>9 pav.</b> „Zenvo TSR-S“ automobilis turintis asimetriškai reguliuojamą galinį sparną [24] .....	25
<b>10 pav.</b> „DrivAerNet++“ skirtingų kūbulų formos geometrijos pavyzdžiai [27] .....	25
<b>11 pav.</b> „DrivAerNet++“ detalių ir tikslumo geometrijos pavyzdžiai [26] .....	26
<b>12 pav.</b> „BMW F30“ schema [39] .....	28
<b>13 pav.</b> Suprojektuotas sedano modelis (priekinis vaizdas) .....	29
<b>14 pav.</b> Suprojektuotas sedano modelis (galinis vaizdas) .....	29
<b>15 pav.</b> Suprojektuotas universalio modelis (priekinis vaizdas) .....	30
<b>16 pav.</b> Suprojektuotas universalio modelis (galinis vaizdas) .....	30
<b>17 pav.</b> Suprojektuotas kupė modelis (priekinis vaizdas) .....	31
<b>18 pav.</b> Suprojektuotas kupė modelis (galinis vaizdas) .....	31
<b>19 pav.</b> Sportinio sparno matmenys .....	32
<b>20 pav.</b> Suprojektuotas sportinis sparnas.....	32
<b>21 pav.</b> Produkcinio automobilio galinio aptako matmenys.....	33
<b>22 pav.</b> Produkciniam automobiliui skirtas galinis aptakas.....	33
<b>23 pav.</b> Automobilių be papildomo difuzoriaus galinės apatinės dalies nuožulos kampas.....	34
<b>24 pav.</b> Sedano sportinis difuzorius.....	34
<b>25 pav.</b> Kupė sportinis difuzorius.....	35
<b>26 pav.</b> Universalio sportinis difuzorius.....	35
<b>27 pav.</b> Sedano produkcinio modelio difuzorius.....	36
<b>28 pav.</b> Kupė produkcinio modelio difuzorius.....	36
<b>29 pav.</b> Universalio produkcinio modelio difuzorius .....	36
<b>30 pav.</b> Sportiniam automobiliui skirta priekinio bamperio lūpa .....	37
<b>31 pav.</b> Produkciniam automobiliui skirta priekinio bamperio lūpa.....	37
<b>32 pav.</b> Skaičiuojamoji erdvė tyrimams .....	39
<b>33 pav.</b> Sparno montavimo taškai sedano kūbului .....	39
<b>34 pav.</b> Sparno montavimo taškai ir briaunos universalio kūbului .....	40
<b>35 pav.</b> Galinio aptako montavimo briauna sedano kūbului.....	40

<b>36 pav.</b> Galinio aptako montavimo briauna universalo kėbului .....	41
<b>37 pav.</b> Priekinės smulkios lūpos montavimo briauna kėbulams .....	41
<b>38 pav.</b> Priekinės sportinės lūpos montavimo briauna kėbulams .....	42
<b>39 pav.</b> Smulkesniojo difuzoriaus pradžia ir palinkimo kampas .....	42
<b>40 pav.</b> Sportinio difuzoriaus pradžia ir palinkimo kampas .....	43
<b>41 pav.</b> Oro srauto linijos aplink sedaną esant 130 km/h oro srauto greičiui .....	44
<b>42 pav.</b> Oro srauto linijos aplink universalą esant 90 km/h oro srauto greičiui.....	45
<b>43 pav.</b> Oro srauto linijos aplink kupė esant 90 km/h oro srauto greičiui .....	45
<b>44 pav.</b> Skirtingų kėbulų pasipriešinimo jėgų skirtinguose greičiuose palyginimas .....	46
<b>45 pav.</b> Skirtingų kėbulų pasipriešinimo koeficientų palyginimas .....	46
<b>46 pav.</b> Skirtingų kėbulų prispaudimo jėgų skirtinguose greičiuose palyginimas.....	47
<b>47 pav.</b> Skirtingų kėbulų prispaudimo koeficientų palyginimas.....	47
<b>48 pav.</b> Oro srauto linijos aplink sedaną su sparnu .....	48
<b>49 pav.</b> Oro srauto linijos aplink sedaną su galiniu aptaku .....	48
<b>50 pav.</b> Oro srauto linijos aplink sedaną su smulkia priekinio bamperio lūpa .....	49
<b>51 pav.</b> Oro srauto linijos aplink sedaną su sportine priekinio bamperio lūpa .....	49
<b>52 pav.</b> Oro srauto linijos aplink sedaną su 6 <sup>o</sup> difuzoriumi .....	49
<b>53 pav.</b> Oro srauto linijos aplink sedaną su 10 <sup>o</sup> difuzoriumi .....	49
<b>54 pav.</b> Oro srauto linijos aplink universalą su sparnu .....	51
<b>55 pav.</b> Oro srauto linijos aplink universalą su galiniu aptaku .....	51
<b>56 pav.</b> Oro srauto linijos aplink universalą su smulkia priekinio bamperio lūpa .....	51
<b>57 pav.</b> Oro srauto linijos aplink universalą su sportine priekinio bamperio lūpa .....	51
<b>58 pav.</b> Oro srauto linijos aplink universalą su 6 <sup>o</sup> difuzoriumi .....	52
<b>59 pav.</b> Oro srauto linijos aplink universalą su 10 <sup>o</sup> difuzoriumi.....	52
<b>60 pav.</b> Oro srauto linijos aplink kupė su 6 <sup>o</sup> difuzoriumi .....	53
<b>61 pav.</b> Oro srauto linijos aplink kupė su galiniu aptaku .....	53
<b>62 pav.</b> Oro srauto linijos aplink kupė su smulkia priekinio bamperio lūpa .....	54
<b>63 pav.</b> Oro srauto linijos aplink kupė su sportine priekinio bamperio lūpa .....	54
<b>64 pav.</b> Oro srauto linijos aplink kupė su 6 <sup>o</sup> difuzoriumi .....	54
<b>65 pav.</b> Oro srauto linijos aplink kupė su 10 <sup>o</sup> difuzoriumi .....	54
<b>66 pav.</b> Kėbulų su papildomais aerodinaminiais elementais pasipriešinimo jėgų palyginimo grafikas .....	56
<b>67 pav.</b> Elementų pasipriešinimo jėgos įtakos kėbulams palyginimo grafikas.....	57
<b>68 pav.</b> Kėbulų su papildomais aerodinaminiais elementais pasipriešinimo koeficientų palyginimo grafikas.....	57
<b>69 pav.</b> Kėbulų su papildomais aerodinaminiais elementais prispaudimo jėgų palyginimo grafikas .....	58
<b>70 pav.</b> Elementų prispaudimo jėgos įtakos kėbulams palyginimo grafikas.....	59

<b>71 pav.</b> Kėbulų su papildomais aerodinaminiais elementais prispaudimo koeficientų palyginimo grafikas.....	60
<b>72 pav.</b> Oro srauto linijos aplink sedaną su galiniu aptaku ir smulkia priekine lūpa.....	61
<b>73 pav.</b> Oro srauto linijos aplink sedaną su galiniu aptaku ir 6 <sup>o</sup> difuzoriumi.....	61
<b>74 pav.</b> Oro srauto linijos aplink sedaną su smulkia priekine lūpa ir 6 <sup>o</sup> difuzoriumi.....	61
<b>75 pav.</b> Oro srauto linijos aplink sedaną su visais gatvei tinkamais elementais.....	61
<b>76 pav.</b> Oro srauto linijos aplink universalą su galiniu aptaku ir smulkia priekine lūpa.....	63
<b>77 pav.</b> Oro srauto linijos aplink universalą su galiniu aptaku ir 6 <sup>o</sup> difuzoriumi.....	63
<b>78 pav.</b> Oro srauto linijos aplink universalą su smulkia priekine lūpa ir 6 <sup>o</sup> difuzoriumi.....	63
<b>79 pav.</b> Oro srauto linijos aplink universalą su visais gatvei tinkamais elementais.....	64
<b>80 pav.</b> Oro srauto linijos aplink kupė su galiniu aptaku ir smulkia priekine lūpa.....	65
<b>81 pav.</b> Oro srauto linijos aplink kupė su galiniu aptaku ir 6 <sup>o</sup> difuzoriumi.....	65
<b>82 pav.</b> Oro srauto linijos aplink kupė su smulkia priekine lūpa ir 6 <sup>o</sup> difuzoriumi.....	65
<b>83 pav.</b> Oro srauto linijos aplink kupė su visais gatvei tinkamais elementais.....	65
<b>84 pav.</b> Kėbulų skirtų gatvei su papildomų aerodinaminių elementų komponuotėmis pasipriešinimo jėgų palyginimo grafikas.....	67
<b>85 pav.</b> Papildomų aerodinaminių elementų komponuočių pasipriešinimo jėgų palyginimo grafikas.....	67
<b>86 pav.</b> Kėbulų skirtų gatvei su papildomų aerodinaminių elementų komponuotėmis prispaudimo jėgų palyginimo grafikas.....	68
<b>87 pav.</b> Papildomų aerodinaminių elementų komponuočių prispaudimo jėgų palyginimo grafikas.....	69
<b>88 pav.</b> Oro srauto linijos aplink sedaną su sparnu ir sportine priekine lūpa.....	70
<b>89 pav.</b> Oro srauto linijos aplink sedaną su sparnu ir 10 <sup>o</sup> difuzoriumi.....	70
<b>90 pav.</b> Oro srauto linijos aplink sedaną sportine priekine lūpa ir 10 <sup>o</sup> difuzoriumi.....	70
<b>91 pav.</b> Oro srauto linijos aplink sedaną su visais sportiniais elementais.....	70
<b>92 pav.</b> Oro srauto linijos aplink sedaną su galiniu aptaku ir geriausiai sportiniais komponentais.....	71
<b>93 pav.</b> Oro srauto linijos aplink universalą su sparnu ir sportine priekine lūpa.....	72
<b>94 pav.</b> Oro srauto linijos aplink universalą su sparnu ir 10 <sup>o</sup> difuzoriumi.....	72
<b>95 pav.</b> Oro srauto linijos aplink universalą su sportine priekine lūpa ir 10 <sup>o</sup> difuzoriumi.....	72
<b>96 pav.</b> Oro srauto linijos aplink universalą su visais sportiniais elementais.....	73
<b>97 pav.</b> Oro srauto linijos aplink universalą su galiniu aptaku ir geriausiai sportiniais komponentais.....	73
<b>98 pav.</b> Oro srauto linijos aplink kupė su sparnu ir sportine priekine lūpa.....	74
<b>99 pav.</b> Oro srauto linijos aplink kupė su sparnu ir 10 <sup>o</sup> difuzoriumi.....	74
<b>100 pav.</b> Oro srauto linijos aplink kupė su sportine priekine lūpa ir 10 <sup>o</sup> difuzoriumi.....	75
<b>101 pav.</b> Oro srauto linijos aplink kupė su visais sportiniais elementais.....	75
<b>102 pav.</b> Oro srauto linijos aplink kupė su galiniu aptaku ir geriausiai sportiniais komponentais.....	75

<b>103 pav.</b> Kėbulų skirtų sportui su papildomų aerodinaminių elementų komponuotėmis pasipriešinimo jėgų palyginimo grafikas.....	77
<b>104 pav.</b> Papildomų sportinių aerodinaminių elementų komponuočių pasipriešinimo jėgų palyginimo grafikas.....	77
<b>105 pav.</b> Kėbulų skirtų sportui su papildomų aerodinaminių elementų komponuotėmis prispaudimo jėgų palyginimo grafikas.....	78
<b>106 pav.</b> Papildomų sportinių aerodinaminių elementų komponuočių prispaudimo jėgų palyginimo grafikas.....	79

## Santrumpų ir terminų sąrašas

### Terminai:

**Pasipriešinimo jėga** – jėga veikianti objektą oro srauto kryptimi.

**Prispaudimo jėga** – neigiama kėlimo jėga.

**Komponuotė** – pagal paskirtį parenkamas aerodinaminių elementų rinkinys.

**Kompiuterinė fluidų dinamika** – kompiuteriniu būdu vykdomas aerodinamikos tyrimas (angl. – CFD)

**Galinis aptakas** – ant automobilio galinės viršutinės briaunos montuojamas elementas, skirtas nukreipti oro srautą į viršų ir generuoti prispaudimą.

**Priekinė bamperio lūpa** – papildomas aerodinaminis elementas montuojamas, automobilio priekinio bamperio apačioje, nukreipiantis oro srautą į viršų (angl. – splitter).

## Įvadas

Aerodinaminės charakteristikos turi stiprios įtakos automobilių dinamikos ypatumams, automobilio sukeliama pasipriešinimo jėga gali padidinti degalų sąnaudas, keliamą triukšmą bei sumažinti automobilio maksimalų greitį. Automobilio prispaudimo jėga gali pagerinti stabilumą posūkiuose ir leisti automobiliui įveikti posūkius žymiai didesniu greičiu. Serijinių automobilių gamintojai siekia kuo labiau sumažinti aerodinaminio pasipriešinimo jėgą, o lenktyniniams automobiliams prispaudimo jėga žymiai svarbesnė, nes taip automobiliai posūkius gali įveikti greičiau.

Norint pakeisti automobilio aerodinamines charakteristikas gali būti naudojami papildomi aerodinaminiai elementai, kurių siekis yra padidinti prispaudimo jėgą arba produkinių automobilių atveju suteikti išskirtinį įvaizdį. Visi elementai suteikiantys papildomos prispaudimo jėgos neišvengiamai sukels pasipriešinimo jėgos, todėl serijinių automobilių elementai dažniausiai būna smulkūs ir turi mažą įtaką aerodinaminėms charakteristikoms. Komponuojant elementus galima pasiekti sportinių automobilių aerodinamines charakteristikas naudojant tik smulkius serijiniams automobiliams tinkančius elementus.

Panašiuose rašto darbuose tiriami pavieniai aerodinaminiai elementai bei jų komponuotės, bet nėra lyginama jų įtaka skirtingiems automobiliams ar kėbulams [1][2]. Šio darbo tikslas - palyginti vienodų elementų įtaką skirtingiems automobiliams, nes tai nėra plačiai tirta.

**Darbo tikslas:** Ištirti įvairių aerodinaminių elementų ir jų komponuočių įtaką skirtingų automobilių kėbulų aerodinaminėms charakteristikoms. Tikslui pasiekti keliami uždaviniai:

1. Išanalizuoti šiuo metu naudojamus aerodinaminius elementus, skirtingus kėbulus, jų aerodinaminių charakteristikų nustatymo metodikas ir išskirti tyrimui aktualius kėbulų tipus bei elementus.
2. Sumodeliuoti automobilių kėbulus tyrimui ir suprojektuoti automobilių aerodinaminius elementus.
3. Sudaryti aerodinaminių elementų charakteristikų tyrimo metodiką ir skaičiuojamuosius aerodinaminius modelius, pagrįstus skaičiuojamosios fluidų dinamikos metodais.
4. Atlikti skaitinius skirtingų kėbulų aerodinaminio aptekėjimo tyrimus ir nustatyti aerodinaminių elementų komponuočių įtaką jų aerodinaminėms charakteristikoms.

## **1. Skirtingų kėbulų ir aerodinaminių elementų aerodinaminės charakteristikos**

Automobilių aerodinaminės charakteristikos turi reikšmingos įtakos automobilio valdymo ypatumams bei susijusioms sąnaudoms. Norint pasiekti geriausias rezultatus gali būti vykdomi įvairūs tyrimai, o esant automobilio dizaino spragoms gali būti naudojami papildomi aerodinaminiai elementai galintys padėti automobilio kėbului pasiekti patenkinamas ar net puikias eksploataavimo savybes.

### **1.1. Automobilių aerodinamikos istorija**

Aerodinaminiai efektai pastebėti kuriant pirmuosius lėktuvus, o vėjo tunelis tyrimams pirmą kartą pasitelktas dar XIX a. Broliai Raitai gamindami skrendančius aparatus stebėjo vėjo sukeltą įtaką. Aerodinaminius tyrimus vėjo tunelyje adaptavo „Chrysler“ bendrovė XX a. trečiojo dešimtmečio gale, pradėjo aptakių automobilių gamybą. Tuo pačiu metu vengrų inžinierius Polas Jarajus sukūrė lašo formos automobilio kėbulą, kurį pagamino „Tatra“ [3].

Automobilių evoliucija XX a. sparčiai progresavo, kai kurie gamintojai ilgą laiką siekė kuo žemesnio pasipriešinimo koeficiento, o kiti aerodinaminius efektus apsvarstydavo tik gale dizaino kūrimo, todėl ketvirtojo ir penktojo dešimtmečio automobiliai dažnai priminė lašo formą, vėlyvesni automobiliai turėjo kampuotas, iš dalies optimizuotas formas. Automobilių aerodinaminio optimizavimo tradicija sugrįžo devintajame ir dešimtajame XX a. dešimtmetyje, kai gamintojai pradėjo naudoti kompiuterinį dizainą ir pasėkoje kompiuterinės fluidų dinamikos skaičiavimo principus. XXI a. automobilių dizainas stipriai atsižvelgia į automobilių aptakias formas ir žemo aerodinaminio pasipriešinimo principus.

Svarbiausi automobilių aerodinamikos pažengimai yra: vėjo tunelis ir kompiuterinė fluidų simuliacija, abu šie metodai, nors ir smarkiai patobulinti vis dar naudojami automobilių pramonėje.

### **1.2. Automobilių kėbulų aerodinaminės savybės**

Dabartiniai gaminami automobiliai gali būti kategorizuojami pagal kėbulo formą: sedanas, universalas, kupė, visureigis, hečbekas ir kiti. Visi kėbulai turi plačiai apibrėžiamas išskirtines formas, kurios gali turėti reikšmingos įtakos aerodinaminėms charakteristikoms.

#### **1.2.1. Sedano formos ir aerodinaminės charakteristikos**

Sedanas – tai kėbulo forma, kurią galima išskirti į tris aiškias zonas, bei toks kėbulo tipas turi keturias duris keleiviams ir dažniausiai turi penkias sėdimas vietas.

Aerodinamines charakteristikas įtakojančios kėbulo formos: kaip dauguma lengvųjų automobilių videlio plotas apie 1,5 m<sup>2</sup>, priekinio stiklo nuo plokštumos kampas apie 25-35°, stogo linija nusileidžianti iki bagažo skyriaus gaubto, automobilio aukštis nuo važiuojamosios dangos 10-15 cm. Sedanų pasipriešinimo koeficientas dažniausiai būna 0,2-0,28 ribose. [4].

Dažnai pasitaikantis sedano kėbulo tipas serijiniams automobiliams dažnai turi papildomus aerodinaminius elementus, kurie suteikia išskirtinio įvaizdžio, kurie taip pat gali būti modifikuojamas sportinėms paskirtims, kur naudojami masyvūs, didelę prispaudimo jėgą suteikiantys elementai.

### **1.2.2. Universalos formos ir aerodinaminės charakteristikos**

Universalos kėbulo forma gali būti išskiriama į dvi zonas ir toks kėbulas turi keturias duris, bei 5-7 sėdimas vietas. Šio kėbulo priekinės formos dažniausiai nesiskiria nuo sedano, turi apie 1,5 m<sup>2</sup> vidinio plotą, 25-35° priekinio stiklo kampą, bet stogo linija nenusileidžia žemyn, bagažo skyriaus gaubtas lieka vertikalus kėbulo gale, kėbulo aukštis nuo dangos 10-15 cm. Pasipriešinimo koeficientas 0,25-0,32 [4].

Universalos kėbulo tipas tampa vis retesniu, užleidžiant vietą plento visureigiams, kurių kėbulo formos labai panašios, bet aukštis nuo važiuojamosios dangos didesnis, gaminami modeliai taip pat naudoja smulkius aerodinaminius elementus geresniam dizainui, o sportiniai variantai retesni, nei sedano, bet naudojami su kiek smulkesniais elementais [5].

### **1.2.3. Kupė formos ir aerodinaminės charakteristikos**

Kupė kėbulo forma gana panaši, kaip sedano, taip pat pasižymi trimis zonomis, bet turi tik dvi duris ir 2-5 sėdimas vietas. Vidinio plotas apie 1,5 m<sup>2</sup> ir priekinis langas taip pat 25-35°. Šis kėbulas dažnai pasižymi nuožulnesniu stogo linijos nusileidimu iki bagažo skyriaus gaubto nei sedanas. Aukštis nuo važiuojamosios dangos gali būti žemesnis, nei 10 cm sportiškesniems variantams, bet dažniausiai 10-15 cm ribose. Pasitaiko labai žemo pasipriešinimo koeficiento modelių, bet dažniausiai 0,22-0,3 ribose [6].

Kupė kėbulo tipas dažnai asocijuojasi su sportiškumu, todėl nėra toks dažnas, kaip kiti kėbulo modeliai, o gaminami serijiniai modeliai dažnai turi aerodinaminius elementus, kurie daro įtaką automobilio dinamikai. Sportiniams tikslams kupė kėbulas yra labai populiarus, nes naudojant aukštos įtakos aerodinaminius elementus, pasiekiami aukšti prispaudimo rezultatai.

### **1.2.4. Kitų kėbulų formos ir aerodinaminės charakteristikos**

Kitos kėbulų formos dažnai turi vieną pagrindinę savybę kuo jie skiriasi nuo sedano, universalos ir kupė, pavyzdžiui: visureigis yra panašus į universalą, bet jo aukštis didesnis; kabrioletas panašus į kupė, bet jo stogas gali nusileisti ir smarkiai pakeisti aerodinamines charakteristikas; hečbekas yra trumpesnis, dviduris universalas ir panašiai. Dauguma dabartinių gaminamų modelių turi smulkius aerodinaminius elementus, kurie dažniausiai naudojami, kaip stilistiniai elementai. Dauguma modelių, kurie įvardyti, kaip kiti, išskyrus hečbeką, retai naudojami sportiniais tikslais, todėl sunku įvertinti didelių aerodinaminių elementų įtaką kėbulams, kuriems jie retai taikomi.

## **1.3. Automobilų aerodinaminiai elementai**

Papildomus aerodinaminius elementus galima skirstyti pagal paskirtį: serijinių produkcinių automobilų elementai, bei sportiniai, lenktynėms skirti elementai. Serijinių automobilų aerodinaminiai elementai dažniausiai naudojami sportiškumo ar išskirtinumo įvaizdžiui suteikti, jie nesukelia didelės prispaudimo jėgos, bet ir netrukdo kasdieniniam automobilio eksploatavimui nesukeldami pasipriešinimo jėgos. Sportiniams automobiliams skirti elementai siekia kuo didesnės prispaudimo jėgos nepaisant pasipriešinimo jėgos, o jeigu pageidautinas aukštas maksimalus greitis, tam gali būti naudojami aktyvūs aerodinaminiai elementai.

### 1.3.1. Galiniai automobilio sparnai

Galinis automobilio sparnas yra dažniausiai naudojamas ir pats populiariausias aerodinaminis elementas. Automobilų galiniai aptakai bei sparnai skirti nukreipti oro srautui į viršų, nes taip sukuriama prispaudimo jėga. Visi aerodinaminiai elementai sukuria papildomą pasipriešinimo jėgą, todėl verta apvarstyti jų paskirtį: ar automobilis naudojamas gatvėje, koks lenktynių tipas ir siekiamas papildomas prispaudimas automobilio ašių atžvilgiu.

Produkcinių automobilų smulkus sparnas ar galinis aptakas turi mažą įtaką automobilio dinamikai, bet naudojant kartu su kitais aerodinaminiais elementais jo įtaka išauga smarkiai (žr. 1 pav.).



1 pav. „Alfa Romeo“ automobilis su galiniu aptaku [7]

Sportiniai automobiliai naudoja sparnus galinės ašies prispaudimui padidinti, sparnų profiliai dažnai panašūs į lėktuvo sparnus, bet jie oro srautą nukreipia į viršų sukurdami prispaudimo jėgą. Tokius elementus verta naudoti kai lenktynėse nėra siekiama aukšto maksimalaus greičio, o norima įveikti posūkius kuo greičiau (žr. 2 pav.).



2 pav. „Porsche“ automobilis su dideliu sportiniu sparnu [8]

Kadangi galiniai aerodinaminiai elementai dažniausiai turi didžiausią įtaką automobilio valdomumui, todėl toks elementas tiriamas pirmasis.

### 1.3.2. Galiniai automobilio difuzoriai

Difuzoriai lyginant su kitais aerodinaminiais elementais sukuria nedaug pasipriešinimo jėgos. Šie elementai veikia automobilio apačia pratekanti srautą nukreipdami jį aukštyr švelnia nuožula.

Serijinių automobilių difuzoriai dažniausiai būna galinio bamperio dalis, nes retai būna vietos automobilio apačioje kurti ilgesnį oro srauto taką, todėl šie elementai skirti pagerinti išvaizdai (žr. 3 pav.).



3 pav. „Ford“ automobilio difuzorius [9]

Sportiniams automobiliams naudojami kuo ilgesni difuzoriai, net iki dviejų trečiųjų automobilio ilgio, nes kuo ilgesnis šis elementas, tuo didesnė sukuriamą prispaudimo jėga (žr. 4 pav.).



4 pav. „Ferrari“ automobilio dugnas ir difuzorius [10]

Lenktyniniuose automobiliuose gali būti naudojami dar ilgesni difuzoriai, kadangi šio elemento svarba ganėtinai aukšta, nors difuzorius nesukelia tiek prispaudimo jėgos kaip sparnas bei jo sukeliama pasipriešinimo jėga maža, todėl verta panaudoti automobilio dugnu tekančią oro srautą papildomai prispaudimo jėgai sukurti [11].

### 1.3.3. Priekinio bamperio lūpos

Priekinės bamperio lūpos – svarbiausias aerodinaminis elementas siekiant padidinti automobilio priekinės ašies sukibimui su kelio danga. Šis elementas tiek produkciniams, tiek sportiniams automobiliams dalį oro srauto nukreipia į viršų taip sudarydamas prispaudimo jėgą automobilio priekyje.

Serijinių automobilių priekinė bamperio lūpa, taip pat naudojama, kaip stilistinis elementas, nors sukeliama pasipriešinimo jėga gan didelė, efektas žymus pasidaro tik esant dideliame greičiui, o gatvės automobiliai retai pasiekia tokį greitį (žr. 5 pav.).



5 pav. „BMW“ automobilis su priekine bamperio lūpa [12]

Sportiniams automobiliams priekinė lūpa naudojama siekiant pagerinti priekinės ašies sukibimą, bei šis elementas dažniausiai naudojamas labai techniškose trasose, kur vidutinis greitis nedidelis ir su daug posūkių (žr. 6 pav.).



6 pav. „Audi“ automobilis su sportine priekine lūpa [13]

Ekstremaliais atvejais priekinė sportinė lūpa gali atrodyti kaip sparnas, tokie elementai suteikia automobiliui labai daug prispaudimo jėgos bei pasipriešinimo jėgos.

#### 1.3.4. Kiti papildomi aerodinaminiai elementai

Kiti aerodinaminiai elementai dažniausiai naudojami, kaip pagalbiniams anksčiau aptartiems elementams, nukreipiantys oro srautą link didesnių, stipresnę įtaką darančių aerodinaminių elementų. Dažniausiai naudojami kiti aerodinaminiai elementai:

- Dugno apsauga / dugno uždengimas – sumažina pasipriešinimo jėgą kylančią nuo susidarančių oro srauto sūkurių variklio skyriuje bei aplink važiuoklę, naudojant kartu su difuzoriumi nukreipiamas oro srautas link difuzoriaus, taip generuojama prispaudimo jėga [14].
- „Kenardai“ arba priekiniai šoniniai sparneliai – nukreipia oro srautą aukštyn ir nustumia srautą nuo automobilio šonų, tai sumažina oro sūkurių sukuriamą vilktį bei prispaudžia automobilio priekinę ašį prie kelio dangos.
- Ratų uždengimai – XX a. septintajame ir aštuntajame dešimtmečiuose dažnai naudoti elementai uždengiantys galinius ratus, pagerina automobilio aptakumą mažindami pasipriešinimo jėgą.

Daugelis kitų aerodinaminių elementų yra labai smulkūs ir naudojami kaip pagalbiniams elementams didelėms aerodinaminėms detalėms arba kaip stilistiniai elementai, beveik negeneruojantys aerodinaminių jėgų.

#### 1.4. Automobilių aerodinaminių charakteristikų tyrimas

Aerodinaminės charakteristikos visiems objektams gali būti nustatomos trimis būdais: teoriniu skaičiavimu, empiriniu tyrimo metodu ir skaitiniu tyrimu. Dažniausiai tiriamos charakteristikos yra objekto pasipriešinimas ir kėlimas, išreiškiami koeficientu arba jėga, o kitos charakteristikos paprastai būna šių jėgų efektai, tokie kaip: automobiliui masės persiskirstymas tenkantis ašims, teorinės automobilio degalų sąnaudos, kitų detalių susidėvėjimo greitis ir t.t.

### 1.4.1. Teorinis aerodinaminių charakteristikų nustatymas

Nustatant objekto aerodinamines charakteristikas dažniausiai yra žinoma arba veikianti jėga, arba koeficientas. Jeigu nėra žinomas nei vienas iš jų, tai charakteristikų nustatymas teoriniu būdu tampa labai sudėtingas ir gan nepraktiškas [16]. Nustatant aerodinamines charakteristikas įprastiniu atveju reikia žinoti keletą parametrų:

- $A$  – plotas, kurį veikia oro srautas.
- $\rho$  – aplinkos, kurioje yra tiriamas objektas tankis, dažniausiai oro;
- $v$  – oro srauto tenkančio aplink objektą arba pačio objekto greitis;
- $D$  arba  $L$  arba  $F_{aer}$  – oro srauto jėga veikianti objektą;
- $C_D$  arba  $C_L$  – aerodinaminis pasipriešinimo arba kėlimo koeficientas.

Pasipriešinimo jėgos skaičiavimo formulė:

$$D = \frac{C_D * A * \rho * v^2}{2} \quad (1)$$

Momentų reakcijoms automobiliams taikoma formulė:

$$F_{aer} = \frac{C_D * A * \rho * v^2}{2} \quad (2)$$

Pasipriešinimo jėgos koeficiento skaičiavimo formulė:

$$C_D = \frac{2D}{A * \rho * v^2} \quad (3)$$

Kėlimo jėgos skaičiavimo formulė:

$$L = \frac{C_L * A * \rho * v^2}{2} \quad (4)$$

Kėlimo jėgos koeficiento skaičiavimo formulė:

$$C_L = \frac{2L}{A * \rho * v^2} \quad (5)$$

Jeigu aerodinaminių charakteristikų tyrimo objektas yra automobilis arba papildomas automobilio aerodinaminis elementas, kėlimo jėga dažniausiai bus neigiama ir gali būti vadinama prispaudimo jėga. Skaičiuojant automobilio pasipriešinimo jėgą ar pasipriešinimo jėgos koeficientą  $A$  – plotas tampa  $A_M$  – midelio plotu, tai yra automobilio priekinė projekcija.

Aplinkos tankis yra dažniausiai oro tankis, teoriniuose skaičiavimuose gali būti naudojamas oro slėgis jūros lygyje – 101,325 kPa arba specifiskai pamatuotas oro slėgis lokacijoje, kurioje šis skaičiavimas aktualus.

Atliekant kompiuterinės fluidų dinamikos tyrimus „SolidWorks“ su „Flow Simulation“ paketu atlieka skaičiavimus naudojant šias lygtis:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho u_i) = 0 \quad (6)$$

$$\frac{\partial \rho u_i}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho u_i u_j) + \frac{\partial p}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} (\tau_{ij} + \tau_{ij}^R) + S_i \quad i = 1, 2, 3 \quad (7)$$

$$\frac{\partial \rho H}{\partial t} + \frac{\partial u_i H}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} (u_j (\tau_{ij} + \tau_{ij}^R) + q_i) + \frac{\partial p}{\partial t} - \tau_{ij}^R \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \rho \varepsilon + S_i u_i + Q_H, \quad H = h + \frac{u^2}{2} \quad (8)$$

$$\tau_{ij} = \mu \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} - \frac{2}{3} \delta_{ij} \frac{\partial u_k}{\partial x_k} \right) \quad (9)$$

$$\frac{\partial \rho k}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho u_i k) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left( \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_i} \right) + S_k, \quad (10)$$

$$\frac{\partial \rho \varepsilon}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho u_i \varepsilon) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left( \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_i} \right) + S_\varepsilon, \quad (11)$$

Šiuos sprendimus programinė įranga atlieka daugybę iteracijų ir suskaičiuoja vidutines aerodinaminių charakteristikų vertes [17].

Oro srauto greitis tekantis aplink objektą automobilių aerodinaminių charakteristikų nustatymo metu virsta į pačio automobilio greitį. Greičio parametras skaičiavime yra keliamas kvadratu, todėl šioje formulėje didėjant greičiui, smarkiai didėja jėgos reikšmės.

#### 1.4.2. Kiti aerodinaminių charakteristikų nustatymo būdai

Pagrindiniai tyrimo metodai aerodinaminėms charakteristikoms nustatyti yra vėjo tunelis ir kompiuterinė skaičiuojamoji fluidų dinamika. Tai du istoriškai svarbiausi pažengimai aerodinaminėms charakteristikoms nustatyti. Vėjo tunelis pradėtas naudoti XIX a. uždaroje patalpoje pučiant orą link tiriamo objekto ir stebint efektus. Ilgainiui vėjo tuneliai tobulėjo, pradėti naudoti jėgų jutikliai, tikslus oro srauto greičio reguliavimas, patalpos aplinko slėgio reguliavimas, srauto turbulentiškumo imitatoriai, automobiliams aktualūs važiavimo paviršiaus judėjimo efekto takai ar voleliai. Taip naudojant moderniausius vėjo tunelius galima nustatyti visus reikiamus aerodinaminius efektus (žr. 7 pav.).

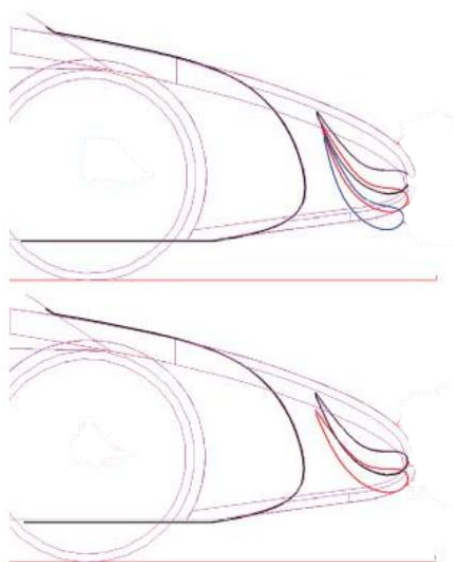


7 pav. Studentiškos formulės tyrimas moderniaame vėjo tunelyje [18]

Kompiuterinės fluidų dinamikos tyrimus galima validuoti atliekant vėjo tunelio skaičiavimus, abu metodai siekia atkartoti automobilio tikras naudojimo sąlygas ir aerodinamikos sukuriamus efektus [19]. Vėjo tunelių tyrimai dažnai yra brangūs ir užtrunka daug laiko, todėl naudojant iteracinius aerodinaminių elementų optimizacijos tyrimus, verta būti įsitikinus elementų efektų naudingumu ir baigtumu.

Kompiuterinis skaičiuojamasis fluidų dinamikos (CFD) tyrimo metodas turi keletą pranašumų, tyrimai gali būti dažnai kartojami ir pastebint modelio spragas galima vykdyti iteracinius bandymus. Šis metodas veikia pasiteikiant kompiuterines skaičiuojamąsias programas, suskaidant modelio erdvę į daugybę smulkių dalių ir kiekvienoje sprendžiant Navjė-Stokso lygtis. Siekiant aukšto tikslumo laipsnio tai gali užtrukti labai ilgai arba gali būti naudojami super kompiuteriai [20].

Iteraciniai tyrimai yra vienas iš didžiausių kompiuterinio tyrimo pranašumų, nes galima tikrinti kiekvieną smulkų geometrijos ar pozicijos pakeitimą [21]. Tyrime tiriama automobilio priekinio sparno pozicijos optimizavimas ir nustatoma, kad pakeitus sparno vietą galima padvigubinti prispaudimo jėgą, sukeltą tik 3 – 4 procentus papildomos pasipriešinimo jėgos (žr. 8 pav.).



**8 pav.** Skirtingų priekinio sparno iteracijų vaizdavimas [22]

Automobilių aerodinaminių charakteristikų tyrimuose dažniausiai bandoma pasiekti kuo didesnę prispaudimo jėgą nesukeliant didelės pasipriešinimo jėgos, nes šios dvi jėgos yra pačios svarbiausios automobilių dinamikai.

Moderniuose automobilių aerodinamikos tyrimuose dažnai akcentuojami aktyvūs aerodinaminiai elementai, kurie dažnu atveju prisitaiko prie esamo automobilio greičio, arba siekiant sumažinti pasipriešinimo jėgą uždengiamos priekinės automobilio ertmės, kaip grotelės ar nuleidžiama automobilio sparno detalė į žemo pasipriešinimo padėtį; arba siekiant padidinti automobilio prispaudimo jėgą norint daugiau sukibimo su kelio danga esant ekstremaliai greičiui. Aktyvūs elementai gali būti naudojami kaip oro stabdžiai. Smarkiai užverčiant aerodinaminius elementus gali būti specialiai generuojama didelė pasipriešinimo jėga, kuri padeda automobiliui sulėtėti. Moderniausias aktyvios aerodinamikos pavyzdys yra asimetriškai reguliuojami aerodinaminiai elementai, kurie gali posūkių metu spausti vieną automobilio pusę žemyn stipriau nei kitą, taip posūkių greičiai gali tapti dar aukštesni (žr. 9 pav.) [23].



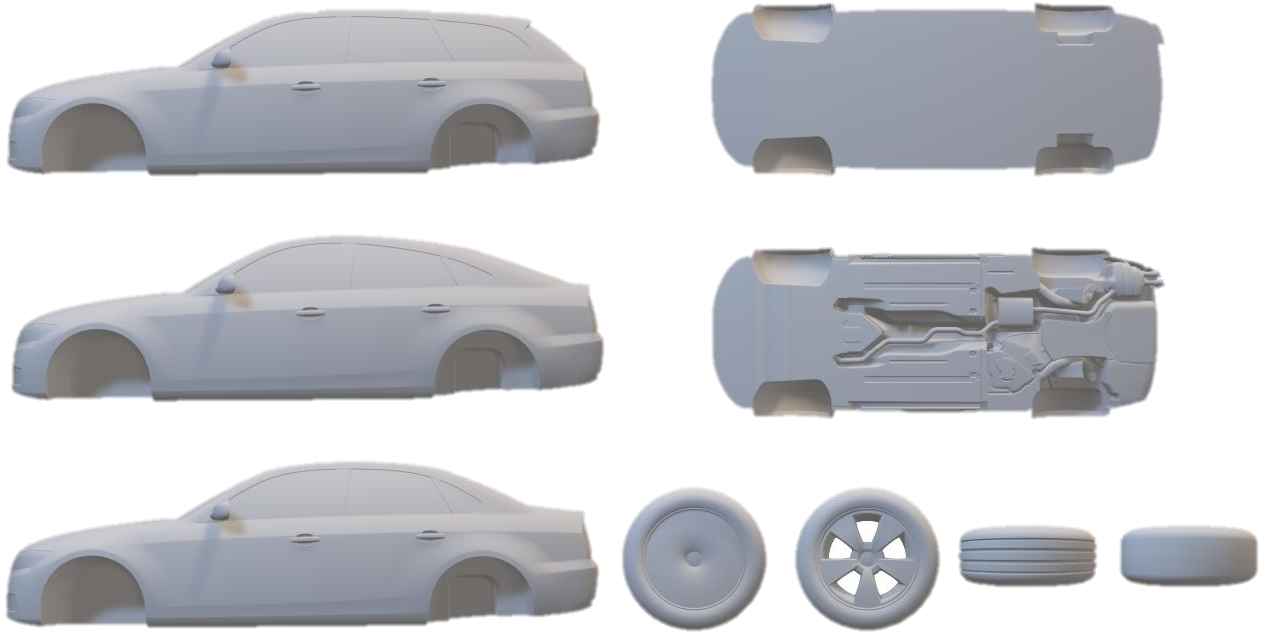
**9 pav.** „Zenvo TSR-S“ automobilis turintis asimetriškai reguliuojamą galinį sparną [24]

Dirbtinio intelekto pasitelkimas aerodinaminėms optimizacijoms yra naujusias įrankis siekiant projektuoti aerodinamiškai efektyvius automobilius, dažniausiai siekiant kuo mažesnio pasipriešinimo. Dirbtinis intelektas gali optimizuoti automobilio geometriją žinodamas koreliaciją tarp geometrinių formų ir sukeltos aerodinaminės jėgos. Šis įrankis gali būti pasitelktas realiu laiku apskaičiuojant aerodinaminius efektus nustatant automobilio sukeltas jėgas uždaroje aplinkoje ar net nuspėjant charakteristikas tam tikrose lenktynių trasose [25]. Kuriami dirbtinio intelekto įrankiai, kaip „DrivAerNet“ ir „DrivAerNet++“, kurių paskirtis turėti kuo daugiau informacijos apie skirtingą automobilių geometriją ir remiantis kiekvieno automobilio modelio skaičiuojamosios fluidų dinamikos tyrimais gali labai greitai nuspėti tiriamo automobilio aerodinamines savybes iki 4 procentų paklaida. Tokie įrankiai gali būti naudojami automobilių geometrijai optimizuoti (žr. 10 pav.) [26].



**10 pav.** „DrivAerNet++“ skirtingų kėbulų formos geometrijos pavyzdžiai [27]

Įrankis taip pat gali atsižvelgti į skirtingus dizaino elementus, kaip automobilio ratai. „DrivAerNet++“ turi daugiau nei 8000 geometrinių modelių, kurias remiantis galimi nuspėjami skaičiavimai. Galimas automobilio detalumo pasirinkimas, ar modeliuose vertinama automobilio dugno ertmių įtaka, ir ar svarbus automobilio ratų tikslumas (žr. 11 pav.).



**11 pav.** „DrivAerNet++“ detalių ir tikslumo geometrijos pavyzdžiai [25]

Šis bei kiti dirbtinio intelekto įrankiai gali paspartinti skaičiuojamosios fluidų dinamikos darbo greitį daugiau nei 10 kartų išlaikydami labai aukštą tikslumą. Minėti įrankiai nesiekia pakeisti kompiuterinio fluidų skaičiavimo naudojant Navjė-Stokso lygtis, tačiau jie teikia gero lygio aproksimacijas siekiant greičiau optimizuoti automobilio kėbulo geometriją [28].

Dirbtinio intelekto sistemos supaprastinančios 3D geometrinius modelius į 2D modelius pasiekia dar greitesnę aerodinaminių charakteristikų nuspėjimą išlaikant iki 0,84 tikslumo koeficientą lyginant su kompiuterinės skaičiuojamosios fluidų dinamikos tyrimais [29].

Naudojant dirbtinio intelekto įrankius galima smarkiai pagreitinti automobilio geometrijos optimizacijos užduotį, panaudojant 2D tyrimą, tada taikant „DrivAerNet++“ ar panašią programą rezultatus patikslinti. Gavus geriausius dirbtiniu intelektu pasiekiamus rezultatus galima pereiti į klasikinį kompiuterinės skaičiuojamosios fluidų dinamikos tyrimą, kai modeliai perskaičiuojami įprastu būdu, bei atliekamos paskutinės korekcijos [30].

Automobilio kėbulo optimizavimas iteraciniu metodu keičiant automobilio kėbulo esminius kampus, kaip variklio gaubto su priekiniu stiklu kampas, stogo polinkio ar priekinio bamperio apatinio krašto išlinkimo dydis, gali sudaryti gana didelę įtaką automobilio aerodinaminėms charakteristikoms [29]. Tiriant optimizacijos efektą, visureigiui pasipriešinimo koeficientas sumažėjo nuo 0,381 iki 0,362 nepakeičiant esminių automobilio dizaino elementų [31].

Optimizuojant sportinių automobilių papildomų elementų sukeliama įtaką, svarbu pastebėti, kad siekiant aukštesnės prispaudimo jėgos sukeliama daugiau pasipriešinimo jėgos [32]. Dauguma atveju difuzorius neženkliai veikia pasipriešinimą, nors sukeliama prispaudimo jėga gali padėti sportiniam automobiliui priglusti prie važiuojamosios dalies geriau. Sportinio automobilio aerodinaminė komponuotė turi būti parenkama pagal lenktynių pobūdį, nors dažnu atveju galima tiesiog siekti kuo didesnės prispaudimo jėgos, ignoruojant sukeliama papildomą pasipriešinimo jėgą [33].

Automobilių modelių supaprastinimas gali būti pasitelkiamas efektų tyrimui, naudojant supaprastintus modelius, taip pat galima vertinti automobilio modifikacijas, lyginti sukeltus

efektus, stebėti oro srauto elgesį aplink automobilį, nes tokie tyrimai nebando nustatyti automobilio aerodinaminių charakteristikų, bet tiria charakteristikų pokytį esant modifikacijoms [34]. Supaprastinimas vykdomas, kai neįmanomas tikslaus modelio tyrimas dėl: kompiuterinių resursų trūkumo, nėra įmanoma gauti tikro serijinio automobilio modelio, ar dėl ertmių aproksimavimo. Supaprastinimai, kaip ratų ar veidrodėlių neįtraukimas į tyrimą gali turėti iki 40 procentų paklaidą lyginant su tiksliu automobilio modeliu, todėl svarbu tiriant supaprastintus automobilio modelius įtraukti realistiškus elementus, kurie bent iš dalies galėtų atspindėti tikro automobilio aerodinamines charakteristikas [35]. Vieno elemento optimizavimui gali būti pasitelktas „Ahmed“ kūnas – tai ypač supaprastintas automobilio atvaizdas, neturintis ratų bei veidrodėlių, bet jeigu tyrimo tikslas yra tirti vieną elementą labai lengva matyti pokytį rezultatams. Tiriamas difuzoriaus kampas „Ahmed“ kūnui ir aiškiai pastebima aukščiausia prispaudimo jėga, kai difuzorius nustatytas 10 laipsnių kampu, bei lengva pastebėti, kad kai pasiekiamas 20 laipsnių kampas, oro srautas yra atsiplėšęs [36][37].

Lyginant skirtingus kėbulus vienodais automobilio priekiais, galinė viršutinė automobilio dalis sudaro reikšmingiausią įtakos dalį ir galima tikėtis, kad sedano pasipriešinimo jėga bus mažesnė, bet hečbekas ar universalas turės aukštesnę prispaudimo jėgą [38].

## 2. Tyrimo projektavimo dalis

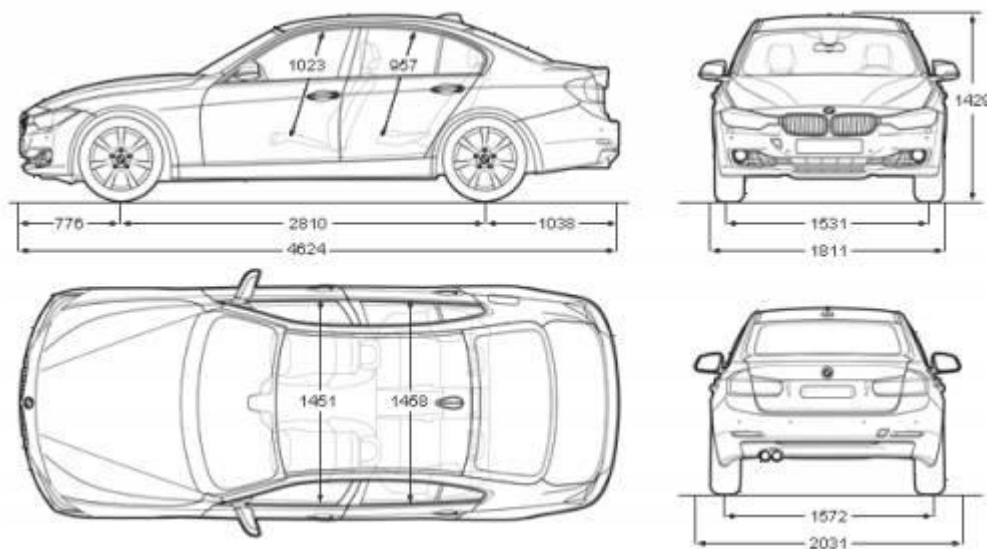
Tyrimui naudojami trys kėbulo tipai: sedanas, universalas ir kupė bei trys dažniausiai produkciniam modeliui ir sportiniam automobiliams naudojami papildomi aerodinaminiai elementai, tokie kaip sparnas, difuzorius ir priekinė lūpa. Šie kėbulai pasirenkami dėl aukšto palyginamumo: jie gali turėti identiškus priekius, tai leis tyrimo metu palyginti priekinių papildomų elementų įtaką, kai skiriasi tik automobilio galas. Sparnas, difuzorius ir priekinė lūpa dažniausiai sutinkami elementai, taip pat šie elementai sukelia didžiausią įtaką aerodinaminėms charakteristikoms, todėl tyrimo rezultatus bus lengviausia sekti.

### 2.1. Kėbulų projektavimas

Tyrimui reikalingi sedano, universalas ir kupė 3d modeliai, norint, kad modeliai būtų lengvai palyginami. Naudojantis internetiniais šaltiniais nebuvo rasta lengvai prieinamų suprojektuotų automobilių, kurie turėtų tris kėbulo versijas bei būtų tinkamo failo formato kompiuteriniam skaičiuojamajam fluidų tyrimui. Nuspręsta projektuoti automobilius rankiniu būdu pasitelkiant „SolidWorks“ programinę įrangą. Automobilių kėbulai braižomi apžvelgus modernaus dizaino elementus pastebimus serijiniuose automobiliuose, tokiu būdu tiriami automobilio modeliai gali atspindėti panašius gaminamus produkcinius automobilius.

#### 2.1.1. Sedano projektavimas

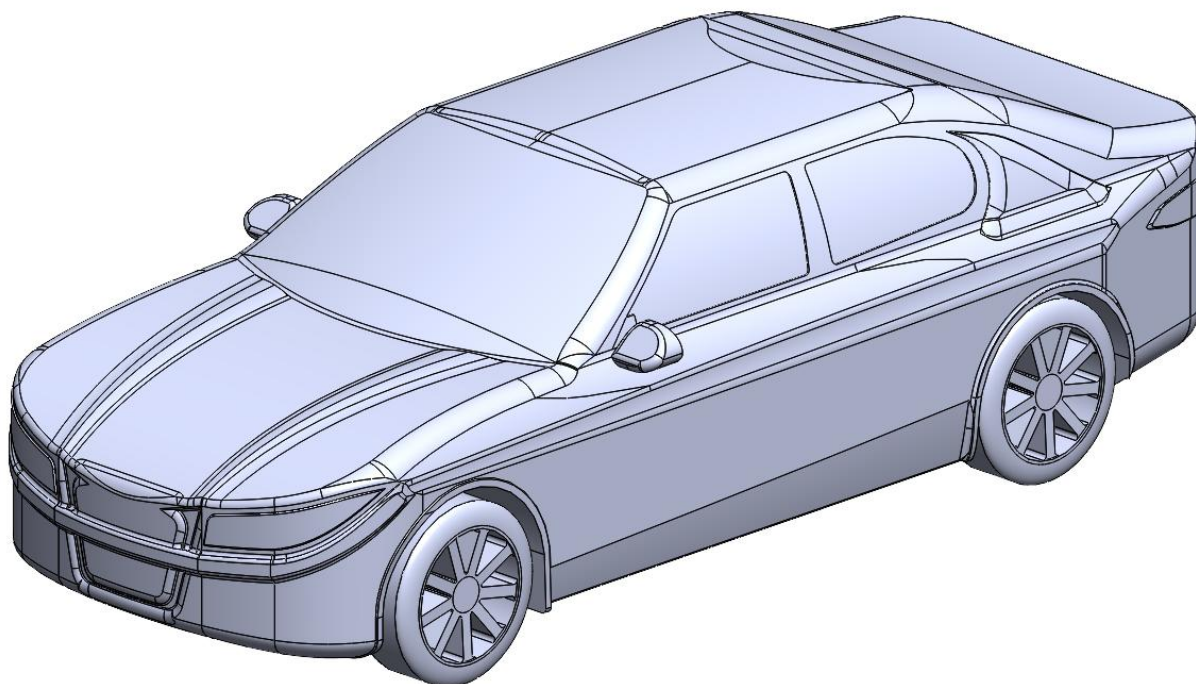
Projektuojant pirmąjį kėbulo modelį pasirinkta pradėti nuo sedano modelio, nes jį modifikuojant galima gauti universalas ir kupė modelius, svarbiausia numatyti automobilio priekį, kuris visiems kėbulo modeliams bus vienodas. Norint atspindėti modernaus sedano gabaritinius matmenis remiamasi „BMW F30“ schema (žr. 12 pav.), ši schema naudojama tik gabaritiniais matmenimis, nes pačio automobilio dizainas nėra pats naujausias, bet gerai atspindi modernaus automobilio dydį.



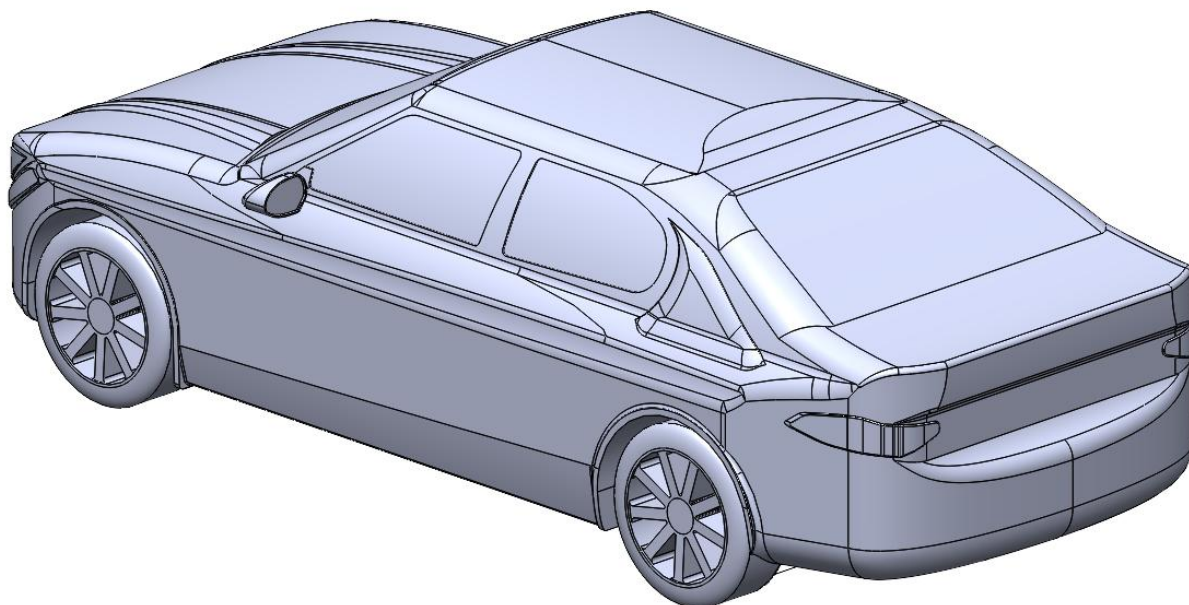
12 pav. „BMW F30“ schema [39]

Projektuotas modelis neturi tiksliai atvaizduotos važiuoklės, variklio ar galios agregato skyriaus bei kitų kėbuluose esančių ertmių, todėl modelis yra laikomas supaprastintu. Visi modelio supaprastinimai, turi atsikartoti visuose kėbulų modeliuose, tik taip tyrimai gali būti palyginami

tarpusavyje. Projektuoto automobilio matmenys: 4618 mm ilgis, 2000 mm plotis (įtraukiant veidrodėlius), 1820 mm plotis (nevertinant veidrodėlių) ir 1440 mm aukštis (su ratais).



**13 pav.** Suprojektuotas sedano modelis (priekinis vaizdas)

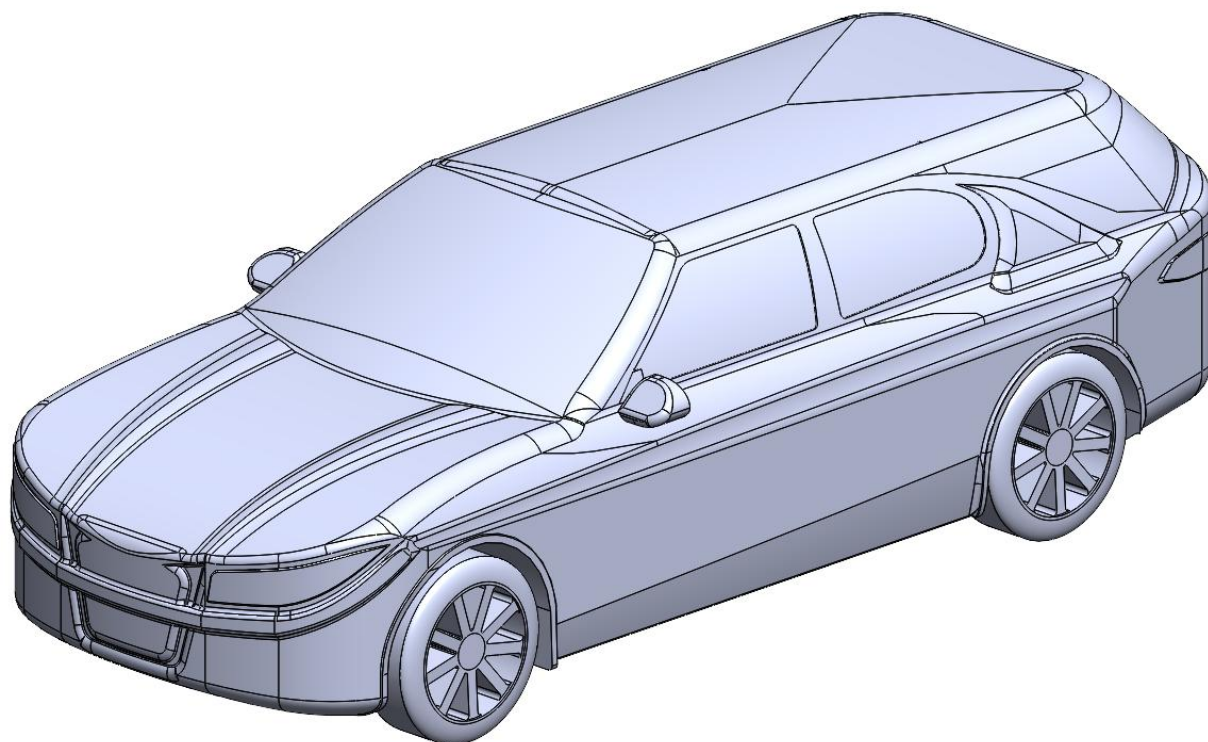


**14 pav.** Suprojektuotas sedano modelis (galinis vaizdas)

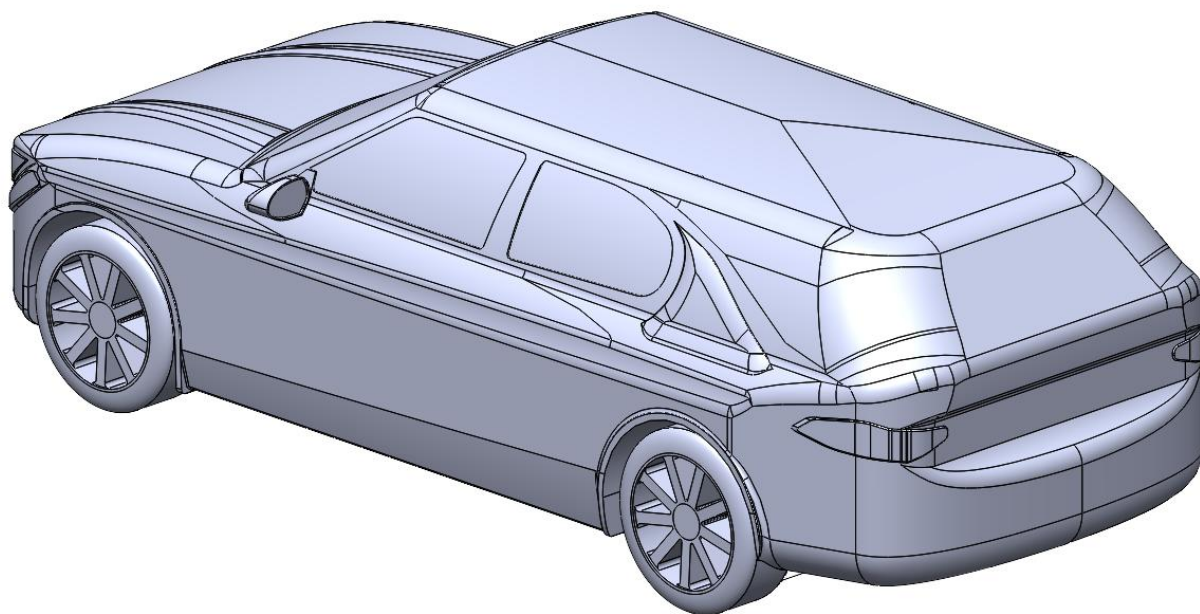
Modelyje galima atpažinti įvairių gamintojų modernių automobilių dizaino elementų, bet nei vienas elementas nėra tiksliai nukopijuotas nuo esamų dizainų, tai yra bendrinis originalus sedano modelis (žr. 13 ir 14 pav.).

### 2.1.2. Universalio projektavimas

Projektuojant universalą išlaikomos dauguma sedano dizaino elementų, keičiamas tik automobilio galas, siekiant kuo tikslesnio palyginamojo tyrimo.



**15 pav.** Suprojektuotas universalio modelis (priekinis vaizdas)

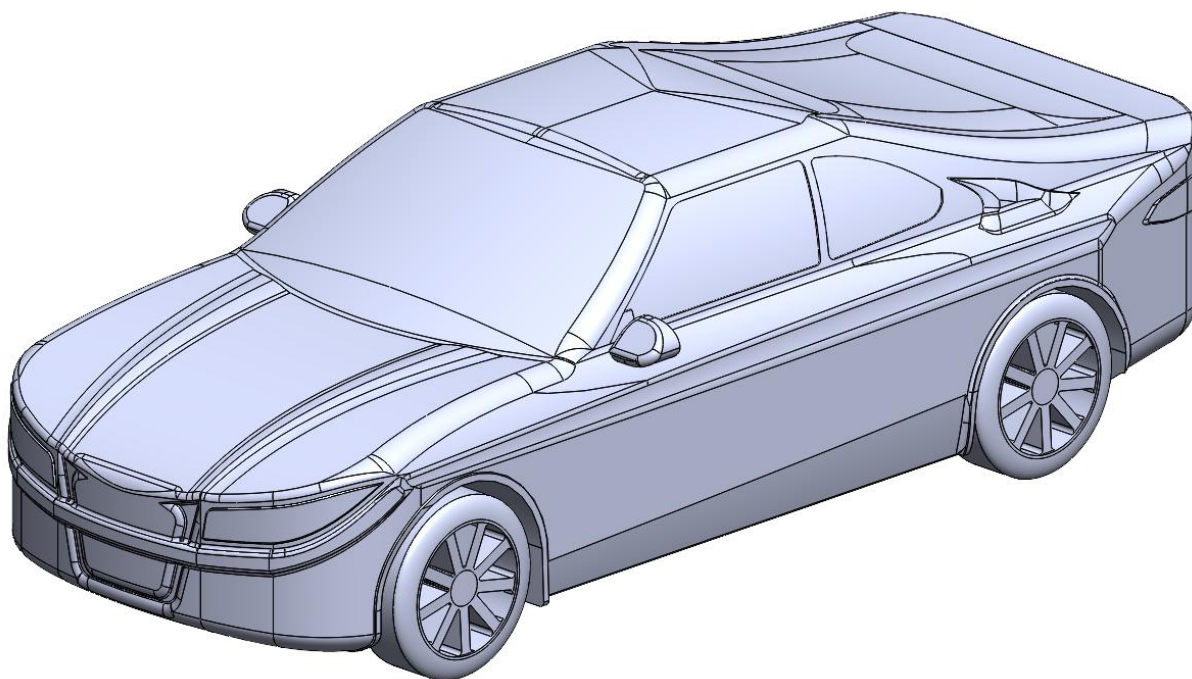


**16 pav.** Suprojektuotas universalio modelis (galinis vaizdas)

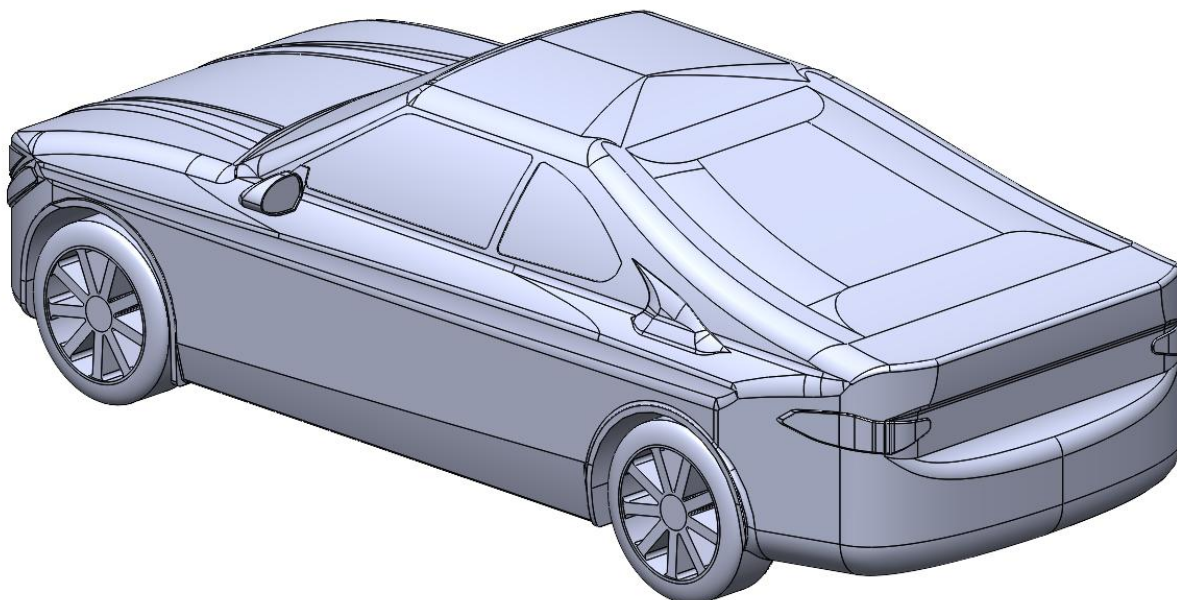
Universalio dizaino elementuose taip pat galima atpažinti keleto produkcinių automobilių bruožų, bet tai nėra jokio automobilio replika, tai bendrinis universalio modelis. Automobilio gabaritiniai matmenys nepakeisti (žr. 15 ir 16 pav.).

### 2.1.3. Kupė projektavimas

Projektuojant kupė išlaikomas sedano ir universalso modelių priekio dizainas ir stogo linija pakeičiama į nuožulnesnę.



**17 pav.** Suprojektuotas kupė modelis (priekinis vaizdas)



**18 pav.** Suprojektuotas kupė modelis (galinis vaizdas)

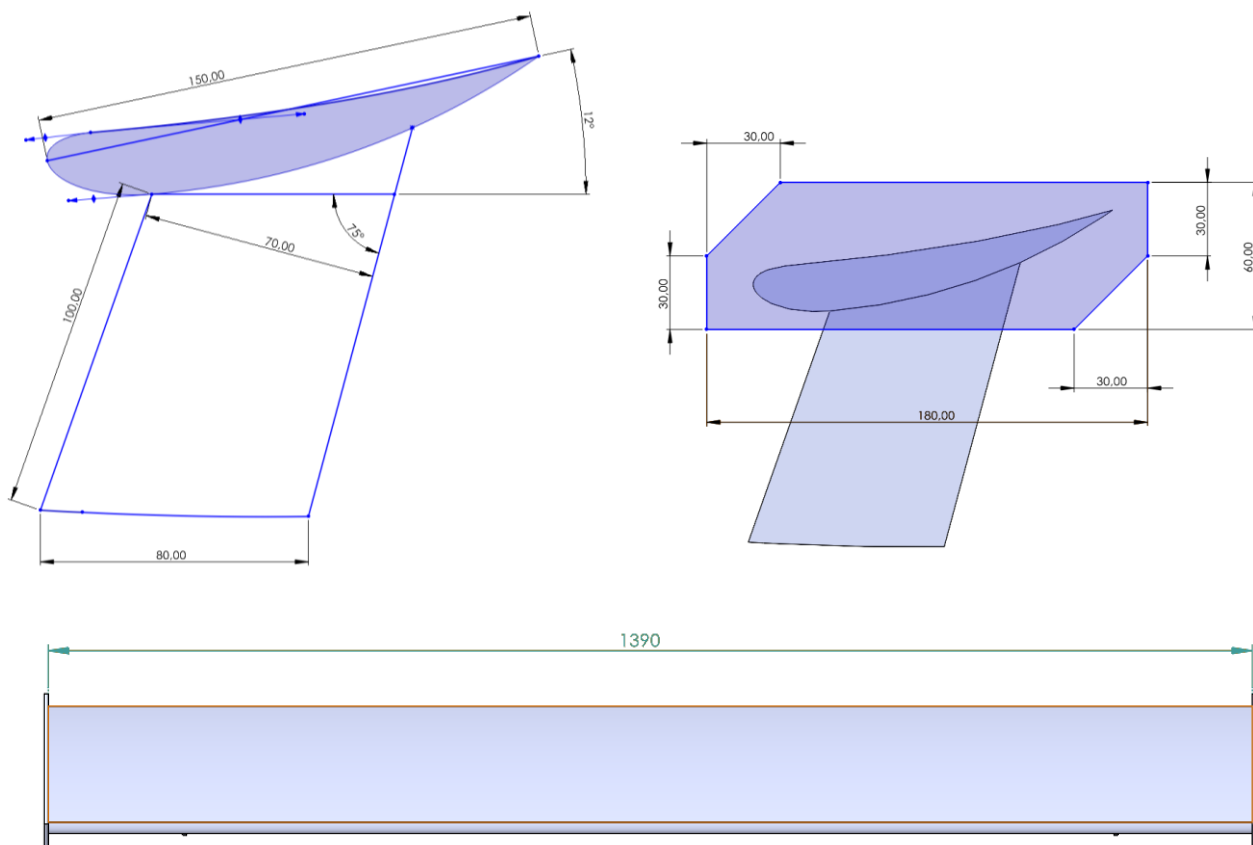
Gabaritiniai matmenys išlaikomi identiški, bet pakeičiama šoninių langų konfigūracija ir šoninis dizaino elementas, kad atitiktų kupė formą (žr. 17 ir 18 pav.).

## 2.2. Papildomų aerodinaminių elementų projektavimas

Tyrimui suprojektuoti papildomi elementai yra dviejų dydžių, tinkami tiek produkciniam serijiniam, tiek sportiniam automobiliui. Projektavimo metu bandoma detales pritaikyti visiems kėbulams, kad detalės būtų kuo universalesnės.

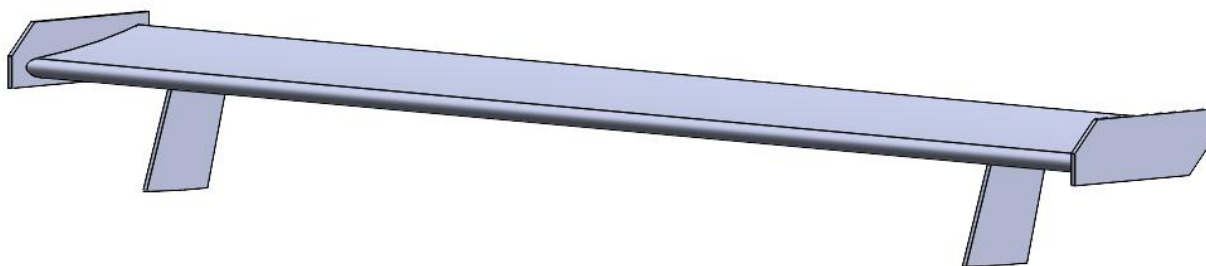
### 2.2.1. Sparnų projektavimas

Sparnas ir smulkus galinis aptakas projektuoti pagal sedano kėbulo modelį, todėl be jokių modifikacijų tinka ir kupė modeliui, kuris turi labai panašų bagažo skyriaus gaubtą.



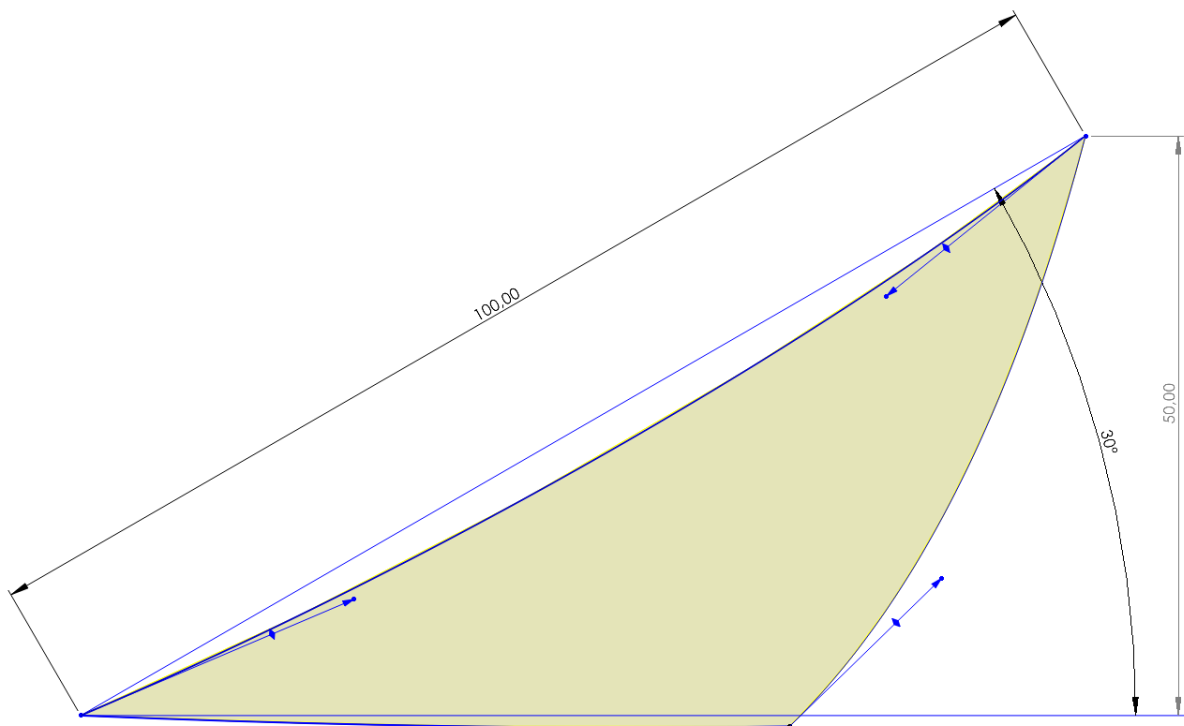
19 pav. Sportinio sparno matmenys

Sparnas projektuojamas 1390 mm ilgio, su 150 mm pločiu, bei 12 laipsnių efektiniu atakos kampu, montavimo plokštelės 100 mm aukščio ir 5 mm pločio bei pasvirusios 15 laipsnių kampu. Sparno galuose montuojamos galų plokštelės, kaip daugumai sparnų, tikintis išvengti oro srauto sukurių ir jų plotis 5 mm, ilgis 180 mm ir aukštis 60 mm (žr. 19 pav.).



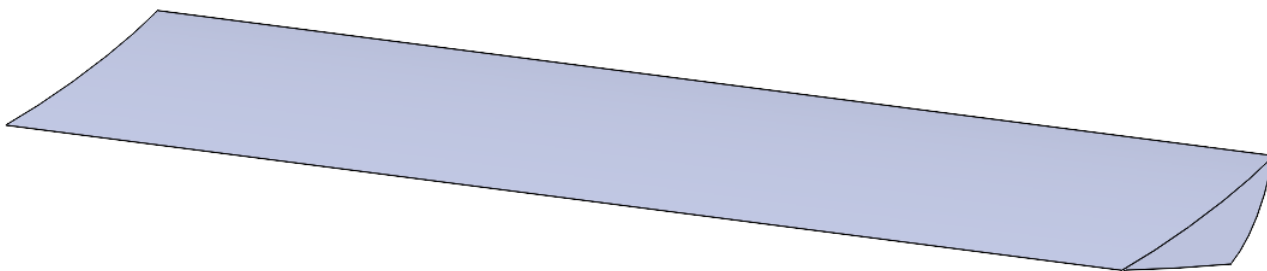
20 pav. Suprojektuotas sportinis sparnas

Suprojektuotam sparnui pasirinktas 12 laipsnių atakos kampas, nes tokiu kampu sparnas sukelia daug prispaudimo jėgos, bei neveikia, kaip oro stabdis, nesukeldamas didelio kiekio pasipriešinimo jėgos. Taip pat, tokio ar panašaus atakos kampo sparnai dažnai naudojami automobiliams žiedo lenktynėse (žr. 20 pav.).



**21 pav.** Produkcinio automobilio galinio aptako matmenys

Produkciniam automobiliui skirtas galinis aptakas projektuojamas pagal sedaną. Jo ilgis 1390 mm, kaip ir sportinio sparno, nukreiptas 30 laipsnių kampu, aukštis 50 mm ir styga 100 mm ilgio (žr. 21 pav.).

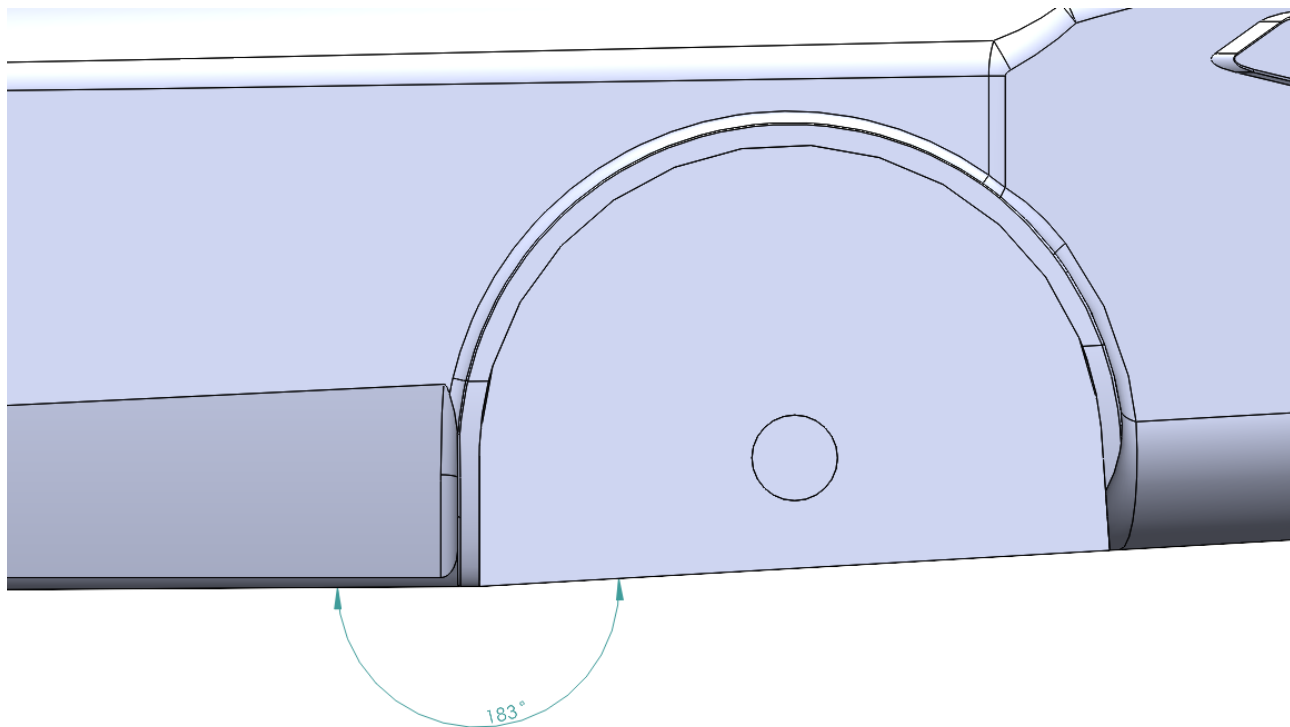


**22 pav.** Produkciniam automobiliui skirtas galinis aptakas

Aptakas nukreiptas stačiau nei sportinis sparnas, nes detalė smulki ir norint, kad elementas įtakotų aerodinamines charakteristikas, produkciniams automobiliams galiniai aptakai projektuojami ir gaminami apie 30 laipsnių statumu (žr. 22 pav.).

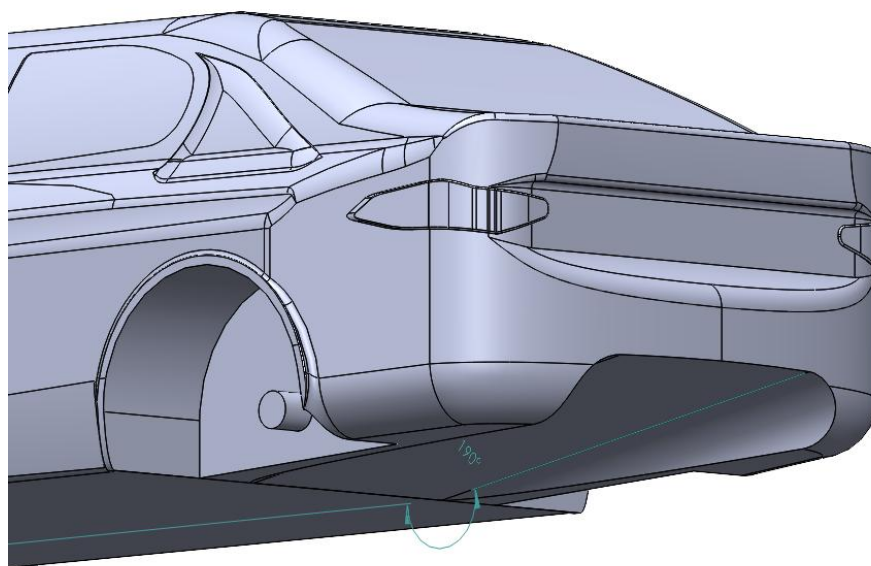
### 2.2.2. Difuzorių projektavimas

Automobilio difuzoriai projektuojami iš originalių modelių išpjaunant didesnio kampo galinę apatinę dalį. Kadangi kėbulų formoje galinių ratų arkos priekinėje dalyje yra pavirtimas aukštyn, toje vietoje ir pradėti papildomi difuzoriai. Automobilio modeliuose be papildomų difuzorių kampas yra 3 laipsniai (žr. 23 pav.).

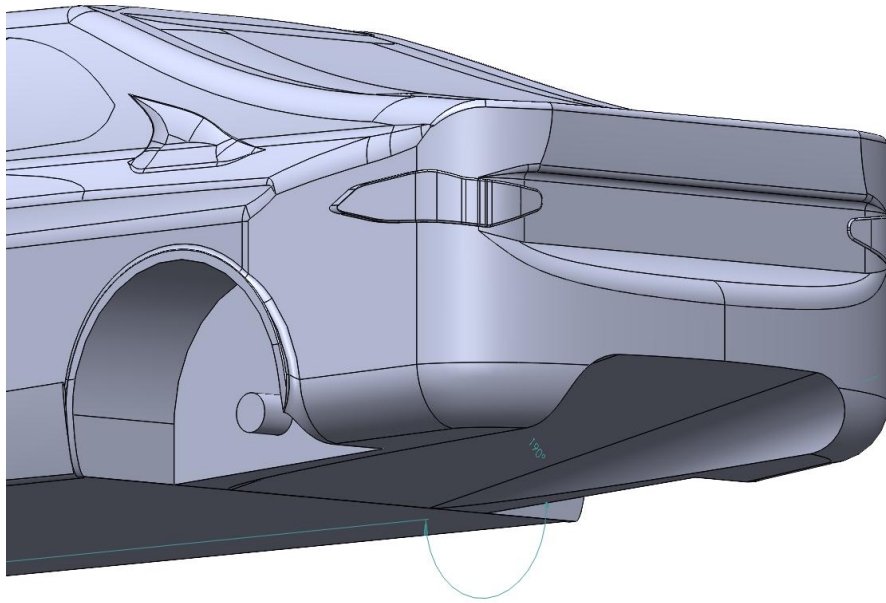


**23 pav.** Automobilių be papildomo difuzoriaus galinės apatinės dalies nuožulos kampas

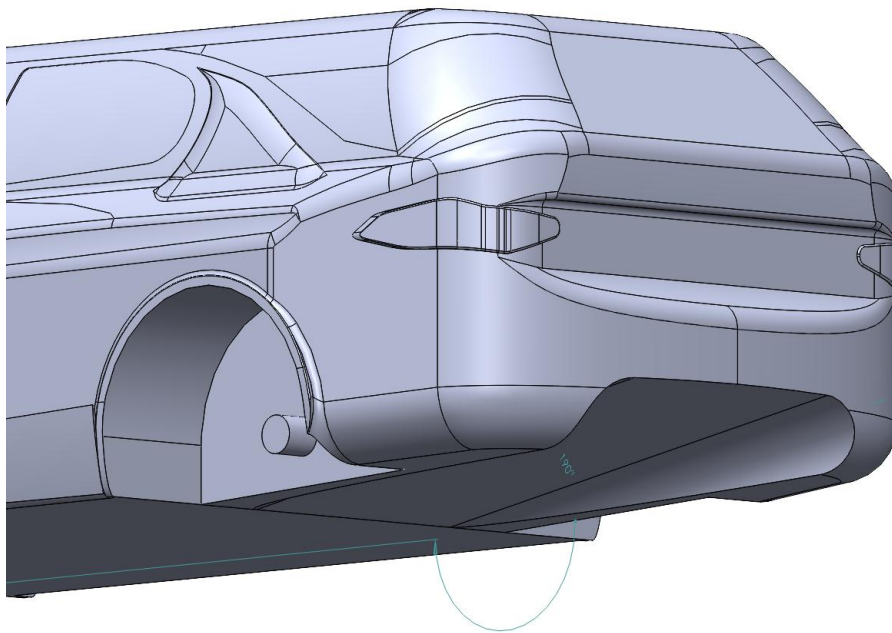
Sportinis difuzorius suprojektuotas 10 laipsnių kampo nuožula, toks kampas dažnai pasitaiko sportiniuose automobiliuose. Ši modifikacija vykdoma visiems kėbulams atskirai, nes elementas atimamas iš bazinio modelio. (žr. 24, 25 ir 26 pav.).



**24 pav.** Sedano sportinis difuzorius

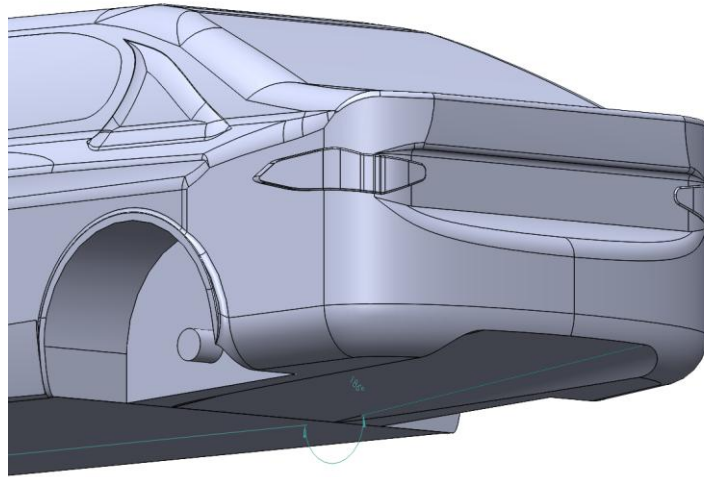


**25 pav.** Kupė sportinis difuzorius

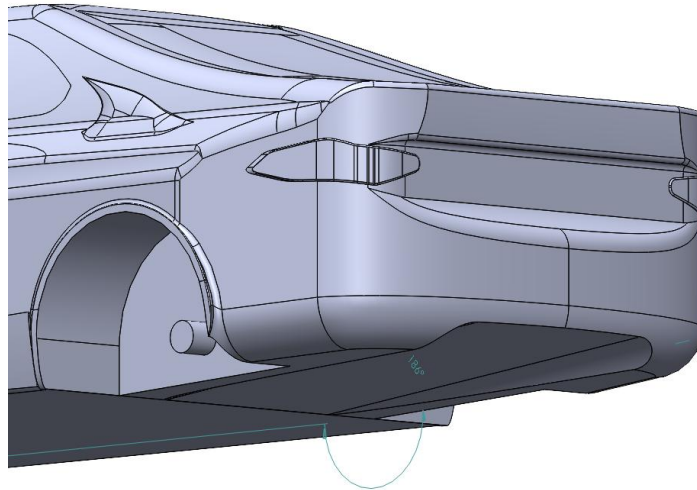


**26 pav.** Universalo sportinis difuzorius

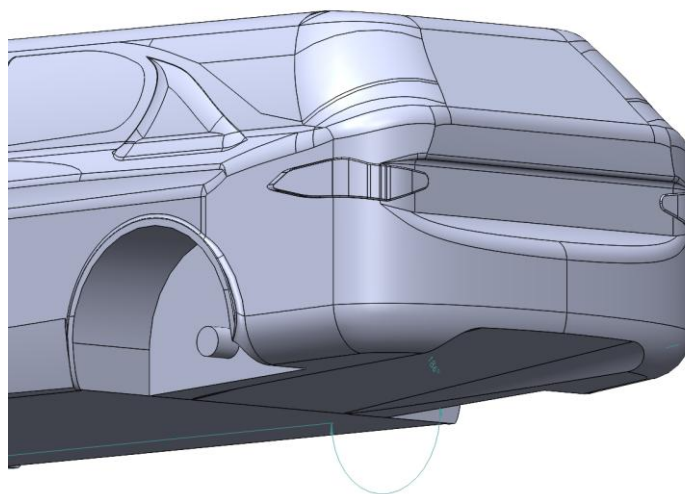
Produkciniam ar lengvai modifikuotam automobiliui projektuojamas 6 laipsnių kampo nuožulos difuzorius, kampas pasirinktas pagal sportiškų produkcinių automobilių difuzorius. Kaip ir sportinis 10 laipsnių variantas projektuotas, kiekvienam kūbului atskirai (žr. 27, 28 ir 29 pav.).



**27 pav.** Sedano produkcinio modelio difuzorius



**28 pav.** Kupė produkcinio modelio difuzorius

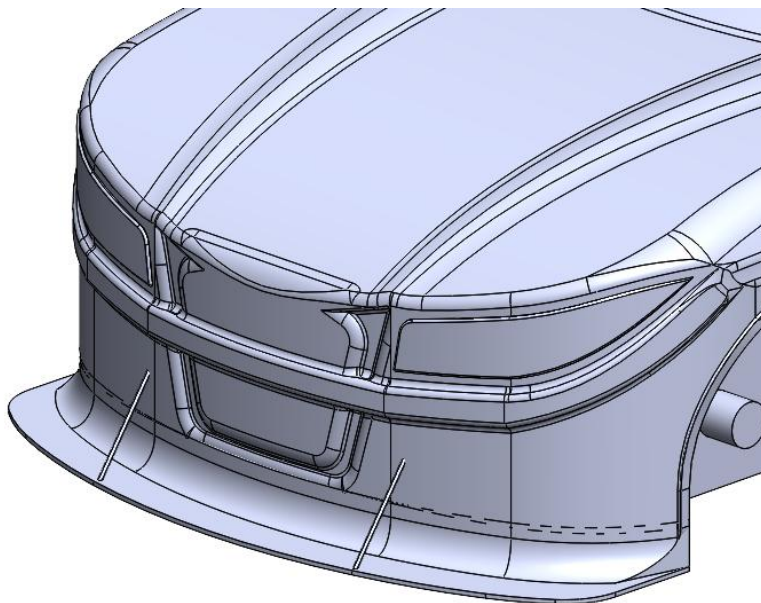


**29 pav.** Universalio produkcinio modelio difuzorius

Elementai turėtų veikti nukreipdami oro srautą, pratekantį automobilio apačioje, į viršų ir tokiu būdu generuojama prispaudimo jėga bei beveik neįtakojama pasipriešinimo jėga.

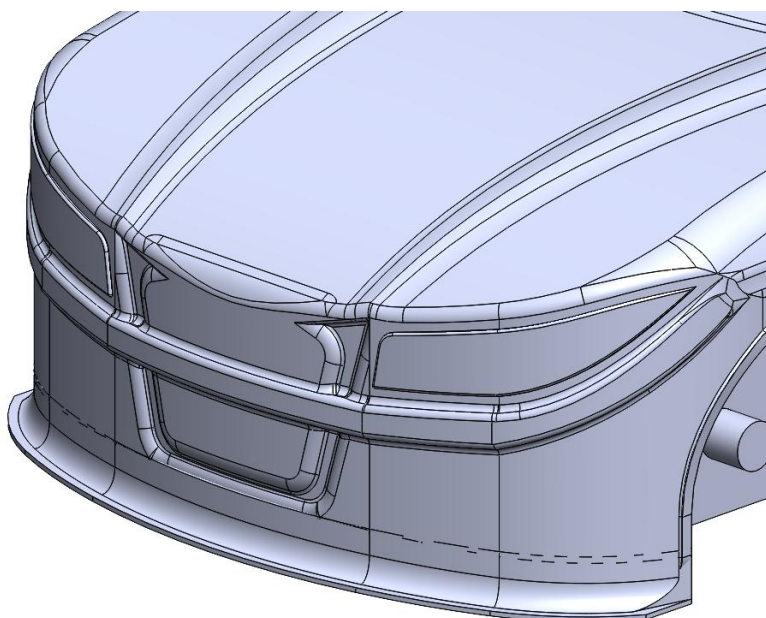
### 2.2.3. Priekinių bamperio lūpų projektavimas

Priekinė bamperio lūpa – vienintelis priekinis elementas įtrauktas į tyrimą. Visų automobilių kėbulų priekiai identiški, todėl suprojektuoti tik sportinio ir produkcinio automobilio priekiniai aptakai, nereikia papildomos adaptacijos skirtingiems kėbulams.



**30 pav.** Sportiniam automobiliui skirta priekinio bamperio lūpa

Sportinio automobilio aerodinaminis elementas išsikiša 150 mm į priekį nuo bazinio modelio, taip pat užpildomas apatinis bamperio palinkimas žemyn, plokščiosios dalies storis 10 mm (žr. 30 pav.).



**31 pav.** Produkciniam automobiliui skirta priekinio bamperio lūpa

Gatvės automobiliui skirtas elementas, taip pat užpildo nuožulą, kuri nukreiptų oro srautą po automobiliu bei pakeista užapvalinimu, nukreipiančiu oro srautą į viršų. Plokščiosios dalies storis taip pat 10 mm (žr. 31 pav.).

### 3. Aerodinaminių charakteristikų nustatymo metodologija ir tikslai

Aerodinamikos charakteristikų nustatymo darbai dažniausiai tiria tam tikrų objektų aptakumą, sukeltą jėgas bei koeficientus. Automobilių aerodinamikos srityje svarbiausi rezultatai yra pasipriešinimo ir kėlimo/prispaudimo jėgos, o žinant šiuos parametrus galima skaičiuoti automobilio maksimalų greitį, degalų sąnaudas ir kitų detalių susidėvėjimą. Pasipriešinimo ir kėlimo/prispaudimo jėgos dažniausiai išreiškiamos koeficientais, nes taip yra lengviausia palyginti skirtingus automobilius.

Ahmedo kūno tyrimai dažniausiai būna palyginamojo pobūdžio, tiriamas vienas kintamasis, toks kaip: papildomas aerodinaminis elementas, skirtingas oro srauto greitis, tinklelio tikslumas, oro sąlygos ar kiti pavieniai faktoriai. Ahmedo kūnas tai pats paprasčiausias modelis atspindintis automobilį, todėl naudojant tokį supaprastintą modelį galima greitai ir sklandžiai iširti daug variantų ir tada pereiti prie tikslesnio automobilio modelio, jau numatant ko galima tikėtis iš kiekvieno faktoriaus pakeitimų [35].

Supaprastinto arba vidutiniškai tikslaus automobilio modelio tyrimai vykdomi su specifiniu automobiliu, kuriam bandoma nustatyti pasipriešinimo ir kėlimo/prispaudimo jėgas. Tokie tyrimai gali būti palyginamieji, kai lyginamos aerodinaminės charakteristikos keičiant įtakojančius faktorius arba automobilio geometriją, arba iteraciniai, kai optimizuojama specifinė automobilio geometrija [20][33].

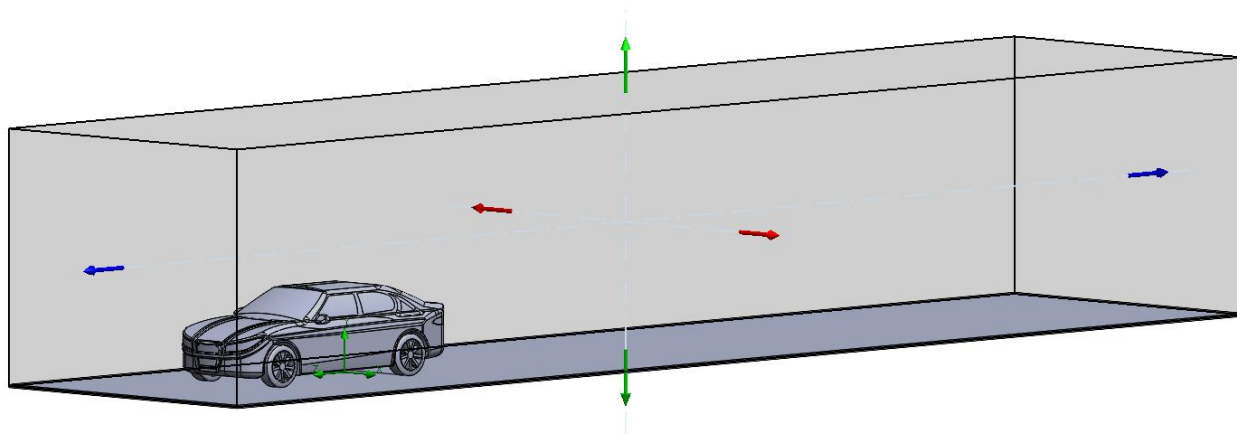
Aukšto tikslumo modelio arba aukšto tikslumo aproksimacijų tyrimai vykdomi specifinio atvejo optimizacijai. Dažniausiai yra tiriamas specifinis automobilis, jau žinomi ar naudojami papildomi elementai, kokie elementai naudojami, žinoma kurias automobilio geometrijos lokacijas galima keisti, kurios privalomos. Tokie tyrimai gali būti vykdomi lenktyniniams automobiliams arba kuriant naują produkcinį modelį, taip pat gali būti validuojami vėjo tunelio tyrimais. Tikslas – sumažinti pasipriešinimo jėgą, o jeigu automobilis sportinis, tai padidinti prispaudimo jėgą [17][26].

Kompiuterinės fluidų dinamikos tyrimai vykdomi, naudojant programinę įrangą, kuri sprendama Navjė-Stokso lygtis randa artimus realybei aerodinaminių charakteristikų rezultatus. Kompiuterinės fluidų dinamikos tikslumas priklauso nuo skaičiuojamosios erdvės tankumo: kuo tinklesnis, tuo rezultatai tikslesni, bet kuo tinklesnis, tuo ilgiau užtrunka kompiuterinis skaičiavimas, todėl svarbu rasti gerą balansą tarp tikslumo ir užtrunkančio tyrimo laiko [40]. Tiriant mažus objektus arba darant specifinio automobilio tyrimą vieną kartą, galima tinklelį padaryti ypač smulkų, bet iteraciniams ir palyginamiesiems tyrimams, kai tyrimai atliekami daugiau nei 20 kartų, verta riboti vieno tyrimo laiką ir tinklelio smulkumą.

#### 3.1. Tyrimo parametrai

Tyrimo parametrai:

- Važiuojamoji dalis: 5000 mm \* 22000 mm
- Oro temperatūra: 20°C
- Matuojamos aerodinaminės prispaudimo ir pasipriešinimo jėgos Z ir Y ašimis
- Oro slėgis: 101325 Pa
- Oro srauto greičiai: 90 km/h, 130 km/h, 200 km/h bendriniais kėbulams ir 200 km/h kėbulams su papildomais elementais bei komponuotėmis.

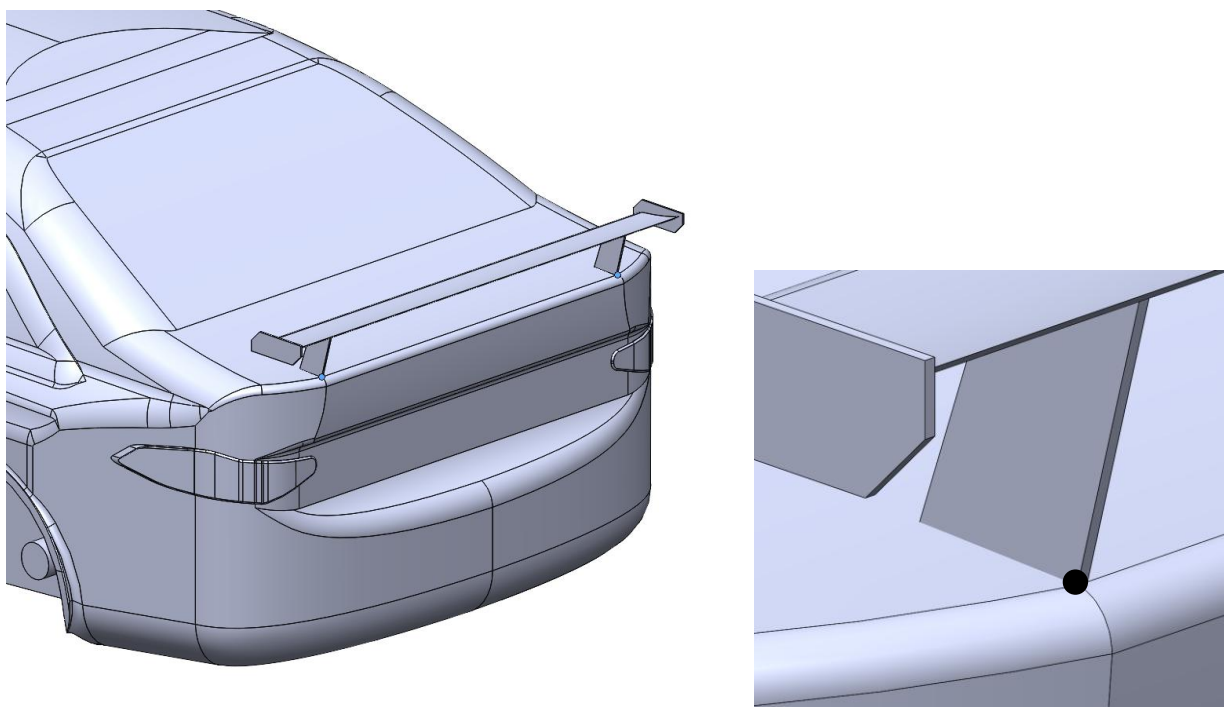


**32 pav.** Skaičiuojamoji erdvė tyrimams

Tyrimui vykdyti nustatyta skaičiuojamoji erdvė: 5000 mm \* 22000 mm \* 4000 mm (žr. 32 pav.)

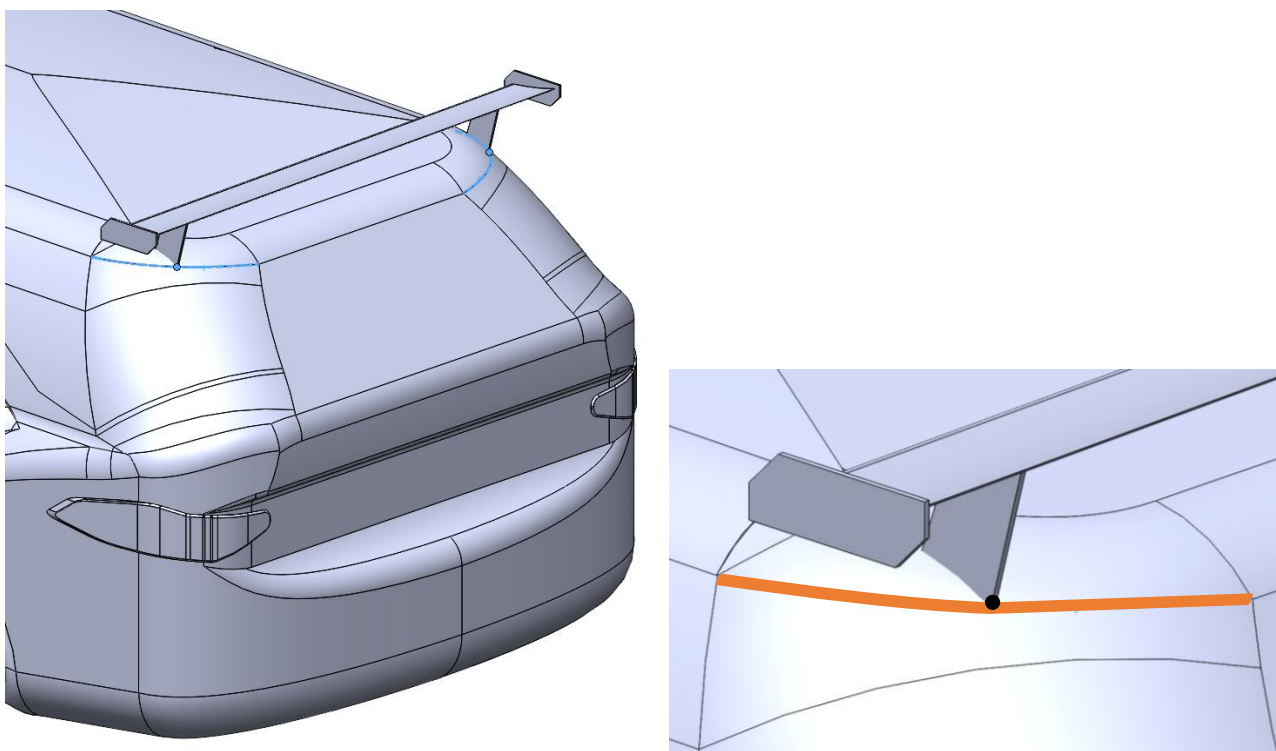
### 3.2. Aerodinaminių elementų pozicijos ant kėbulų

Tyrimui atlikti sedanui ir kupė kėbulams sparnas montuojamas ant automobilio bagažo skyriaus galinio užvalinimo kampų ir sparno montavimo plokštelių išorinių galinių kampų (žr. 33 pav.). Tokiu atveju sparno profilio priekinis kraštas yra 1165 mm ir galinis kraštas yra 1188 mm aukštyje nuo važiuojamosios dangos.



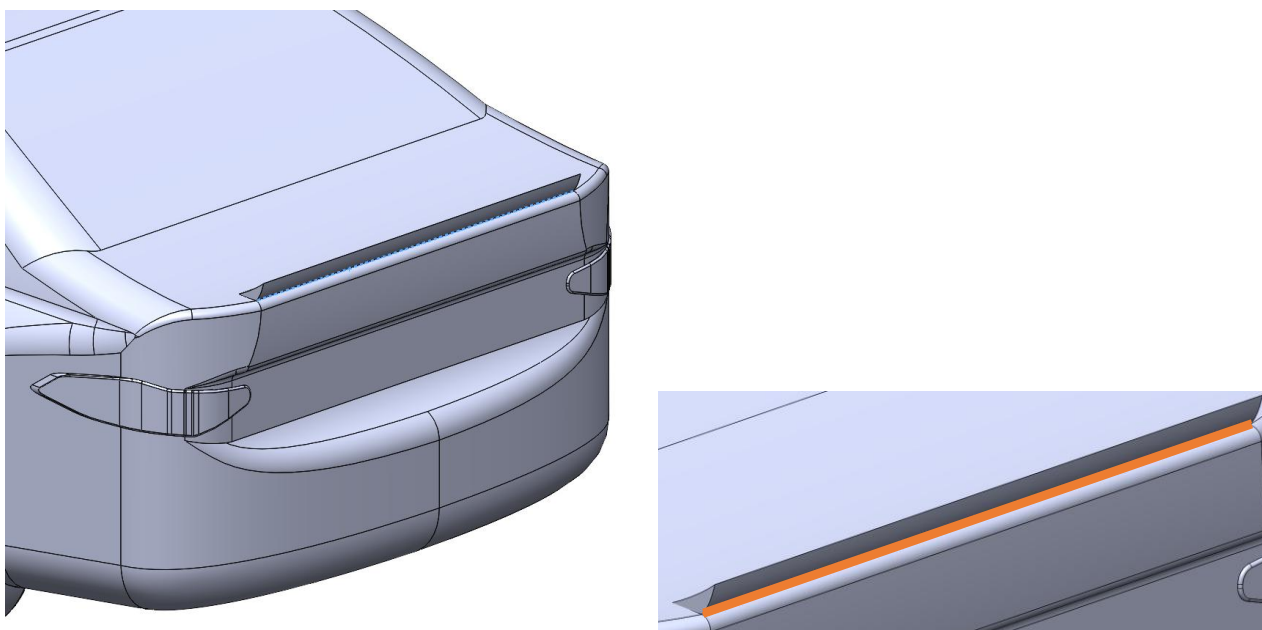
**33 pav.** Sparno montavimo taškai sedano kėbului

Sparnas universalui montuojamas standartinėje papildomo galinio viršutinio aerodinaminio elemento vietoje, ant stogo linijos galinio užapvalinimo apatinės briaunos, jungiant sparno montavimo plokštelių išorinius galinius kampus (žr. 34 pav.). Sparno priekinis kraštas yra 1470 mm ir galinis kraštas 1493 mm nuo kelio dangos, universalso montavimo vieta aukščiau, nes montuojant sparną identiškoje pozicijoje kaip sedanui ir kupė, sparnas patektų į atsiskyrusį oro srautą ir neturėtų reikšmingos įtakos aerodinaminėms charakteristikoms.



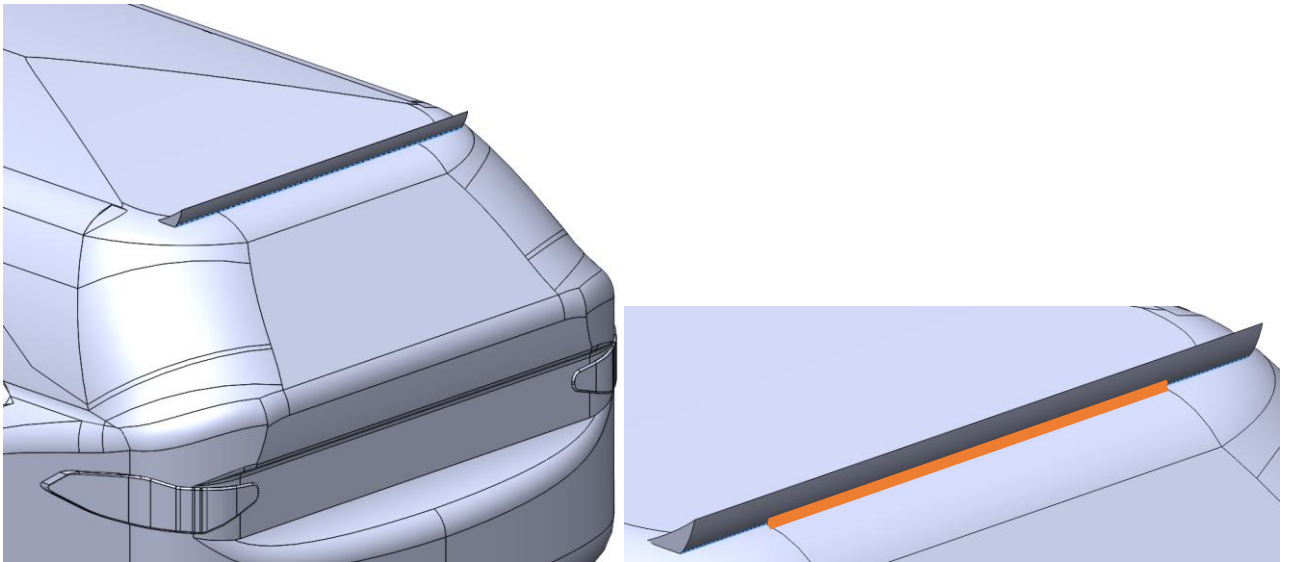
**34 pav.** Sparno montavimo taškai ir briaunos universalio kėbului

Smulkus galinis aptakas sedanui ir kupė montuojamas ant galinės automobilio bagažo skyriaus galinio užvalinimo briaunos (žr. 35 pav.).



**35 pav.** Galinio aptako montavimo briauna sedano kėbului

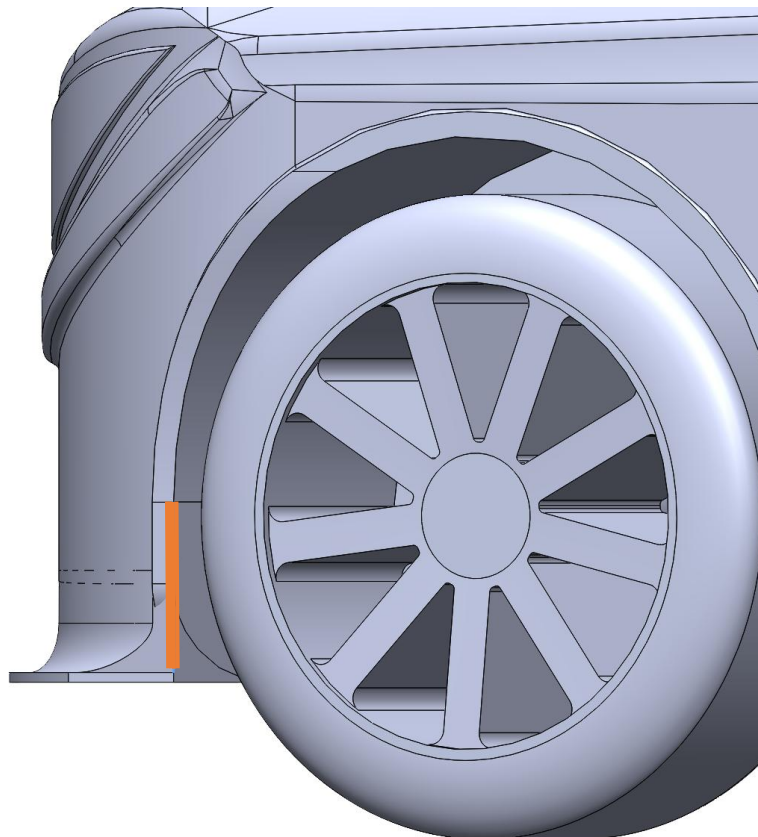
Taip montuojant galinį aptaką, galinė aptako briauna yra 1102 mm nuo važiuojamosios kelio dangos. Universalui galinis aptakas montuojamas ant stogo, kadangi montavimo briauna siauresnė, nei ant kitų kėbulų galinis aptakas sutrumpintas iki 982 mm ilgio, kad nebūtų sukelti oro srauto sūkuriai, esant tarpui tarp aerodinaminio elemento ir kėbulo (žr. 36 pav.).



**36 pav.** Galinio aptako montavimo briauna universalio kėbului

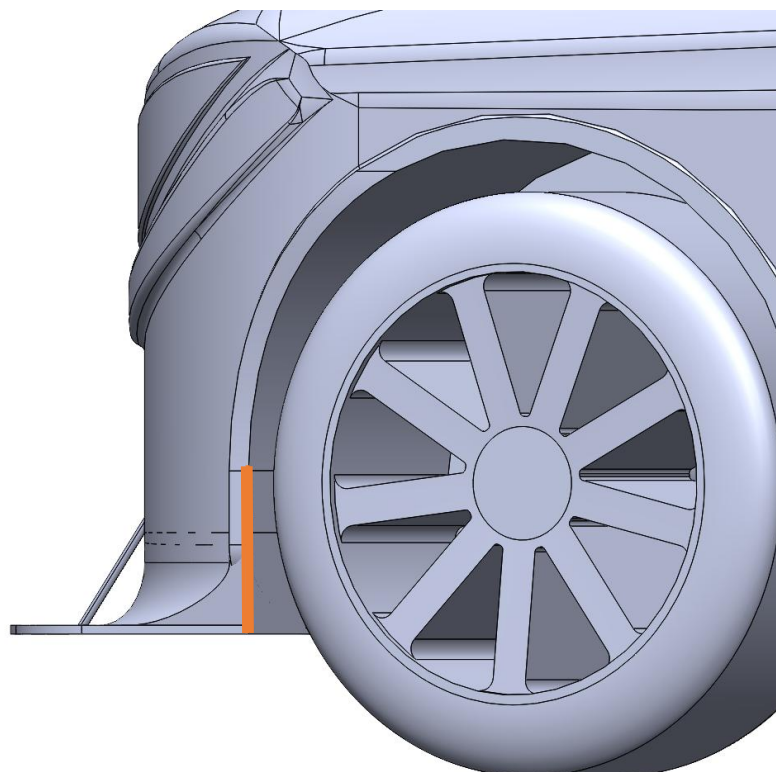
Galinio aptako galinė briauna yra 1441 mm aukštyje nuo važiuojamosios dalies, galinę apatinę aptako briauną jungiant su universalio galinio viršutinio užapvalinimo viršutine briauna.

Priekiniai elementai montuojami visiems kėbulams vienodai, jungiant priekinės lūpos galinę briauną su kėbulo priekinio rato išorine briauną bei lūpos apačia tame pačiame aukštyje, kaip automobilio dugnas (žr. 37 pav.).



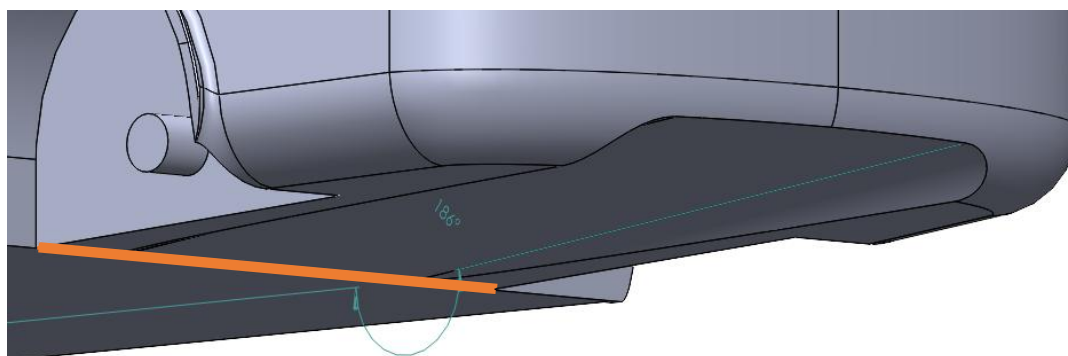
**37 pav.** Priekinės smulkios lūpos montavimo briauna kėbulams

Sportinis, didesnis elementas montuojamas taip pat jungiant kėbulo priekinės rato arkos išorinę briauną su lūpos galine šonine briauna bei lūpos apačia tame pačiame aukštyje kaip automobilio dugnas (žr. 38 pav.).



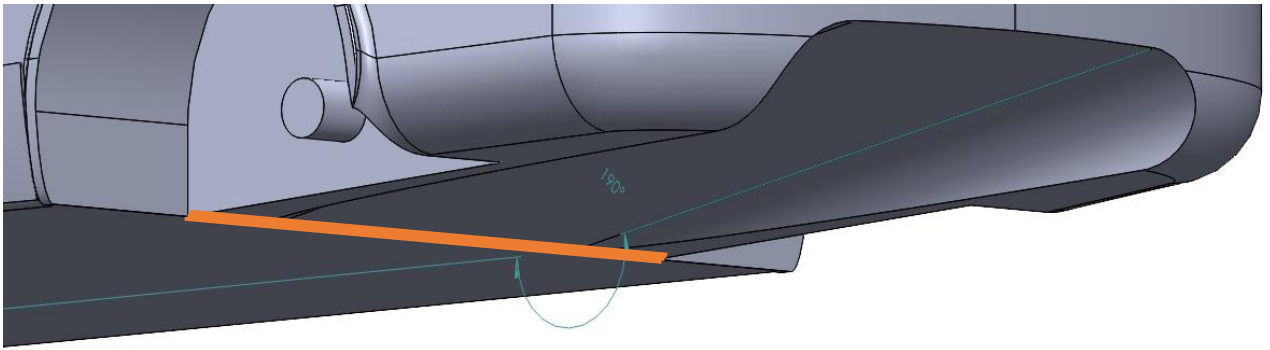
**38 pav.** Priekinės sportinės lūpos montavimo briauna kėbulams

Difuzorių montavimui redaguojami originalūs kėbulų modeliai, jų visų pozicija ir modifikavimo metodas identiškas, difuzoriai prasideda nuo kėbulų galinės rato arkos priekio ir nusidriekia iki pat automobilio galo (žr. 39 pav.), originalių modelių dugno uždegimo palinkimas į viršų yra  $3^\circ$ , gatvės serijinių automobilių modifikacija šį kampą padidina iki  $6^\circ$ , o sportinė modifikacija iki  $10^\circ$ . Smulkesnio difuzoriaus ilgis 1385 mm.



**39 pav.** Smulkesniojo difuzoriaus pradžia ir palinkimo kampas

Sportinis difuzorius prasideda toje pačioje vietoje, bet esant didesniai  $10^\circ$  palinkimo kampui, jo ilgis yra ilgesnis 1415 mm (žr. 40 pav.).



**40 pav.** Sportinio difuzoriaus pradžia ir palinkimo kampas

Papildomų aerodinaminių elementų pozicija ant kėbulų turi labai aukštą įtaką aerodinaminėms charakteristikoms, todėl kuo vienodžiau montuojami elementai ant skirtingų kėbulų, tuo tyrimo rezultatai bus geriau palyginami. Šiame tyrime išsiskiriami galiniai viršutiniai elementai: sparnas ir galinis aptakas, nes turi būti montuojami ant universalio stogo, galinio aptako ilgis net turi būti sumažintas, kad atitiktų kėbulo formą. Visi kiti elementai montuojami identišškai, kad būtų išlaikomas kuo aukštesnis palyginamumo lygis.

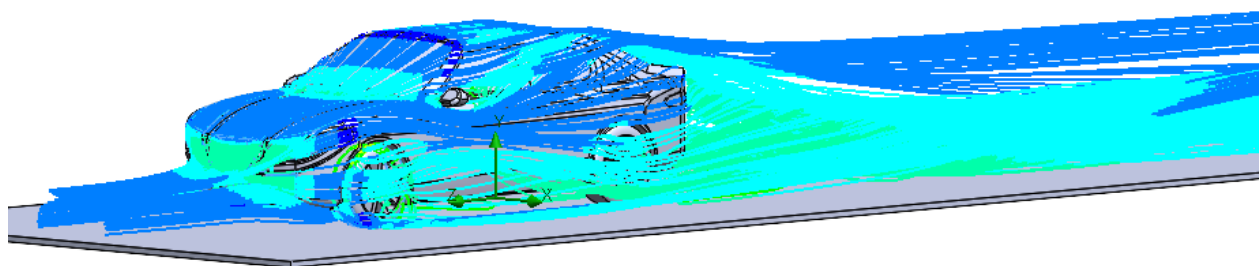
#### 4. Skaitiniai aerodinaminio aptekėjimo tyrimai

Kompiuterinės fluidų dinamikos tyrimai atlikti siekiant surasti aerodinamiškai naudingiausią komponuotę kiekvienam automobilio kėbului, to siekiant atlikti bazinių kėbulų tyrimai, kad būtų galima nustatyti kiekvieno elemento įtaką, kai jie sumontuoti ant skirtingų kėbulų. Nustatyta kiekvieno elemento įtaka skirtingiems kėbulams leidžia pradėti komponavimo procesą, o komponuojama siekiant žemiausios pasipriešinimo jėgos, bei aukščiausio prispaudimo jėgos, įvertinami išskirtiniai efektyvūs komponuočių variantai.

##### 4.1. Baziniai kėbulų be papildomų aerodinaminių elementų tyrimai

Įvykdyti tyrimai be papildomų aerodinaminių elementų, jų paskirtis – galėti palyginti kėbulus tarpusavyje, bei tolimesniuose tyrimuose įvertinti kiekvieno elemento įtaką ir kaip kiekvienas elementas skirtingai veikia skirtingus kėbulus.

Sedano kėbulo su ratais aerodinaminių charakteristikų tyrimas įvykdytas skirtinguose greičiuose. Tyrimo metu stebėtas oro srauto aptekėjimas, įtrauktas važiuojamosios dangos judėjimas bei ratų sukimosi greitis atitinkantis oro srauto greitį (žr. 41 pav.).



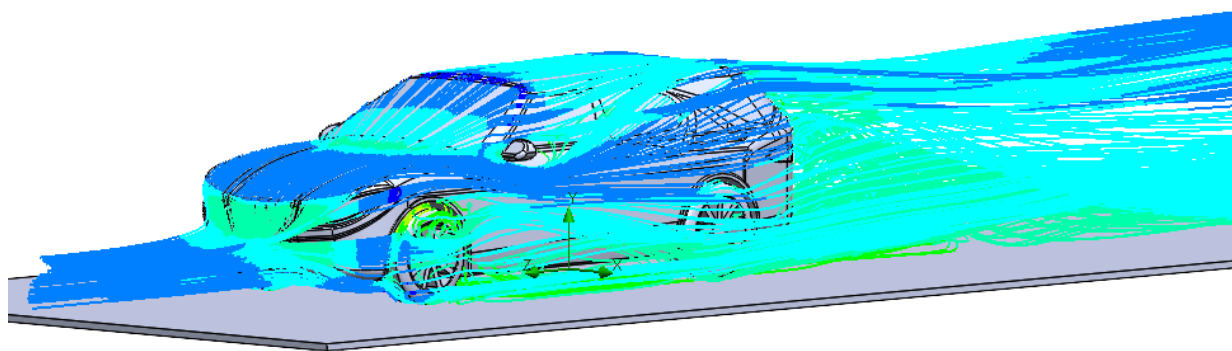
41 pav. Oro srauto linijos aplink sedaną esant 130 km/h oro srauto greičiui

1 lentelė. Sedano be papildomų aerodinaminių elementų sukeltos jėgos skirtinguose greičiuose

Jėgos/Greitis	90 km/h	130 km/h	200 km/h
Pasipriešinimo jėga, N	307,45	638,38	1494,42
Pasipriešinimo koeficientas	0,3641		
Prispaudimo jėga, N	-70,56	-145,11	-353,12
Prispaudimo koeficientas	-0,02357		

Oro srautas aptekėjo, kaip tikėtasi, automobilis sukelia neigiamą prispaudimo jėgą (kėlimo jėgą), kaip ir dauguma serinių produkcinių automobilių. Automobilio pasipriešinimo koeficientas 0,3641 ir atitinka literatūroje minimą 0,25-0,4 sedano intervalą (žr. 1 lentelė).

Universalo tyrimas kartojamas tris kartus esant 90, 130 ir 200 km/h greičiui, stebėtos oro srauto linijos, ir taip pat, kaip sedano tyrime, įtraukta kelio danga bei automobilio ratai (žr. 42 pav.).



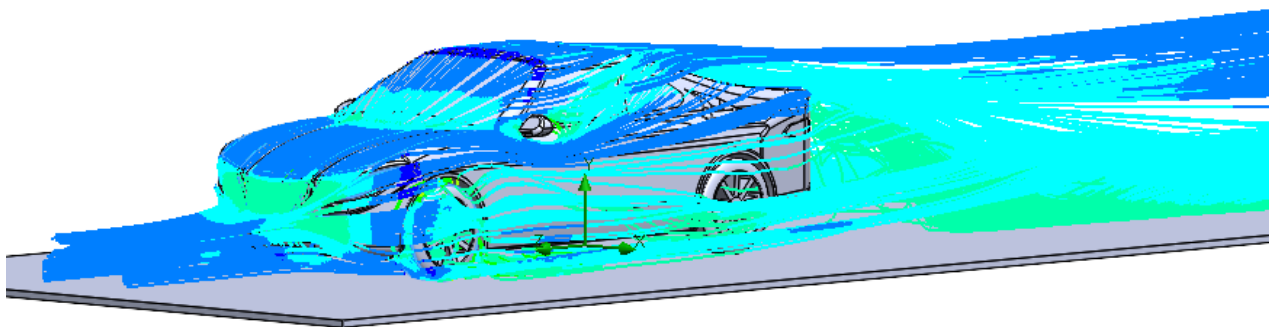
**42 pav.** Oro srauto linijos aplink universalą esant 90 km/h oro srauto greičiui

**2 lentelė.** Sedano be papildomų aerodinaminių elementų sukeltos jėgos skirtinguose greičiuose

Jėgos/Greitis	90 km/h	130 km/h	200 km/h
Pasipriešinimo jėga, N	317,36	663,61	1581,06
Pasipriešinimo koeficientas	0,3798		
Prispaudimo jėga, N	-36,29	-110,12	-496,58
Prispaudimo koeficientas	-0,02112		

Buvo numatyta, kad universalos pasipriešinimo ir prispaudimo jėgos bus didesnės nei sedano, tai tyrimo eigoje pasitvirtino (žr. 2 lentelė.).

Paskutinis kartojamas kupė kėbulo tyrimas (žr. 43 pav.).

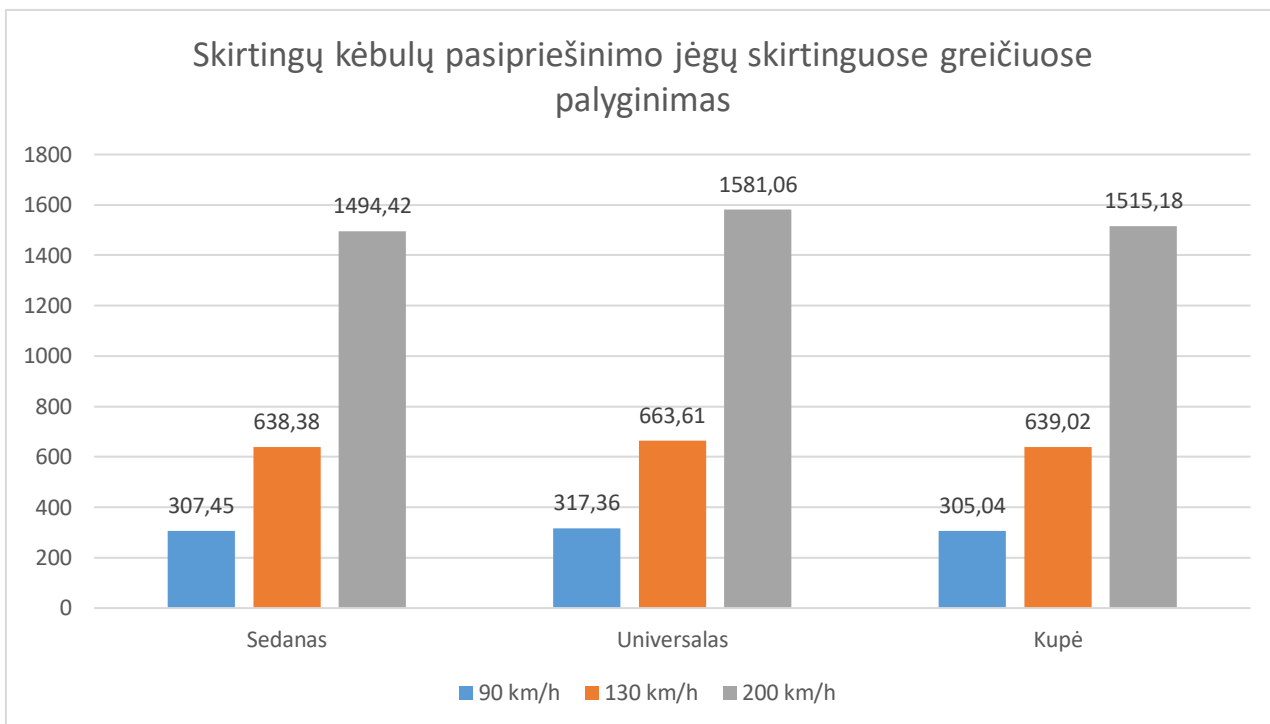


**43 pav.** Oro srauto linijos aplink kupė esant 90 km/h oro srauto greičiui

**3 lentelė.** Sedano be papildomų aerodinaminių elementų sukeltos jėgos skirtinguose greičiuose

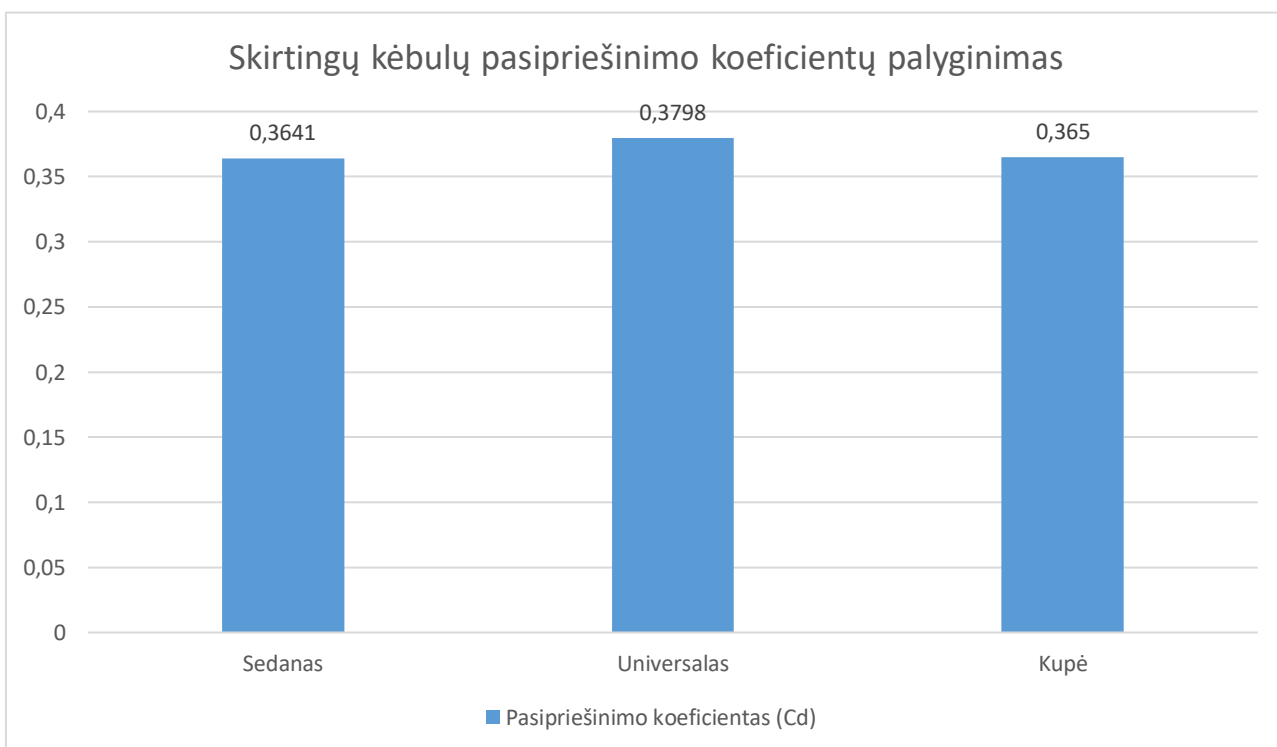
Jėgos/Greitis	90 km/h	130 km/h	200 km/h
Pasipriešinimo jėga, N	305,04	639,02	1515,18
Pasipriešinimo koeficientas	0,3650		
Prispaudimo jėga, N	-36,25	-78,32	-190,79
Prispaudimo koeficientas	-0,01252		

Lentelėje pateikti duomenys rodo, kad kupė kėbulas turi žemiausią pasipriešinimo jėgą bei žemiausią prispaudimo jėgą dėl mažo tarpo tarp automobilio galinės viršutinės ir apatinės dalių bei švelniai nusileidžiančios stogo linijos (žr. 3 lentelė.).



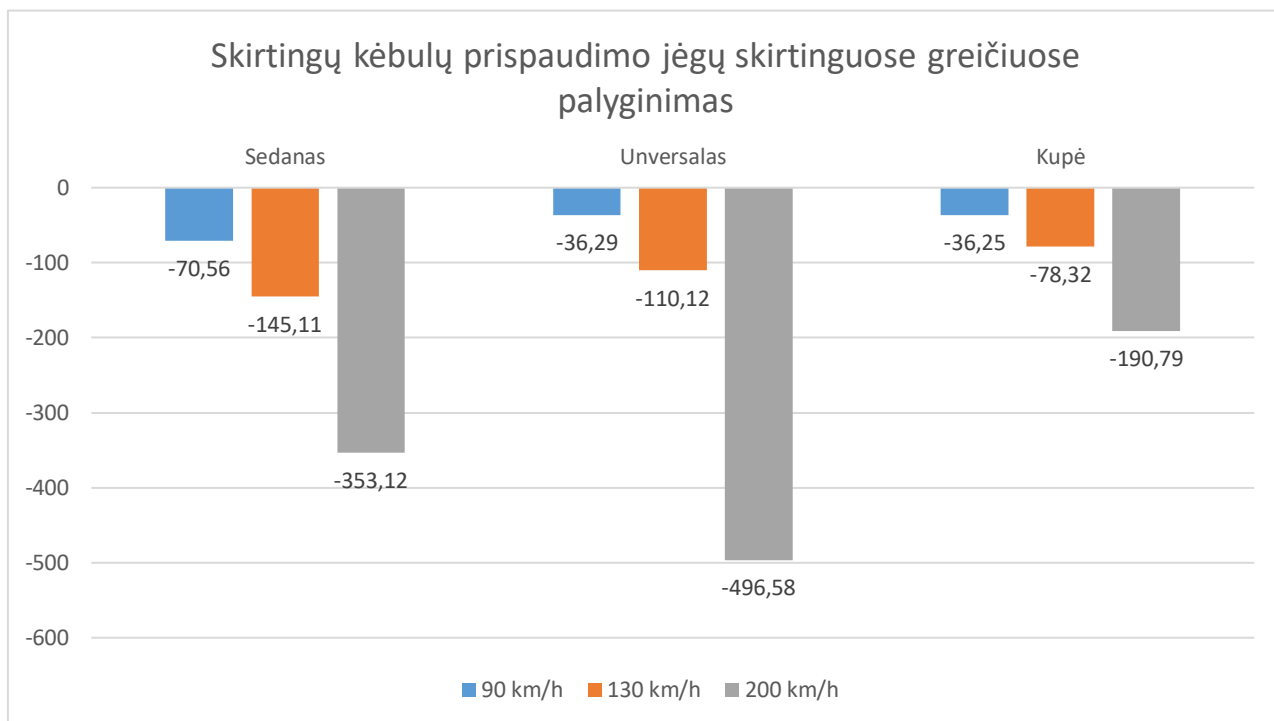
**44 pav.** Skirtingų kėbulų pasipriešinimo jėgų skirtinguose greičiuose palyginimas

Universalas pasipriešinimo jėga aukščiausia visų greičių bandymuose, 200 km/h greityje siekia 1581,06 N, kupė sukeltos jėgos vidutinės, o sedano kėbulas sukelia mažiausią pasipriešinimo jėgą – tik 1494,42 N (žr. 44 pav.).



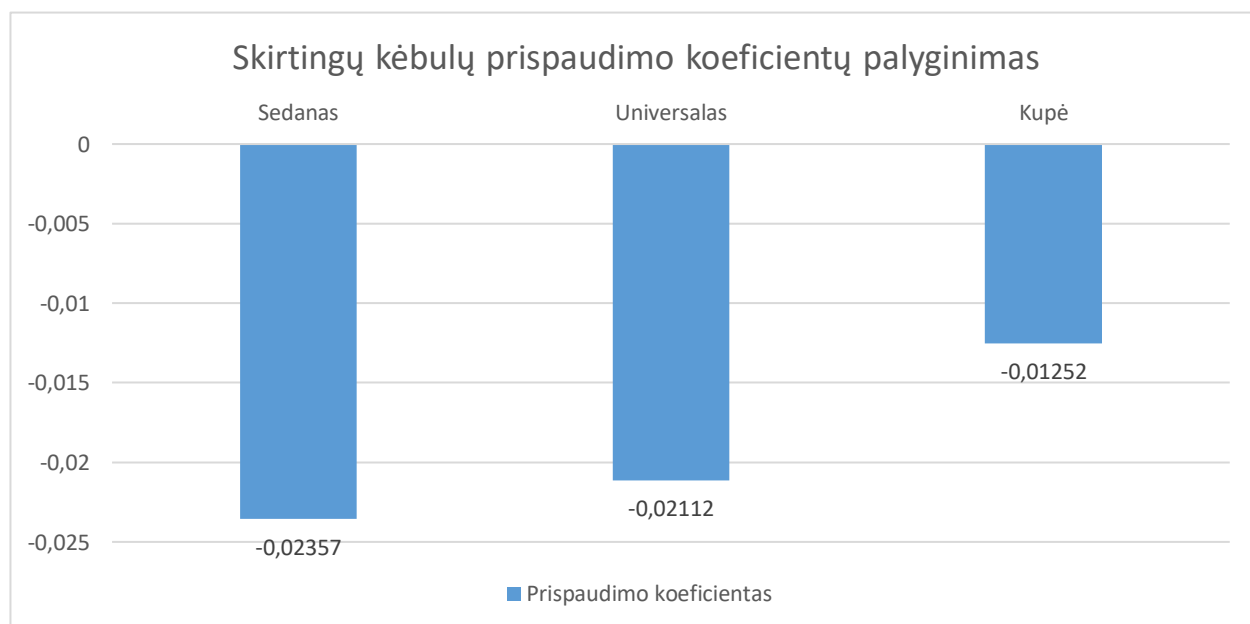
**45 pav.** Skirtingų kėbulų pasipriešinimo koeficientų palyginimas

Automobilių pasipriešinimo koeficientai gan aukšti kaip moderniems automobiliams, o taip gali nutikti dėl projektuoto automobilio supaprastinimo, nes į tyrimą nėra įtraukiamos ertmės bei tikslūs važiuoklės modeliai. Labai sunku lyginti pasipriešinimo koeficientus, nes gamintojai naudoja skirtingas nustatymo metodologijas, kartais neįtraukiami veidrodėliai. Tyrimo metu nustatyta, kad universalso pasipriešinimo koeficientas aukščiausias 0,3798, o sedano žemiausias 0,3641 (žr. 45 pav.).



**46 pav.** Skirtingų kėbulų prispaudimo jėgų skirtinguose greičiuose palyginimas

Universalas sukelia aukštą prispaudimo jėgą arba sukeliama mažas kėlimas 90 ir 130 km/h greičiuose, bet 200 km/h greityje universalas sukelia mažiausią prispaudimo jėgą -496,58 N, sedano sukeltos jėgos vidutinės, o kupė sukėlė daugiausiai prispaudimo jėgos -190,79 N 200 km/h greityje (žr. 46 pav.).



**47 pav.** Skirtingų kėbulų prispaudimo koeficientų palyginimas

Sedanas turi žemiausią prispaudimo koeficientą  $-0,02357$ , neigiamas ženklas nurodo, kad yra generuojamas kėlimas. Kupė sukelia  $-0,01252$  ir tai yra aukščiausias prispaudimo koeficientas, bet vis tiek generuojamas kėlimas. Universalas turi vidutinį prispaudimo koeficientą  $-0,02112$  (žr. 47 pav.).

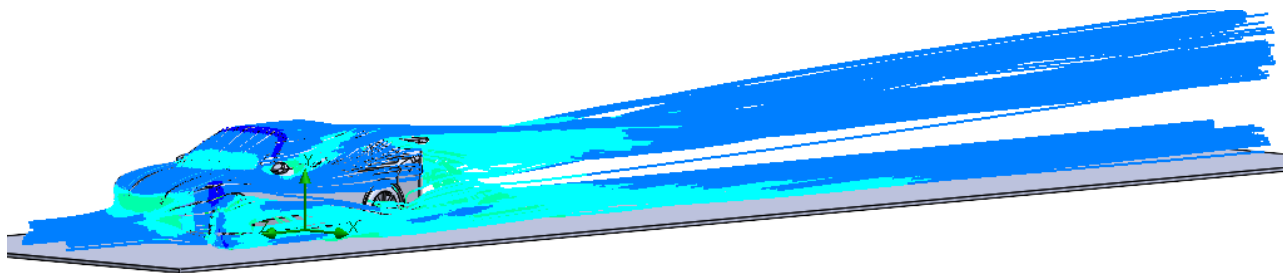
Ištirti baziniai kėbulai ir nustatyta, kad universalas turi didžiausią pasipriešinimo  $1581,06$  N jėgą, ir  $-496,58$  N prispaudimo jėgos, kai automobilio greitis  $200$  km/h. Sedano kėbulas demonstravo žemiausius pasipriešinimo  $1494,42$  N bei  $-353,12$  N prispaudimo jėgų rezultatus, kai automobilio greitis  $200$  km/h. Kupė rezultatai gan panašūs į sedano, turėjo  $1515,18$  N pasipriešinimo jėgą bei aukščiausią  $-190,73$  N prispaudimo jėgą, kai automobilio greitis  $200$  km/h. Nustatyta jog visų kėbulų be papildomų aerodinaminių elementų prispaudimo jėga neigiama tai patvirtina, kad automobiliai generuoja kėlimą ir auto sportui naudinga būtų montuoti papildomus aerodinaminius elementus.

#### 4.2. Pavienių elementų įtakos kėbulams tyrimas

Pavienių elementų tyrimuose bandymai vykdyti tik  $200$  km/h greityje, nes bazinių kėbulų tyrimuose pastebėta, kad  $90$  km/h greityje, pagal esamus parametrus, paklaida gali būti didesnė nei aerodinaminių charakteristikų skirtumai tarp kėbulų.  $130$  km/h greityje skirtumai labiau pastebimi, bet kuo aukštesnis greitis, tuo lengviau pastebėti skirtumus ir palyginti rezultatus. Dauguma šiuolaikinių produkcinių automobilių gali išvystyti  $200$  km/h greitį, todėl pavienių aerodinaminių elementų tyrimas tęstas šiame greityje.

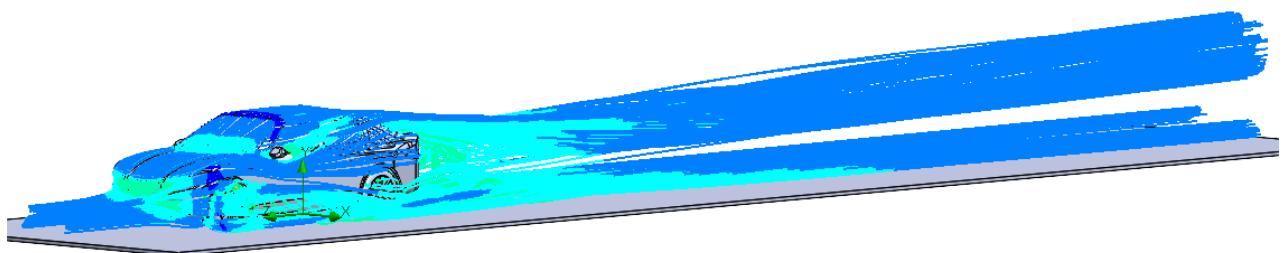
##### 4.2.1. Sedano papildomų aerodinaminių elementų tyrimai

Ant sedano sumontuoti papildomi aerodinaminiai elementai tiriami su sedano kėbulu, kaip ir bazinio kėbulo tyrimuose, o tinklelis, skaičiuojamoji erdvė ir kiti parametrai liko nepakitę, išskyrus tyrimas įvykdytas  $200$  km/h oro srauto greityje.



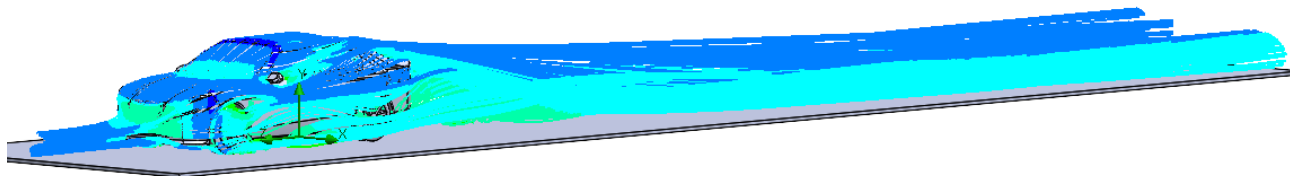
48 pav. Oro srauto linijos aplink sedaną su sparnu

Sparnas nukreipia pratekantį oro srautą į viršų generuodamas prispaudimo jėgą, oro srauto sūkuriai už automobilio didesni, nei baziniame tyrime, todėl sudaroma didesnė vilktis ir didesnė pasipriešinimo jėga (žr. 48 pav.).



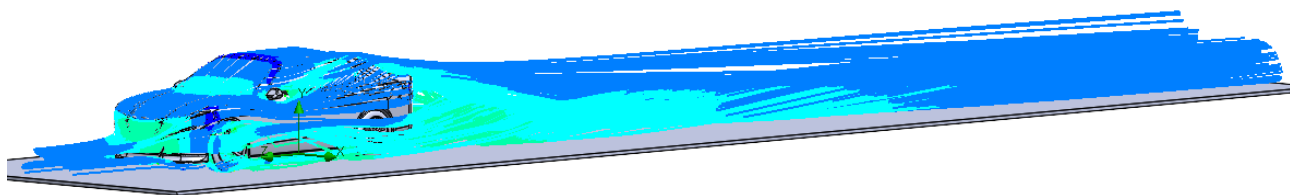
49 pav. Oro srauto linijos aplink sedaną su galiniu aptaku

Galinis aptakas veikia panašiai, kaip sparnas nukreipia dalį oro srauto į viršų, bet sukuria mažesnius oro sūkurius už automobilio (žr. 49 pav.).



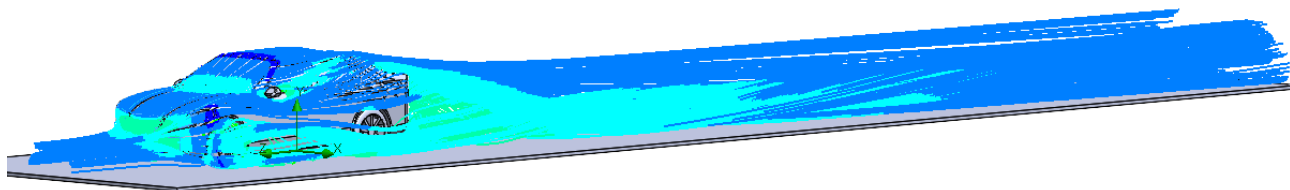
**50 pav.** Oro srauto linijos aplink sedaną su smulkia priekinio bamperio lūpa

Priekinio bamperio lūpa dalį oro srauto nukreipia virš automobilio, elementas sumažina prispaudimo jėgą, elemento priekis nukreipia per daug oro srauto žemyn, generuodamas kėlimo jėgą (žr. 50 pav.).



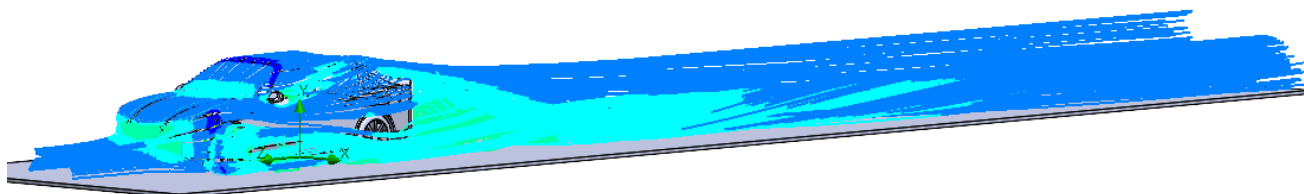
**51 pav.** Oro srauto linijos aplink sedaną su sportine priekinio bamperio lūpa

Sportinė priekinio bamperio lūpa dar daugiau oro srauto nukreipė į viršų, padidinama pasipriešinimo jėga bei sukelta prispaudimo jėga lyginant su baziniu kėbulu (žr. 51 pav.).



**52 pav.** Oro srauto linijos aplink sedaną su 6° difuzoriumi

Difuzorius nukreipia po automobiliu pratekantį oro srautą į viršų automobilio gale, mažai įtakojama pasipriešinimo jėga, bet tikėtasi, kad prispaudimo jėga išaugs, tačiau oro srautas atsiplėšia ir aerodinaminės charakteristikos mažai įtakojamos (žr. 52 pav.).



**53 pav.** Oro srauto linijos aplink sedaną su 10° difuzoriumi

Sportinis difuzoriaus oro srautas atsiplėšia anksčiau ir generuojama dar mažiau prispaudimo jėgos, atsiplėšęs oro srautas susisuka į sūkurius ir sukelia papildomos pasipriešinimo jėgos (žr. 53 pav.).

Lentelėje pateikti visi sedano su aerodinaminiais elementais tyrimų rezultatai, bei suskaičiuoti aerodinaminių jėgų koeficientai.

**4 lentelė.** Sedano su papildomais aerodinaminiais elementais aerodinaminės charakteristikos

Jėgos/Kėbulas	Sedanas su sparnu	Sedanas su galiniu aptaku	Sedanas su smulki priekine lūpa	Sedanas su sportine priekine lūpa	Sedanas su 6 <sup>o</sup> difuzoriumi	Sedanas su 10 <sup>o</sup> difuzoriumi
Pasipriešinimo jėga, N	1596,51	1558,84	1542,38	1508,85	1539,80	1533,76
Pasipriešinimo koeficientas	0,3855	0,3764	0,3725	0,3644	0,3718	0,3718
Prispaudimo jėga, N	251,63	103,14	-587,00	-80,45	-466,86	-455,10
Prispaudimo koeficientas	0,01702	0,006978	-0,03971	-0,005443	-0,03159	-0,03079

Didžiausios prispaudimo ir pasipriešinimo jėgos sukeltos sedano su sparnu, kėbulas su difuzoriais negeneruoja prispaudimo jėgos (žr. 4 lentelė.).

Lentelė sudaryta atimant bazinio kėbulo aerodinaminių charakteristikų rezultatus iš tyrimų su papildomais aerodinaminiais elementais, tokiu būdu galima matyti papildomų aerodinaminių elementų įtaką sedano kėbului.

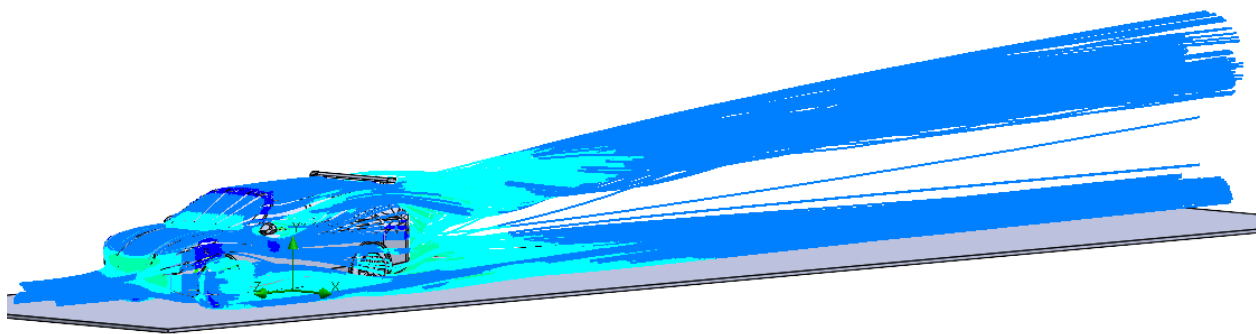
**5 lentelė.** Sedano papildomų aerodinaminių elementų aerodinaminės charakteristikos

Jėgos/Elementas	Sparnas	Galinis aptakas	Smulki priekinė lūpa	Sportinė priekinė lūpa	6 <sup>o</sup> difuzorius	10 <sup>o</sup> difuzorius
Pasipriešinimo jėga, N	102,09	64,42	47,96	14,43	45,38	39,34
Pasipriešinimo koeficiento pokytis	0,02140	0,01230	0,008330	0,0002334	0,007707	0,006249
Prispaudimo jėga, N	604,75	456,26	-233,88	272,67	-113,74	-101,98
Prispaudimo koeficiento pokytis	0,04059	0,03055	-0,01615	0,01812	-0,008019	-0,007223

Sedanui sparnas, galinis aptakas ir sportinė priekinė lūpa generavo prispaudimo jėgą, kiti elementai generavo kėlimą. Sparnas sukėlė daugiausiai prispaudimo jėgos – 604,75 N, smulki priekinė lūpa kėbului teikė 233,88 N kėlimo (žr. 5 lentelė.).

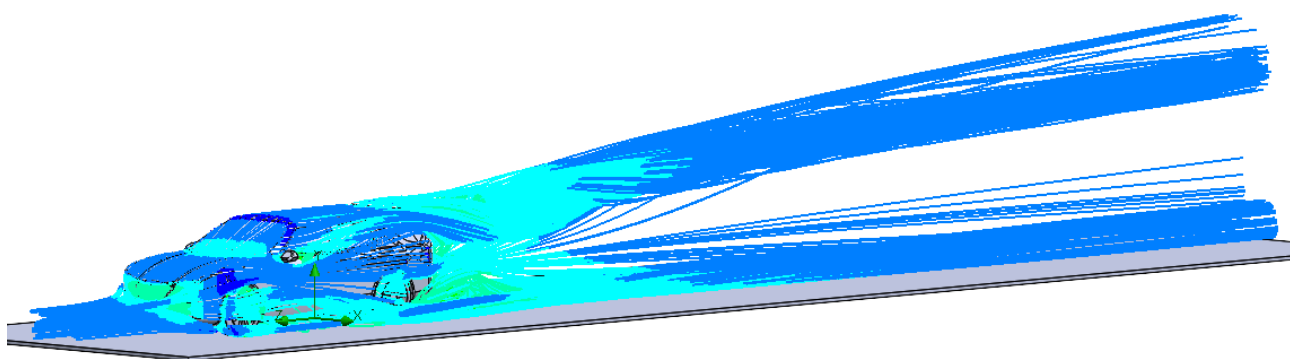
**4.2.2. Universalio papildomų aerodinaminių elementų tyrimai**

Tyrimas kartojamas identiškais sąlygomis sumontuojant papildomus elementus ant universalio kėbulo ir stebimi efektai 200 km/h oro srauto greityje.



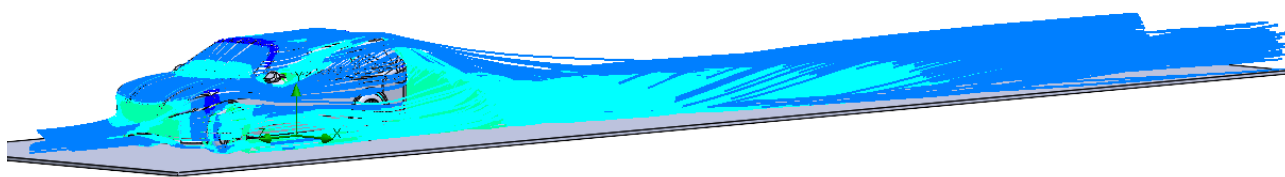
**54 pav.** Oro srauto linijos aplink universalą su sparnu

Universalso sparnas montuojamas ant stogo, todėl galima tikėtis ženklėsniū aerodinamiū charakteristikū pokyčio, nei sedano tyrime (žr. 54 pav.).



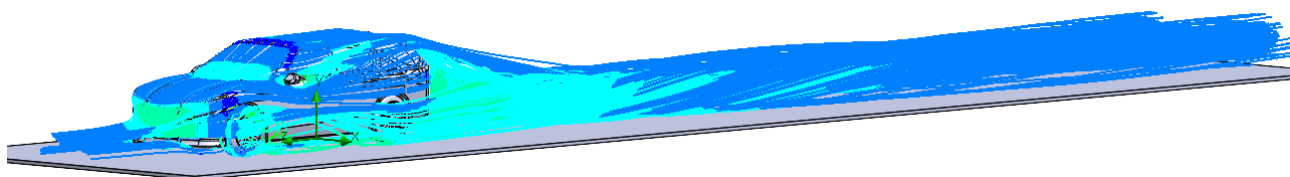
**55 pav.** Oro srauto linijos aplink universalą su galiniu aptaku

Universalso galinis aptakas siauresnis nei kitų kėbulū, bet montuojamas ant stogo, todėl puikiai nukreipia oro srautą į viršū generuodamas prispaudimo jėgą, o susidarantys oro sūkuriai, padidina pasipriešinimą (žr. 55 pav.).



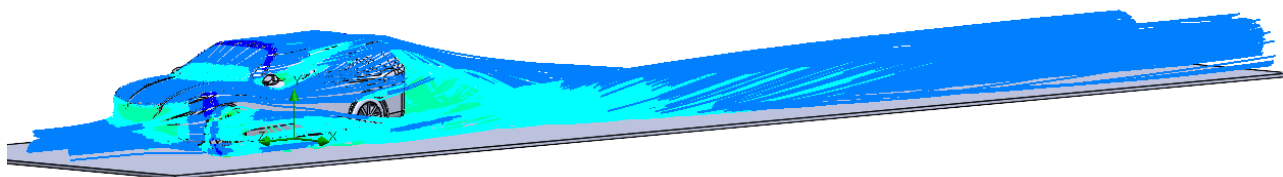
**56 pav.** Oro srauto linijos aplink universalą su smulkia priekinio bamperio lūpa

Priekinė bamperio lūpa stabdo oro srautą automobilio priekyje sukeldama papildomą pasipriešinimo jėgą, bet prispaudimo jėga neženkliai padidėja (žr. 56 pav.).



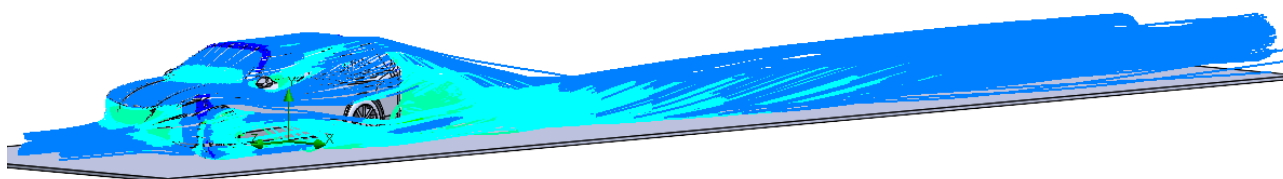
**57 pav.** Oro srauto linijos aplink universalą su sportine priekinio bamperio lūpa

Sportinės lūpos efektas panašus kaip smulkios, taip nutinka dėl lūpos ilgio, oro srautas spėja prilipti prie paviršiaus, taip sumažėja sukeltos jėgos (žr. 57 pav.)



**58 pav.** Oro srauto linijos aplink universalą su 6° difuzoriumi

Difuzoriaus tyrime, kaip ir sedanui, panašu, kad oro srautas atsiplėšia difuzoriaus pradžioje ir sukuria sūkurius, todėl aerodinaminės charakteristikos yra neigiamai įtakotos (žr. 58 pav.)



**59 pav.** Oro srauto linijos aplink universalą su 10° difuzoriumi

Sportinis difuzorius nukreipia oro srautą į viršų, dalis srauto atsiplėšia, bet vis tiek generuojama prispaudimo jėga (žr. 59 pav.)

Pagal tyrimo metu gautus rezultatus sudaryta aerodinaminių charakteristikų lentelė.

**6 lentelė.** Universalos su papildomais aerodinaminiais elementais aerodinaminės charakteristikos

Jėgos/Kėbulas	Universalas su sparnu	Universalas su galiniu aptaku	Universalas su smulkia priekine lūpa	Universalas su sportine priekine lūpa	Universalas su 6° difuzoriumi	Universalas su 10° difuzoriumi
Pasipriešinimo jėga, N	1825,91	1959,29	1710,38	1672,63	1636,37	1674,61
Pasipriešinimo koeficientas	0,4409	0,4731	0,4130	0,4039	0,3952	0,4044
Prispaudimo jėga, N	773,64	840,36	-430,10	-297,92	-866,37	-916,21
Prispaudimo koeficientas	0,05234	0,05686	-0,02910	-0,02016	-0,05862	-0,06199

Universalos pasipriešinimo jėgos didesnės, nei sedano ir kėbulas su galiniais viršutiniais elementais generavo aukštą prispaudimo jėgą. Difuzoriai, kėbulo aerodinaminėms charakteristikoms kenksmingi – negeneruoja prispaudimo ir sukelia papildomą pasipriešinimą (žr. 6 lentelė.).

Lentelė sudaryta atimant bazinio kėbulo aerodinaminių charakteristikų rezultatus iš tyrimų su papildomais aerodinaminiais elementais, taip galima matyti papildomų aerodinaminių elementų įtaką universalos kėbului.

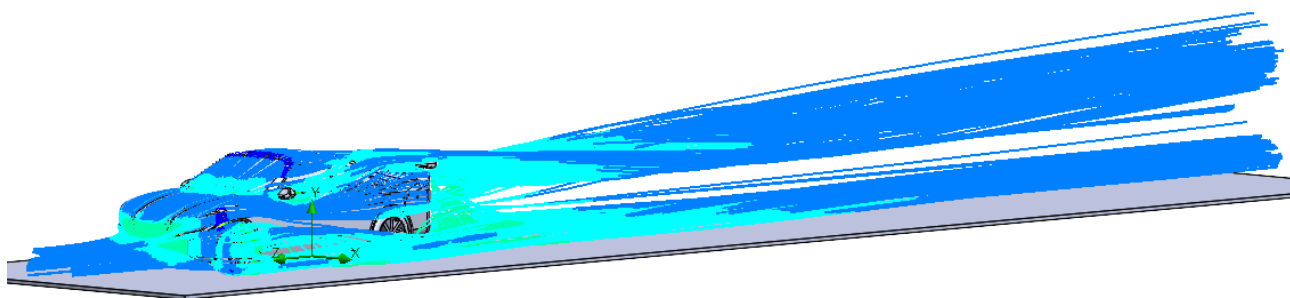
**7 lentelė.** Universalio papildomų aerodinaminių elementų aerodinaminės charakteristikos

Jėgos/Elementas	Sparnas	Galinis aptakas	Smulki priekinė lūpa	Sportinė priekinė lūpa	6° difuzorius	10° difuzorius
Pasipriešinimo jėga, N	244,85	378,23	129,32	91,57	55,31	93,55
Pasipriešinimo koeficiento pokytis	0,06108	0,09329	0,03318	0,02406	0,01531	0,02454
Prispaudimo jėga, N	1270,22	1336,94	66,48	198,66	-369,79	-419,63
Prispaudimo koeficiento pokytis	0,07346	0,07797	-0,007981	-0,0009623	-0,03750	-0,04087

Galiniai viršutiniai elementai universalui teikė didžiulį papildomą prispaudimą, priekiniai elementai generavo nedidelį prispaudimą, o difuzoriai ženkliai sumažino kėbulo generuojamą prispaudimą (žr. 7 lentelė.).

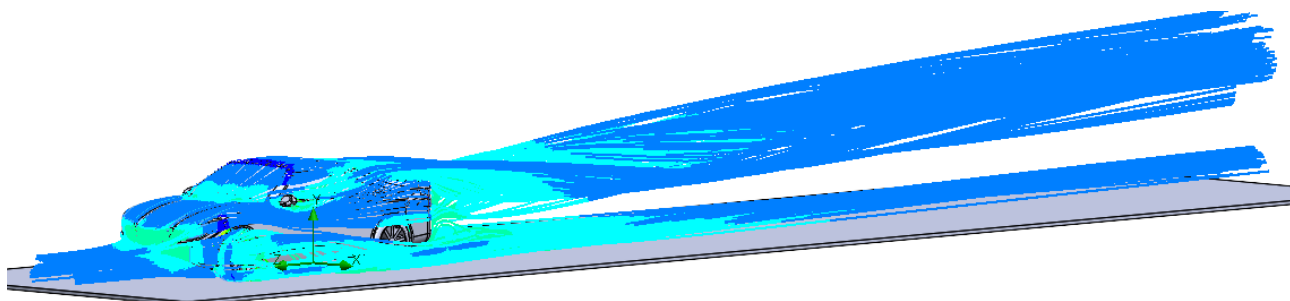
**4.2.3. Kupė papildomų aerodinaminių elementų tyrimai**

Galiausiai tiriami papildomi aerodinaminiai elementai montuojami ant kupė kėbulo ir tirti 200 km/h oro srauto greityje.



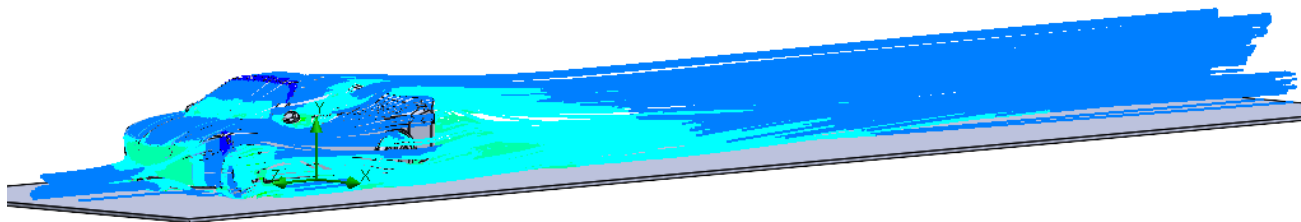
**60 pav.** Oro srauto linijos aplink kupė su sparnu

Sparnas nukreipdamas oro srautą į viršų generuoja papildomą prispaudimo jėgą, tuo pačiu padidėja pasipriešinimas (žr. 60 pav.).



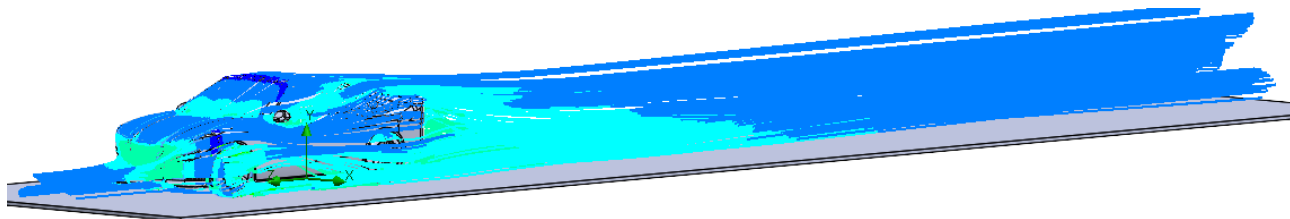
**61 pav.** Oro srauto linijos aplink kupė su galiniu aptaku

Galinis aptakas veikia panašiai kaip sparnas, bet elemento atakos kampas didesnis, todėl daugiau oro srauto nukreipiama į viršų, generuojama didesnė papildoma prispaudimo ir pasipriešinimo jėga (žr. 61 pav.).



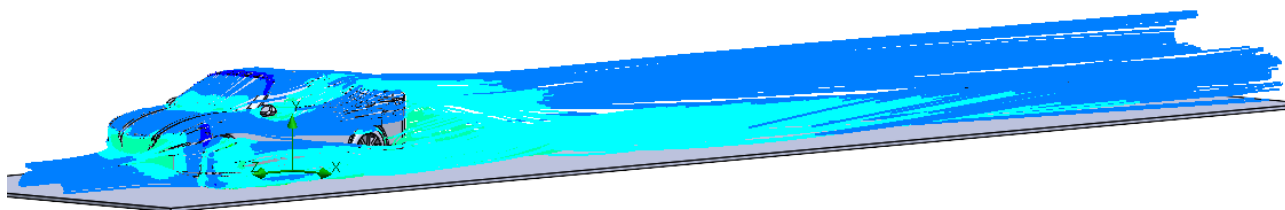
**62 pav.** Oro srauto linijos aplink kupė su smulkia priekinio bamperio lūpa

Tiriama kupė su smulkia lūpa, jos aerodinaminės charakteristikos pagerėja, nors priekiniai elementai ant kitų kūbulų turėjo neigiamos įtakos. (žr. 62 pav.).



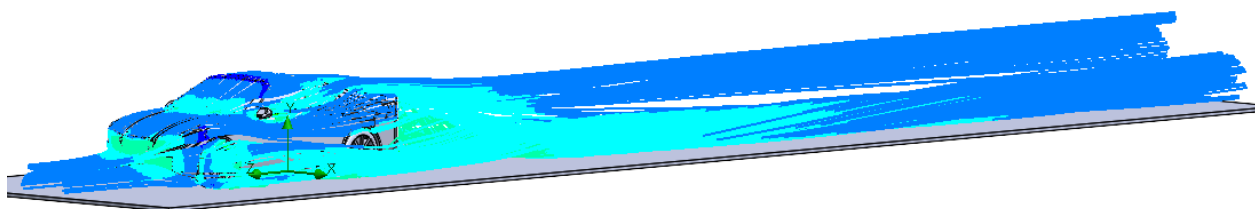
**63 pav.** Oro srauto linijos aplink kupė su sportine priekinio bamperio lūpa

Sportinė priekinė bamperio lūpa kupė kūbului suteikia labai panašių savybių kaip ir smulki lūpa, taip pat stebimas aerodinaminių savybių žymus pagerėjimas (žr. 63 pav.).



**64 pav.** Oro srauto linijos aplink kupė su 6° difuzoriumi

Nuo kupė difuzoriaus oro srautas atsiplėšia ir beveik nesudaroma įtaka aerodinaminėms charakteristikoms (žr. 64 pav.)



**65 pav.** Oro srauto linijos aplink kupė su 10° difuzoriumi

Nuo didesnio kampo difuzoriaus oro srautas atsiplėšia panašiai kaip nuo smulkesnio elemento ir beveik nedaroma įtaka kupė aerodinaminėms charakteristikoms (žr. 65 pav.)

Atlikus tyrimus, kupė kūbului su papildomais aerodinaminiais elementais sudaryta aerodinaminių charakteristikų rezultatų lentelė.

**8 lentelė.** Kupė su papildomais aerodinaminiais elementais aerodinaminės charakteristikos

Jėgos/Kėbulas	Kupė su sparnu	Kupė su galiniu aptaku	Kupė su smulkia priekine lūpa	Kupė su sportine priekine lūpa	Kupė su 6 <sup>o</sup> difuzoriumi	Kupė su 10 <sup>o</sup> difuzoriumi
Pasipriešinimo jėga, N	1642,89	1680,59	1523,88	1484,76	1544,02	1518,58
Pasipriešinimo koeficientas	0,3967	0,4058	0,3680	0,3585	0,3729	0,3667
Prispaudimo jėga, N	396,89	521,45	121,37	309,06	-300,89	-276,15
Prispaudimo koeficientas	0,02685	0,03528	0,008211	0,02091	-0,02036	-0,01868

Kupė su papildomais aerodinaminiais elementais išskyrus difuzoriais generavo prispaudimą. Priekiniai elementai labai neženkliai įtakojo kėbulo pasipriešinimo jėgą (žr. 8 lentelė.).

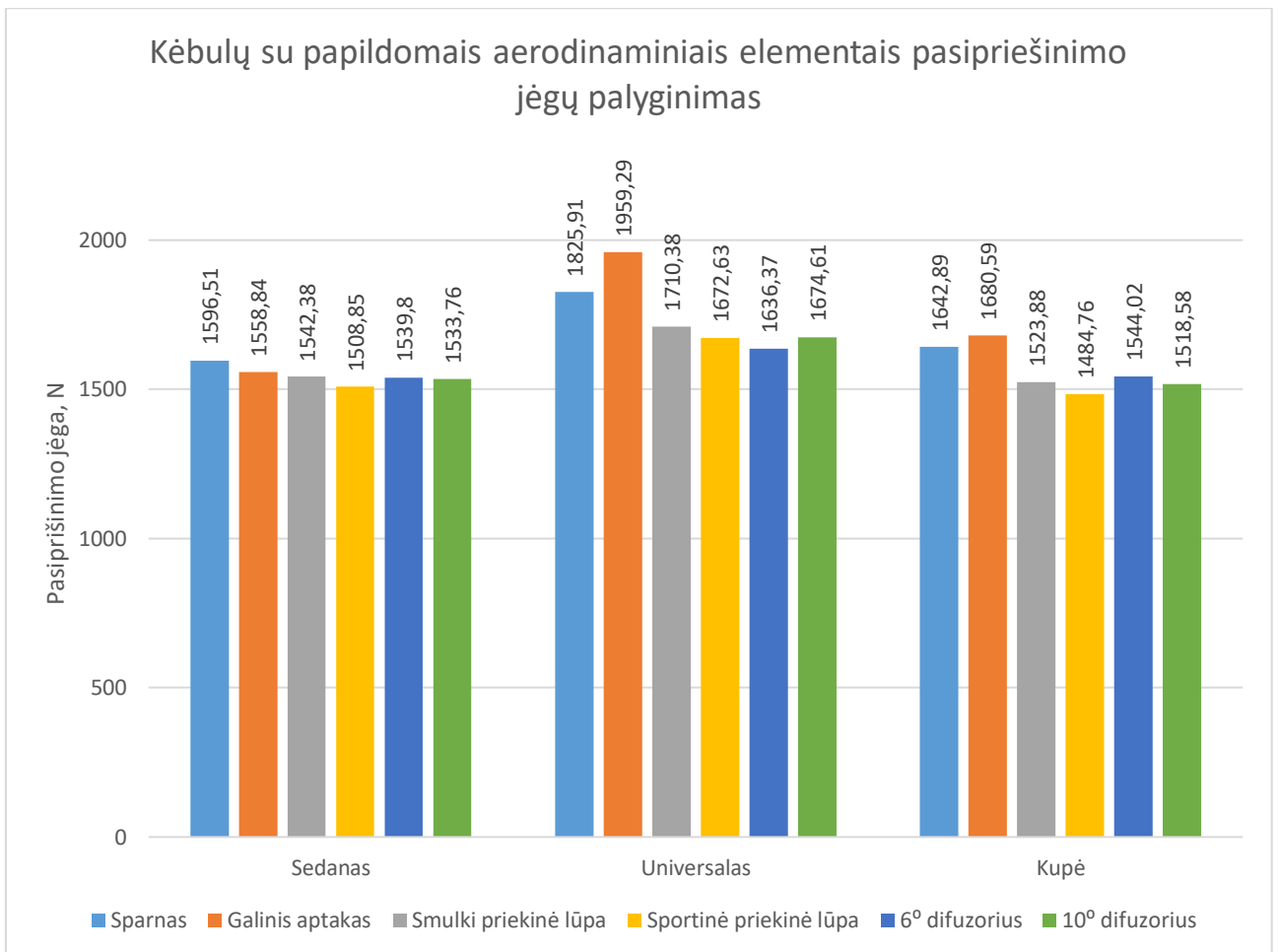
Lentelė sudaryta atimant bazinio kėbulo aerodinaminių charakteristikų rezultatus iš tyrimų su papildomais aerodinaminiais elementais, taip galima matyti papildomų aerodinaminių elementų įtaką kupė kėbului.

**9 lentelė.** Kupė papildomų aerodinaminių elementų aerodinaminės charakteristikos

Jėgos/Elementas	Sparnas	Galinis aptakas	Smulki priekinė lūpa	Sportinė priekinė lūpa	6 <sup>o</sup> difuzorius	10 <sup>o</sup> difuzorius
Pasipriešinimo jėga, N	127,71	165,41	8,70	-30,42	28,84	3,4
Pasipriešinimo koeficiento pokytis	0,03177	0,04087	0,003028	-0,006419	0,007891	0,001748
Prispaudimo jėga, N	589,68	712,24	312,16	499,85	-110,10	-52,36
Prispaudimo koeficiento pokytis	0,3937	0,04780	0,02073	0,03343	-0,007837	-0,006163

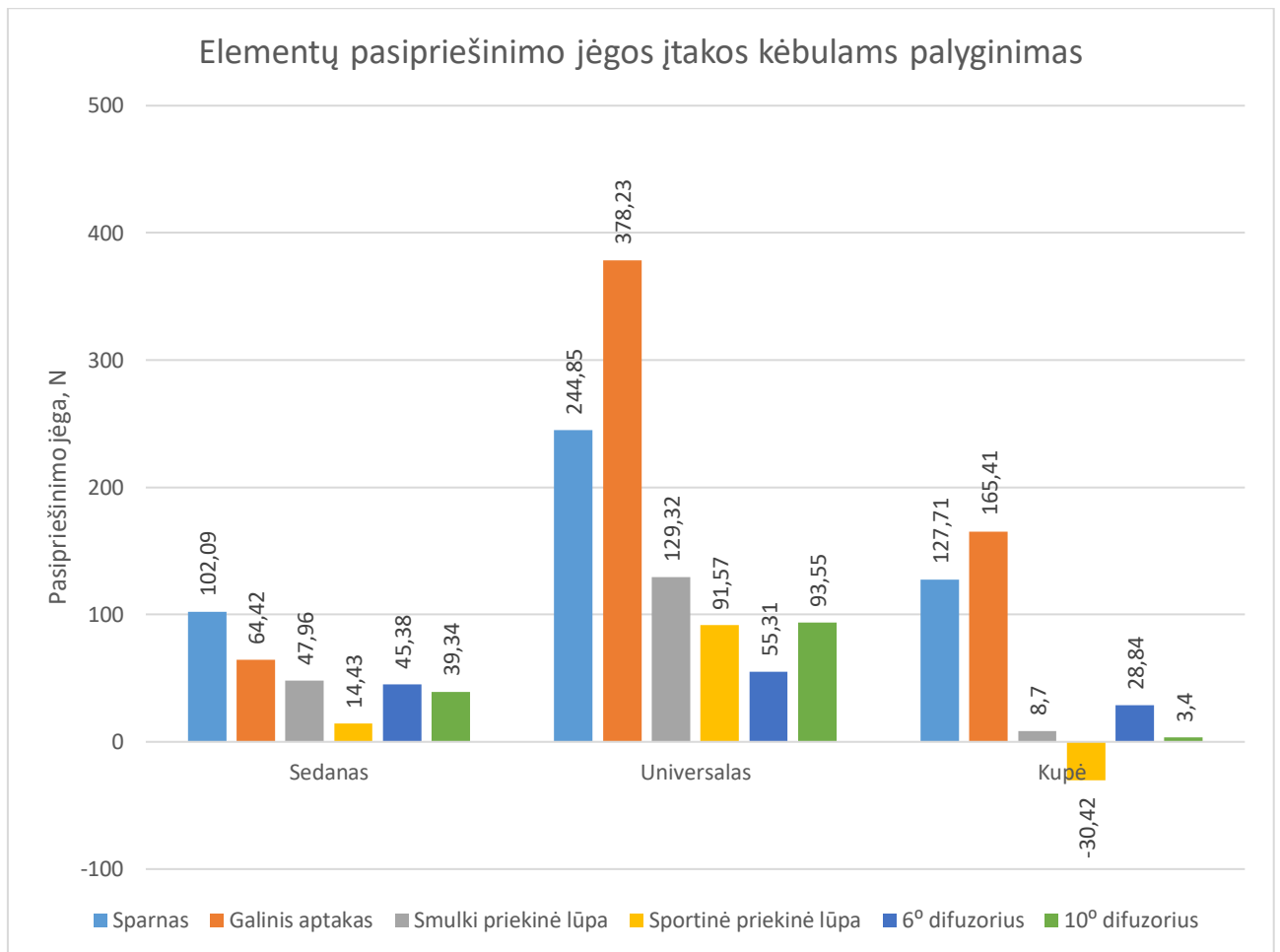
Galinis aptakas teigė kėbului daugiau prispaudimo jėgos, nei sparnas, nes jo efektinis atakos kampas statesnis ir ant šio kėbulo yra daugiau atstumo oro srautui įsibėgėti. Difuzoriai kupė generavo kėlimą, bet žymiai mažiau, nei kitiems kėbulams (žr. 9 lentelė.).

Sudaryti rezultatų palyginimo grafikai, pradėdant nuo kėbulų su papildomais aerodinaminiais elementais pasipriešinimo jėgų palyginimo grafiko (žr. 66 pav.).



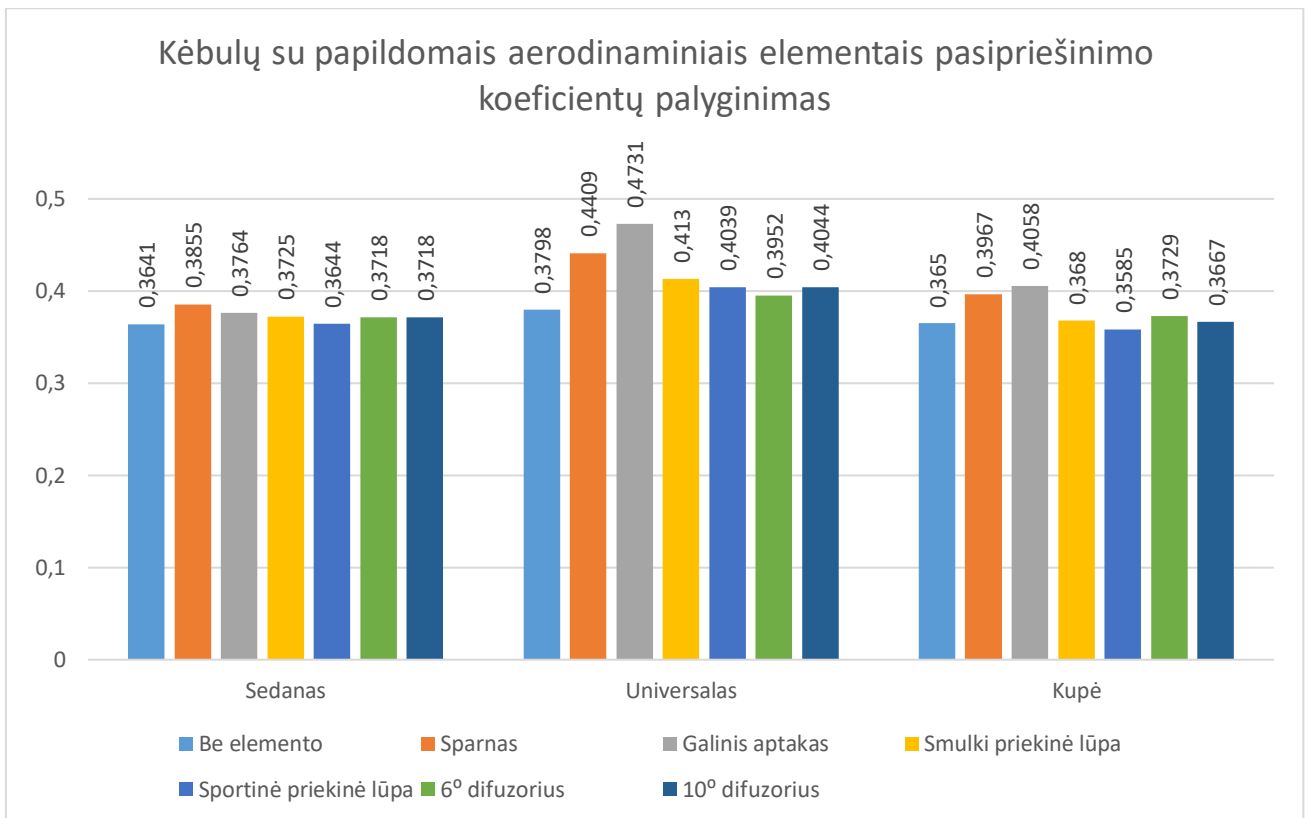
**66 pav.** Kėbulų su papildomais aerodinaminiais elementais pasipriešinimo jėgų palyginimo grafikas

Kėbulų sukeliama pasipriešinimo jėga beveik visais atvejais išaugo su papildomai elementais, sudarytas elementų pasipriešinimo jėgos įtakos kėbulams grafikas (žr. 67 pav.).



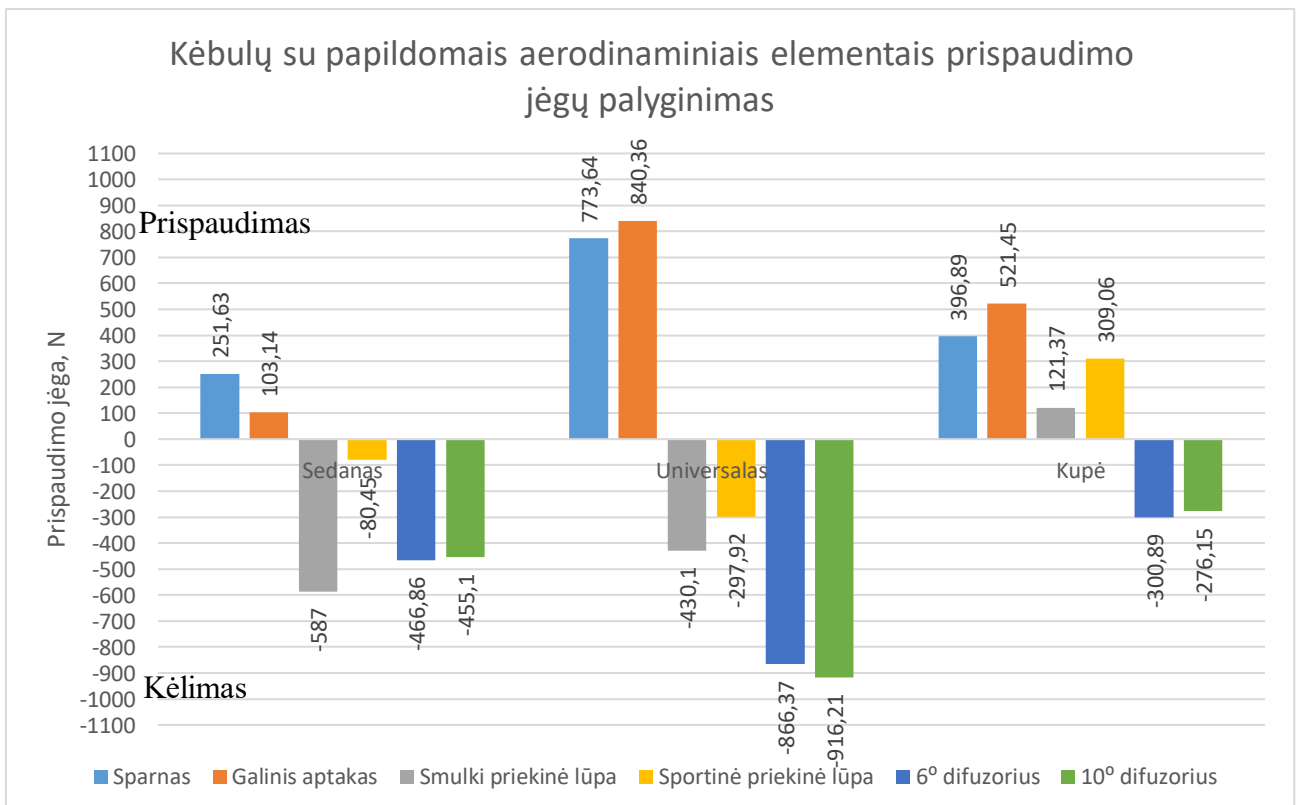
**67 pav.** Elementų pasipriešinimo jėgos įtakos kėbulams palyginimo grafikas

Pasipriešinimo jėgų tyrime, galima stebėti, kad papildomi aerodinaminiai elementai skirtingai įtakoja skirtingus kėbulus. Išskirtinai galiniai viršutiniai elementai ypač smarkiai įtakoja universalą dėl kitokios montavimo pozicijos. Difuzoriai labai skirtingai įtakoja kėbulus – universalso pasipriešinimas labiau išaugo sumontavus 10° difuzorių, nei 6°, o sedano ir kupė kėbulus smarkiau veikė 6° difuzorius, o taip galėjo įvykti dėl mažesnio atstumo tarp kėbulo viršutinės galinės dalies ir apatinės galinės dalies. Sedaną silpniau įtakojo smulkus galinis aptakas nei sparnas, nors kitus kėbulus, sparnas silpniau veikė, nes oro srauto įsibėgėjimo atstumas ant universalso ir kupė ilgesnis, o galinio aptako efektinis atakos kampas gerokai statesnis nei sparno. Sudarytas kėbulų su papildomais aerodinaminiais elementais pasipriešinimo koeficientų palyginimo grafikas (žr. 68 pav.).



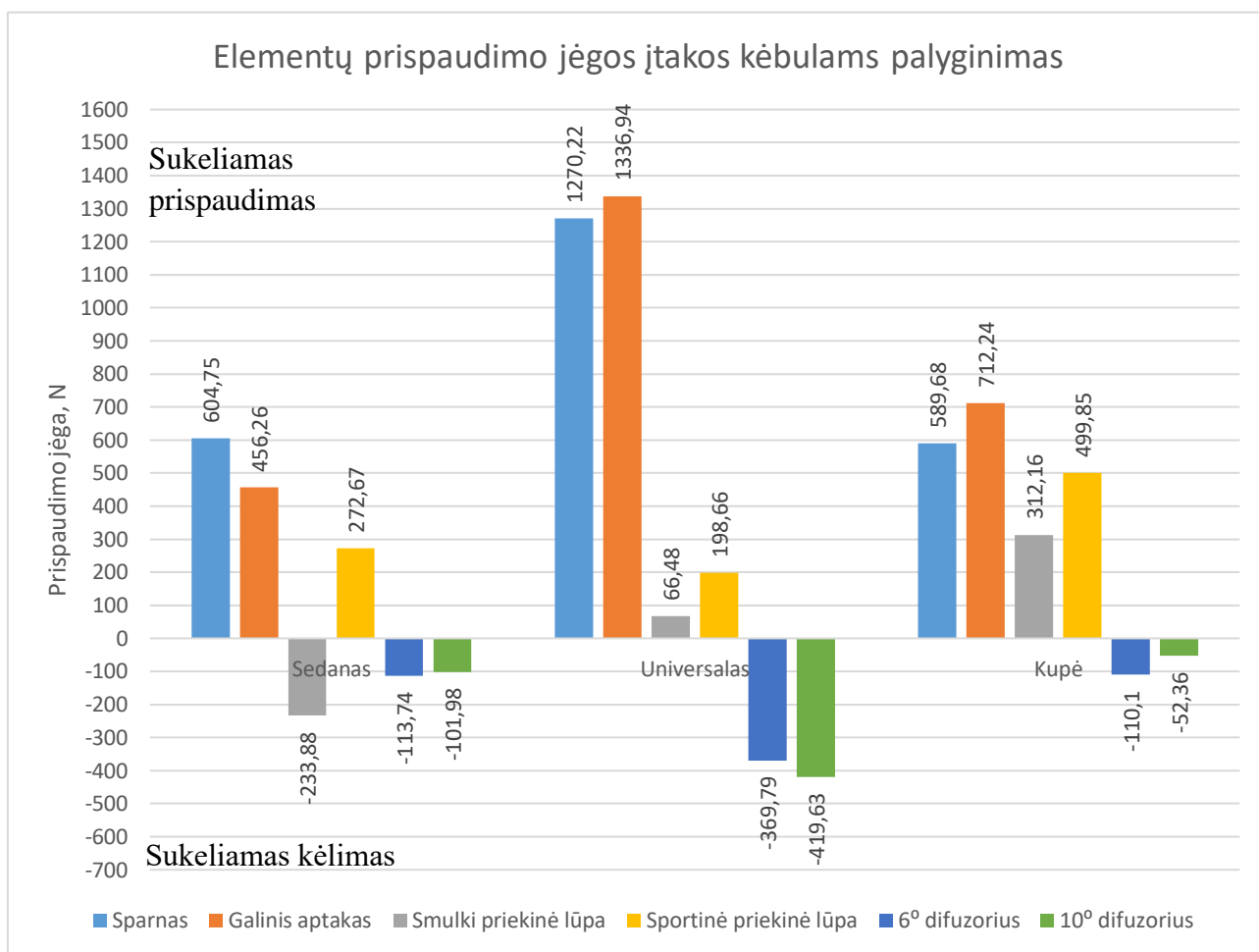
**68 pav.** Kėbulų su papildomais aerodinaminiais elementais pasipriešinimo koeficientų palyginimo grafikas

Koeficientai atkartoja informaciją, kurią apibūdino pasipriešinimo jėgų tyrimų rezultatai. Tyrimo eigoje sudarytas kėbulų su papildomais aerodinaminiais elementais prispaudimo jėgų palyginimo grafikas (žr. 69 pav.).



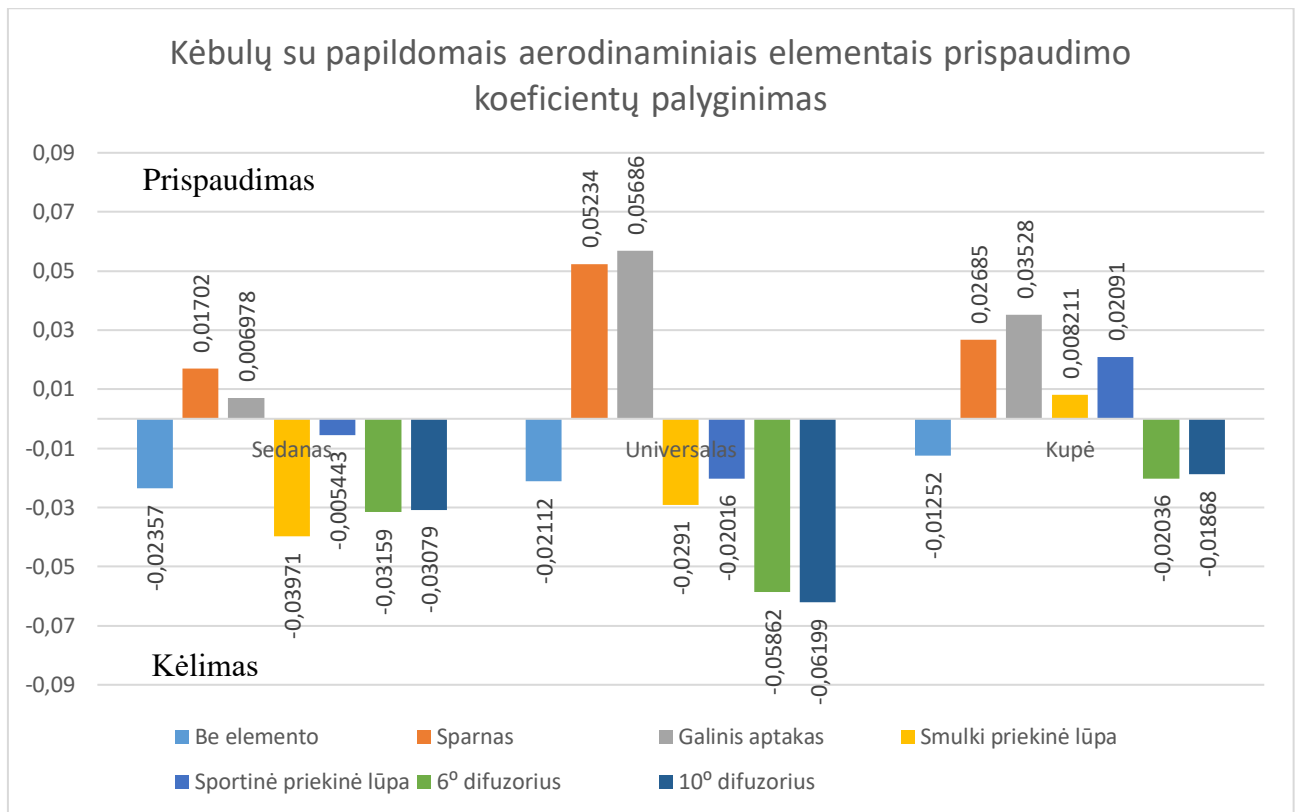
**69 pav.** Kėbulų su papildomais aerodinaminiais elementais prispaudimo jėgų palyginimo grafikas

Bendras kėbulu su elementu sukeliamų jėgų grafikas negali nusakyti aerodinaminio naudingumo, todėl sudarytas elementų prispaudimo jėgos įtakos kėbulams grafikas (žr. 70 pav.).



**70 pav.** Elementų prispaudimo jėgos įtakos kėbulams palyginimo grafikas

Tyrimo metu nustatyta, kad difuzoriai visiems kėbulams sukėlė neigiamą prispaudimą (kėlimą), todėl galima vertinti, kad šie elementai be papildomų modifikacijų nėra aerodinamiškai naudingi, bet pagal oro srauto linijas, kurios iš po automobilio galo kyla aukštyn, galima numatyti, kad komponuojant difuzorių su galiniu aptaku, tikėtini teigiami rezultatai. Dėl elementų montavimo pozicijos ir žymiai ilgesnio oro srauto įsibėgėjimo atstumo universalso galiniai viršutiniai elementai sukėlė daugiau prispaudimo jėgos nei tie patys elementai ant sedano ar kupė, dėl elementų montavimo pozicijos ir žymiai ilgesnio oro srauto įsibėgėjimo atstumo. Galinis aptakas buvo efektyvesnis už sparną ant universalso ir kupė, nes jo atakos kampas statesnis už sparno ir buvo ilgesnis oro srauto įsibėgėjimo kelias. Smulki priekinio bamperio lūpa sedanui suteikė kėlimo jėgos, o kitiems kėbulams prispaudimo, dėl lėtesnio oro srauto sedano galinėje viršutinėje dalyje – oro srautas iš po automobilio nėra taip efektyviai ištraukiamas. Patvirtinant tyrimo metu gautus rezultatus, sudarytas kėbulų su papildomais aerodinaminiais elementais prispaudimo koeficientų palyginimo grafikas (žr. 71 pav.).



**71 pav.** Kėbulų su papildomais aerodinaminiais elementais prispaudimo koeficientų palyginimo grafikas

Iš pateikto grafiko matyti, kad bazinis kupė kėbulas turėjo didžiausią prispaudimo koeficientą (mažiausią kėlimą), todėl kėbulas su daugiau elementų pradėjo kelti prispaudimo jėgą. Universalas su difuzoriais turėjo aukštą automobiliui kėlimo jėgą.

### 4.3. Komponuočių įtakos kėbulams tyrimas

Ištirus skirtingus kėbulus su papildomais aerodinaminiais elementais, suskaičiuota kiekvieno elemento įtaka kiekvienam tiriamam kėbului. Naudojant gautus tyrimo rezultatus komponuojama gatvei ir auto sportui tinkamiausios komponuotės, įvykdyti kompiuterinės fluidų dinamikos tyrimai.

Gatvės automobilis apibrėžiamas, kaip sportinis automobilis, kurį galima naudoti viešuose keliuose. Sportinis automobilis, automobilis, kuris modifikuojamas dideliais papildomais aerodinaminiais elementais siekiant kuo daugiau prispaudimo jėgos. Sportiniai papildomi aerodinaminiai elementai apibrėžiami kaip netinkami gatvės automobiliui dėl pėsčiųjų saugos. Gatvės automobilio aerodinaminių charakteristikų tikslas, sukelti kuo daugiau prispaudimo jėgos, nenaudojant sportinių detalių.

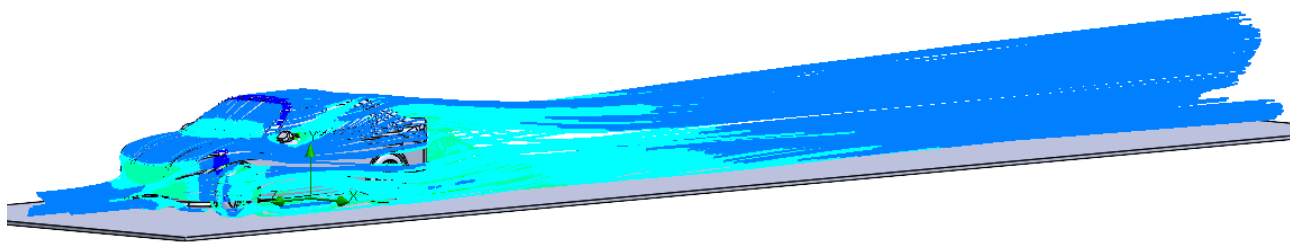
Nustatoma, kad gatvės automobiliui negalima naudoti sportinių elementų: sparno, sportinės priekinio bamperio lūpos ir 10° difuzoriaus. Prireikus, sportiniam automobiliui galima naudoti gatvės automobilio elementus, jei toks gatvės automobilio elementas gali suteikti geresnes aerodinamines charakteristikas.

#### 4.3.1. Gatvės automobilio komponuočių tyrimas

Gatvės automobiliui galima rinktis iš trijų aerodinaminių elementų: galinio aptako, smulkios priekinės lūpos ir 6° difuzoriaus. Pavienių aerodinaminių elementų įtaka aerodinaminėms

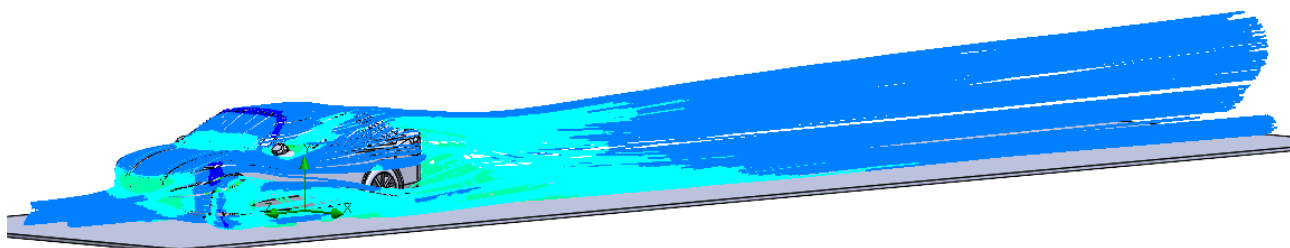
charakteristikoms yra žinoma ir tyrimas kartotas kiekvienam kėbului. Tyrimai vykdyti 200 km/h greityje su identiškai tyrimo parametrais, kaip pavienių elementų tyrimuose.

Įvykdytas sedano tyrimas.



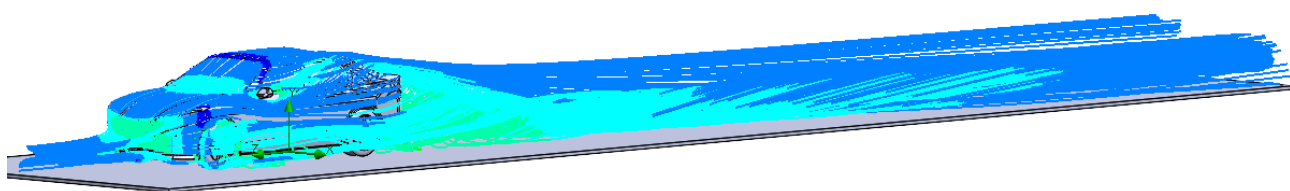
**72 pav.** Oro srauto linijos aplink sedaną su galiniu aptaku ir smulkia priekine lūpa

Ši komponentė pratekanti oro srautą nukreipė aukštyn ir smulkus priekinis aerodinaminis elementas, kuris veikdamas pavieniui, sukėlė kėlimo jėgą, komponentėje puikiai generuoja prispaudimo jėgą (žr. 72 pav.).



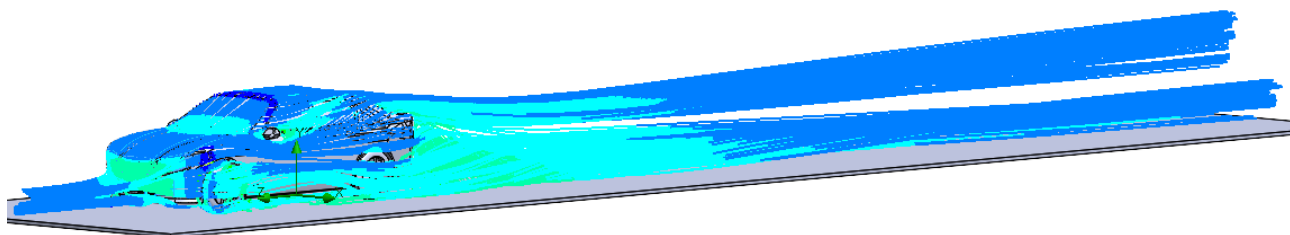
**73 pav.** Oro srauto linijos aplink sedaną su galiniu aptaku ir 6° difuzoriumi

Difuzorius komponentėje su galiniu aptaku generavo mažiau prispaudimo jėgos, nei sedanas tik su galiniu aptaku, todėl ši komponentė laikoma prasta. Oro srauto linijos parodo didelius srauto sūkurius automobilio gale (žr. 73 pav.).



**74 pav.** Oro srauto linijos aplink sedaną su smulkia priekine lūpa ir 6° difuzoriumi

Ši komponentė prasčiausiai suteikia automobiliui prispaudimo jėgos, bet abu elementai veikdami atskirai generavo kėlimo jėgą, o kartu generuoja prispaudimo jėgą (žr. 74 pav.).



**75 pav.** Oro srauto linijos aplink sedaną su visais gatvei tinkamais elementais

Komponuotė su visais tinkamais elementais sukelia mažiau prispaudimo jėgos nei komponuotė su galiniu aptaku ir smulkia priekine lūpa, susidaro oro srauto sūkuriai prie difuzoriaus (žr. 75 pav.).

**10 lentelė.** Gatvės sedano su papildomų aerodinaminių elementų komponuotėmis aerodinaminės charakteristikos

Jėgos/Kėbulas	Sedanas su galiniu aptaku ir smulkia priekine lūpa	Sedanas su galiniu aptaku ir 6 <sup>o</sup> difuzoriumi	Sedanas su smulkia priekine lūpa ir 6 <sup>o</sup> difuzoriumi	Sedanas su visais gatvei tinkamais elementais
Pasipriešinimo jėga, N	1583,06	1562,43	1582,32	1592,90
Pasipriešinimo koeficientas	0,3823	0,3773	0,3821	0,3847
Prispaudimo jėga, N	348,91	-35,79	-140,22	269,79
Prispaudimo koeficientas	0,02361	-0,002421	-0,009487	0,01825

Galinio aptako komponuotės sedanui generavo daugiausiai prispaudimo jėgos, difuzoriaus komponuotės neigiamai įtakojo kėbulą, generuodamos kėlimą (žr. 10 lentelė.).

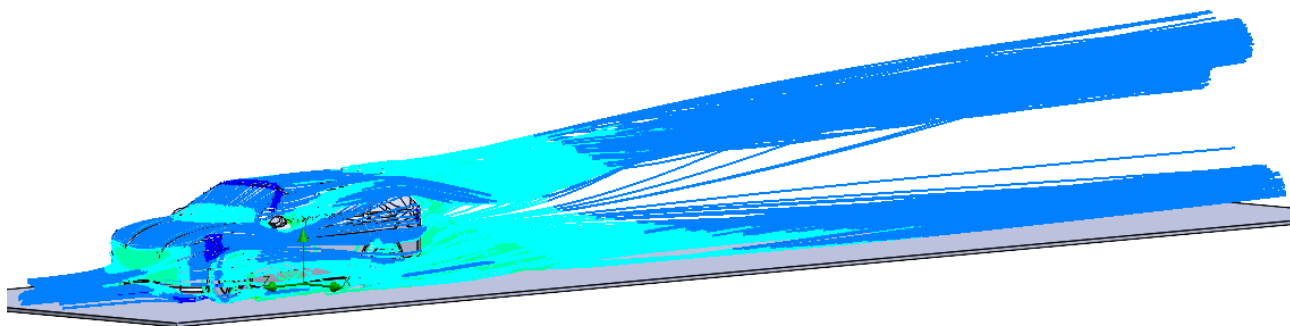
Sudaryta komponuočių įtakos kėbulams reikšmių lentelė atimant bazinio sedano aerodinamines charakteristikas iš kėbulo su komponuotėmis. Jėgų koeficientų skirtumai neįtraukti, nes palyginime aiškiau matomas efektas vertinant jėgomis.

**11 lentelė.** Gatvės sedano papildomų aerodinaminių elementų aerodinaminės charakteristikos

Jėgos/Kėbulas	Galinis aptakas ir smulki priekinė lūpa	Galinis aptakas ir 6 <sup>o</sup> difuzorius	Smulki priekinė lūpa ir 6 <sup>o</sup> difuzorius	Visi gatvei tinkami elementai
Pasipriešinimo jėgos pokytis, N	88,64	68,01	87,90	98,48
Prispaudimo jėgos pokytis, N	702,03	317,33	212,90	622,91

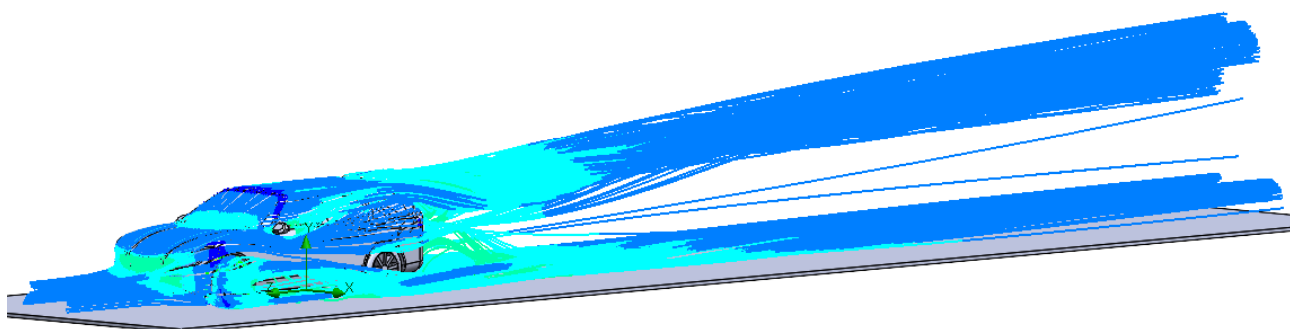
Visos komponuotės generuoja prispaudimo jėgą, net ir tos, kurios sudarytos iš elementų, kurie pavieniui generavo kėlimo jėgą. Daugiausiai prispaudimo jėgos generavo sedanas su galiniu aptaku ir priekine lūpa 702,03 N lyginant su baziniu sedanu, o mažiausiai prispaudimo jėgos generavo sedanas su galiniu aptaku ir 6<sup>o</sup> difuzoriumi 317,33 N lyginant su baziniu sedanu. Pastebėta, kad pasipriešinimo jėgos labai panašios, todėl renkant geriausią komponuotę nevertinamos. Nustatyta, kad gatvės sedanui geriausia komponuotė su galiniu aptaku ir priekine lūpa (žr. 11 lentelė.).

Tyrimas pratęstas su universalio kėbulu.



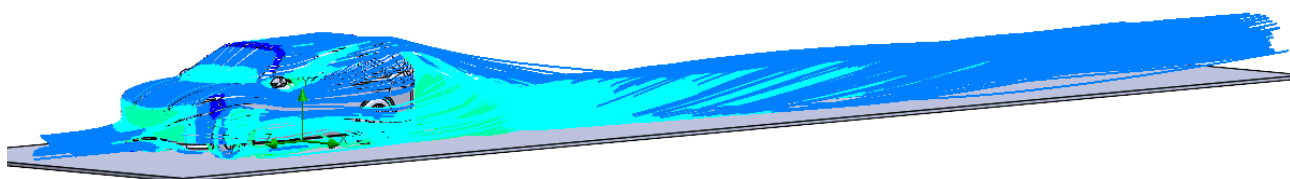
**76 pav.** Oro srauto linijos aplink universalą su galiniu aptaku ir smulkia priekine lūpa

Šioje komponentėje panaudotas smulkus priekinis aerodinaminis elementas, kuris veikdamas pavieniui sukėlė kėlimo jėgą, o komponentėje puikiai generuoja prispaudimo jėgą bei oro srautas nukreipiamas aukštyn (žr. 76 pav.).



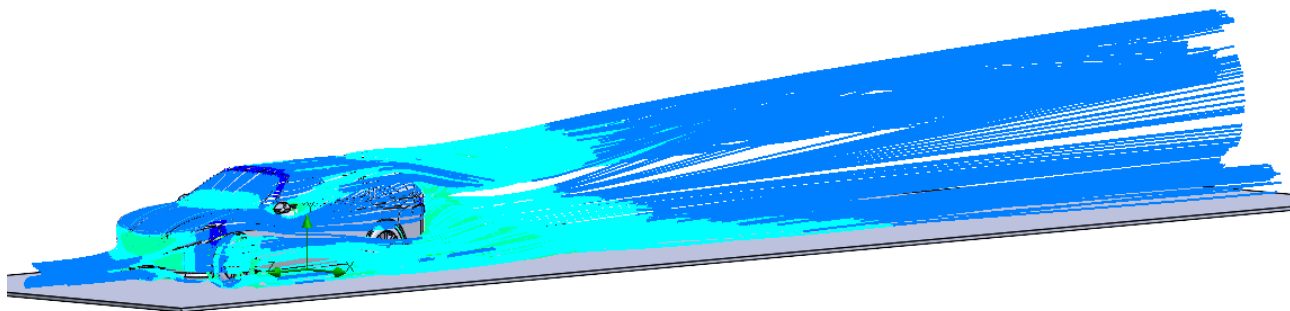
**77 pav.** Oro srauto linijos aplink universalą su galiniu aptaku ir 6° difuzoriumi

Difuzorius komponentėje nesukelia prispaudimo jėgos, pagal oro srauto linijas matoma, kad susidaro sūkuriai ir oro srautas nėra efektyviai nukreipiamas aukštyn (žr. 77 pav.).



**78 pav.** Oro srauto linijos aplink universalą su smulkia priekine lūpa ir 6° difuzoriumi

Oro srautas gerai nukreipiamas į viršų, bet automobilio galinėje apatinėje dalyje dalis srauto prilimpa prie kelio dangos ir nėra nukreipiamas aukštyn (žr. 78 pav.).



**79 pav.** Oro srauto linijos aplink universalą su visais gatvei tinkamais elementais

Pagal oro srauto linijas matoma, kad oro srautas nekreipiamas aukštyn, ši komponentė veikia prastai (žr. 79 pav.).

**12 lentelė.** Gatvės universalso su papildomų aerodinaminių elementų komponentėmis aerodinaminės charakteristikos

Jėgos/Kėbulas	Universalas su galiniu aptaku ir smulkia priekine lūpa	Universalas su galiniu aptaku ir 6° difuzoriumi	Universalas su smulkia priekine lūpa ir 6° difuzoriumi	Universalas su visais gatvei tinkamais elementais
Pasipriešinimo jėga, N	1973,58	1935,08	1727,70	1947,31
Pasipriešinimo koeficientas	0,4766	0,4673	0,4172	0,4702
Prispaudimo jėga, N	970,295	533,66	-514,03	816,19
Prispaudimo koeficientas	0,06565	0,03611	-0,03478	0,05522

Universalui mažiausiai papildomo pasipriešinimo teikė smulkios priekinės lūpos ir 6° difuzoriaus komponentė, bet ši komponentė yra vienintelė negeneruojanti prispaudimo jėgos (žr. 12 lentelė.).

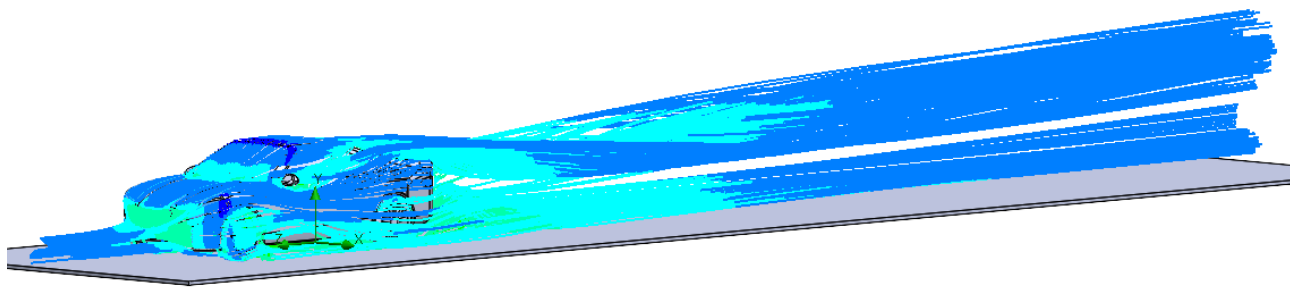
Sudaryta komponentių įtakos kėbulams reikšmių lentelė atimant bazinio universalso aerodinamines charakteristikas iš kėbulo su komponentėmis.

**13 lentelė.** Gatvės universalso papildomų aerodinaminių elementų aerodinaminės charakteristikos

Jėgos/Kėbulas	Galinis aptakas ir smulki priekinė lūpa	Galinis aptakas ir 6° difuzorius	Smulki priekinė lūpa ir 6° difuzorius	Visi gatvei tinkami elementai
Pasipriešinimo jėgos pokytis, N	392,52	354,02	146,64	366,25
Prispaudimo jėgos pokytis, N	1466,88	1030,24	-160,91	1312,77

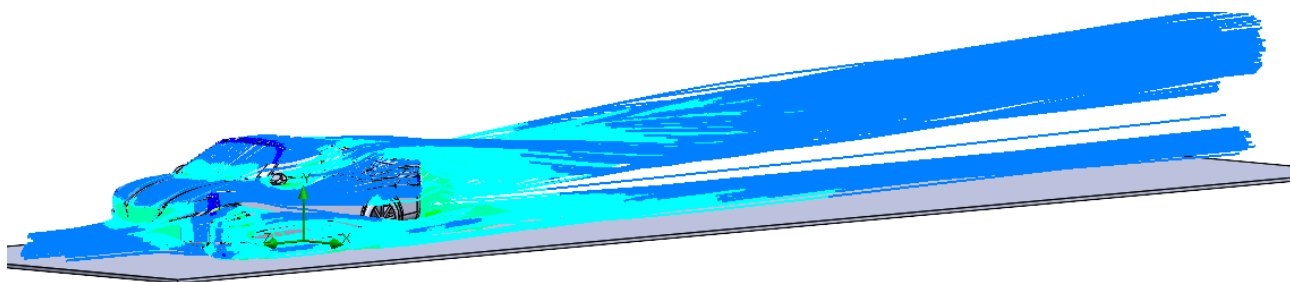
Tyrimo metu nustatyta, jog visos komponentės, išskyrus universalso su smulkia priekine lūpa ir 6° difuzoriumi, generuoja prispaudimo jėgą. Mažiausia prispaudimo jėga atsiranda smulkios priekinės lūpos ir 6° difuzoriaus komponentėje, nevertinant bazinio kėbulo charakteristikų generuojama - 160,91 N prispaudimo jėga, o daugiausiai prispaudimo jėgos kėbului suteikia galinis aptakas ir smulki priekinė lūpa 1466,88 N. Pasipriešinimo jėgos nevertinamos, nes išsiskirianti komponentė nesuteikia kėbului prispaudimo jėgos (žr. 13 lentelė.).

Tęsiant komponentų analizę įvykdytas gatvės kupė tyrimas.



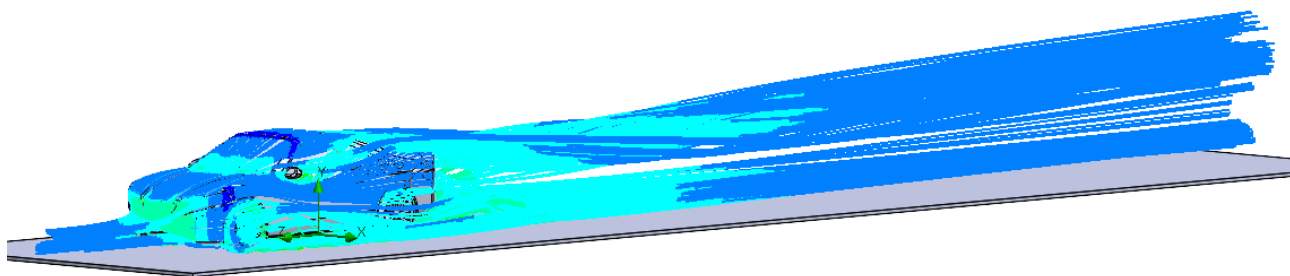
**80 pav.** Oro srauto linijos aplink kupė su galiniu aptaku ir smulkia priekine lūpa

Didžioji dalis oro srauto nukreipiama į viršų, net pro automobilio apačią tekantis vėjo srautas už automobilio kyša aukštyn (žr. 80 pav.).



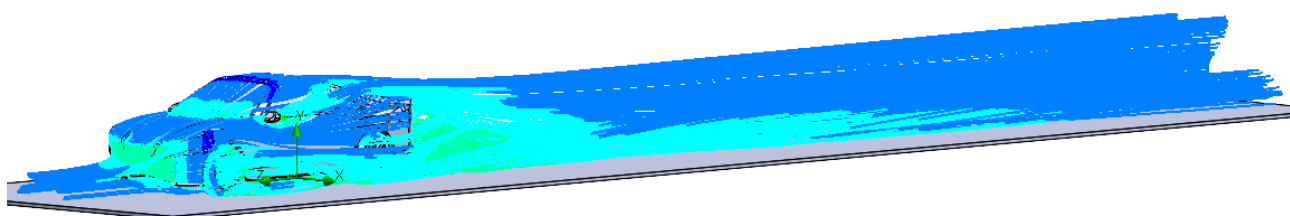
**81 pav.** Oro srauto linijos aplink kupė su galiniu aptaku ir 6° difuzoriumi

Galinis aptakas oro srautą nukreipia puikiai, bet nuo difuzoriaus atsiplėšęs srautas prilimpa prie kelio dangos (žr. 81 pav.).



**82 pav.** Oro srauto linijos aplink kupė su smulkia priekine lūpa ir 6° difuzoriumi

Didelė dalis oro srauto kreipiama aukštyn, nedidelė dalis priglunda prie kelio dangos (žr. 82 pav.).



**83 pav.** Oro srauto linijos aplink kupė su visais gatvei tinkamais elementais

Srautas beveik nukreipiamas aukštyn, oro srauto linijos glunda prie kelio dangos arba prateka tiesiai (žr. 83 pav.).

**14 lentelė.** Gatvės kupė su papildomų aerodinaminių elementų komponuotėmis aerodinaminės charakteristikos

Jėgos/Kėbulas	Kupė su galiniu aptaku ir smulkia priekine lūpa	Kupė su galiniu aptaku ir 6 <sup>o</sup> difuzoriumi	Kupė su smulkia priekine lūpa ir 6 <sup>o</sup> difuzoriumi	Kupė su visais gatvei tinkamais elementais
Pasipriešinimo jėga, N	1692,82	1668,37	1533,50	1686,67
Pasipriešinimo koeficientas	0,4088	0,4029	0,3703	0,4073
Prispaudimo jėga, N	729,14	356,67	79,09	674,86
Prispaudimo koeficientas	0,04933	0,02413	0,005351	0,04566

Gatvės kupė kėbulas su visomis komponuotėmis generavo prispaudimo jėgą, daugiausiai prispaudimo kėbului teikė galinio aptako ir smulkios priekinės lūpos komponuotė (žr. 14 lentelė.).

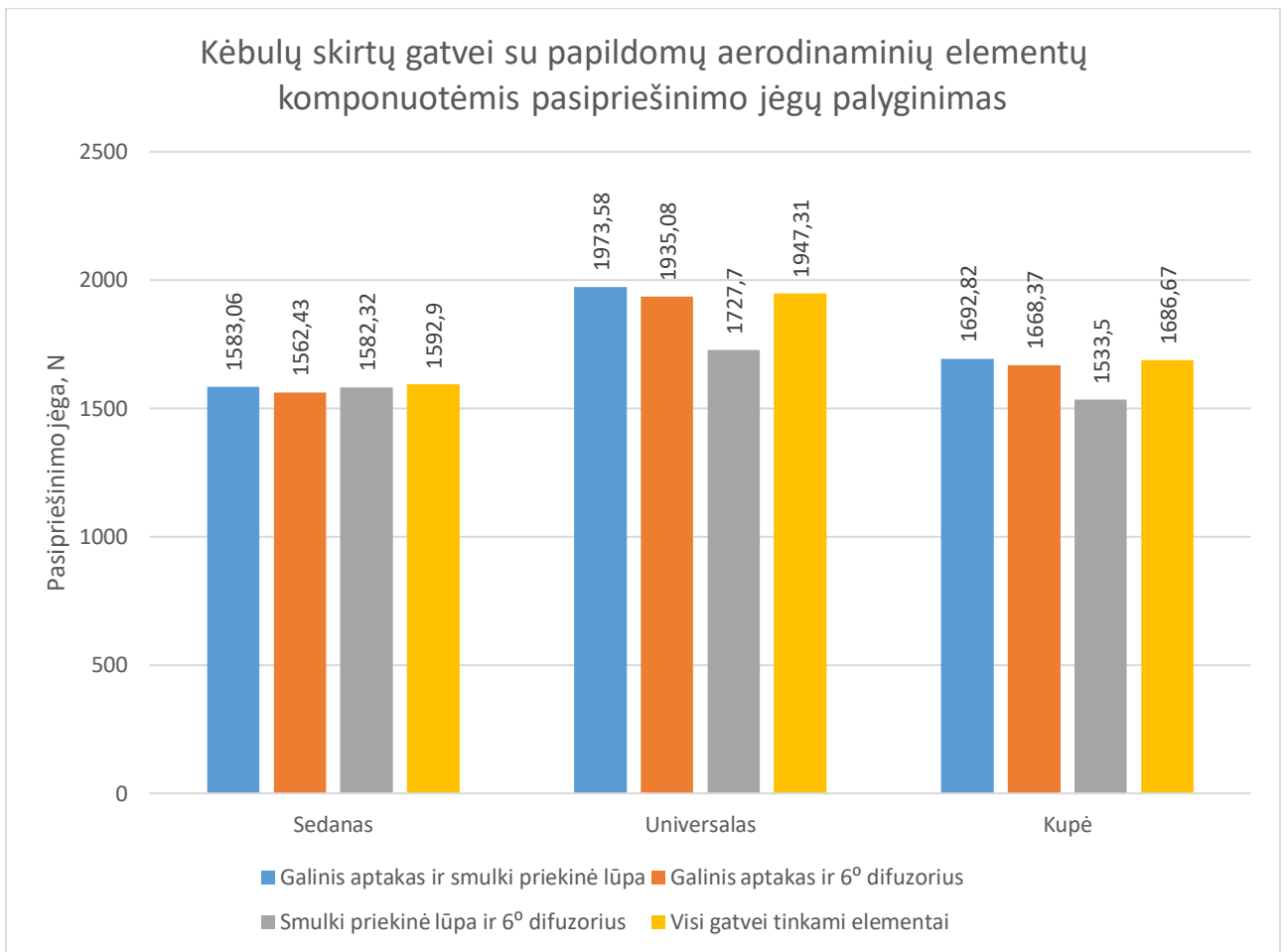
Sudaryta komponuočių įtakos kėbulams reikšmių lentelė atimant bazinio kupė aerodinamines charakteristikas iš kėbulo su komponuotėmis.

**15 lentelė.** Gatvės kupė papildomų aerodinaminių elementų aerodinaminės charakteristikos

Jėgos/Kėbulas	Galinis aptakas ir smulki priekinė lūpa	Galinis aptakas ir 6 <sup>o</sup> difuzorius	Smulki priekinė lūpa ir 6 <sup>o</sup> difuzorius	Visi gatvei tinkami elementai
Pasipriešinimo jėgos pokytis, N	177,64	153,19	18,32	171,49
Prispaudimo jėgos pokytis, N	919,93	547,46	269,88	865,65

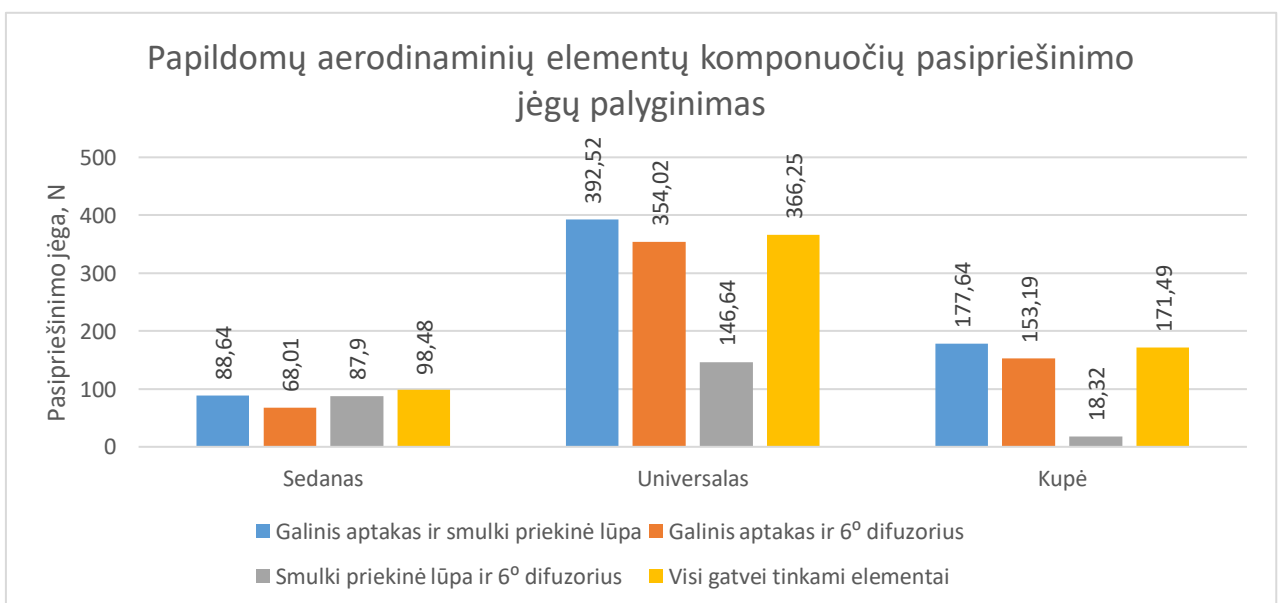
Tyrimas parodė, kad aerodinaminių elementų komponuotės ant kupė kėbulo teikė automobiliui prispaudimo jėgos, daugiausiai prispaudimo generavo galinio aptako ir smulkios priekinės lūpos komponuotė 919,93 N, neįtraukiant bazinio automobilio charakteristikų. Mažiausiai prispaudimo jėgos generavo smulkios priekinės lūpos ir 6<sup>o</sup> difuzoriaus komponuotė 269,88 N, bei šis komplektas mažiausiai generavo ir pasipriešinimo jėgos, tik 18,32 N daugiau lyginant su baziniu kėbulu. Tyrimo metu nustatyta, kad gatvės kupė automobiliui geriausia komponuotė su galiniu aptaku ir smulkia priekine lūpa (žr. 15 lentelė.).

Sudaryti grafikai tyrimo rezultatų analizei.



**84 pav.** Kėbulų skirtų gatvei su papildomų aerodinaminių elementų komponentėmis pasipriešinimo jėgų palyginimo grafikas

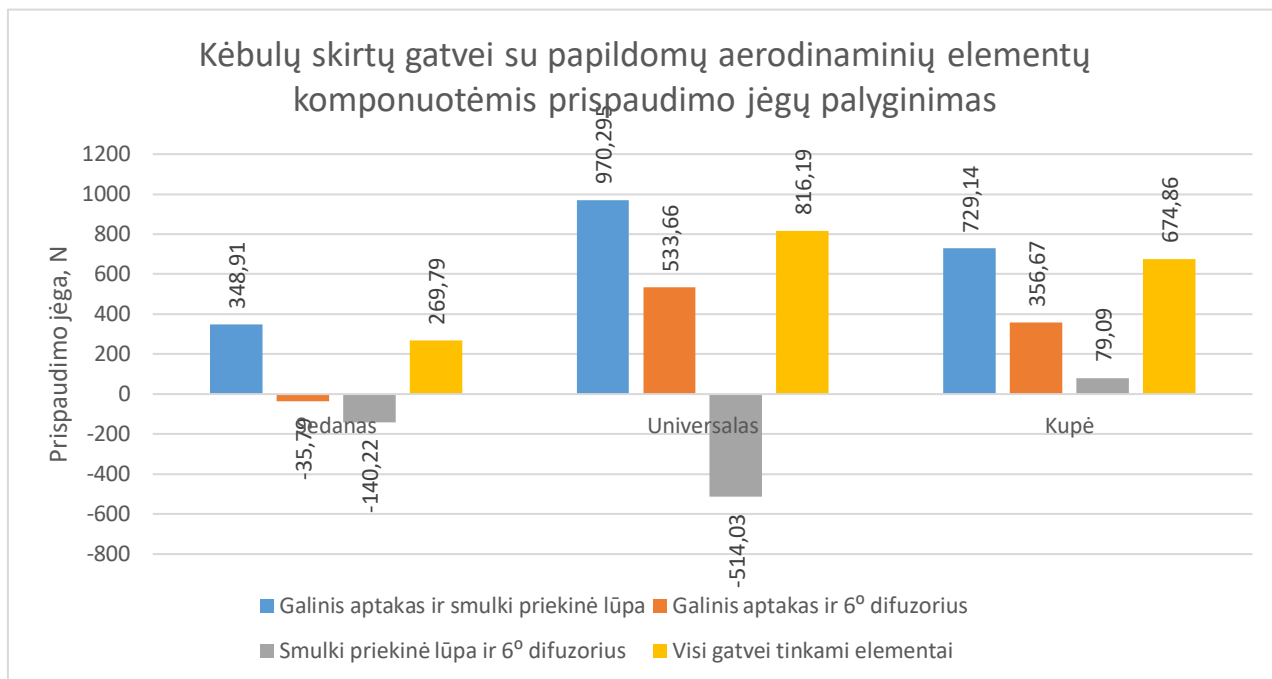
Palyginime galima išskirti smulkios priekinės lūpos ir 6° difuzoriaus komponentę kaip mažai pasipriešinimo jėgos generuojančią komponentę (žr. 84 pav.) Sudarytas komponentių įtakos palyginimo grafikas.



**85 pav.** Papildomų aerodinaminių elementų komponentių pasipriešinimo jėgų palyginimo grafikas

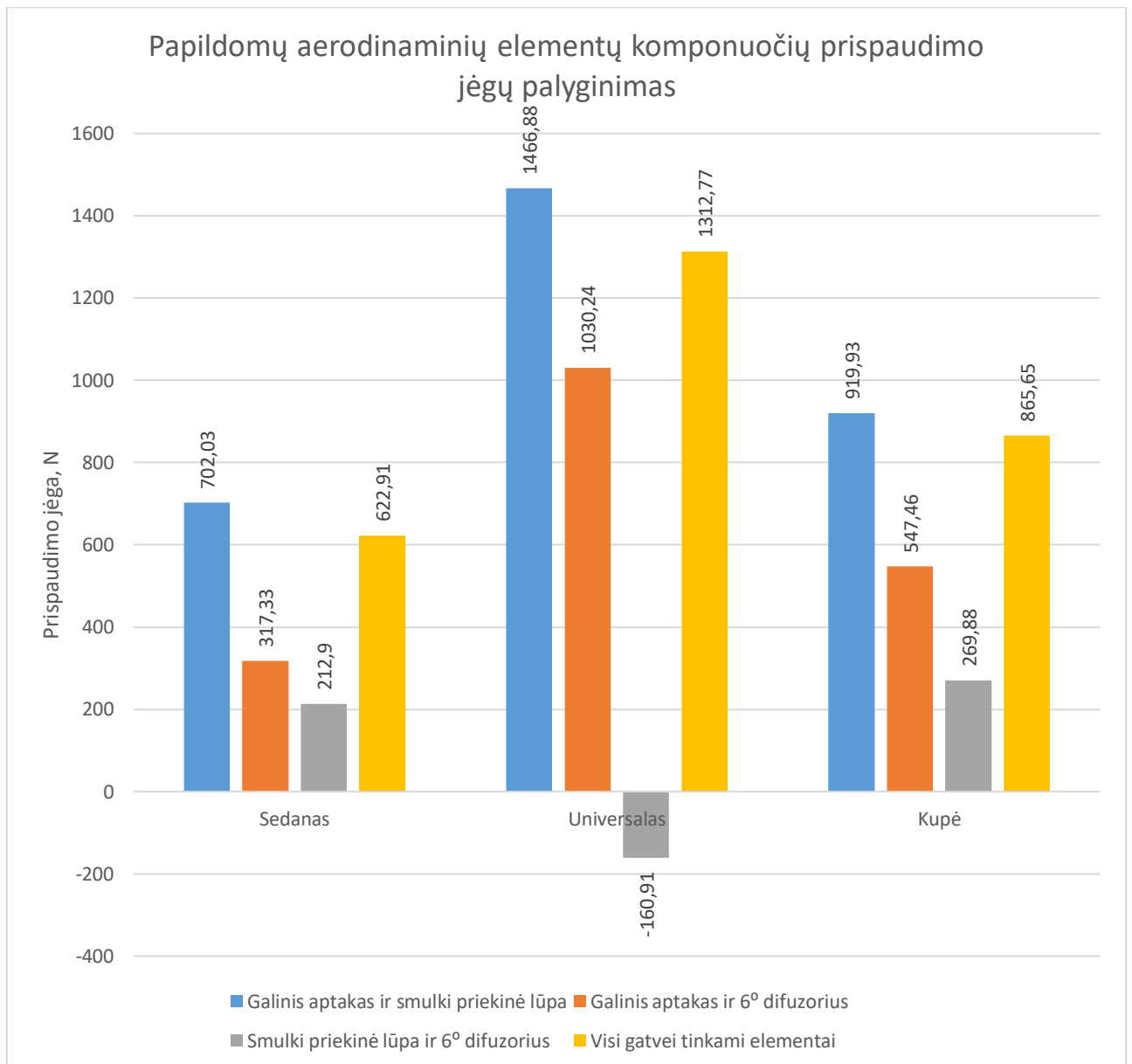
Tyrimas patvirtino, kad komponuotės universalą įtakoja žymiai smarkiau nei kitus kėbulus. Pasipriešinimo jėgos skirtumai mažiausiai pastebimi montuojant detales ant sedano. Kupė gatvės automobilio pasipriešinimo jėgos aukštesnės nei sedano, išskyrus smulkios priekinės lūpos ir 6<sup>o</sup> difuzoriaus komponuotę; ši sukelia mažiausią pasipriešinimo jėgą iš visų gatvei tinkamų automobilių komponuočių (žr. 85 pav.).

Sudarytas prispaudimo jėgų rezultatų palyginimo grafikas.



**86 pav.** Kėbulų skirtų gatvei su papildomų aerodinaminių elementų komponuotėmis prispaudimo jėgų palyginimo grafikas

Tyrimas parodė, jog sedanas yra mažiausiai komponuočių įtakojamas kėbulas, dvi komponuotės nesuteikia kėbului prispaudimo. Universalas labiausiai komponuočių įtakojamas, mažiausią prispaudimo jėgą generuojanti komponuotė yra smulkios priekinės lūpos ir 6<sup>o</sup> difuzoriaus universalso kėbului ir daugiausiai prispaudimo jėgos teikianti komponuotė galinio aptako ir smulkios priekinės lūpos taip pat univesalo kėbului (žr. 86 pav.). Aiškesnei rezultatų analizei sudarytas komponuočių prispaudimo jėgų palyginimo grafikas.



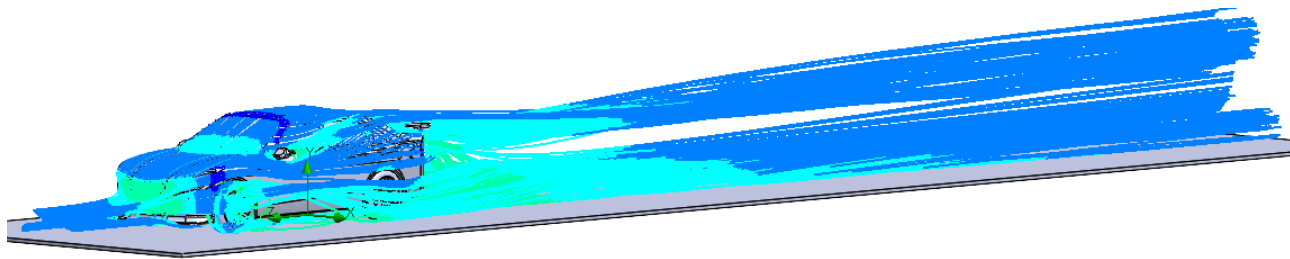
**87 pav.** Papildomų aerodinaminių elementų komponentų prispaudimo jėgų palyginimo grafikas

Pagal grafiko rezultatus matoma, kad visos komponentės ant visų kėbulų, išskyrus smulkios priekinės lūpos ir 6° difuzoriaus, universalso kėbului generuoja papildomą prispaudimo jėgą. Gatvės sedano komponentės teikia mažiausiai papildomos prispaudimo jėgos nuo 212,90 N iki 702,03 N lyginant su baziniu kėbulu. Visos kupė komponentės sukelia daugiau prispaudimo jėgos nei atitinkamos sedano komponentės: nuo 269,88 N iki 919,93 N. Gatvės universalas turi net tris komponentes, kurios generuoja daugiau prispaudimo jėgos, nei kitų kėbulų detalių komplektai (žr. 87 pav.).

#### **4.3.2. Sportinio automobilio komponentų tyrimas**

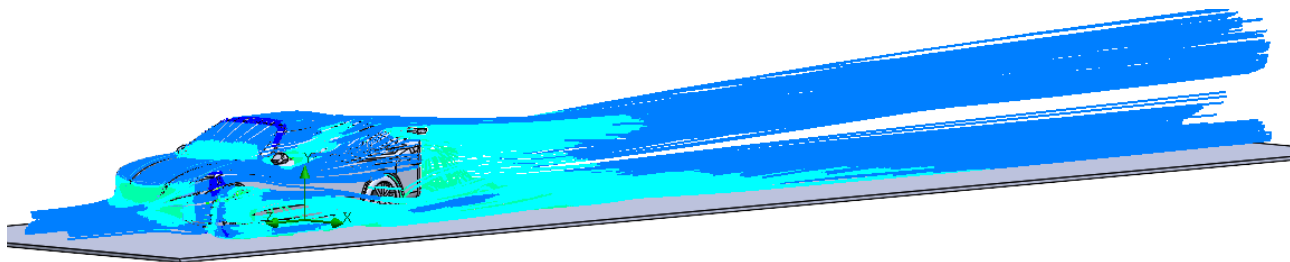
Sportinio automobilio tyrimas pradėtas nuo visų sportinių automobilių papildomų aerodinaminių elementų komponavimo. Sparnas, sportinė priekinio bamperio lūpa ir 10° difuzorius yra esminiai sportinio automobilio aerodinaminiai elementai, bet dar papildomai tirtas gatvės automobilio galinis aptakas, nes ši detalė suteikė ypatingai daug prispaudimo jėgos pavienių elementų tyrimuose bei gatvės automobilių komponentų tyrimuose.

Įvykdytas sportinio sedano tyrimas.



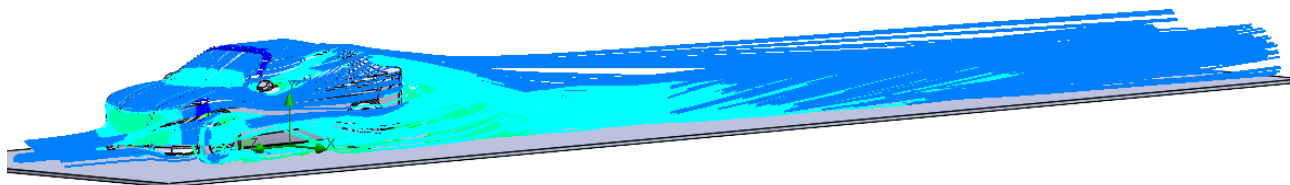
**88 pav.** Oro srauto linijos aplink sedaną su sparnu ir sportine priekine lūpa

Tyrimo metu nustatyta, kad oro srautas nukreipiamas į viršų už automobilio, abu elementai vykdo paskirtį (žr. 88 pav.).



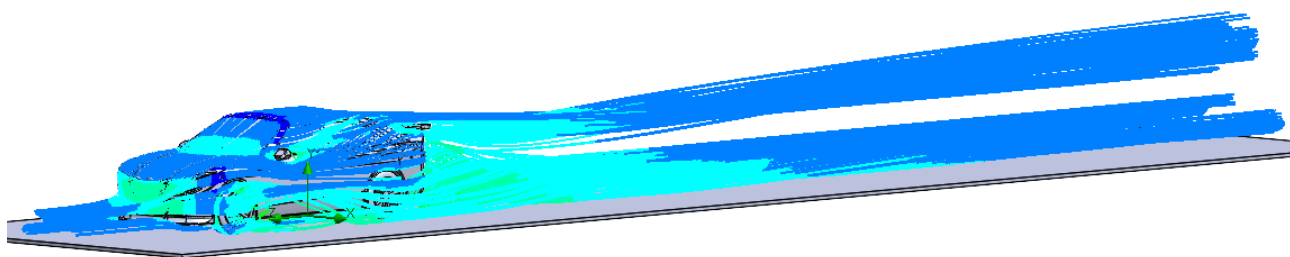
**89 pav.** Oro srauto linijos aplink sedaną su sparnu ir 10° difuzoriumi

Sparnas nukreipia daug oro gale automobilio aukštyn, bet difuzorius nepilnai atlieką savo darbą ir dalis srauto lieka nenukreiptas (žr. 89 pav.).



**90 pav.** Oro srauto linijos aplink sedaną sportine priekine lūpa ir 10° difuzoriumi

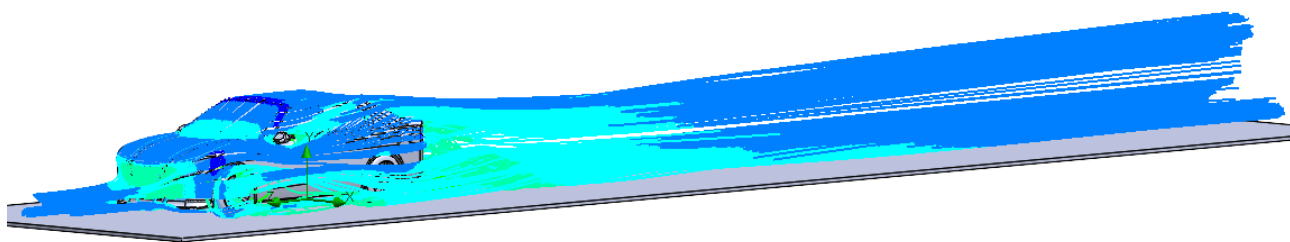
Dalis oro srauto už automobilio prateka tiesiai, nenukreiptas aerodinaminių elementų, bet generuojama prispaudimo jėga (žr. 90 pav.).



**91 pav.** Oro srauto linijos aplink sedaną su visais sportiniais elementais

Papildomi aerodinaminiai elementai nukreipia didžiąją dalį oro srauto į viršų, bet maža dalis srauto prisiglaudžia prie kelio dangos (žr. 91 pav.).

Nustatyta, kad daugiausiai prispaudimo jėgos sportiniam sedanui suteikianti komponuotė yra sparnas ir sportinė priekinio bamperio lūpa, todėl tyrimui su galiniu aptaku, sparnas pakeičiamas į galinį aptaką ir tiriama nauja komponuotė.



**92 pav.** Oro srauto linijos aplink sedaną su galiniu aptaku ir geriausiai sportiniais komponentais

Galinis aptakas veikia oro srautą panašiai, kaip sparnas, sukeliama mažesnis prispaudimas bei pasipriešinimas (žr. 92 pav.).

**16 lentelė.** Sportinio sedano su papildomų aerodinaminių elementų komponentais aerodinaminės charakteristikos

Jėgos/Kėbulas	Sedanas su sparnu ir sportine priekine lūpa	Sedanas su sparnu ir 10° difuzoriumi	Sedanas su sportine priekine lūpa ir 10° difuzoriumi	Sedanas su visais sportiniais elementais	Sedanas su galiniu aptaku ir geriausiai sportiniais komponentais (atlikta peržiūrėjus komponentų rezultatus)
Pasipriešinimo jėga, N	1601,95	1616,49	1556,92	1629,33	1549,27
Pasipriešinimo koeficientas	0,3868	0,3904	0,3760	0,3935	0,3741
Prispaudimo jėga, N	652,76	133,95	35,13	607,94	497,79
Prispaudimo koeficientas	0,04416	0,009063	0,002377	0,04113	0,03368

Visos sedano sportinės komponentės generavo prispaudimo jėgą ir daugiausiai prispaudimo turėjo sedanas su sparnu ir sportine priekine lūpa (žr. 16 lentelė.).

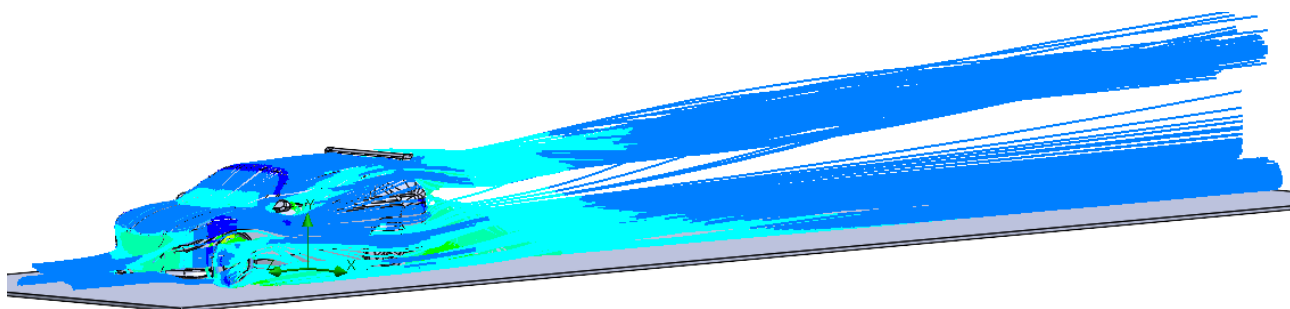
Sudaryta komponentų įtakos kėbulams reikšmių lentelė atimant bazinio sedano aerodinamines charakteristikas iš kėbulo su sportinėmis komponentėmis.

**17 lentelė.** Sportinio sedano papildomų aerodinaminių elementų aerodinaminės charakteristikos

Jėgos/Kėbulas	Sparnas ir sportinė priekinė lūpa	Sparnas ir 10° difuzorius	Sportinė priekinė lūpa ir 10° difuzorius	Visi sportiniai elementai	Galini aptakas ir geriausi sportiniai komponentai (atlikta peržiūrėjus komponentų rezultatus)
Pasipriešinimo jėgos pokytis, N	107,53	122,07	62,50	134,91	54,85
Prispaudimo jėgos pokytis, N	1005,88	487,07	388,25	961,06	850,91

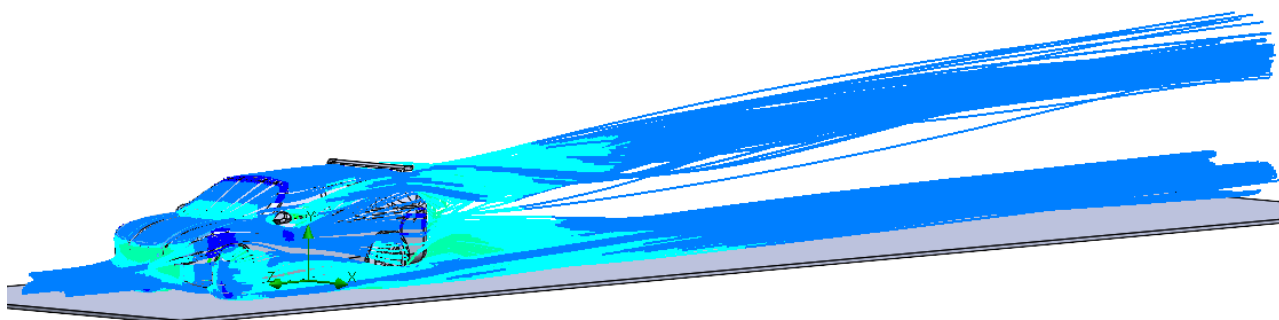
Sportinio sedano komponuotė suteikianti kėbului aukščiausią prispaudimo jėgą – sparnas ir sportinė priekinio bamperio lūpa, generuojanti 1005,88 N, atėmus bazinio kėbulo rezultatus. Tyrimas parodė, jog visos komponuotės suteikė kėbulams papildomos prispaudimo jėgos, o mažiausiai prispaudimo suteikė sportinė priekinė lūpa ir 10° difuzorius 388,25 N. Papildomos komponuotės pasipriešinimo jėga yra žemiausia ir kėbului papildomai prideda tik 54,85 N (žr. 17 lentelė.).

Atlikti sportinio universalo komponuočių tyrimai.



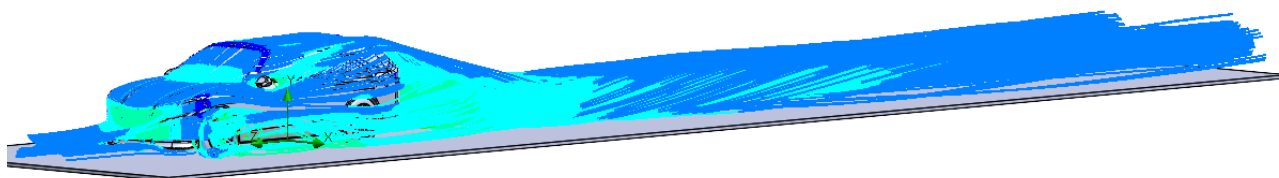
**93 pav.** Oro srauto linijos aplink universalą su sparnu ir sportine priekine lūpa

Srautas nukreipiamas į viršų už automobilio, elementai vykdo paskirtį, generuodami prispaudimo jėgą (žr. 93 pav.).



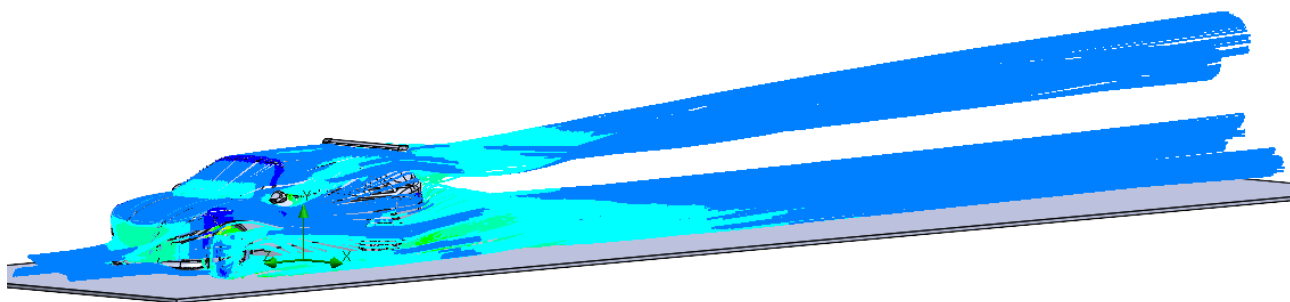
**94 pav.** Oro srauto linijos aplink universalą su sparnu ir 10° difuzoriumi

Sparnas puikiai nukreipia oro srautą aukštyn, bet difuzorius dalį srauto praleidžia nenukreipdamas (žr. 94 pav.).



**95 pav.** Oro srauto linijos aplink universalą su sportine priekine lūpa ir 10° difuzoriumi

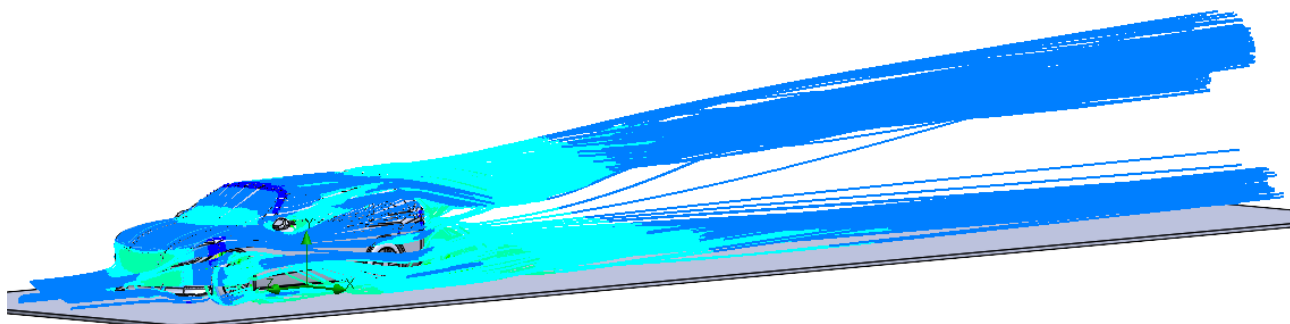
Komponuotė silpnai kreipia srautą aukštyn (žr. 95 pav.).



**96 pav.** Oro srauto linijos aplink universalą su visais sportiniais elementais

Oro srautas kreipiamas į viršų, po automobiliu tekantis srautas nepilnai įtakojamas (žr. 96 pav.).

Tyrimo metu nustatyta, kad geriausia sportinio universalų komponentė yra su sparnu ir sportine priekinio bamperio lūpa, todėl papildomai komponentei sukurti naudojamas galinis aptakas ir sportinė priekinio bamperio lūpa.



**97 pav.** Oro srauto linijos aplink universalą su galiniu aptaku ir geriausiais sportiniais komponentais

Nauja geriausia komponentė, nes galinis aptakas veikia geriau nukreipdamas oro srautą aukštyn, nei sparnas, dėl statesnio efektyvio atakos kampo (žr. 97 pav.)

**18 lentelė.** Sportinio universalų su papildomų aerodinaminių elementų komponentėmis aerodinaminės charakteristikos

Jėgos/Kėbulas	Universalas su sparnu ir sportine priekine lūpa	Universalas su sparnu ir 10° difuzoriumi	Universalas su sportine priekine lūpa ir 10° difuzoriumi	Universalas su visais sportiniais elementais	Universalas su galiniu aptaku ir geriausiais sportiniais komponentais (atlikta peržiūrėjus komponentų rezultatus)
Pasipriešinimo jėga, N	1833,68	1808,38	1732,36	1815,06	1943,36
Pasipriešinimo koeficientas	0,4428	0,4367	0,4183	0,4383	0,4693
Prispaudimo jėga, N	1002,12	519,66	-385,18	820,74	1127,20
Prispaudimo koeficientas	0,06780	0,03516	-0,02606	0,05553	0,07626

Universalas su galiniu aptaku ir sportine priekine lūpa generavo didžiausią kiekį prispaudimo, sparno ir sportinės priekinės lūpos komponuotė, taip pat teikė kėbului daug prispaudimo (žr. 18 lentelė.).

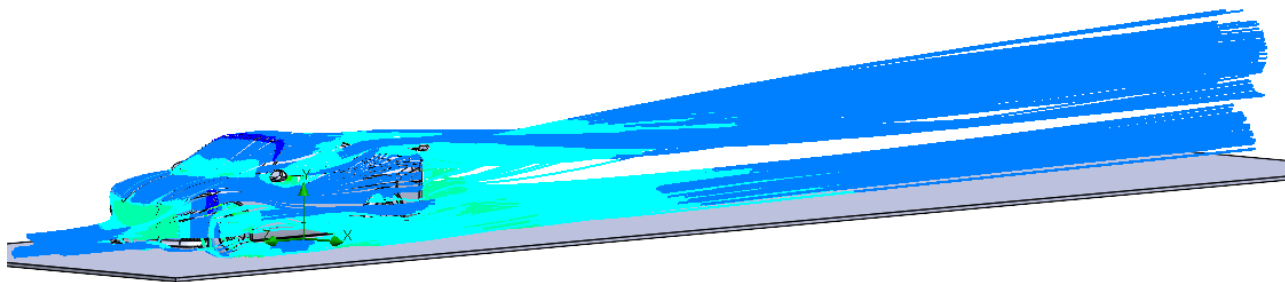
Sudaryta komponuočių įtakos kėbulams reikšmių lentelė atimant bazinio universalso aerodinaminės charakteristikas iš kėbulo su sportinėmis komponuotėmis.

**19 lentelė.** Sportinio universalso papildomų aerodinaminių elementų aerodinaminės charakteristikos

Jėgos/Kėbulas	Sparnas ir sportinė priekinė lūpa	Sparnas ir 10° difuzorius	Sportinė priekinė lūpa ir 10° difuzorius	Visi sportiniai elementai	Galinis aptakas ir geriausi sportiniai komponentai (atlikta peržiūrėjus komponuočių rezultatus)
Pasipriešinimo jėgos pokytis, N	252,62	227,32	151,30	234,00	362,3
Prispaudimo jėgos pokytis, N	1498,70	1016,24	111,40	1317,32	1623,78

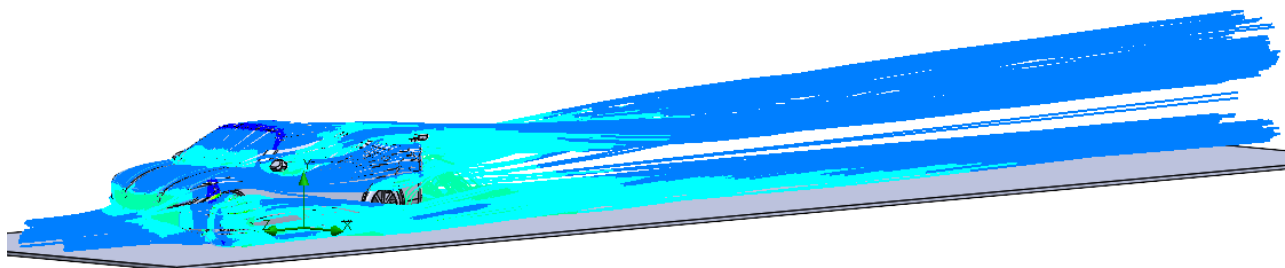
Aukščiausią prispaudimo jėgą universalui suteikia galinio aptako ir priekinės bamperio lūpos komponuotė, net 1623,78 N papildomos prispaudimo jėgos. Mažiausiai prispaudimo generuoja sportinės lūpos ir 10° difuzoriaus komponuotė, tik 111,40 N. Galima teigti, kad sparno ir sportinio bamperio priekinio elemento komponuotė yra geriausia sportui, nes sukeliama gan didelė prispaudimo jėga ir generuojama mažiau pasipriešinimo nei komplektui su aptaku ir sportine priekine lūpa. Siekiant aukščiausio prispaudimo galinis aptakas universalui yra geresnis aerodinaminis elementas nei sparnas (žr. 19 lentelė.).

Paskutinis atliktas sportinio kupė komponuočių tyrimas.



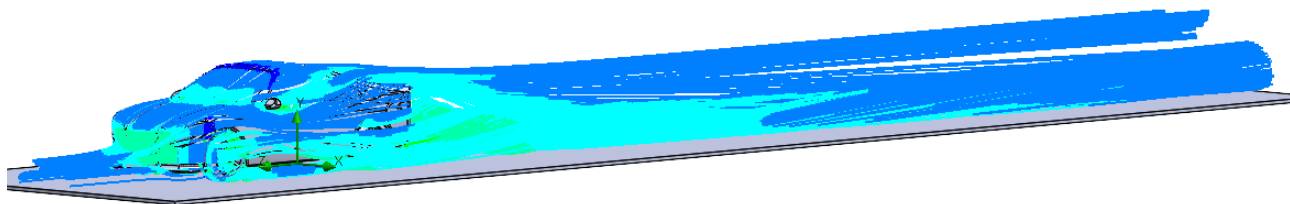
**98 pav.** Oro srauto linijos aplink kupė su sparnu ir sportine priekine lūpa

Tyrimo metu nustatyta, jog elementai puikiai nukreipia oro srautą aukštyn (žr. 98 pav.).



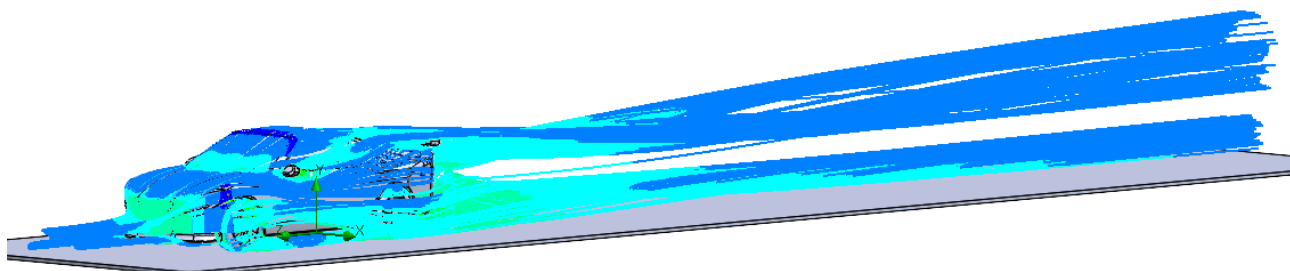
**99 pav.** Oro srauto linijos aplink kupė su sparnu ir 10° difuzoriumi

Sparnas nukreipia orą į viršų, bet apatinis galinis elementai, daro mažai įtakos srautui (žr. 99 pav.).



**100 pav.** Oro srauto linijos aplink kupė su sportine priekine lūpa ir 10° difuzoriumi

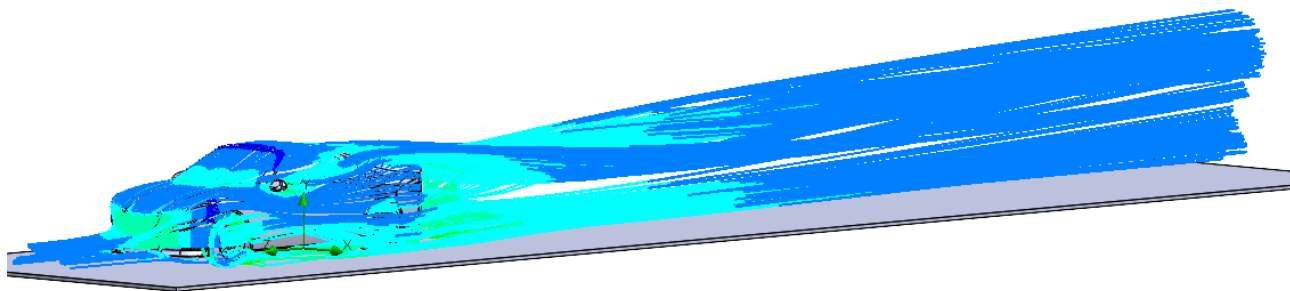
Komponuotė daro menką įtaką oro srautui, bet didesnę, nei ant kitų kėbulų (žr. 100 pav.).



**101 pav.** Oro srauto linijos aplink kupė su visais sportiniais elementais

Oras nukreipiamas efektyviai, bet oro srautas tekantis po automobiliu nedaug nukreiptas (žr. 101 pav.).

Komponuotė su sparnu ir sportine priekine lūpa generavo daugiausiai prispaudimo, todėl papildoma komponuotė sudaryta iš galinio aptako ir sportinės priekinės lūpos.



**102 pav.** Oro srauto linijos aplink kupė su galiniu aptaku ir geriausiai sportiniais komponentais

Galinis aptakas, pakeisdamas sparną, srauto nukreipimą neženkliai pagerina (žr. 102 pav.).

**20 lentelė.** Sportinio kupė su papildomų aerodinaminių elementų komponuotėmis aerodinaminės charakteristikos

Jėgos/Kėbulas	Kupė su sparnu ir sportine priekine lūpa	Kupė su sparnu ir 10° difuzoriumi	Kupė su sportine priekine lūpa ir 10° difuzoriumi	Kupė su visais sportiniais elementais	Kupė su galiniu aptaku ir geriausiai sportiniais komponentais (atlikta peržiūrėjus komponuočių rezultatus)
Pasipriešinimo jėga, N	1620,62	1662,24	1518,78	1649,03	1652,60

Pasipriešinimo koeficientas	0,3913	0,4014	0,3668	0,3982	0,3991
Prispaudimo jėga, N	837,92	273,70	267,38	816,28	916,96
Prispaudimo koeficientas	0,05669	0,01852	0,01809	0,05523	0,06204

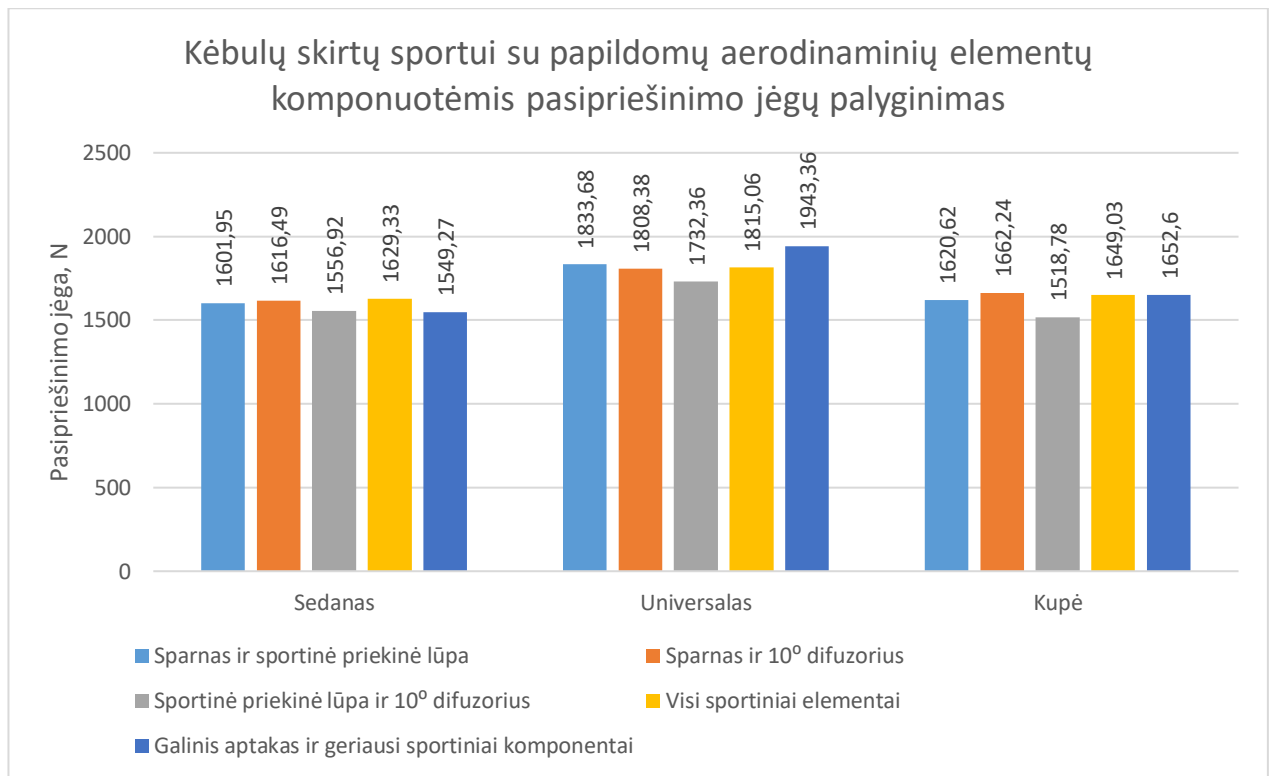
Sportiniam kupė kūbului komponuotė sudaryta iš galinio aptako ir sportinės priekinės lūpos teikė daugiausiai prispaudimo, kaip ir universalso kūbului (žr. 20 lentelė.).

Sudaryta komponuočių įtakos kūbulams reikšmių lentelė atimant bazinio kupė aerodinamines charakteristikas iš kūbulo su sportinėmis komponuotėmis.

**21 lentelė.** Sportinio kupė papildomų aerodinaminių elementų aerodinaminės charakteristikos

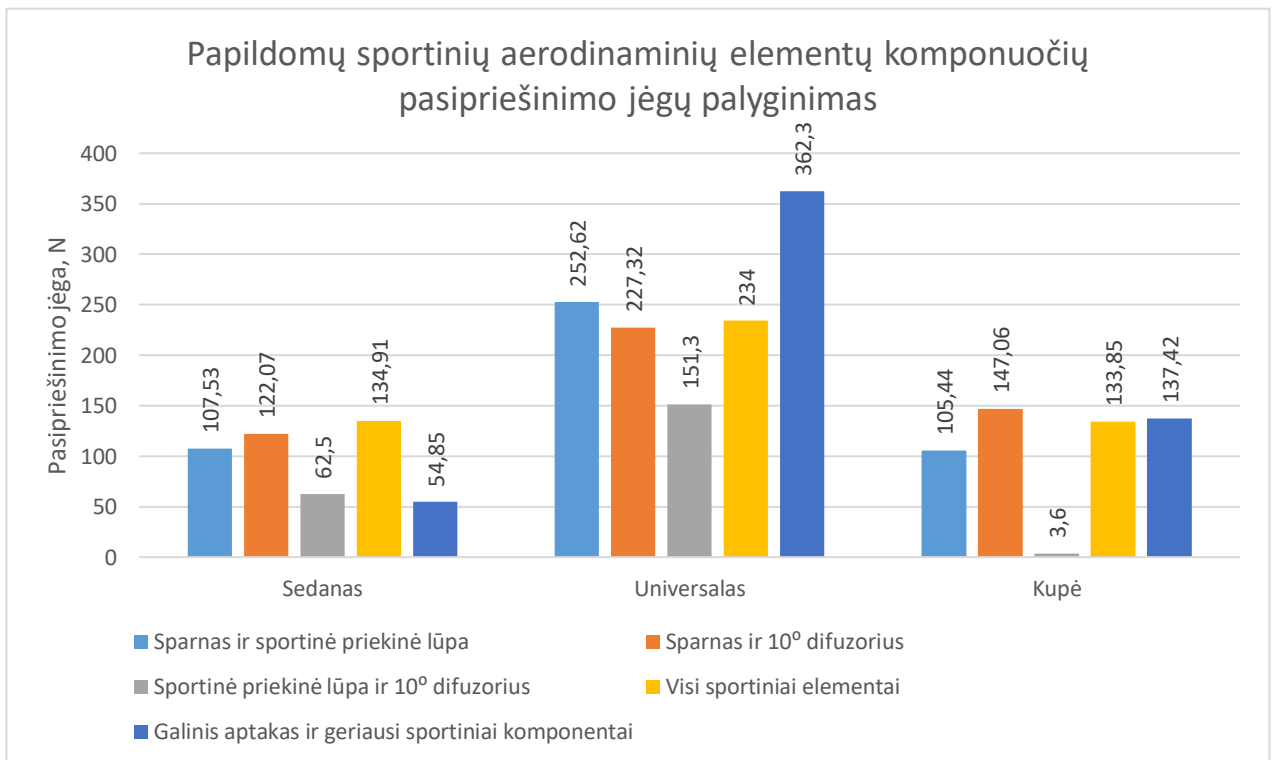
Jėgos/Kėbulas	Sparnas ir sportinė priekinė lūpa	Sparnas ir 10° difuzorius	Sportinė priekinė lūpa ir 10° difuzorius	Visi sportiniai elementai	Galinis aptakas ir geriausi sportiniai komponentai (atlikta peržiūrėjus komponuočių rezultatus)
Pasipriešinimo jėgos pokytis, N	105,44	147,06	3,60	133,85	137,42
Prispaudimo jėgos pokytis, N	1028,71	464,49	458,17	1007,07	1107,75

Mažiausiai papildomos prispaudimo jėgos kupė kūbului suteikia sportinės priekinės lūpos ir 10° difuzorius t.y. tik 458,17 N. Šios komponuotės mažiausia ir generuojama papildoma pasipriešinimo jėga – tik 3,60 N. Sparno su sportine priekine lūpa ir galinio aptako su sportine priekine lūpa komponuotė labai panašios, bet su galiniu aptaku komponuotė efektyvesnė, sukeldama 1107,75 N papildomos prispaudimo jėgos (žr. 21 lentelė.).



**103 pav.** Kėbulų skirtų sportui su papildomų aerodinaminių elementų komponuotėmis pasipriešinimo jėgų palyginimo grafikas

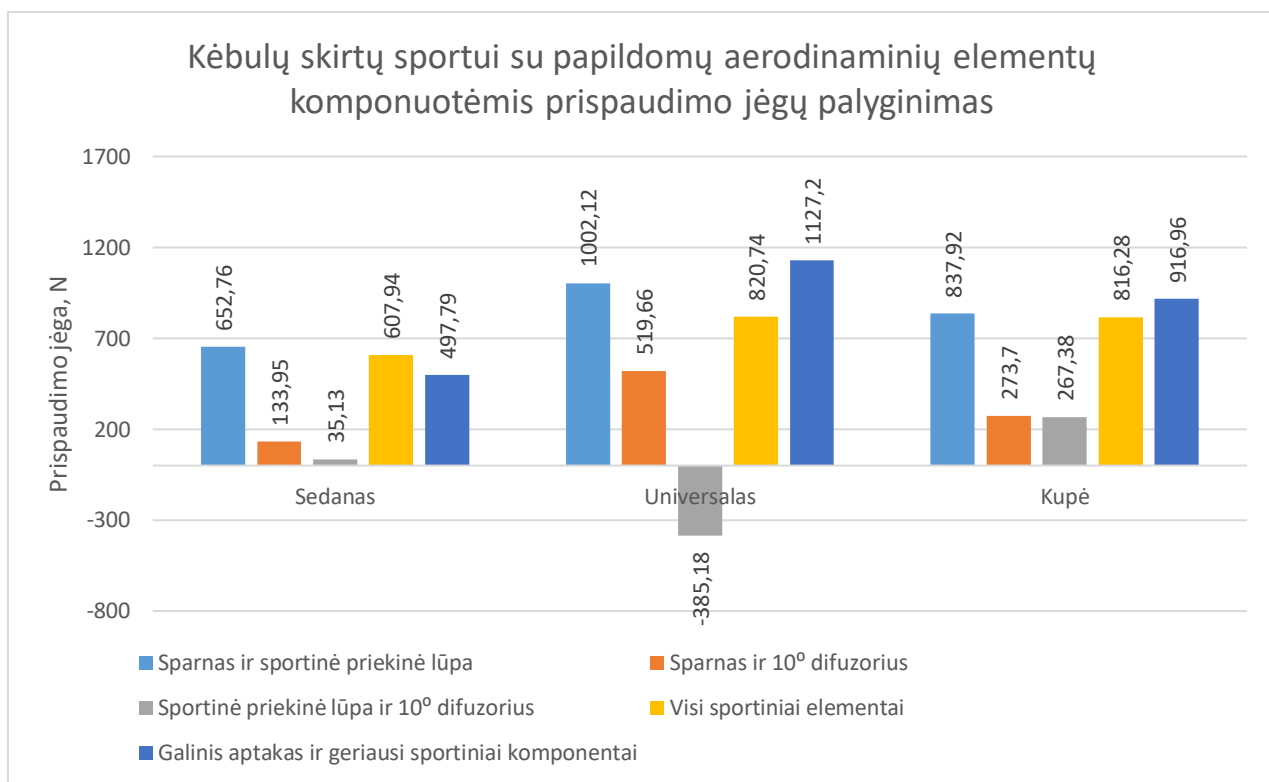
Skirtingiems kėbulams, skirtingos komponuotės generavo aukščiausias ir žemiausias pasipriešinimo jėgas (žr. 103 pav.). Rezultatams geriau parodyti sudarytas komponuočių įtakos grafikas.



**104 pav.** Papildomų sportinių aerodinaminių elementų komponuočių pasipriešinimo jėgų palyginimo grafikas

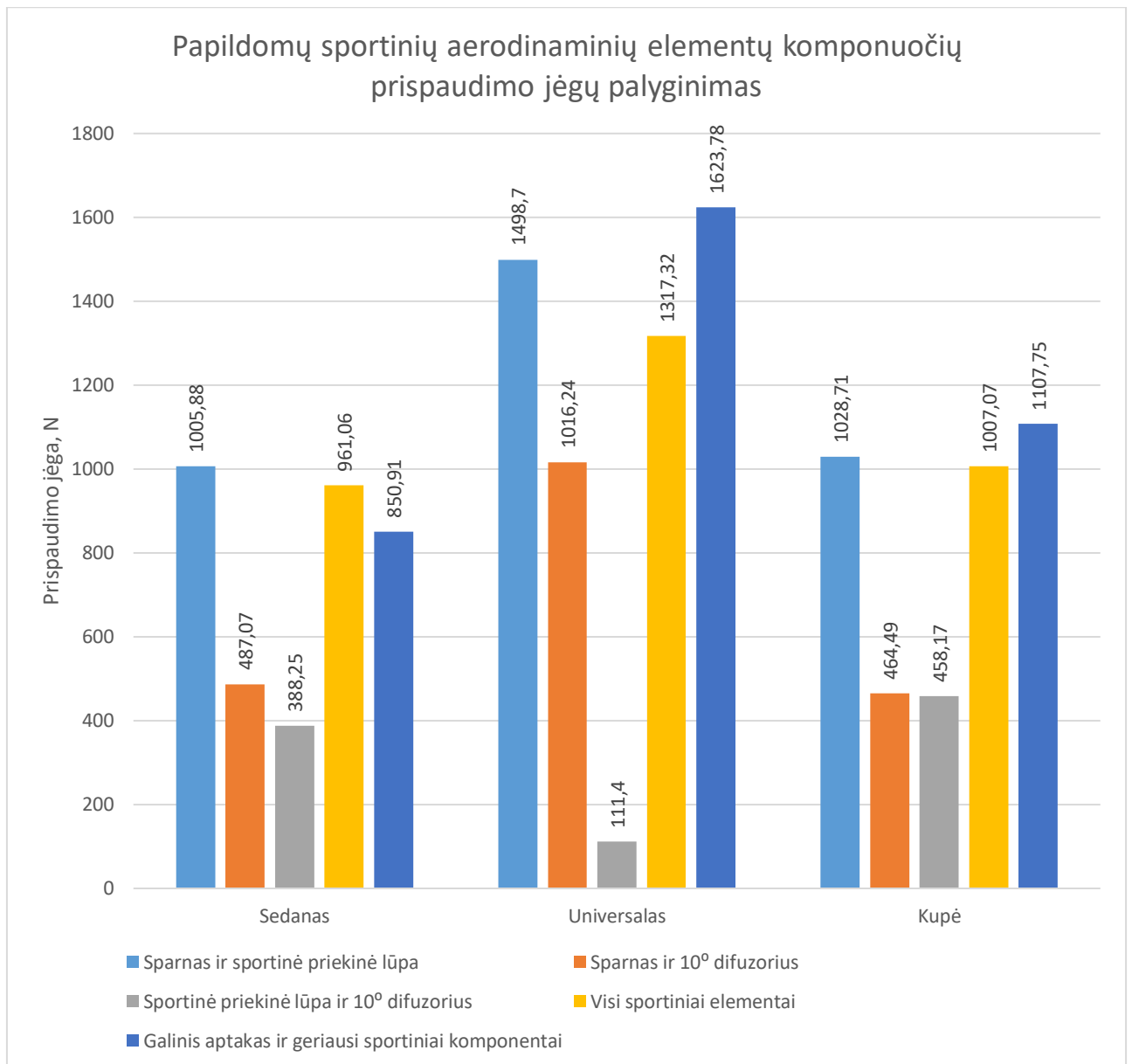
Išskirtinai daug pasipriešinimo sukėlė sportinė universalos komponentė su galiniu aptaku ir priekine sportine lūpa 362,30 N. Mažiausiai pasipriešinimo įtakos sukėlė kupė su sportine priekine lūpa ir 10° difuzoriumi, t.y. tik 3,60 N (žr. 104 pav.).

Tęsiant tyrimą sudarytas prispaudimo jėgų rezultatų palyginimo grafikas.



**105 pav.** Kėbulų skirtų sportui su papildomų aerodinaminių elementų komponentėmis prispaudimo jėgų palyginimo grafikas

Universalos sportinė komponentė su sportine priekine lūpa ir 10° difuzoriumi vienintelė sukėlė neigiamą prispaudimą (kėlimą) -385,18 N su kėbulu (žr. 105 pav.). Geresnei rezultatų analizei sudarytas papildomų sportinių aerodinaminių elementų komponentių prispaudimo jėgų palyginimo grafikas.



**106 pav.** Papildomų sportinių aerodinaminių elementų komponuočių prispaudimo jėgų palyginimo grafikas

Visos sportinių automobilių papildomų aerodinaminių elementų komponuotės kėbulams suteikė papildomos prispaudimo jėgos. Sudaryta išvada, jog prasčiausia sportui komponuotė su sportine priekine lūpa ir 10° difuzoriumi. Greičiausiai taip nutiko dėl neteisingos difuzoriaus geometrijos ar pozicijos, elementas tiek pavieniuose elementų tyrimuose tiek komponuotėse nesukėlė papildomos prispaudimo jėgos. Visose papildomose komponuotėse naudojamas galinis aptakas vietoje sparno kartu su sportine priekine lūpa, ir tyrimas parodė, kad šis komplektas sukėlė didžiausią prispaudimo jėgą komplektuojant ant universalos ir kupė kėbulų, nes jo atakos kampas statesnis nei sparno bei ant šių kėbulų oro srautas turi ilgesnį išibėgėjimo plotą nei ant sedano. Nustatyta, kad komponuotė su sparnu ir sportine priekine lūpa generavo aukščiausią prispaudimo jėgą montuojant ant sedano, t.y. 1005,88 N papildomo prispaudimo. (žr. 106 pav.).

Universalos gatvės automobilio komponuotės su galiniu aptaku nedaug atsiliko nuo sportinių komplektacijų. Sedano sportinės komplektacijos efektyvumu lenkė gatvės automobilio komplektacijas iki 40%, o kupė tik 20%.

## Išvados

1. Išanalizavus šiuo metu plačiausiai paplitusius kėbulų tipus, pasirinkti labiausiai palyginimui tinkantys kėbulai: sedanas, universalas ir kupė, nes kėbulų priekiai ir ratų bazės ilgiai gali būti identiški. Tyrimui atlikti parinkti papildomi elementai: galinis sparnas ir galinis aptakas, smulki priekinė bamperio lūpa ir sportinė priekinė bamperio lūpa, mažo kampo difuzorius bei sportinis didesnio kampo difuzorius. Išanalizavus aerodinaminių tyrimų metodikas nuspręsta vykdyti aerodinaminių charakteristikų palyginamąjį tyrimą naudojant skaičiuojamosios fluidų dinamikos metodą. Pagal mokslinės literatūros aerodinaminius tyrimus, dažnai tiriama specifinio automobilio aerodinaminės charakteristikos arba papildomo aerodinaminio elemento pozicijos ant automobilio įtaka aerodinaminėms charakteristikoms, tačiau nėra tiriami aerodinaminiai skirtumai tarp kėbulų, nelyginama skirtingų komponuočių įtaka automobiliams.
2. Suprojektuoti 3 kėbulai: sedanas, universalas ir kupė. Gabaritiniams matmenims pasirinktas „BMW F30“ modelis, nes jis turėjo visų 3 kėbulų versijas. Automobiliai projektuoti pagal kitų modernių automobilių bruožus, bet modeliai nėra specifinio automobilio replikos. Modeliai yra supaprastinti, nėra vidinių ertmių, bei tiksliai projektuojamų važiuoklės elementų. Suprojektuoti automobiliai yra 4593,78 mm ilgio, 1808 mm pločio ir 1440 mm aukščio. Papildomi aerodinaminiai elementai projektuoti apžvelgus esamus elementus, bet nėra kopijuoti nuo specifinių egzistuojančių modelių.
3. Tyrimo metodika sudaryta atsižvelgus į panašius tyrimus, kuriuose tiriamos automobilių aerodinaminės charakteristikos ar papildomų aerodinaminių elementų įtaka. Automobilio modelis įtrauktas ant plokštumos, kuri atspindi kelią, įrauktas oro srautas tekanti -Z ašimi. Tyrimo parametrai: važiuojamoji dalis: 5000 mm \* 22000 mm, oro temperatūra: 20°C, matuojamos aerodinaminės prispaudimo ir pasipriešinimo jėgos Z ir Y ašimis, oro slėgis: 101325 pa, oro srauto greičiai skirtingi bendriniais kėbulams ir 200 km/h kėbulams su papildomais elementais bei komponuotėmis. Tyrimuose įtraukta judanti važiuojamoji dalis ir besisukantys ratai, atitinkantys oro srauto greitį ir imituojantys tikrą automobilio važiavimą. Papildomų aerodinaminių elementų pozicijos aprašytos, išskirtinai ant universalos stogo montuojami sparnas ir galinis aptakas.
4. Atlikti kompiuterinės fluidų dinamikos tyrimai: baziniams kėbulams, kėbulams su pavieniais elementais ir kėbulams su aerodinaminių elementų komponuotėmis.
  - 4.1. Bazinių kėbulų tyrimuose, universalas sukelia didžiausią 1581,06 N pasipriešinimo jėgą ir kupė kėbulas sukelia didžiausią -190,79 N prispaudimo jėgą.
  - 4.2. Kėbulų su papildomais elementais tyrime nustatytos aerodinaminės charakteristikos, bei suskaičiuota elementų įtaka. Didžiausią prispaudimo jėgą generuoja galinis aptakas sumontuotas ant universalos 1336,94 N, o mažiausią 10° difuzorius sumontuotas ant universalos -419,63 N. Didžiausią pasipriešinimo jėgą sukuria galinis aptakas sumontuotas ant universalos 378,23 N, o mažiausią sportinė priekinė lūpa sumontuotas ant kupė -30,42 N.
  - 4.3. Sudarytos aerodinaminių elementų komponuotės skirtos gatvei ir sportui kiekvienam kėbului ir nustatomos jų aerodinaminės charakteristikos. Daugiausiai prispaudimo jėgos visiems kėbulams generuojanti gatvės elementų komponuotė galinis aptakas su smulkia priekine lūpa. Sportiniams universalui ir kupė kėbulams aukščiausią prispaudimo jėgą teikė galinis aptakas su sportine priekine lūpa, o sedanui sparnas su sportine priekine lūpa. Difuzorius, nors pagal oro srauto linijas kreipė orą į viršų, negeneravo prispaudimo jėgos, todėl manoma, kad elemento geometrija ar pozicija nėra optimali.

## Literatūros sąrašas

1. MURALIDARAN, Dwaraganath Manimangalam. *Aerodynamic and structural analysis of spoilers for passenger cars* [internete]. Kaunas: Kauno technologijos universitetas, Mechanikos inžinerijos ir dizaino fakultetas, 2020 [žiūrėta 2026-05-12]. Prieiga per internetą: <https://epubl.ktu.edu/object/elaba%3A59763226>
2. STEPHEN, Richard. *Research and development of a body kit for passenger cars to enhance aerodynamic efficiency* [internete]. Kaunas: Kauno technologijos universitetas, Mechanikos inžinerijos ir dizaino fakultetas, 2021 [žiūrėta 2026-05-12]. Prieiga per internetą: <https://epubl.ktu.edu/object/elaba%3A95936479>
3. *Automotive aerodynamics – a brief history* [internete]. Resolved Analytics, [b. m.] [žiūrėta 2026-05-12]. Prieiga per internetą: <https://www.resolvedanalytics.com/cfd-applications/cfd-for-automotive-aerodynamics>
4. ZHANG, Shuyang. Research on application of power electronics technology in wireless charging system for household appliances. Iš: *Proceedings of the 2025 2nd International Conference on Electrical Engineering and Intelligent Control (EEIC 2025)*. Paris: Atlantis Press, 2025, p. 268–276. ISBN 978-94-6463-864-6. DOI: 10.2991/978-94-6463-864-6\_74.
5. PEREZ, J. *These 10 sedans are dying next year. And it's just the beginning* [internete]. Motor1.com, 2025-08-22 [žiūrėta 2026-05-12]. Prieiga per internetą: <https://www.motor1.com/features/769714/dead-sedans-2026-getting-worse/>
6. ASHTON, N. ir REVELL, A. Comparison of RANS and DES methods for the DrivAer automotive body. *SAE Technical Paper*, 2015, no. 2015-01-1538. DOI: 10.4271/2015-01-1538.
7. *Alfa Romeo – Giulia Veloce – Rear Side Splitters* [internete]. Maxton Design Canada, 2019 [žiūrėta 2026-05-12]. Prieiga per internetą: [https://maxtondesign.ca/products/alfa-romeo-giulia-veloce-rear-side-splitters?srsId=AfmBOoqnyIuSAKqCuIPFyWf8TC1yCFqTe9B3wEDK7hq-fmeJd\\_cleaNO](https://maxtondesign.ca/products/alfa-romeo-giulia-veloce-rear-side-splitters?srsId=AfmBOoqnyIuSAKqCuIPFyWf8TC1yCFqTe9B3wEDK7hq-fmeJd_cleaNO)
8. STAFF, C. *New Porsche 911 GT3 Cup makes Australian debut* [internete]. Carsales.com.au, 2021-05-07 [žiūrėta 2026-05-12]. Prieiga per internetą: <https://www.carsales.com.au/editorial/details/new-porsche-911-gt3-cup-makes-australian-debut-129858/>
9. *Street Pro Rear Diffuser Ford Puma ST Mk1* [internete]. Maxton Design, 2025 [žiūrėta 2026-05-12]. Prieiga per internetą: [https://maxtondesign.com/products/street-pro-rear-diffuser-ford-puma-st-mk1?\\_pos=5&\\_sid=869068484&\\_ss=r](https://maxtondesign.com/products/street-pro-rear-diffuser-ford-puma-st-mk1?_pos=5&_sid=869068484&_ss=r)
10. *Diffuser* [internete]. Formula1-Dictionary.net, [b. m.] [žiūrėta 2026-05-12]. Prieiga per internetą: <https://www.formula1-dictionary.net/diffuser.html>
11. GUERRERO, A., CASTILLA, R. ir EID, G. A numerical aerodynamic analysis on the effect of rear underbody diffusers on road cars. *Applied Sciences*, 2022, vol. 12, no. 8, p. 3763. DOI: 10.3390/app12083763.
12. *BMW F9X M8 carbon fiber front splitter* [internete]. CarBahn, 2020 [žiūrėta 2026-05-12]. Prieiga per internetą: [https://carbahn.com/products/carbon-fiber-front-splitter-bmw-m8?srsId=AfmBOopKZXLZ4Kx4nbZGRcyJ4gKPU06RrYg98rPOUQ4HLL81iMI\\_j1\\_8](https://carbahn.com/products/carbon-fiber-front-splitter-bmw-m8?srsId=AfmBOopKZXLZ4Kx4nbZGRcyJ4gKPU06RrYg98rPOUQ4HLL81iMI_j1_8)
13. *Racing Front Splitter Audi R8 Mk.2* [internete]. Maxton Design, 2025 [žiūrėta 2026-05-12]. Prieiga per internetą: [https://maxtondesign.com/products/racing-front-splitter-audi-r8-mk-2?\\_pos=31&\\_sid=f4c7f4436&\\_ss=r](https://maxtondesign.com/products/racing-front-splitter-audi-r8-mk-2?_pos=31&_sid=f4c7f4436&_ss=r)

14. EHIRIM, O. H., KNOWLES, K., SADDINGTON, A. J. ir FINNIS, M. V. Aerodynamics of a convex bump on a ground-effect diffuser. *Journal of Fluids Engineering*, 2018, vol. 140, no. 9. DOI: 10.1115/1.4039518.
15. FABIAN, Michal, HUŇADY, Róbert, KUPEC, František ir MLAKA, Tomáš. Effect of the aerodynamic elements of the hatchback tailgate on the aerodynamic drag of the vehicle. *Advances in Science and Technology Research Journal*, 2022, vol. 16, p. 73–87. DOI: 10.12913/22998624/155308.
16. MILNE-THOMSON, Louis Melville. *Theoretical aerodynamics*. Courier Corporation, 1973.
17. MATSSON, J. E. *An introduction to SolidWorks® flow simulation 2012*. Schroff Development Corp., 2012.
18. PACHECO, J. *Wind tunnel testing of a complete formula student vehicle*. Lisboa, 2022. MSc Thesis. Instituto Superior Técnico.
19. KUTTASIRISUK, Noppakot et al. Simulation-guided aerodynamic design and scaled verification for high-performance sports cars. *Modelling*, 2025, vol. 6, no. 3, p. 105. DOI: 10.3390/modelling6030105.
20. *What is computational fluid dynamics (CFD)?* [internet]. Ansys, 2024 [žiūrėta 2026-05-12]. Prieiga per internetą: <https://www.ansys.com/simulation-topics/what-is-computational-fluid-dynamics>
21. SZUDAREK, M. ir PIECHNA, J. CFD analysis of the influence of the front wing setup on a time attack sports car's aerodynamics. *Energies*, 2021, vol. 14, no. 23, p. 7907. DOI: 10.3390/en14237907.
22. PIECHNA, Janusz, RUDNIAK, Leszek ir PIECHNA, Adam. CFD analysis of the central engine generic sports car aerodynamics. Iš: *4th European Automotive Simulation Conference*. Munich, 2009.
23. ZHANG, J. A study on active aerodynamic components in modern high-performance vehicles. *Applied and Computational Engineering*, 2026, no. KA28372. DOI: 10.54254/2755-2721/2026.KA28372.
24. *Zenro TSR-S review 2022* [internet]. Top Gear, 2021-05-11 [žiūrėta 2026-05-12]. Prieiga per internetą: <https://www.topgear.com/car-reviews/zenro/tsr-s>
25. TRAN, J., FUKAMI, K., INADA, K., UMEHARA, D., ONO, Y., OGAWA, K. ir TAIRA, K. Aerodynamics-guided machine learning for design optimization of electric vehicles. *Communications Engineering*, 2024, vol. 3. DOI: 10.1038/s44172-024-00322-0.
26. ELREFAIE, M., MORAR, F., DAI, A. ir AHMED, F. DrivAerNet++: A large-scale multimodal car dataset with computational fluid dynamics simulations and deep learning benchmarks. *arXiv*, 2024. DOI: 10.48550/arxiv.2406.09624.
27. QI, X., YANG, M. ir TONG, G. Predicting drag coefficients of vehicle geometries: A PointNet++ point cloud surrogate model approach. *AIP Advances*, 2025. DOI: 10.1063/5.0300798.
28. SONG, B., YUAN, C., PERMENTER, F., ARÉCHIGA, N. ir AHMED, F. Surrogate modeling of car drag coefficient with depth and normal renderings. *arXiv*, 2023. DOI: 10.48550/arxiv.2306.06110.
29. LI, J., ZHU, X., ZHANG, C., DANG, S. ir CHEN, G. CFD simulation of passenger car aerodynamics and body parameter optimization. *Fluid Dynamics & Materials Processing*, 2025, vol. 21, no. 9, p. 2305–2329. DOI: 10.32604/fdmp.2025.067087.

30. KHEIRKHAH, Mahdi, ROOHI, E. ir PASANDIDEHFARD, Mahmoud. Improving the aerodynamics of a fastback car body using a spoiler. *Scientific Reports*, 2025, vol. 15, no. 1. DOI: 10.1038/s41598-025-02080-1.
31. AL-SAAD, A., AL-FARHANY, K., AL-CHLAIHAWI, K., JAMSHED, W., EID, M., DIN, E. ir RAIZAH, Z. Improvement of the aerodynamic behavior of a sport utility vehicle numerically by using some modifications and aerodynamic devices. *Scientific Reports*, 2022, vol. 12. DOI: 10.1038/s41598-022-24328-w.
32. KUREC, K. Numerical study of the sports car aerodynamic enhancements. *Energies*, 2022, vol. 15, no. 18, p. 6668. DOI: 10.3390/en15186668.
33. NATH, D., PUJARI, P., JAIN, A. ir RASTOGI, V. Drag reduction by application of aerodynamic devices in a race car. *Advances in Aerodynamics*, 2021, vol. 3. DOI: 10.1186/s42774-020-00054-7.
34. KAMAL, M., ISHAK, I., DARLIS, N., MAJI, D., SUKIMAN, S., RASHID, R. ir AZIZUL, M. A review of aerodynamics influence on various car model geometry through CFD techniques. *Journal of Advanced Research in Fluid Mechanics and Thermal Sciences*, 2021, vol. 88, no. 1, p. 109–125. DOI: 10.37934/arfmts.88.1.109125.
35. CONNOLLY, M., O’ROURKE, M. ir IVANKOVIC, A. Drag reduction technology and devices for road vehicles – A comprehensive review. *Heliyon*, 2024, vol. 10. DOI: 10.1016/j.heliyon.2024.e33757.
36. BUSCARIOLO, F., ASSI, G. ir SHERWIN, S. Computational study on an Ahmed body equipped with simplified underbody diffuser. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 2020. DOI: 10.1016/j.jweia.2020.104411.
37. MUKUT, A. N. M. I. ir ABEDIN, M. Z. Review on aerodynamic drag reduction of vehicles. *International Journal of Engineering Materials and Manufacture*, 2019, vol. 4, no. 1, p. 1–14. DOI: 10.26776/ijemm.04.01.2019.01.
38. YAKKUNDI, V., MANTHA, S. ir SUNNAPWAR, V. Hatchback versus sedan – A review of drag issues. *International Journal of Mechanical Engineering*, 2017, vol. 4, p. 5–13. DOI: 10.14445/23488360/ijme-v4i1p102.
39. *BMW 3-Series Sedan F30 (2012) blueprints* [internet]. The-Blueprints.com, 2026 [žiūrēta 2026-05-12]. Prieiga per internetą: [https://www.the-blueprints.com/blueprints/cars/bmwcars/47965/view/bmw\\_3-series\\_sedan\\_f30\\_2012/](https://www.the-blueprints.com/blueprints/cars/bmwcars/47965/view/bmw_3-series_sedan_f30_2012/)
40. MAJI, D. S. B. ir MUSTAFFA, N. CFD analysis of rear-spoilers effectiveness on sedan vehicle in compliance with Malaysia national speed limit. *Journal of Automotive Powertrain and Transportation Technology*, 2022, vol. 2, no. 1. DOI: 10.30880/japtt.2022.02.01.003.