



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

# **Aerodinaminių elementų poveikio automobilio dinaminėms savybėms tyrimas**

Baigiamasis magistro projektas

---

**Tomas Čeida**  
Projekto autorius

**Lekt. dr. Janina Jablonskytė**  
Vadovė

**Kaunas, 2019**



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

# **Aerodinaminių elementų poveikio automobilio dinaminėms savybėms tyrimas**

Baigiamasis magistro projektas  
Transporto priemonių inžinerija (6211EX021)

---

**Tomas Čeida**

Projekto autorius

**Lekt. dr. Janina Jablonskytė**

Vadovas

**doc. Darius Juodvalkis**

Recenzentas

---

**Kaunas, 2019**



## **Kauno technologijos universitetas**

Mechanikos inžinerijos ir dizainofakultetas

Studijų programa – Transporto priemonių inžinerija 6211EX021

### **Magistrantūros studijų baigiamojo projekto užduotis**

Studentui Tomui Čeidai

#### **1. Baigiamojo projekto tema:**

Aerodinaminių elementų poveikio automobilio dinaminėms savybėms tyrimas

Research of aerodynamics elements' influence on vehicle dynamics characteristics

#### **2. Projekto tikslas:**

Išanalizuoti gamyklinio automobilio BMW e46 coupe aerodinaminių elementų įtaką automobilio stabdymo keliui ir judėjimui posūkyje.

#### **3. Projekto uždaviniai:**

1. Sudaryti tiriamą automobilio trimatį modelį naudojant CAD programas.
2. Nustatyti gamyklinį modelį veikiančias aerodinamines jėgas, naudojantis ANSYS Fluent programine įranga.
3. Nustatyti efektyviausią automobilio difuzoriaus pastatymo kampą, kuris užtikrintų didžiausią prispaudžiamą jėgą ir mažiausią pasipriešinimą.
4. Išanalizuoti ir surasti geriausią, optimaliausią galinio sparno tvirtinimo vietą.
5. Gamyklinį modelį papildyti optimizuotais aerodinaminiais elementais, ir palyginti aerodinamines jėgas, veikiančias gamyklinį ir modernizuotą modelį.
6. Išanalizuoti gamyklinio modelio ir aerodinaminiais elementais papildyto modelio stabdymo kelią.
7. Išanalizuoti aerodinaminių jėgų poveikį automobilio dinamikai judant posūkyje, apskaičiuoti maksimalų išcentrinį pagreitį ir minimalų posūkio spindulį, palyginti rezultatus gamyklinio ir pagerinto modelio.

#### **4. Projekto aprašomosios dalies struktūra:**

Įvadas, teorinė dalis, tiriamoji dalis

#### **5. Projekto konsultantai:**

Baigiamojo projekto autorius

---

*(vardas, pavardė, parašas, data)*

Baigiamojo projekto vadovas

**Lekt. dr. Janina Jablonskytė**

---

*(vardas, pavardė, parašas, data)*

Krypties studijų programos vadovas

---

*(vardas, pavardė, parašas, data)*



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

## **Aerodinaminių elementų poveikio automobilio dinaminėms savybėms tyrimas**

### Akademinio sąžiningumo deklaracija

Patvirtinu, kad mano, Tomo Čeidos baigiamasis projektas tema „Aerodinaminių elementų poveikio automobilio dinaminėms savybėms tyrimas“ yra parašytas visiškai savarankiškai ir visi pateikti duomenys ar tyrimų rezultatai yra teisingi ir gauti sąžiningai. Šiame darbe nei viena dalis nėra plagijuota nuo jokių spausdintinių ar internetinių šaltinių, visos kitų šaltinių tiesioginės ir netiesioginės citatos nurodytos literatūros nuorodose. Įstatymų nenumatytų piniginių sumų už šį darbą niekam nesu mokėjęs.

Aš suprantu, kad išaiškėjus nesąžiningumo faktui, man bus taikomos nuobaudos, remiantis Kauno technologijos universitete galiojančia tvarka.

---

(vardą ir pavardę įrašyti ranka)

---

(parašas)

Tomas Čeida, Aerodinaminių elementų poveikio automobilio dinaminėms savybėms tyrimas. Magistro baigiamasis projektas vadovė Lekt. dr. Janina Jablonskytė; Kauno technologijos universitetas, Mechanikos ir dizaino fakultetas.

Studijų kryptis ir sritis (studijų krypčių grupė): Transporto inžinerija (E12)

Reikšminiai žodžiai: aerodinaminis pasipriešinimas, kėlimo jėga, automobilio aerodinaminiai elementai

Kaunas, 2019. 42 p.

### **Santrauka**

Šiame darbe tirta automobilio aerodinaminių elementų įtaka aerodinaminės ir dinaminės transporto priemonės savybėms. Šiam tikslui pasiekti buvo sukurtas trimatis standartinis automobilio modelis. CFD analizės pagalba ištirtas gamyklinis modelis buvo patobulintas prie automobilio pridėjus papildomus aerodinaminius elementus. Apskaičiavus aerodinamines jėgas buvo analizuota jų įtaka automobilio stabdymo keliui ir aerodinaminių jėgų įtaka automobilio judėjimui posūkyje.

Tomas Čeida Research of aerodynamics elements' influence on vehicle dynamics characteristics. Final Degree Project Master's Final Degree Project supervisor Lect. dr. Janina Jablonskytė; Faculty of mechanical engineering and design, Kaunas University of Technology.

Study field and area (study field group): Transport engineering (E12)

Keywords: drag, lift, vehicle, aerodynamic elements

Kaunas, 2019. 42p.

### **Summary**

In this project was analyzed aerodynamic elements influence to vehicle dynamic properties. In order to analyze the aerodynamic forces impact on vehicle braking and turning dynamics. To achieve this goal, I needed to create MBW E46 Coupe 3D model in CAD software. Then, with CFD software I analyzed stock vehicle and updated vehicle with various aerodynamic elements. Aerodynamic forces results were compared, and researched what impact aerodynamic elements have on vehicle braking distance and lateral acceleration.

## Turinys

<b>Lentelių sąrašas .....</b>	<b>9</b>
<b>Paveikslų sąrašas .....</b>	<b>10</b>
<b>Įvadas.....</b>	<b>11</b>
<b>1. Aerodinaminės jėgos .....</b>	<b>12</b>
1.1. Aerodinaminiai koeficientai .....	12
1.2. Oro srautas.....	14
1.3. Laminarinis, turbulentinis oro srautas ir pasienio sluoksnis .....	14
1.4. Žemės efektas lenktyniniuose automobiliuose .....	16
<b>2. Aerodinaminiai elementai.....</b>	<b>17</b>
2.1. Galinis sparnas.....	17
2.2. Lygus dugnas ir difuzorius. ....	17
2.3. Priekinė lūpa(„spliteris“) .....	19
<b>3. CFD Analizė .....</b>	<b>20</b>
3.1. CFD Analizės nauda.....	20
3.2. CFD analizės žingsniai Ansys Fluent programoje .....	21
<b>4. Aerodinaminių jėgų analizė.....</b>	<b>22</b>
4.1. Gamyklinio modelio tyrimas .....	22
4.2. Automobilio aerodinaminių savybių gerinimas, techniniai reikalavimai.....	24
4.3. Difuzoriaus kampo analizė .....	25
4.4. Galinio sparno tvirtinimo vietos parinkimas .....	27
4.5. Trimačio modelio tyrimas .....	30
4.6. Sparno pastatymo kampo įtaka aerodinaminėms jėgoms.....	33
<b>5. Aerodinaminių savybių įtaka dinaminėms savybėms .....</b>	<b>35</b>
5.1. Stabdymas.....	35
5.2. Maksimalus šoninis pagreitis .....	37
<b>Išvados .....</b>	<b>40</b>
<b>Informacijos šaltinių sąrašas .....</b>	<b>41</b>
<b>Priedai.....</b>	<b>42</b>
1 priedas. Lentelės .....	42
2 priedas. Brėžiniai .....	42



## Lentelių sąrašas

<b>1 lentelė</b> CFD analizės palyginimas su eksperimentine analizė.....	20
<b>2 lentelė</b> gamyklinio modelio CFD analizė.....	24
<b>3 lentelė</b> optimalaus difuzoriaus kampo analizė.....	26
<b>4 lentelė</b> galinio sparno tvirtinimo vietos analizė.....	29
<b>5 lentelė</b> CFD konfigūruotų automobilio analizė.....	31
<b>6 lentelė</b> koeficiento $C_D$ apskaičiavimas.....	33
<b>7 lentelė</b> koeficiento $C_L$ apskaičiavimas.....	33
<b>8 lentelė</b> Sparno pastatymo kampo analizė.....	34
<b>9 lentelė</b> stabdymo kelio analizės rezultatai.....	42
<b>10 lentelė</b> išcentrinio pagreičio analizė.....	42
<b>11 lentelė</b> minimalus posūkio spindulys.....	42

## Paveikslų sąrašas

1 pav. Aerodiminis pasipriešinimas.....	11
2 pav. Įvairios kūnų formos pasipriešinimo koeficientai[1].....	13
3 pav. Oro srautas einantis per automobilio profilį [1].....	14
4 pav. Laminarinis ir turbulentinis oro srautas.....	15
5 pav. Pasienio sluoksnis[1].....	15
6 pav. „Indycar“ automobilio pasipriešinimo jėgų priklausomybė nuo ašių aukščio [16].....	16
7 pav. galinis sparnas [12].....	17
8 pav. Lygus dugnas ir gale įtaisytas difuzorius [13].....	18
9 pav. Difuzoriaus įtaka pasipriešinimo koeficientams [5].....	18
10 pav. Priekinė lūpa[14].....	19
11 pav. Slėgio pasiskirstymas automobiliui su priekine lūpa ir be jos .....	19
12 pav. CFD analizė.....	20
13 pav. CFD analizės seka[6].....	21
14 pav. Gamyklinis modelis.....	22
15 pav. Baigtinis elementų modelis su kraštinėmis sąlygomis.....	23
16 pav. Automobilio greičiai Kačerginės Nemuno žiedo trasoje.....	23
17 pav. Oro srauto linijos automobiliui judant 130 km/h greičiu.....	24
18 pav. Techniniai reikalavimai aerodinaminių elementų gabaritams[8].....	25
19 pav. Dvimatis modelis, B difuzoriaus kampas.....	25
20 pav. Baigtinis elementų tinklelis.....	26
21. pav. 8 laipsnių difuzoriaus oro srauto aptekėjimas.....	27
22 pav. 14 laipsnių difuzoriaus oro srauto aptekėjimas.....	27
23 pav. Galinio sparno tvirtinimo vietai nustatyti tiriamas zona.....	28
24 pav. Galinio sparno profilis[15].....	33
25pav. 2-os sparno tvirtinimo pozicijos slėgio pasiskirstymas automobiliui judant 110 km/h greičiu.....	29
26 pav. 2-os sparno tvirtinimo pozicijos oro srauto aptekėjimas prie 110 km/h.....	30
27pav. modernizuotas modelis su 5-as sparno tvirtinimo ozicija.....	30
28 pav. Slėgio centro koordinatė vieta krovininiame ir sportiniame automobilyje[3].....	32
29 pav. Slėgio centro koordinatė .....	32
30 pav. Sparno tvirtinimo kampas .....	33
31 pav. Automobilį veikiančios jėgos stabdant[9].....	31
32 pav. Stabdymo kelio grafikas.....	37
33 pav. Automobilį veikiančios jėgos judant apskritimu[9].....	37
34 pav. Maksimalus išcentrinio pagreičio grafikas.....	38
35 pav. Automobilio įveikiamas minimalaus posūkio spindulio grafikas.....	39

## Įvadas

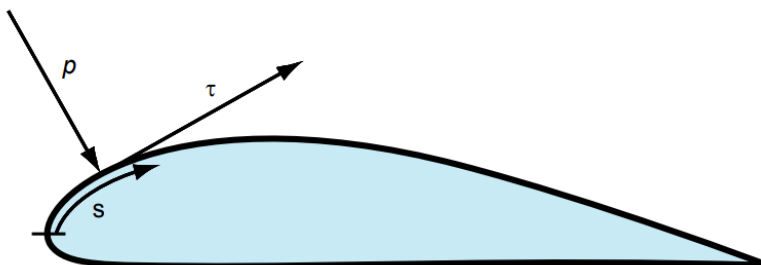
Vos tik buvo sukurtas pirmasis automobilis ir prasidėjo serijinė automobilių gamyba, atsirado ir automobilių sportas. Visais laikais žmonės lenktyniavo, norėdami įrodyti savo pranašumą. Autosportas labai prisidėjo prie automobilių industrijos klestėjimo ir tobulėjimo. Automobilius visada stengdavosi atnaujinti, patobulinti, o pagrindinis tikslas buvo judėti kuo greičiau. Norint pasiekti šį tikslą, buvo kuriamos ir tobulinamos visos automobilio sistemos: variklis turėjo išspausti didžiausią įmanomą galią, automobilio važiuoklė turėjo puikiai atkartoti kelio dangą ir užtikrinti, kad automobilio ratai pastoviai turėtų tvirtą kontaktą su kelio danga, pavaros turėjo būti sureguliuotos taip, kad automobilio variklio galia būtų optimaliai perduota varomiems ratams. 1956 Šveicarijos inžinieriui Michael May kilo idėja pritvirtinti apverstą sparną, kuris kurtų prispaudžiamąją jėgą, ant savo automobilio. Šis patobulinimas leido jo automobiliui posūkiuose judėti greičiau. Tai buvo pirmas kartas, kai aerodinaminis elementas buvo panaudotas automobilyje. Nuo to momento į automobilio aerodinamiką ir aerodinaminius elementus buvo kreipiamas žymiai didesnis dėmesys, buvo stengiamasi ne tik sukurti prispaudžiamąją jėgą, bet ir sumažinti aerodinaminį pasipriešinimą. Aerodinaminiai sprendimai buvo įdiegti ne tik automobilių sporte, bet ir serijinėje automobilių gamyboje. Tai turėjo įtakos ir automobilių dizainui, jis tapo aptakesnis, apvalesnių formų. Dėl mažesnio pasipriešinimo automobiliai tapo ne tik greitesni, bet ir ekologiškesni, suvartodavo mažiau kuro.

**Darbo tikslas** išanalizuoti gamyklinio automobilio BMW e46 coupe aerodinaminių elementų įtaką automobilio stabdymo keliui ir judėjimui posūkyje. Šiam tikslui pasiekti iškelti darbo uždaviniai:

1. Sudaryti tiriamą automobilio trimatį modelį naudojant CAD programas.
2. Nustatyti gamyklinį modelį veikiančias aerodinamines jėgas, naudojantis ANSYS Fluent programine įranga.
3. Nustatyti efektyviausią automobilio difuzoriaus pastatymo kampą, kuris užtikrintų didžiausią prispaudžiamąją jėgą ir mažiausią pasipriešinimą.
4. Išanalizuoti ir surasti geriausią, optimaliausią galinio sparno tvirtinimo vietą.
5. Gamyklinį modelį papildyti optimizuotais aerodinaminiais elementais ir palyginti aerodinamines jėgas, veikiančias gamyklinį ir modernizuotą modelį.
6. Išanalizuoti gamyklinio modelio ir aerodinaminiais elementais papildyto modelio stabdymo kelią.
7. Išanalizuoti aerodinaminių jėgų poveikį automobilio dinamikai judant posūkyje, apskaičiuoti maksimalų išcentrinį pagreitį ir minimalų posūkio spindulį, palyginti rezultatus gamyklinio ir pagerinto modelio.

## 1. Aerodinaminės jėgos

Automobiliui judant keliu, aplink jį juda oro srautas. Nesvarbu, tiriamas parastos formos kūnas ar sudėtingos formos kūnas (toks kaip automobilis) – aerodinaminės jėgos ir momentai susidaro dėl dviejų pagrindinių priežasčių: slėgio  $p$  pasiskirstymo kūno paviršiuje ir trinties  $\tau$  pasiskirstymo kūno paviršiuje 1 pav [1].



1 pav. Aerodinaminis pasipriešinimas [1]

Dėl skirtingo oro dalelių greičio viršutinėje ir apatinėje profilio dalyse, susidaro skirtingi slėgiai, šiuo atveju viršutinėje profilio dalyje žemas slėgis, apatinėje aukštas. Susumavus kūno paviršiuje veikiančias slėgio ir trinties jėgas, gaunama atstojamoji aerodinaminė jėga. Atstojamąją aerodinaminę jėgą galima išskaidyti į dvi projekcijas: keliamąją jėgą ir pasipriešinimo jėgą. Keliamoji jėga yra atstojamosios jėgos projekcija, statmena oro srauto judėjimo krypčiai, nuo jos krypties priklauso, ar automobilis keliamas nuo kelio paviršiaus ar prie jo spaudžiamas. Pasipriešinimo jėga yra atstojamosios jėgos projekcija, lygiagreti su laisvojo srauto kryptimi ir kuri priešinasi automobiliui judėti į priekį [1].

### 1.1. Aerodinaminiai koeficientai

Aerodinaminės jėgos, kurias veikia kūną judantį oro sraute, labiau priklauso nuo to kūno geometrinės formos ir pačio oro srauto ypatybių. Norint supaprastinti jėgų skaičiavimus, patogu įsivesti bedimensinius koeficientus, kurie priklausytų tik nuo didžiausią įtaką turinčių veiksnių. Pagrindiniai parametrai būtų šie [1,2]:

Dinaminis slėgis apskaičiuojamas:

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

Čia:  $\rho$  - oro tankis  $1.225 \text{ kg/m}^3$ ,  $V$  - oro srauto greitis

Apskaičiuoti keliamosios jėgos koeficientą naudojantis šia formule:

$$C_L = \frac{L}{qS}; \quad (2)$$

Čia:  $L$  - kėlimo jėga,  $S$  - aktualus kūno plotas

Keliamosios jėgos apskaičiavimo formulė:

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

Keliamoji jėga yra priklausoma nuo kūno atskaitos plotui bei dinaminio slėgio, kuris lygus oro tankio ir laisvojo srauto greičio kvadrato sandaugos pusei taip pat yra priklausoma nuo atskaitos

plotui ir dinaminiam slėgiui, kuris lygus oro tankio ir laisvojo srauto greičio kvadrato sandaugos pusei. Proporcingumo koeficientas yra keliamosios jėgos koeficientas [1,2].

Pasipriešinimo koeficientas:

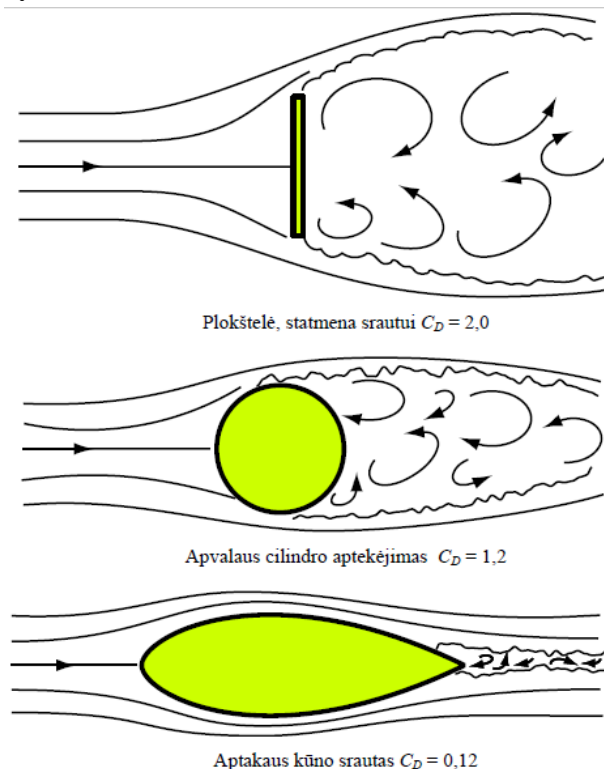
$$C_D = \frac{D}{qS}; \quad (4)$$

Čia:  $D$  -kėlimo jėga,

Pasipriešinimo jėga apskaičiuojama:

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

Pasipriešinimo jėga yra priklausoma nuo kūno skerspjūvio ploto ir dinaminio slėgio, kuris lygus oro tankio ir laisvojo srauto greičio kvadrato sandaugos pusei. Proporcingumo koeficientas yra pasipriešinimo koeficientas. Pasipriešinimo koeficientas labiausiai veikia judančio kūno forma ir nuo to kaip jis yra orientuotas oro sraute [1,2].



2 pav. Įvairios kūnų formos pasipriešinimo koeficientai[1]

Kūno forma turi labai didelės įtakos kūno pasipriešinimui, ku kūnas aptakesnis ir ilgesnis, tuo pasipriešinimo koeficientas mažesnis. 2 pav. parodytos trijų kūnų oro srauto srovės linijos ir nurodyti kūnų pasipriešinimo koeficientai. Kaip matome kuo oro srautas tolygiau apteka kūną, tuo mažesnė sukuriama pasipriešinimo jėga. Labiausiai sudarkytas oro srautas matomas už plokštelės statmenos oro srautui, už jos susidaro didžiausi oro sūkuriai, kurie labiau įtakoja pasipriešinimo jėgą, todėl automobiliuose ir jų dizaine stengiamasi naudoti apvalias, profiliuotas formas. [1,2].

## 1.2. Oro srautas

Oro srautas aptekantis automobilį vadinamas stacionariu, jei kiekviename taške kryptis ir greičio dydis išlieka pastovus. Realiomis sąlygomis greitis gali būti skirtingas skirtinguose erdvės taškuose, tada šis srautas vadinamas nestacionariu[1].

Kadangi plika akimi oras yra nematomas, oro srauto vaizdavimui taikomi įvairūs metodai. Pati pagrindinė sąvoka taikant šiuos metodus yra srovės linija. Kiekviename srovės linijos taške greičio vektorius yra šios linijos liestinė. Srovės linijų vaizdas, kaip oro srautas apteka automobilio profilį, pavaizduotas 3 pav. [1,2].



3 pav. Oro srautas einantis per automobilio profilį [10]

Jei sujungsime visus taškus, pro kuriuos judėjo oro dalelė, gausime liniją, ji yra vadinama trajektorija[1,2].

Sujungus visus taškus, pro kuriuos judėjo oro dalelė, gaunama linija erdvėje, kuri vadinama trajektorija. Jeigu srautas yra stacionarus, t. y., nesikeičia laikui bėgant, tai trajektorija sutampa su srovės linija. Srovės linijų braižymas kūną aptekančiame sraute yra labai svarbus oro srauto vaizdavimo metodas [1,2].

Iš srovės linijų vaizdo galima padaryti svarbias išvadas. Kadangi skersai srovės linijų srautas nepraeina, tai tarpą tarp šių linijų galima įsivaizduoti kaip srovės vamzdelį. Ten, kur srovės linijos priartėja viena prie kitos, pagal vientisumo lygtį greitis yra didesnis. Iš Bernulio lygties matyti, kad statinis slėgis tose vietose bus mažesnis. Ir priešingai, ten, kur srovės linijos nutolsta viena nuo kitos, pagal vientisumo lygtį greitis yra mažesnis. Iš Bernulio lygties matyti, kad statinis slėgis tose vietose bus didesnis. Taigi, nagrinėjant srovės linijas, galima gauti svarbios informacijos apie kūno aptekėjimo sąlygas [1,2].

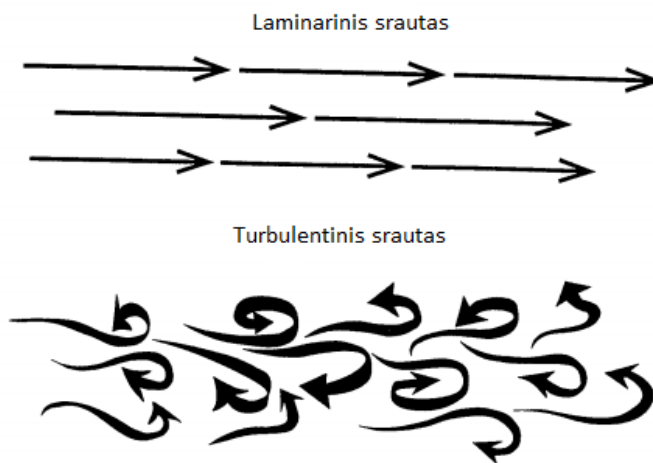
Trimatis (erdvinis) oro srautas – tai realus automobilį aptekantis srautas, kai srauto parametrai priklauso nuo visų trijų erdvinių koordinačių [1,2].

## 1.3. Laminarinis, turbulentinis oro srautas ir pasienio sluoksnis

Laminarinis oro srautas yra toks srautas, kuriame srauto linijos yra lygiagrečios, judančias tolygiai. Jeigu oro srauto linijos pradeda tarpusavyje maišytis, toks oro srautas tampa turbulentiniu. Laminarinis ir turbulentinis oro srautas pavaizduotas 4 pav. Laminario ir turbulentinio oro srauto pasipriešinimo, kėlimo jėgos labai skiriasi[1,2].

Realiomis sąlygomis laminarinis oro srautas retas reiškiny, kad ir koks būtų ramus oras, visada yra trikdžiai tokie kaip vėjas, patys automobiliai, pastatai, kurie jį sudrumsčia[1,2].

Oras turi panašias savybes kaip ir skystis, juose pasireiškia vidinė trintis, kuri vadinama klampumu. Ši savybė pasireiškia pasipriešinimu gretimų sluoksnių maišymuisi, poslinkiui ir apibūdina oro srauto judėjimą paviršiuje. Kuo klampesnis skystis ar dujos, tuo kūnui sunkiau judėti ir reikia daugiau jėgos[1,2].



4 pav. Laminarinis ir turbulentinis oro srautas

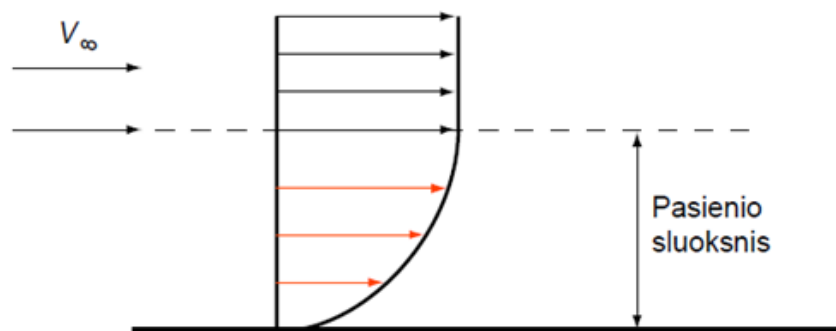
Reinoldso skaičius pavadintas XIX amžiaus mokslininko Osborn Reinoldso garbei. Jis tyrinėjo skysčių dinamiką. Šis skaičius padeda numatyti srauto tipą, kada jis būna laminarinis, o kada turbulentinis

$$Re = \frac{\rho VL}{\mu}; \quad (6)$$

Čia:  $\rho$  - oro tankis  $1.225 \text{ kg/m}^3$ ,  $\mu$  - klampumas  $L$  - charakteringas kūno ilgis

Pavyzdžiui, jei Reinoldso skaičiaus reikšmė (tiriant automobilį) mažesnė nei  $10^5$  srautas bus laminarinis ir pasipriešinimo ir kėlimo jėga labai skirsis nuo didesnių Reinoldso skaičiaus reikšmių[3]

Tarkim, kad tam tikro greičio oro srautas juda stacionaria plokštuma 5 pav.. Dėl oro klampumo, oro srauto greitis prie pat stacionarios plokštumos paviršiaus tampa lygus 0, bet atsiranda sluoksnis, kuriame oro srautas pamažu susilygina su pradiniu oro srauto greičiu.



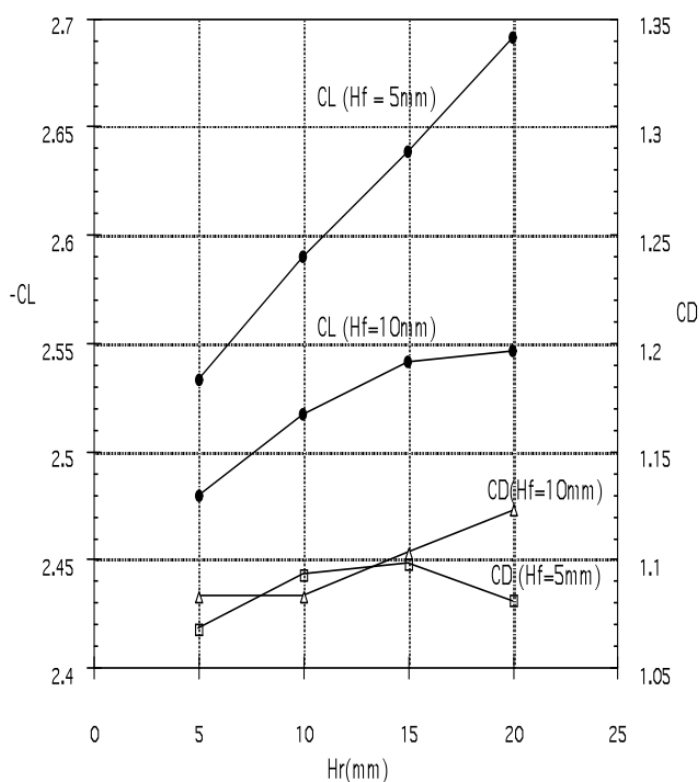
5 pav. Pasienio sluoksnis[1]

Sluoksnis, kuriam oro srauto greitis nelygus pradiniam oro srauto greičiui vadinamas pasienio sluoksniu. Pasienio sluoksnio storis vis didėja oro srautui judant toliau plokščiu paviršiumi. Oro klampumas turi labai nedidelę reikšmę, todėl pasienio sluoksnis yra pakankamai plonas. Pasienio sluoksnis atsiranda ne tik oro srautui aptekant plokščią paviršių, bet ir aptekant sudėtingesnės formos kūnus[1,2].

#### 1.4. Žemės efektas lenktyniniuose automobiliuose

Didelio greičio lenktyniniai automobiliai, juda kaip galima žemiau, kuo arčiau kelio paviršiaus. Taip neišvengiamas žemės efektas. Žemės efektas ryškiai pasireiškia aviacijoje, lėktuvui tūpant ar kylant, lėktuvo sparnai prie žemesnio greičio, kuria ženkliai didesnę kėlimo jėgą, nei lėktuvui skrendant pakilus į darbinį aukštį. Lenktyninių automobilio kūrėjai taip pat stengiasi išnaudoti šį efektą savo naudai, naudoja sparnus, kurie yra apverstai ir kuria ne kėlimo jėgą, o prispaudžiamąją. Pagrindo efektas atsiranda dėka Bernulio principo, kad oro srautas galėtų pratekėti pro sumažėjusį skerspjūvio plotą, kuris yra tarp pagrindo ir automobilio dugno, jis pagreitėja, taip sumažėja oro slėgis, viršuje oro srauto slėgis nuo to nepakinta, taip ir atsiranda didesnė prispaudžiamoji jėga. Taip pat tai įtakoja ir pasipriešinimo jėgą, ji sumažėja esant stipresniam pagrindo efektui.[16]

Kokią įtaka pagrindo efektas turi „Indycar“ serijos automobiliams puikiai iliustruoja 6 pav. Joseph‘as Katz‘as atliko eilę bandymų su šios serijos automobiliais 2002m. Jis tyrė skirtingų ašių t.y priekinės(Hf) ir galinės ašių(Hr) aukščių įtaką automobilio prispaudimo ir pasipriešinimo jėgai.



6 pav. „Indycar“ automobilio pasipriešinimo jėgų priklausomybė nuo ašių aukščio[16]

Iš 6 pav. grafiko matosi, kad didžiausia prispaudimo jėga sukuriama kai automobilio priekinė ašis yra kuo žemiau, taip pat šiuo atveju sukuriama ir mažiausia pasipriešinimo jėga. Galinės ašies atveju, esant aukščiausiam tirtam aukščiui, sukuriama didžiausia prispaudimo jėga, pasipriešinimo jėga beveik mažiausia.



## 2. Aerodinaminiai elementai

### 2.1. Galinis sparnas

Sparnai naudojami automobiliuose tuo pačiu tikslu kaip ir lėktuvuose, tačiau automobiliuose keliamoji jėga pakeičiama spaudžiamąją. Sparnų konstrukcijos 7 pav. gaminamos iš lengvų bet stiprių medžiagų, tokių kaip aliuminis ir anglies pluoštas. Paprasti sparnai automobiliuose tvirtinami taip kad spaudžiamąją jėgą tiesiogiai perduotų važiuoklei. Sparnų pagrindinė funkcija yra sukurti didesnę automobilio ratų sukibimą su keliu.[4]

Pagrindinė galinio sparno funkcija pagerinti automobilio įsibėgėjimą, stabdymą bei padidinti posūkio įveikimo greitį. Galinis sparnas sumažina perteklinį pasukamumą. Automobiliams, kurių varomieji ratai yra galiniai, šis aerodinaminis elementas yra ypač svarbus[4].

Oro srautas pasiekiantis galinį sparną nebūna, toks tiesus ir tobulas. Automobilio stogo konstrukcija keičia oro srauto tekėjimo greitį bei trajektoriją, todėl būtina atlikti testavimus ir nustatyti, kurioje vietoje galinis sparnas bus efektyviausiai išnaudojamas[4].



7 pav. Galinis sparnas [12]

Taip pat svarbi detalė yra sparno plokštelės sparno galuose. Šios plokštelės užtikrina, kad oro srautas aptekėtų sparno profilį, ir neleistų oro srautui eiti per šonus, kas sumažintų jo efektyvumą[4].

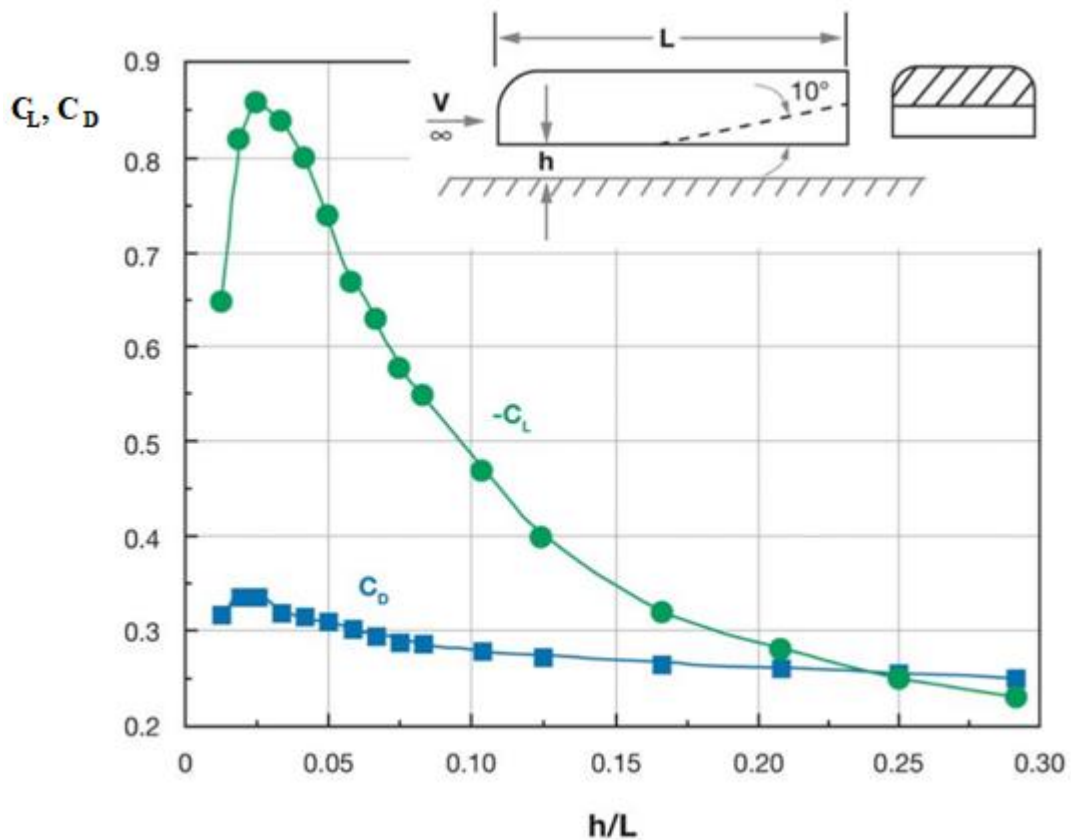
### 2.2. Lygus dugnas ir difuzorius.

Daugiausiai spaudžiamosios jėgos(apie 60 %) lenktyniniuose automobiliuose sukuria elementai esantys automobilio dugne[4]. Didelis automobilio dugno patobulinimas būtų jo išlyginimas, 8 pav. pavaizduotas automobilis su lygiu dugnu. Oro pasipriešinimas yra gerokai didesnis šiurkštaus kūno negu lygaus. Automobilio atveju dugne yra daug įrengimų su aštriais kampais, už tokių kliūčių susidaro oro sūkuriai, oro srautas tampa turbulentinis, o tai labai didina pasipriešinimą[5,4,3].



8 pav. Lygus dugnas ir gale įtaisytas difuzorius [13]

Vienas iš pagrindinių aerodinaminių elementų automobilio dugne yra difuzorius. Difuzorius dažniausiai tvirtinamas automobilio gale. Pagrindinis šio elemento tikslas yra padidinti išeinamo oro srauto greitį automobilio dugne (sumažinti slėgį), o paskui jį sulėtinti (padidinti slėgį). Oro srautas patenkantis į difuzorių turi išsiplėsti, kad užpildytų išsiplėtimo kamerą. Tai skatina patekti dar daugiau oro po automobiliu ir sukuria dar žemesnį slėgį ir vakuomo efektą [5, 4, 3].



9 pav. Difuzoriaus įtaka pasipriešinimo koeficientams [5]

Kad difuzorius dirbtų efektyviai, oro srautas turi neatsiskirti nuo jo paviršiaus. Jei oro srautas atsiskiria nuo paviršiaus, atsiranda oro srauto virsmas į sūkurius, kas sukuria didelę pasipriešinimo jėgą. 9 pav. Pavaizduota kaip efektyviai  $10^\circ$  difuzorius kuria prispaudžiamąją jėgą, kuri priklauso nuo automobilio aukščio. Matome, kad kuo automobilis žemesnis ir ilgesnis, difuzorius sukurs didesnę prispaudimo jėgą, tuo metu pasipriešinimo įtaka kinta nežymiai.

### 2.3. Priekinė lūpa („spliteris“)

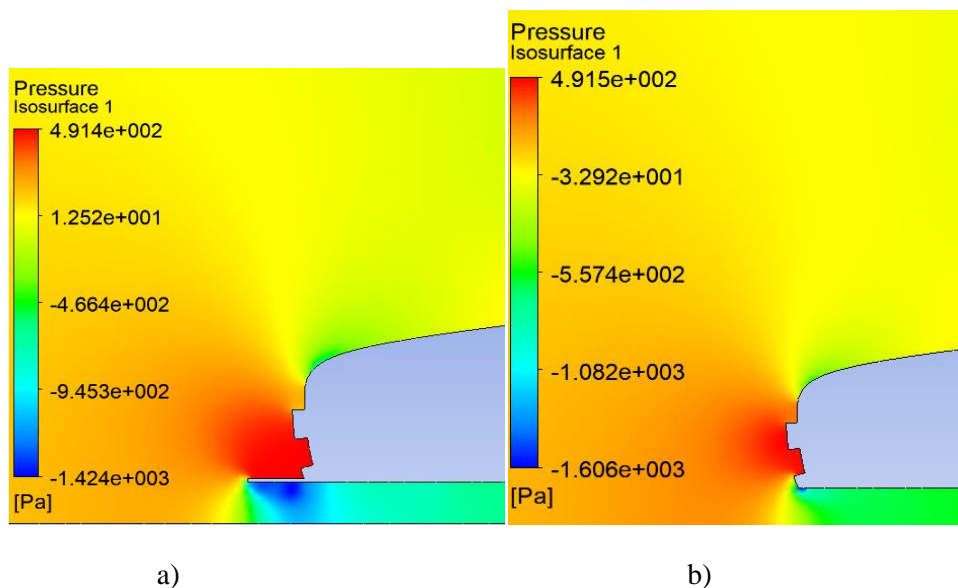
Tai horizontalus elementas tvirtinimas prie priekinio buferio apačioje.

Pagrindinė priekinės lūpos funkcija – sukurti ir pagerinti oro srautą automobilio priekyje. Taip pat šio elemento viršutinėje dalyje sukuriama aukšta slėgis, o apatinėje dalyje sukuriama žemo slėgio zona 10 pav., taip oro srautas juda greičiau [5].



10 pav. priekinė lūpa [14]

Kuo ilgesnis šis elementas, tuo didesne prispaudimo jėga sukuriama. Lūpa užtikrina, kad oro srautas būtų nukreiptas į automobilio galą, kaip matome 11 pav. Automobiliui judant tuo pačiu greičiu su priekine lūpa, jo dugne sukuriama ryškiai mažesnis slėgis. Šis aerodinaminis elementas sukuria prispaudžiamąją jėgą automobilio priekyje, kuri mažina automobilio nesusukamumą [5].



11 pav. Slėgio pasiskirstymas automobiliui: a) su priekine lūpa b) gamyklinio modelio

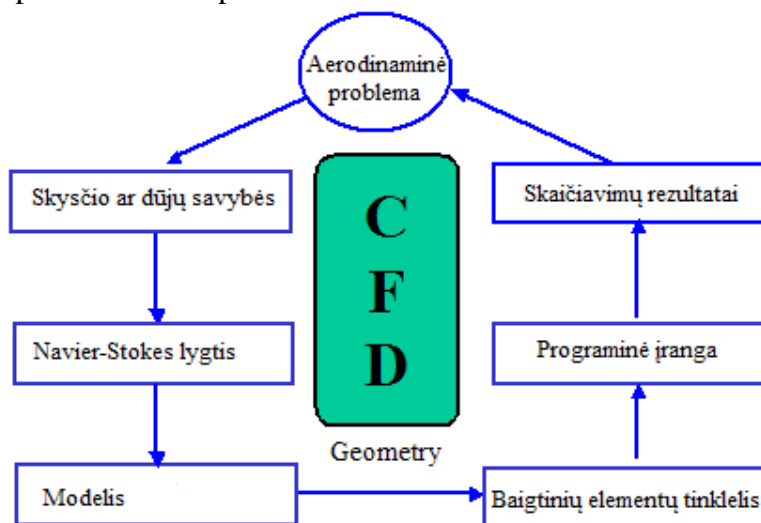
Tai vienintelis elementas, kuris gali kurti prispaudžiamąją jėgą automobilio priekyje ir atitinka LASF 2019 m techninį reglamentą.

### 3. CFD Analizė

CFD– kompiuterinė analizė, kuri analizuoja sistemą veikiamą oro ar skysčio srauto, šilumos, masės perdavimo. Šiuo tiriamu atveju, analizė padeda numatyti oro ar skysčio srauto parametrus, ja pasitelkus išsprendžiamos sudėtingos matematinės lygtys naudojantis skaitmeniniais metodais. Tai duoda kokybines bei kiekybines prognozes, kaip elgsis oro srautas. CFD apima[6]:

- Matematinį modelį, sprendžiant diferencines lygtis
- Skaitmenizuotą metodą
- Programinę įrangą skirtą sprendimo skaičiavimui, rezultatų apdorojimui

Tai labai plataus panaudojimo spektro analizė, kuri leidžia sudėtingų procesų skaičiavimo rezultatus vaizduoti lengva, paprasta forma, panaudojant sukurtus srautų judėjimo paveikslus ar animacijas[6]. CFD analizės schema pavaizduota 12 pav.



12 pav. CFD analizė

Turint aerodinaminę problemą, žinant oro srauto fizines ypatybes, jas apibrėžti galima naudojantis Navier-Stokes lygtimis, tai yra CFD analizės pamatas. Šias lygtis galima išspręsti ir rankiniu būdu, bet jos yra labai sudėtingos, todėl labai pagelbėja CFD analizės programos. Šiame darbe naudosime Ansys Fluent programinę įrangą.

#### 3.1. CFD Analizės nauda

Aerodinamines problemas galima spręsti šiais būdais: eksperimentiniu ir naudojantis CFD analize. Šių dviejų būdų palyginimas 1 lentelėje[7]:

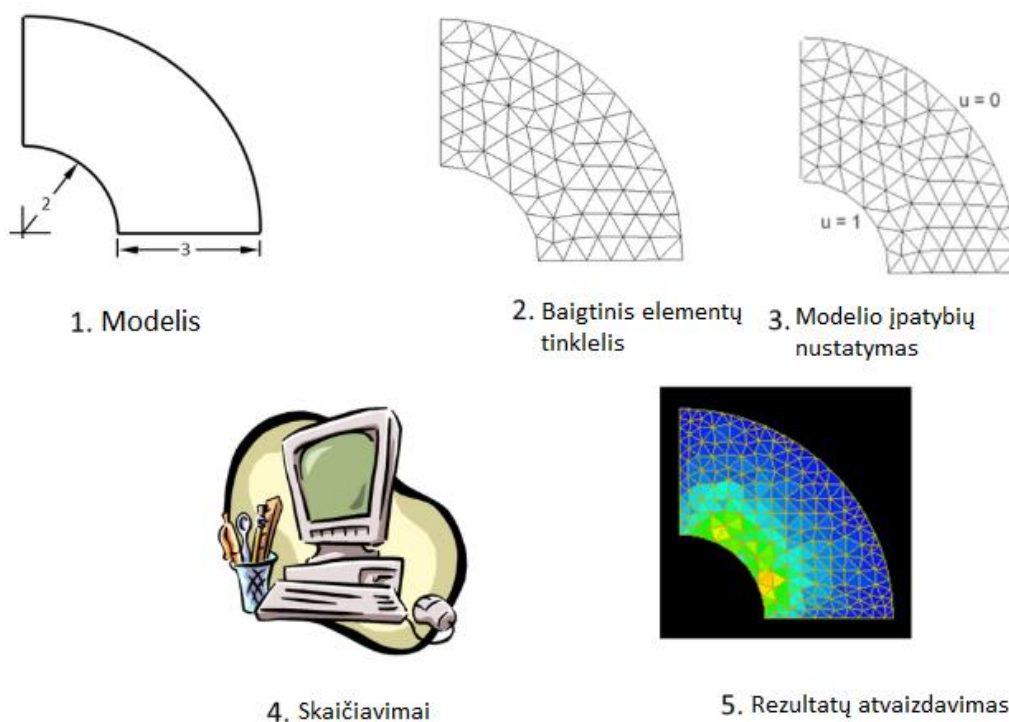
1 lentelė CFD analizės palyginimas su eksperimentine analize

	CFD	Eksperimentinis, vėjo tunelis
<b>Kaina</b>	Pigu	Brangu
<b>Laiko suvartojimas</b>	Trumpas	Ilgas
<b>Testuojamo kūno dydis</b>	Bet koks	Mažas, vidutinis
<b>Rezultatų informaciją</b>	Visa	Ribota

Kaip matome iš lentelės, CFD analizė yra pigesnė, nereikia naudoti sudėtingų prietaisų, nereikia gaminti testavimo modelio. Taip pat analizė užima mažiau laiko, galima naudoti bet koki modelio dydį, CAD programose galima jį sumažinti ar padidinti, kiek reikia. Rezultatus gauname visus kokius tik įmanoma, o vėjo tunelyje rezultatų kiekis yra ribotas[6, 7].

### 3.2. CFD analizės žingsniai Ansys Fluent programoje

13 paveikslėlyje pavaizduota žingsnių seka norint atlikti oro srauto analizę ANSYS Fluent programa.



13 pav. CFD analizės seka[6]

Pagrindiniai yra šie žingsniai:

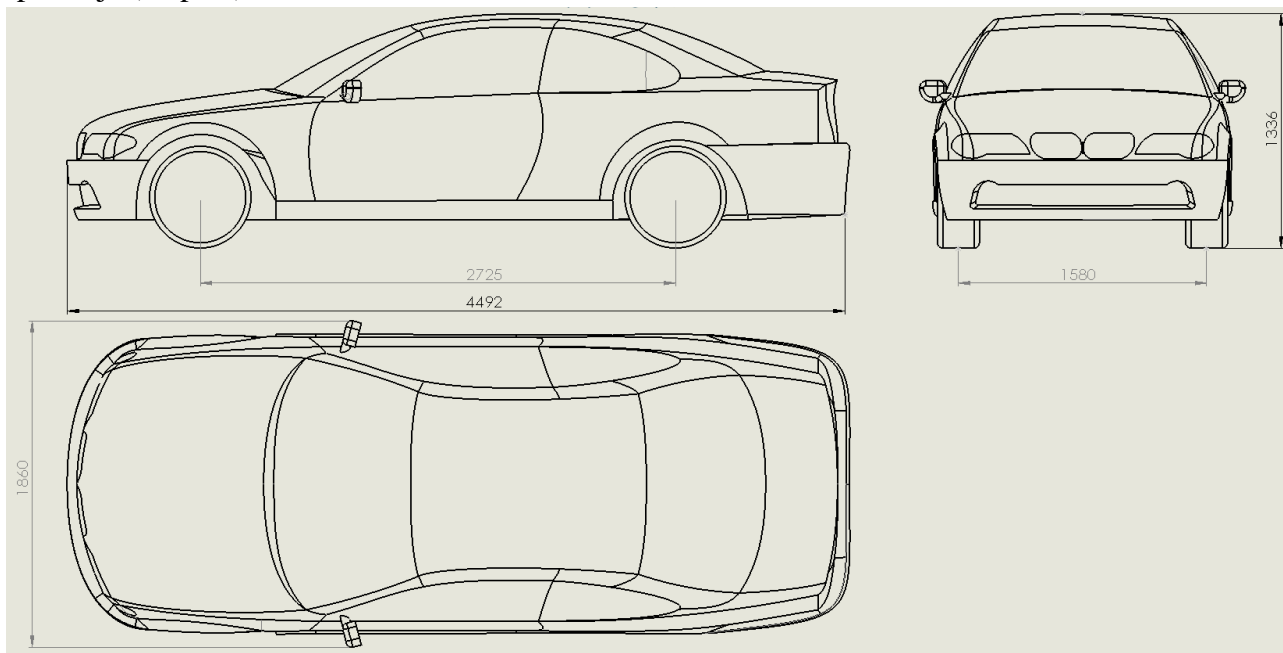
1. Tiriama modelio sukūrimas,
2. Baigtinių elementų tinklelio sukūrimas. Paskui apdorojant tinklelį,
3. Nustatomos kraštinės sąlygos, nurodoma, kur prasideda oro srautas, kur jis išeina, nustatoma sienų, modelio parametrai.
4. Kai analizuojamas modelis yra visiškai apibrėžtas, nustatytos visos ribos, tada apibrėžta sistema keliami į kitą programą, taip vadinama „sprendėja“ (šiuo atveju Ansys Fluent). Šio tipo programos sugeba apskaičiuoti kiekvieno tinklelio elemento diferencines lygtis.
5. Rezultatų apdorojimas. Kai programos apskaičiuoja visų baigtinio elementų tinklelio narių lygtis, gautus rezultatus apdoroja ir pateikia vaizdiškai.

## 4. Aerodinaminių jėgų analizė

### 4.1. Gamyklinio modelio tyrimas

Šiame darbe naudosime CFD tipo programą ANSYS Fluent, kuri apskaičiuoja oro srauto greitį ir slėgį visuose modelio taškuose. Norint gauti tokius rezultatus, programa turi atlikti labai daug skaičiavimų.

Tiriamas automobilis BMW E46 Coupe. Trimatis modelis buvo sukurtas Solidworks programos aplinkoje (14 pav.).



14 pav. Gamyklinis modelis

Automobilio duomenys:

Ilgis: 4488 mm

Plotis: 1757 mm

Aukštis: 1369 mm

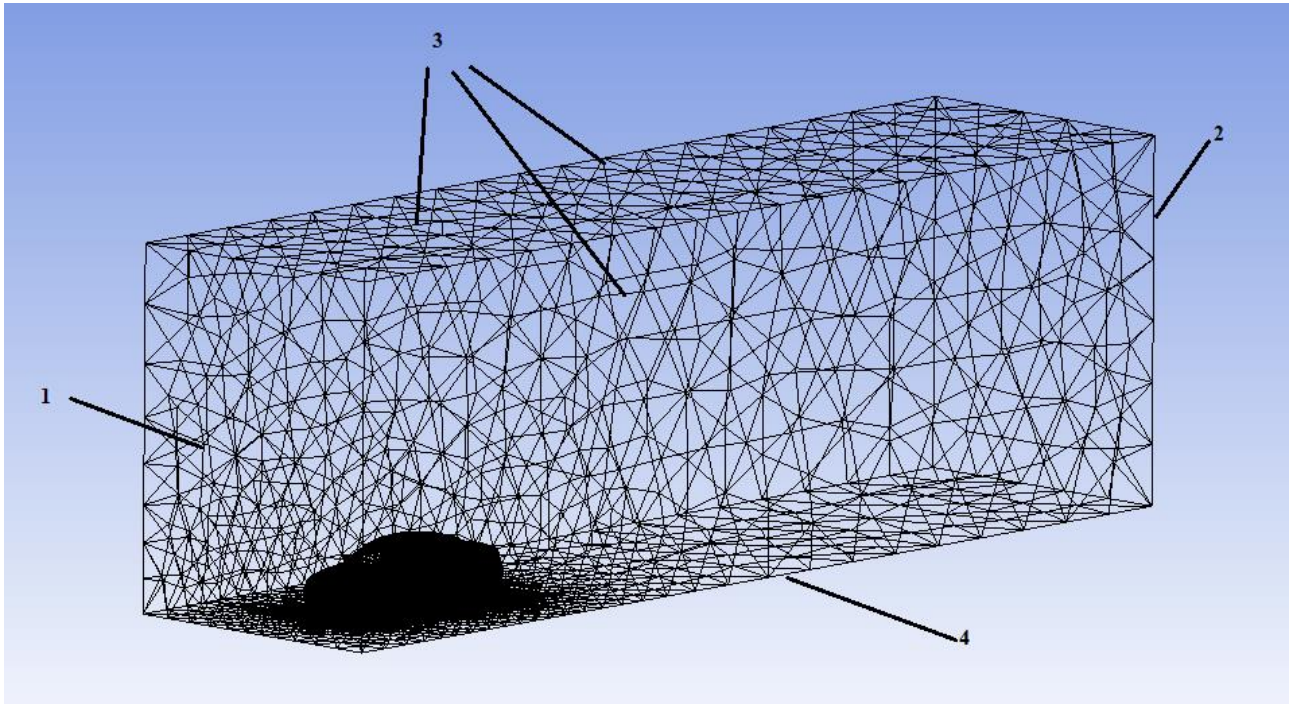
Ratų bazė: 2725 mm

Svoris(su vairuotoju): 1300 kg

Baigtinis elementų modelis pavaizduotas 15 pav., jį sudaro apie 500 000 elementų, kurie yra tetraedro formos. Mažiausias elementas: 2 mm dydžio, didžiausias 20 cm, aplink automobilio modelį naudojama „Inflation“ funkcija. Šį modelį apibrėžia šios kraštinės sąlygos:

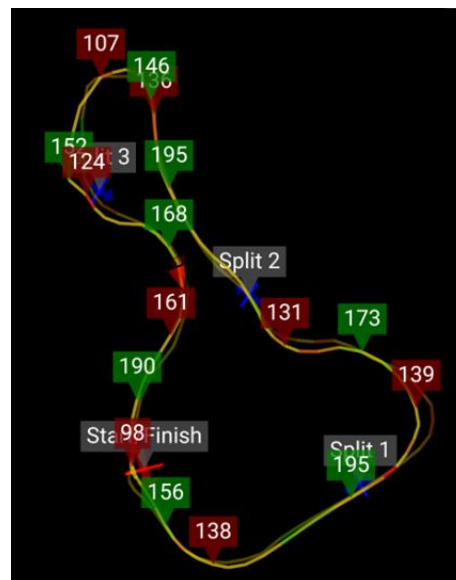
1. Įleidimo anga(angl. „Inlet“) šiame paviršiuje įleidžiamas oro srautas nustatytu greičiu.
2. Išleidimo anga (angl. „outlet“) - šioje angoje išleidžiamas oro srautas
3. Siena(angl. „wall“)- šie paviršiai nustatyti kaip judanti siena, kuri juda tokiu pat greičiu kaip ir oro srautas, klampumas nepaisomas
4. Kelias (angl. „ground“)- apatinė siena, juda tokiu pat greičiu kaip ir įleidžiamas oro srautas, o klampumas paisomas
5. Automobilis (angl. „car“)- nejudantis automobilio modelis automobilio modelis, klampumas paisomas





15 pav. Baigtinis elementų modelis su kraštinėmis sąlygomis

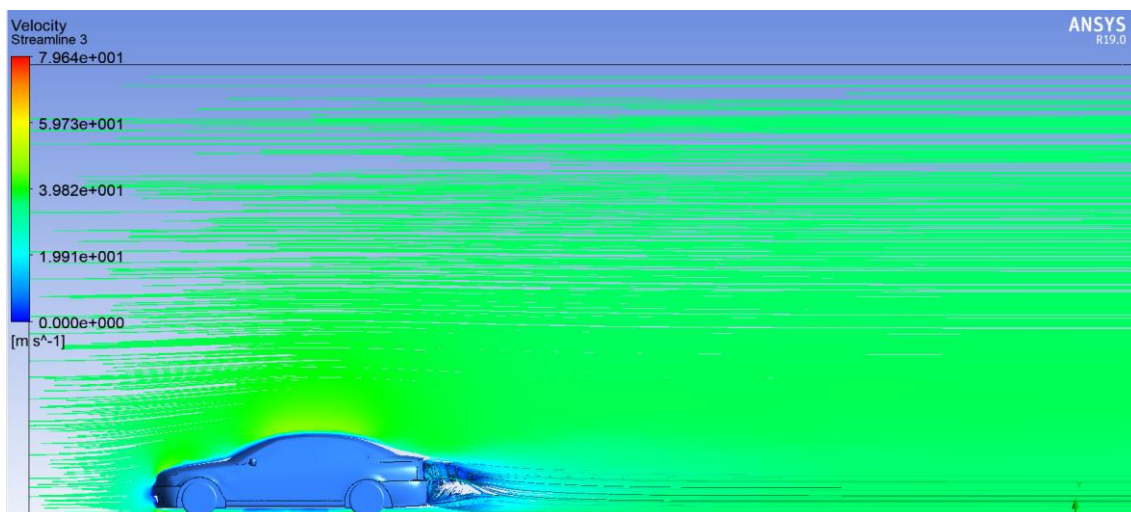
Modelis buvo patalpintas į 20m ilgio, 6m pločio ir 8 m aukščio kamerą, ir veiktas keturiais skirtingais oro judėjimo greičiais: 90km/h, 110km/h, 130 km/h ir 150km/h, 170 km/h. Šie greičiai yra pagrindiniai, kuriais juda automobilis Kačerginės Nemuno žiedo trasoje. Automobilio greičiai trasoje pavaizduoti 16 pav.



16 pav. Automobilio greičiai Kačerginės Nemuno žiedo trasoje

Simuliacijos modelis naudotas iš Australijos LEAP akademinio portalo pamokos „FSAE CFD Tutorial“, „k-omega“ [17]. Oro srautas stacionarus, simuliacija paremti slėgio skaičiavimais.

Kaip matyti 17 pav. gale susidaro atitrūkęs oro srautas, kuris formuojasi į sūkurį. Šio atitrūkusio srauto judėjimas ir jo dydis turi didžiausią įtaką pasipriešinimo jėgai.



17 pav. Oro srauto linijos automobiliui judant 130 km/h greičiu

Gamyklinio modelio CFD analizės rezultatai pateikti 2 lentelėje:

2 lentelė gamyklinio modelio CFD analizė

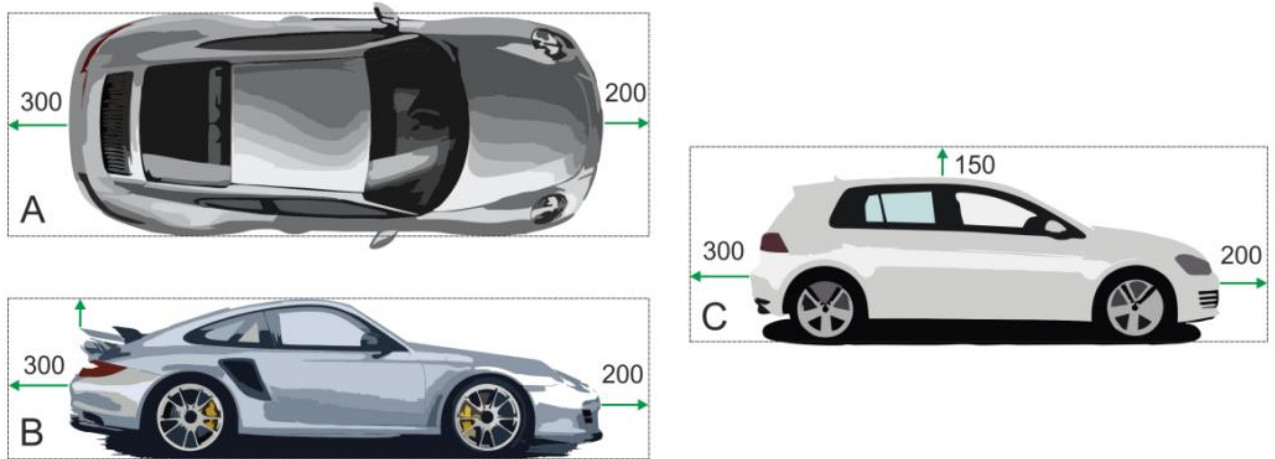
Greitis, km/h	Pasipriešinimo jėga, N	Kėlimo jėga, N	Pasipriešinimo koeficientas $C_D$
90	220,31	-137,37	0,304
110	328,03	-201,35	0,304
130	458,48	-292,61	0,304
150	607,81	-368,39	0,303
170	782,51	-478,43	0,303

Bandymo metu buvo gautos šios pasipriešinimo jėgos automobilio judėjimo kryptį yra pateiktos 1 lentelė, skaičiuojamos keturiais skirtingais oro judėjimo greičiais t.y. 90km/h, 110km/h, 130 km/h, 150km/h ir 170 km/h

#### 4.2. Automobilio aerodinamių savybių gerinimas, techniniai reikalavimai

Pagal 2019m LASF R3000 klasės techninius reikalavimus Aerodinaminiai įrenginiai be apribojimų, tačiau privalo išsitemkti perimetruose nurodytuose paveikslėliuose: A – visiems automobiliams, B – kupė, sedanas, kabrioletas, C – hečbekas, universalas. Matmenys nurodyti milimetrais. Draudžiamos sistemos (mechanizmai), leidžiančios aerodinamių įrenginių reguliavimą važiavimo metu. Automobilio dugno apsaugos – be apribojimų, tačiau privalo išsitemkti perimetruose nurodytuose paveikslėliuose: A – visiems automobiliams, B – kupė, sedanas, kabrioletas, C – hečbekas, universalas. Matmenys nurodyti milimetrais[8].





18 pav. Techniniai reikalavimai aerodinaminių elementų gabaritams[8]

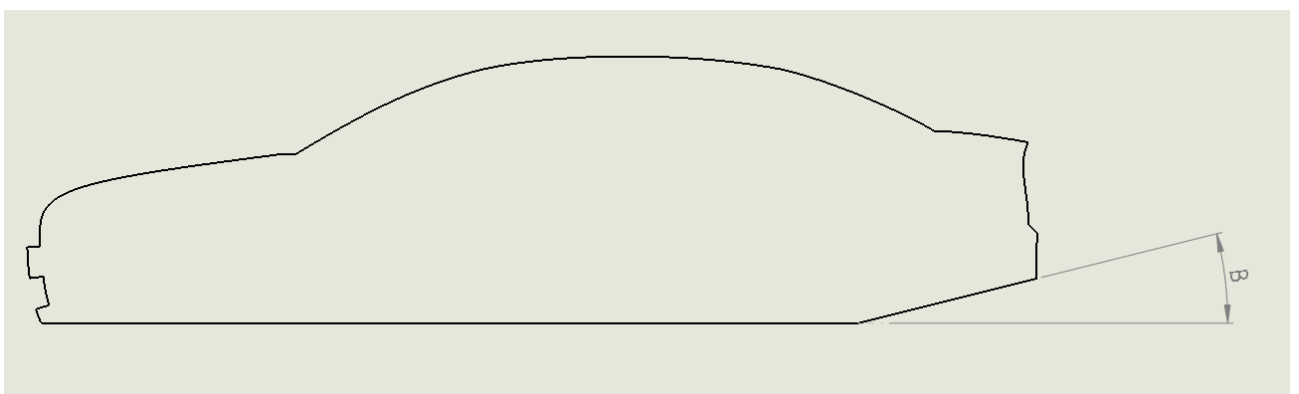
Automobilio minimalus aukštis – automobiliui stovint ant lygios plokštumos, išleidus orą iš vienos pusės ratų, jokie aerodinaminiai įrenginiai bei kėbulo detalės negali siekti plokštumos paviršiaus. Tiriamojo automobilio minimalus leistinas aukštis yra 0,16m.

### 4.3. Difuzoriaus kampo analizė

Difuzorius yra toks aerodinaminis įrenginys, kurio pagrindinis funkcija padidinti oro srauto greitį automobilio dugne. Difuzorius tvirtinamas automobilio galinėje dalyje. Šis įrenginys prailgina oro srauto nukeliaujamą kelią, todėl oro srauto greitis padidėja, slėgis sumažėja.

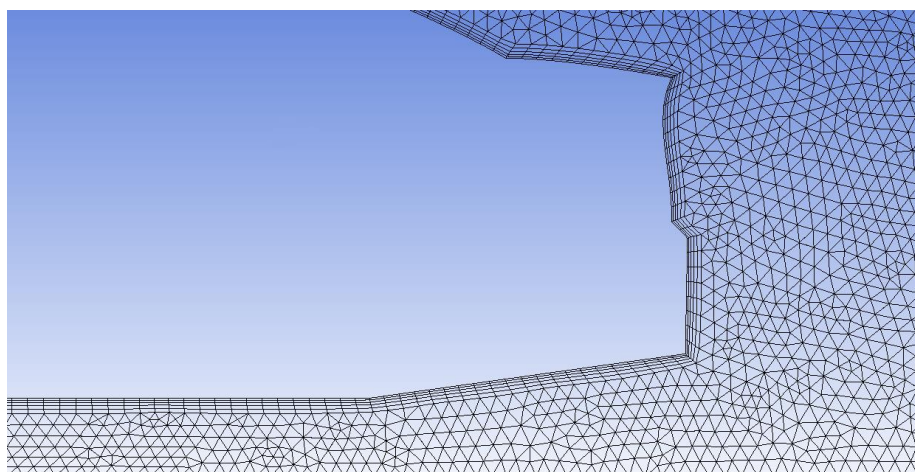
Tiriamame automobilyje maksimalus galimas difuzorius gali būti 645mm ilgio ir 800mm pločio. Optimalų difuzoriaus kampą, skaičiuotas Fluent programa. Siekiant supaprastinti nagrinėjamą modelį, buvo tirtas dvimatis srauto simuliacija. Difuzoriaus formos optimizavimui naudota keturi oro srauto greičiai, 90km/h, 110 km/h, 130km/h, 150 km/h, 170 km/h. Tirta pradėta nuo 14 ° difuzoriaus, paskui kampas mažinamas kas 2 °, tol kol rasime optimaliausią jo kampą.

SolidWorks programoje nubraižyta ši šoninė automobilio projekcija 19 pav.



19. pav. Dvimatis modelis, B difuzoriaus kampas

Fluent programoje dvimatis modelis buvo įdėtas į 20m ilgio ir 6m pločio dėžutę, kur bus sukurtas baigtinių elementų tinklas ir atlikta CFD simuliacija. Baigtinių elementų tinklas pavaizduotas 20 paveikslėlyje. Tinklelį sudaro apie 100 000 elementų.



20 pav. Baigtinis elementų tinklelis

Simuliacijos modelis naudotas iš Australijos LEAP akademinio portalo pamokos „FSAE CFD Tutorial“ [17]

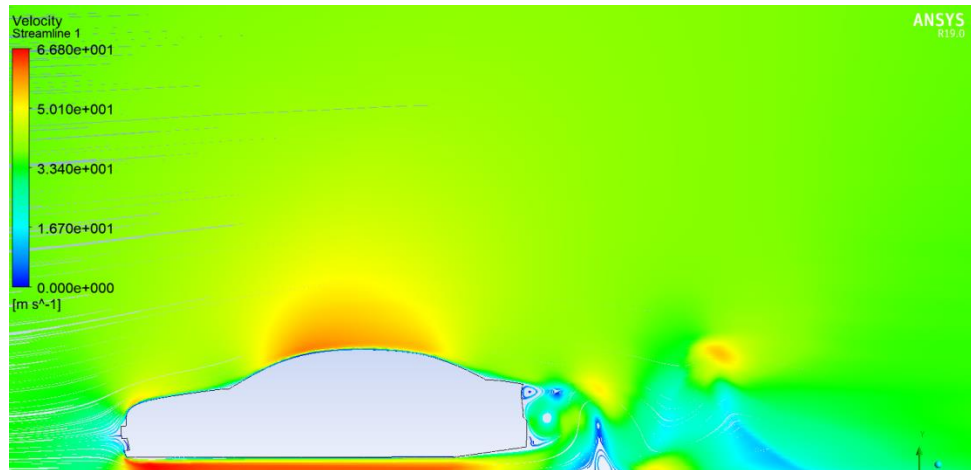
Atlikus skaičiavimus su skirtingais skaičiavimus su skirtingais difuzoriaus kampai gauti rezultatai pateikti 3 lentelėje:

3 lentelė optimalaus difuzoriaus kampo analizė

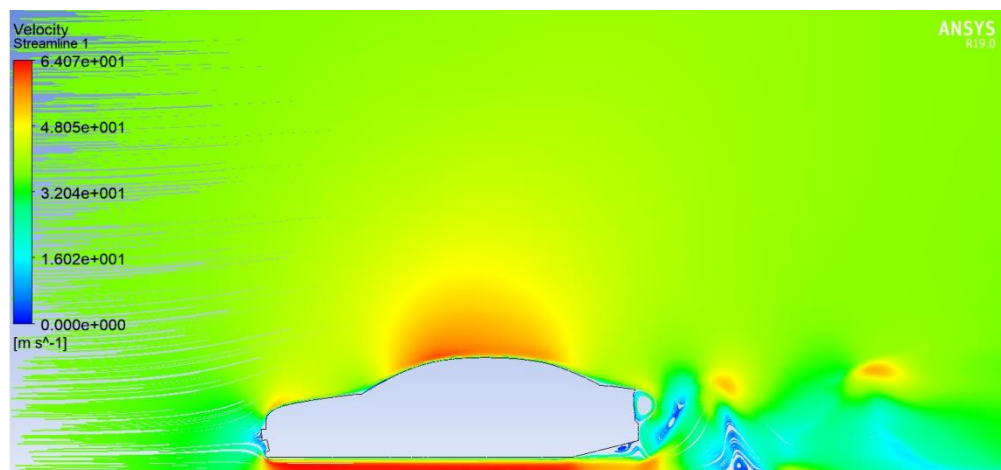
Oro srauto greitis, km/val	90			110			130		
	Pasipriešinimo jėga $F_D$ , N	Kėlimo jėga $F_L$ , N	$F_L / F_D$	Pasipriešinimo jėga $F_D$ , N	Kėlimo jėga $F_L$ , N	$F_L / F_D$	Pasipriešinimo jėga $F_D$ , N	Kėlimo jėga $F_L$ , N	$F_L / F_D$
Gamyklinis	279,51	-378,99	1,36	420,44	-581,24	1,38	594,55	-859,75	1,45
6°	238,71	-1181,61	4,95	340,34	-1698,32	4,99	480,36	-2387,37	4,97
8°	199,19	-1193,03	<b>5,99</b>	295,65	-1765,40	<b>5,97</b>	412,32	-2474,66	<b>6,00</b>
10°	176,67	-975,08	5,52	262,45	-1462,50	5,57	369,19	-2060,25	5,58
12°	195,83	-769,55	3,93	295,31	-1161,06	3,93	414,14	-1645,90	3,97
14°	212,43	-549,55	2,59	322,53	-902,64	2,80	458,66	-1361,56	2,97

Oro srauto greitis, km/val	150			170		
	Pasipriešinimo jėga, N	Kėlimo jėga $F_L$ , N	$F_L / F_D$	Pasipriešinimo jėga, N	Kėlimo jėga $F_L$ , N	$F_L / F_D$
Gamyklinis modelis	793,64	-1184,10	1,49	1022,24	-1535,49	1,50
6°	648,81	-3270,01	5,04	822,34	-4177,51	5,08
8°	548,30	-3320,32	<b>6,06</b>	695,83	-4220,57	<b>6,07</b>
10°	485,61	-2725,85	5,61	625,46	-3512,17	5,62
12°	542,65	-2164,84	3,99	702,59	-2806,86	4,00
14°	691,65	-1863,47	2,69	776,20	-2398,69	3,09

Iš rezultatų matyti, kad mažiausią pasipriešinimą kuria difuzorius su 10 laipsnių kampų, esant šiam kampui pasipriešinimo mažesni 63% nuo gamyklinio modelio. Tačiau, optimaliausias difuzoriaus kampas yra 8 laipsniai. Esant šiam kampui prispaudimo jėgos ir pasipriešinimo jėgos santykis yra didžiausias ~6,06. Toliau kampui didėjant, rezultatai prastėja, pasipriešinimo jėga didėja, o prispaudimo jėga mažėja



21. pav. 8 laipsnių difuzoriaus oro srauto aptekėjimas



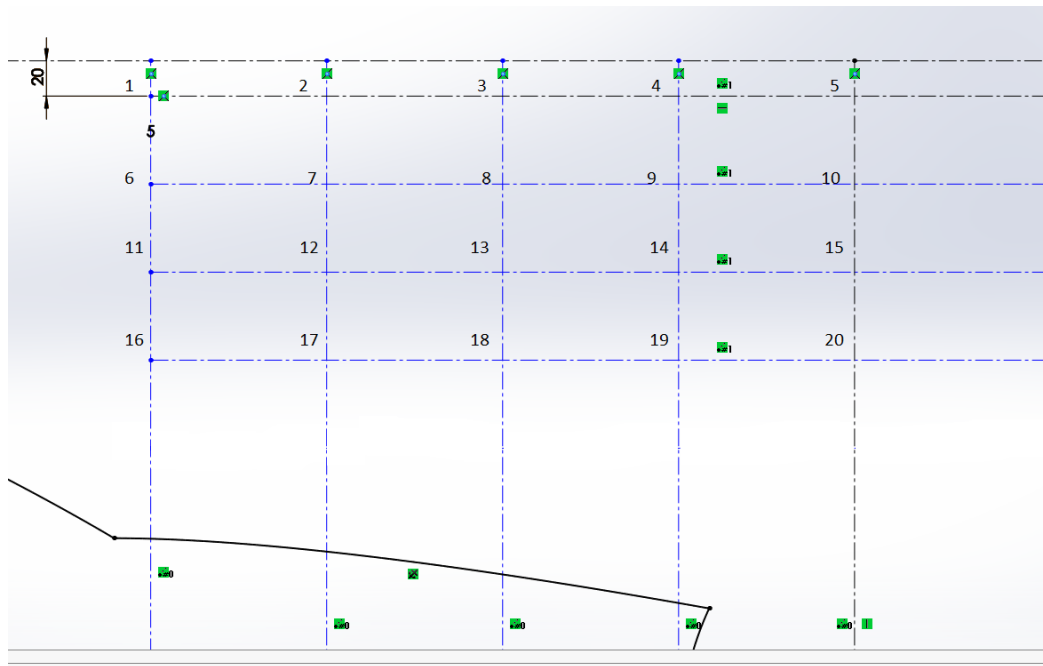
22 pav. 14 laipsnių difuzoriaus oro srauto aptekėjimas

Kaip matome iš pavaizduotų rezultatų, jei difuzoriaus kritinis kampas yra viršijamas, oro srautas jo nebeapteka neatitrūkdamas sklandžiai, jis pradeda atitrūkti nuo paviršiaus, susidaro įvairūs sūkuriai. Toks srautas šiuo atveju yra žalingas, padidėja pasipriešinimo jėga, ir sukuriama ženkliai mažesnė prispaudžiamoji jėga.

#### 4.4. Galinio sparno tvirtinimo vietos parinkimas

Kaip matome iš rezultatų, optimaliausias difuzoriaus kampas yra 8 laipsniai. Esant šiam kampui prispaudimo jėgos ir pasipriešinimo jėgos koeficientas yra didžiausias 6.06.

Norint dar labiau padidinti prispaudimo jėgą naudojami galiniai sparnai. Jie veikia taip pat lėktuvo sparnai, tačiau yra apversti. Vadovaujantis R3000 klasės reglamentu, galinį sparną galima tvirtinti zonoje, kuri matoma paveiksle 23 pav. (tinklelis, kur vieno langelio matmenys 50x100 mm).



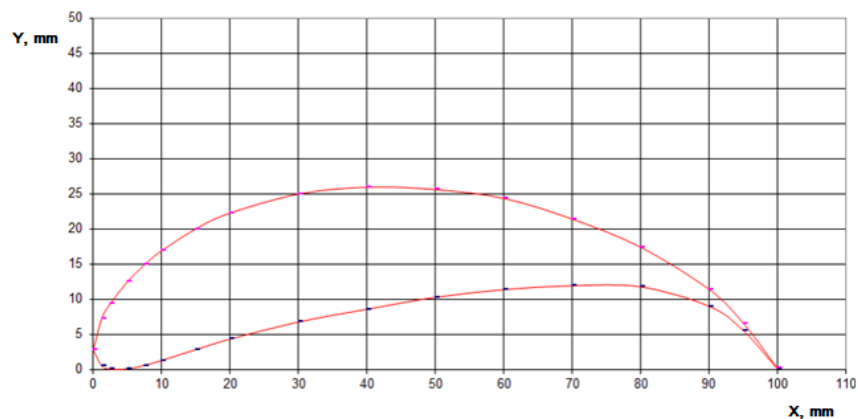
23 pav. galinio sparno tvirtinimo vietai nustatyti tiriamas zona.

Sparno priekinė briauna bus tvirtinama kiekviename pavaizduotame taške  
 Sparno profilis buvo pasirinktas iš 2019 WTCR techninio reglamento 24 pav. Jis lengvai gaunamas rinkoje, patikimai pagamintas, nes yra homologuotas FIA organizacijos.

Sparno duomenys:

- stygos ilgis 250mm
- sparno mostas 1400m
- galinės briaunos storis 2mm

Be 183-176		Ro = 2.69 Xo = 2.69 -Yo = 2.79																	
x %	0	1.25	2.5	5	7.5	10	15	20	30	40	50	60	70	80	90	95	100		
-Yv	2.79	0.53	0.07	0.1	0.62	1.32	2.86	4.35	6.79	8.8	10.02	11.4	11.95	11.8	9.03	5.58	0.1		
-Yo	2.79	7.31	9.4	12.52	14.95	16.94	20.05	22.3	25.01	25.98	25.65	24.39	21.44	17.43	11.43	6.63	0.2		



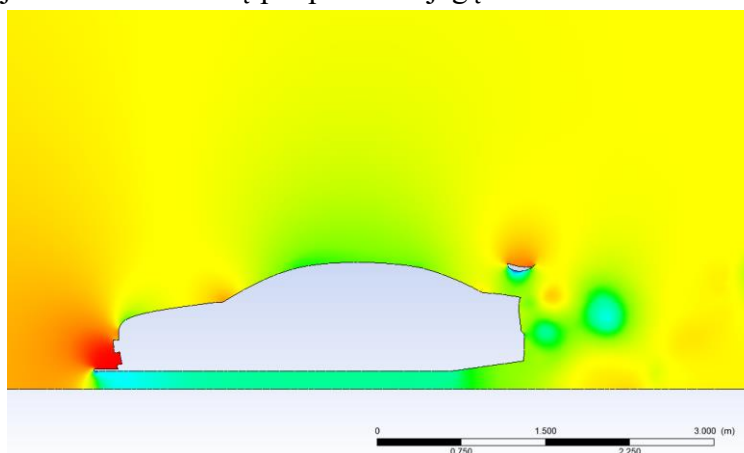
24. pav galinio sparno profilis.[15]

Sparno optimizacijai pasirinktas oro srauto greitis buvo 110 km/h. Simuliacijai buvo naudotas tas pats simuliacijos modelis, ir tokių pat nustatymų baigtinių elementų tinklelis. Gauti rezultatai pateikti 4 lentelėje

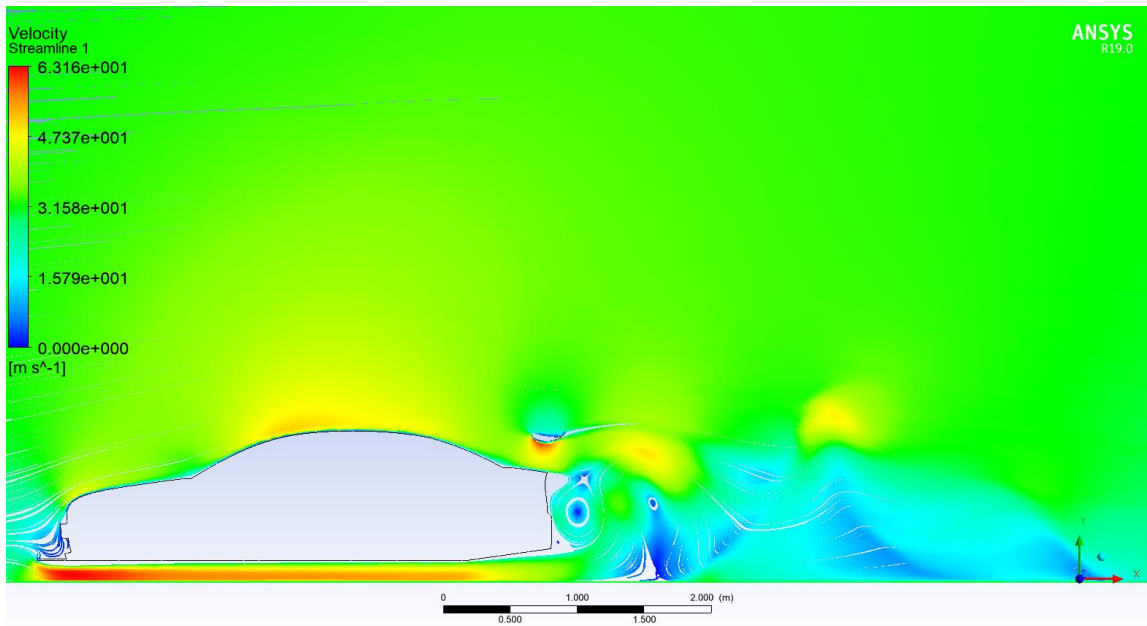
**4 lentelė** galinio sparno tvirtinimo vietos analizė

Galinio sparno tvirtinimo vieta Nr.	Pasipriešinimo jėga, N	Kėlimo jėga, N	Keliamosios jėgos santykis su pasipriešinimo jėga
1	448,17	-3284,76	7,32
2	429,86	-3442,08	8,00
3	495,87	-3713,26	7,48
4	533,68	-3900,2	7,30
5	461,89	-3607,4	7,81
6	402,34	-2791,46	6,93
7	439,22	-3351,63	7,63
8	492,77	-3775,28	7,66
9	506,15	-3911,74	7,72
10	497,70	-3796,19	7,62
11	394,81	-2017,85	5,11
12	437,15	-2849,4	6,51
13	529,79	-4092,47	7,72
14	535,46	-3925,21	7,33
15	477,13	-3698,84	7,75
16	408,90	-2681,49	6,55
17	461,12	-2879,87	6,24
18	415,82	-2965,87	7,13
19	435,67	-3116,82	7,15
20	458,53	-3319,49	7,23

Kaip matome iš gautų rezultatų, didžiausia prispaudimo jėga gaunama tada, kai galinis sparnas tvirtinamas kuo toliau ir kuo aukščiau. 13 sparno vietoje, geriausias prispaudimo jėgos ir pasipriešinimo santykis gautas 2 pozicijoje 25 pav. Galinis sparnas optimaliausiai veikia pritvirtintas kaip galima aukščiau. Iš analizės rezultatų matosi, kad kuo žemesnė ir artimesnė sparno tvirtinimo vieta, tuo jis sukuria mažesnę prispaudimo jėgą



25 pav. 2-os sparno tvirtinimo pozicijos slėgio pasiskirstymas automobiliui judant 110 km/h greičiu



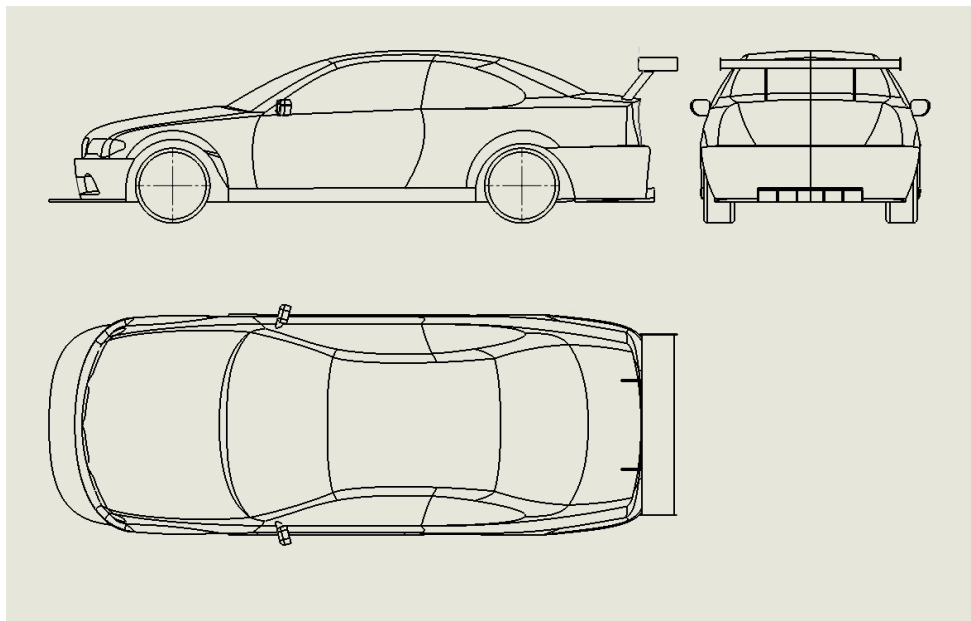
26 pav. 2-os sparno tvirtinimo pozicijos oro srauto aptekėjimas prie 110 km/h

Trimačio modelio analizei naudotas 13, 2, 5 sparno tvirtinimo vietos. Jos buvo atrinktos nes:

- 13 tvirtinimo vieta sukūrė didžiausią prispaudimo jėgą
- 2 tvirtinimo vietoje kėlimo ir pasipriešinimo jėgų santykis buvo didžiausias
- 5 tvirtinimo vietoje kėlimo ir pasipriešinimo jėgų santykis buvo antras pagal dydį

#### 4.5. Trimačio modelio tyrimas

Visiškai ištyrus dvimatį modelį ir suradus optimaliausią galinę sparno poziciją, „Solidworks“ programoje prie senojo trimačio modelio buvo pridėti optimizuoti aerodinaminiai elementai



27 pav. Modernizuotas modelis su 5-asparno tvirtinimo pozicija

Kaip ir dvimačio modelio skaičiavimuose, modelis patalpinamas į 16m ilgio 7m pločio ir 7m aukščio kamerą, kurioje vyks oro srauto skaičiavimai. Buvo atlikti skaičiavimai esant šiems oro srauto greičiams 90km/h, 110km/h 130km/h, 150km/h, 170 km/h. Programos skaičiavimų modelis naudotas tas pats, kaip ir prieš tai. Baigtinį elementų tinklą sudaro apie 500 000 elementų. Gauti rezultatai pateikti 5 lentelėje:

5 lentelė CFD konfigūruotų automobilio analizė

Oro srauto greitis	90 km/h				110 km/h				
	Galinio sparno tvirtinimo vieta Nr.	Pasipriešinimo jėga $F_D$ , N	Kėlimo jėga $F_L$ , N	$F_L/F_D$	Slėgioko koordinatė x, mm	Pasipriešinimo jėga, N	Kėlimo jėga $F_L$ , N	$F_L/F_D$	Slėgioko koordinatė x, mm
	13	331,24	-472,86	-1,43	2940	494,85	-702,80	-1,42	2750
	2	306,17	-485,15	-1,58	3150	455,51	-722,46	-1,59	2940
	5	337,97	-557,94	-1,65	2970	504,46	-829,81	-1,64	2990
Gamyklinis modelis		220,31	-137,37	-0,62	2490	328,03	-201,35	-0,61	2510

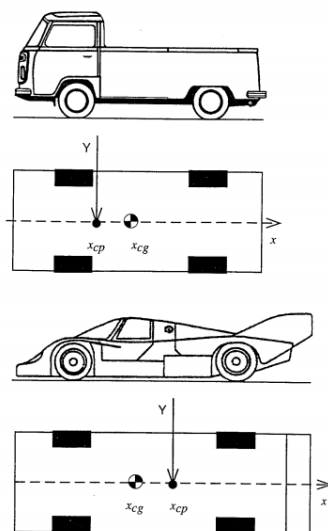
Oro srauto greitis	130 km/h				150 km/h				
	Galinio sparno tvirtinimo vieta Nr.	Pasipriešinimo jėga $F_D$ , N	Kėlimo jėga $F_L$ , N	$F_L/F_D$	Slėgioko koordinatė x, mm	Pasipriešinimo jėga $F_D$ , N	Kėlimo jėga $F_L$ , N	$F_L/F_D$	Slėgioko koordinatė x, mm
	13	691,97	-995,60	-1,44	2670	919,87	-1329,12	-1,44	2680
	2	639,06	-1012,74	-1,58	3230	851,21	-1356,35	-1,59	2580
	5	706,76	-1144,11	-1,62	2950	937,74	-1523,75	-1,62	2850
Gamyklinis modelis		458,48	-292,61	-0,64	2580	607,81	-368,39	-0,61	2480

Galinio sparno tvirtinimo vieta Nr.	170 km/h			
	Pasipriešinimo jėga, N	Kėlimo jėga $F_L$ , N	$F_L/F_D$	Slėgioko koordinatė x, mm
13	1187,93	1718,93	-1,45	2730
2	1093,10	1748,06	-1,60	3170
5	1203,59	1958,66	-1,63	2810
Gamyklinis modelis	782,51	-478,43	-0,61	2530



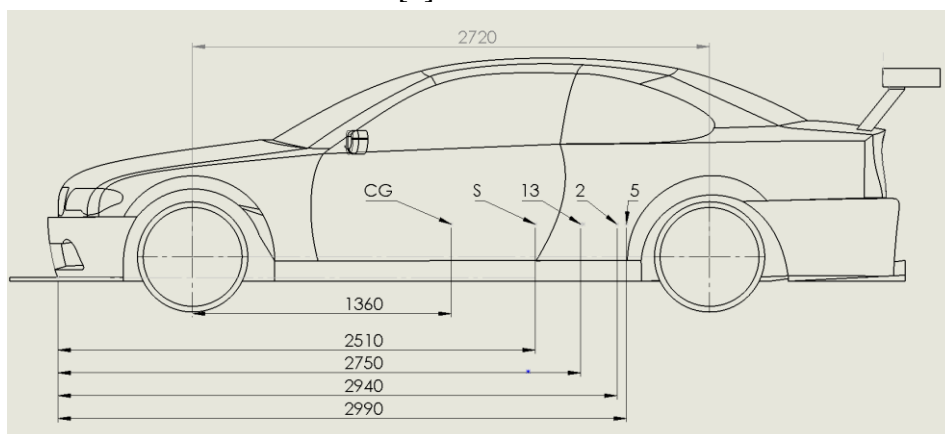
Atlikus modernizuotų modelių trimatę CFD analizę iš gautų rezultatų matome, kad geriausia tvirtinimo pozicija yra 5. Pritvirtinus galinį sparną šioje pozicijoje prispaudimo jėga buvo gauta didžiausia visais tirtais greičiais. Taip pat santykis tarp prispaudimo jėgos ir pasipriešinimo jėgos irgi buvo didžiausia

Trimatėje analizėje dar buvo apskaičiuota ir slėgio centro koordinatė. Slėgio centro koordinatė tai toks taškas, kuriame veikia visos aerodinaminės jėgos.



28 pav. Slėgio centro koordinatė vieta kroviniame ir sportiniame automobilyje[3]

Šiuo tiriamu atveju pasipriešinimo jėga ir kėlimo jėga veikė būtent šiame taške vietoje. Norint, kad automobilis būtų aerodinamiškai stabilus(tai galioja ir lėktuvams), reikia kad slėgio centro taškas būtų už automobilio masės centro koordinatės[3].



29 pav. Slėgio centro koordinatė

30 pav. Vaizduoja, jog kuo didesnis masės centro atstumas nuo slėgio centro, kuris yra link automobilio galo, tuo aerodinamiškai stabilesnis automobilis [3]. Atsižvelgus ne tik į aerodinaminę pusę, slėgio centras neturėtų pasislinkti toliau nei galinė automobilio ašis, nes tada atsirastų sukimo momentas, kuris keltų automobilio priekinę dalį. Taip pat būtina atsižvelgti ir tai, kad prispaudimo jėga nevienodai spaudžia priekinius ir galinius ratus, todėl reikia skirtingai sureguliuoti priekinę ir galinę automobilių dalis[3].



Iš gautų rezultatų matome, kad visuose atvejuose tiriamo modelio slėgio centras yra už automobilio masės centro 29 pav.

Pagal 1 ir 3 formules galime apskaičiuoti  $C_L$  ir  $C_D$  koeficientus. Kėlimo jėgos koeficiento charakteringas plotas lygus  $7,84 m^2$ , pasipriešinimo jėgos -  $1,896 m^2$ . Rezultatai pateikti lentelėse:

**6 lentelė** koeficiento  $C_D$  apskaičiavimas

$C_D$ koeficiento reikšmės					
<b>Galinio sparno tvirtinimo vieta Nr.</b>	<b>90km/h</b>	<b>110km/h</b>	<b>130km/h</b>	<b>150km/h</b>	<b>170km/h</b>
<b>13</b>	0,458	0,458	0,458	0,458	0,460
<b>2</b>	0,423	0,421	0,423	0,424	0,423
<b>5</b>	0,467	0,467	0,468	0,467	0,466
<b>Gamyklinis</b>	0,304	0,303	0,304	0,302	0,303

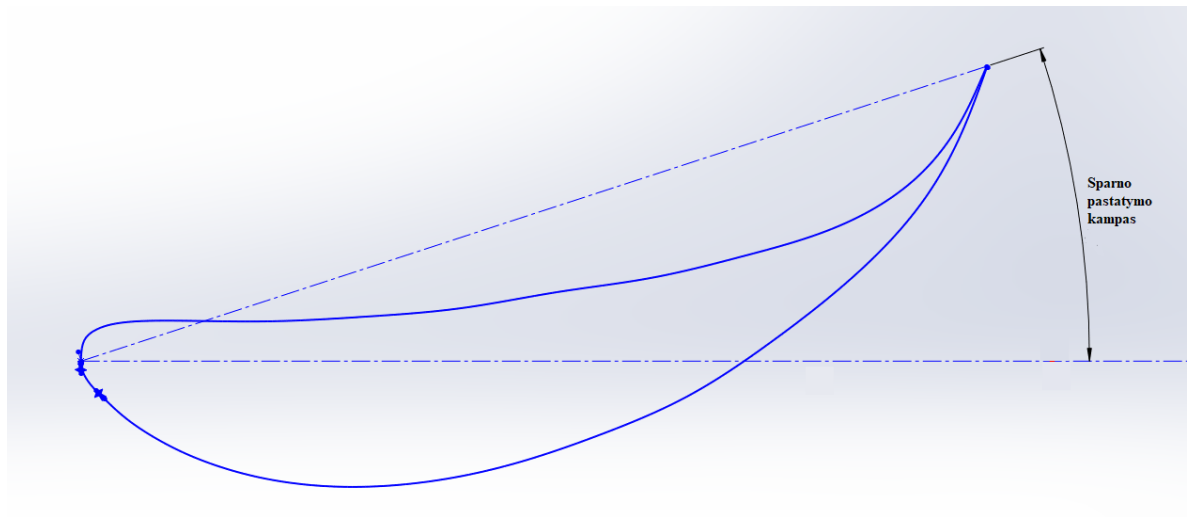
**7 lentelė** koeficiento  $C_L$  apskaičiavimas

$C_L$ koeficiento reikšmės					
<b>Galinio sparno tvirtinimo vieta Nr.</b>	<b>90 km/h</b>	<b>110km/h</b>	<b>130km/h</b>	<b>150km/h</b>	<b>170km/h</b>
<b>13</b>	-0,158	-0,157	-0,159	-0,160	-0,161
<b>2</b>	-0,162	-0,161	-0,162	-0,163	-0,163
<b>5</b>	-0,186	-0,185	-0,183	-0,183	-0,183
<b>Gamyklinis</b>	-0,045	-0,045	-0,046	-0,044	-0,044

Kaip matome iš gautų pasipriešinimo ir kėlimo jėgos koeficientų(6-7 lentelės) geriausia modifikacija yra 5, nes jos kėlimo jėgos koeficientas yra mažiausias, t.y. kad automobilis yra nekeltas nuo kelio dangos, o prie jos spaudžiamas. Lyginant gamyklinio modelio aerodinaminių jėgų koeficientus, matoma, kad pasipriešinimo jėgos koeficientas yra mažesnis nei modelio papildyto su aerodinaminiais elementais. Aerodinaminiai elementai prideda aerodinaminį pasipriešinimą, tačiau aerodinaminių elementų įtaka prispaudimo jėgai yra žymiai didesnė nei pasipriešinimo jėgai. Modelio, su papildomais aerodinaminiais elementais, pasipriešinimo jėgos koeficientas yra didesnis ~54% nei gamyklinio modelio, tačiau prispaudimo jėgos koeficientas didesnis net 4 kartus, kas užtikrina didesnę sukibimą su keliu.

#### **4.6. Sparno pastatymo kampo įtaka aerodinaminėms jėgoms**

Toliau nagrinėjama galinio sparno pastatymo kampo įtaka aerodinaminio pasipriešinimo ir kėlimo jėgoms. Kaip išsiaiškinome 5.4 skyriuje, geriausia sparno tvirtinimo pozicija yra 5. Toliau analizuojamas pilnas automobilio modelis su visais prieš tai tirtais aerodinaminiais elementais, keičiamas tik sparno pastatymo kampas, kas 2 laipsnius 30 pav..Simuliacijos modelis ir kiti nustatymai identiški kaip ir prieš tai, simuliacijos oro srauto greitis 110 km/h.



30 pav. Sparno pastatymo kampas

Gauti rezultatai pateikti 8 lentelėje:

### 8 lentelė Sparno pastatymo kampo analizė

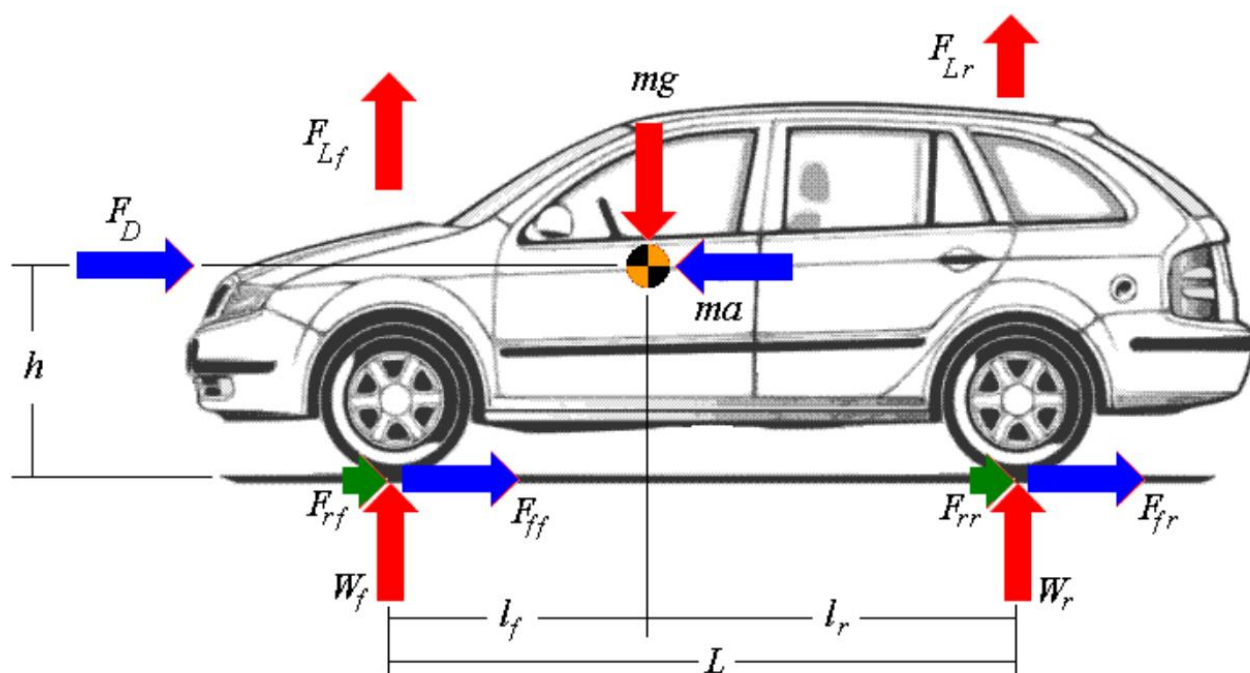
Oro srauto greitis 110km/h							
Sparno pastatymo kampas,	Pasipriešinimo jėga $F_D$ , N	Kėlimo jėga $F_L$ , N	Slėgio centro koordinatė x, mm	$F_L / F_D$	$C_D$	$C_L$	
2°	497,62	-816,68	2930	-1,641	0,461	-0,182	
4°	519,48	-886,97	2940	-1,707	0,481	-0,198	
6°	510,65	-850,42	2780	-1,665	0,473	-0,190	
8°	537,53	-893,74	2760	-1,662	0,497	-0,200	
10°	548,09	-918,99	3350	-1,676	0,507	-0,205	
12°	551,98	-965,86	2840	-1,749	0,511	-0,216	
14°	558,13	-913,36	2870	-1,636	0,516	-0,204	
16°	570,64	-953,8	2620	-1,671	0,528	-0,213	
18°	566,79	-986,34	2990	-1,740	0,524	-0,220	
20°	566,36	-960,23	2940	-1,695	0,524	-0,214	
22°	573,11	-952,76	2470	-1,662	0,530	-0,213	
24°	579,41	-927,09	2700	-1,600	0,536	-0,207	
26°	578,36	-888,44	2940	-1,536	0,535	-0,198	
28°	592,75	-860,4	3260	-1,451	0,548	-0,192	
30°	592,21	-860,4	3260	-1,452	0,548	-0,192	

Remiantis gautais rezultatais, sparno pastatymo kampui didėjant, nuo 2° iki 18° gaunama vis didesnė prispaudimo jėga, kol pastatymo kampas pasiekia 18°, paskui prispaudimo jėga ima mažėti. Pasipriešinimo jėga didėja kol sparno pastatymo kampas pasiekia 28°, nuo šio kampo, bendras pasipriešinimas nekinta. Didžiausią prispaudimo jėgą sukuria sparnas, su 18° pastatymo kampu, prispaudimo jėga lygi 986,23 N.

## 5. Aerodinamių savybių įtaka dinaminėms savybėms

### 5.1. Stabdymas

Buvo palyginta gamyklinio automobilio ir aerodinamiškai pagerintu modeliu stabdymo kelią.



31 pav. Automobilį veikiančios jėgos stabdant[9]

Paveiksle 31 sužymėtos visos automobilį veikiančios jėgos. Visos automobilį veikiančios jėgos horizontalioje ašyje:[9]

$$F_f = F_{ff} + F_{fr} = \mu F_v \quad (7)$$

$$F_r = F_{rf} + F_{rr} = f_r F_v; \quad (8)$$

$$F_v = mg - F_L = \left(1 - \frac{F_L}{mg}\right) mg; \quad (9)$$

Kadangi automobilis stabdomas abejomis ašimis, didžiausia stabdymo jėga bus lygi trinties jėgai  $F_f$ . Susumavus visas jėgas x ašyje gaunama ir išreiškus pagreitį gaunama:[9]

$$a = (\mu + f_r)g + \frac{0.5\rho}{m} [C_D A_P - (\mu + f_r) C_L A_H] v^2; \quad (10)$$

Čia:  $m$  - automobilio masė,  $\mu$  - padangos trinties koeficientas (1,3),  $f_r$  - automobilio padangos riedėjimo trinties koeficientas,  $g$  - laisvo kritimo pagreitis,  $F_r$  - riedėjimo trinties jėga,  $F_D$  - oro pasipriešinimo jėga,  $F_L$  - kėlimo jėga,  $F_v$  - sunkio jėga,  $A_P$  - automobilio vidinio plotas  $1,89 \text{ m}^2$ ,  $A_H$  - automobilio viršutinės projekcijos plotas  $7,84 \text{ m}^2$ ,

Funkcija 10 apibrėžia maksimalų stabdymo pagreitį. Žinome, kad stabdymo pagreitis priklauso nuo greičio, kuris stabdant mažėja. Todėl norint apskaičiuoti stabdymo atstumą reikia išspręsti diferencinę lygtį:[9]

$$u = \frac{ds}{dt}; \quad (11)$$

$$a = \frac{du}{dt}; \quad (12)$$

Eliminavus dt gauname:[9]

$$ds = \frac{udu}{a}; \quad (13)$$

Integravę lygtį gauname:[9]

$$\int_{s=0}^d ds = \int_{u=v}^0 \frac{udu}{a}; \quad (14)$$

$$d = \int_{u=v}^0 \frac{udu}{a}; \quad (15)$$

Įsivedame papildomus koeficientus:

$$K_t = (\mu + f_r)g; \quad (16)$$

$$K_a = \frac{0.5\rho}{m} [C_D A_P - (\mu + f_r)C_L A_H]; \quad (17)$$

Gaunama, kad:

$$a = K_t + K_a u^2; \quad (18)$$

$$da = 2K_a u du; \quad (19)$$

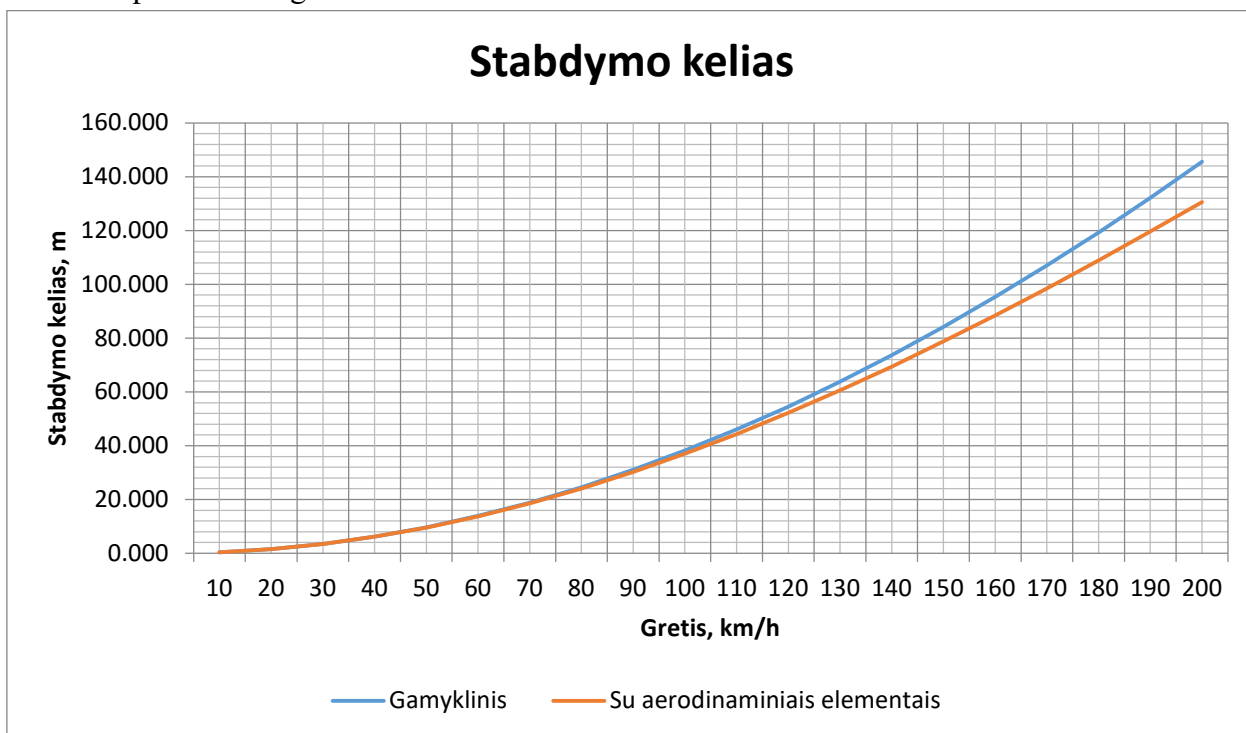
$$d = \frac{1}{2K_a} \int_{a=K_t+K_a(v)^2}^{K_t+K_a(0)^2} \frac{da}{a}; \quad (20)$$

$$d = \frac{1}{2K_a} \ln(K_t + K_a v^2) - \frac{1}{2K_a} \ln(K_t); \quad (21)$$

$$d = \frac{1}{2K_a} \ln\left(1 + \frac{K_a}{K_t} v^2\right); \quad (22)$$

Stabdymo keliasįvertintas gamykliniam modeliui ir aerodinaminiais elementais apkrautui modeliui(5 galinio sparno tvirtinimo vieta, su sparno atakos kampų 18°, 8° laipsniu difuzoriumi ir su priekine lūpa). Gauti rezultatai pateikti 32 pav.

Rezultataipavaizduoti grafiškai:

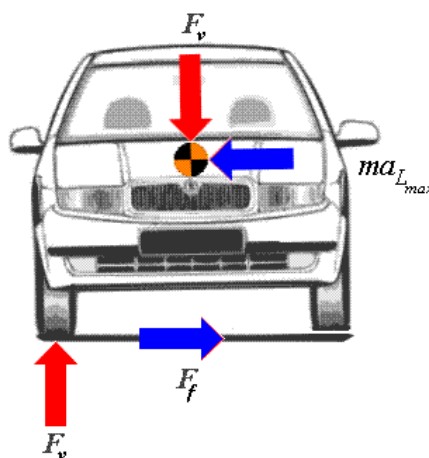


32 pav. stabdymo kelio grafikas

Iš gautų rezultatų matoma, kad aerodinaminės jėgos turi įtakos stabdymo keliui tada, kai stabdoma nuo 100 km/h greičio. Stabdant nuo 100 iki 0 km/h, stabdymo kelias sutrumpėjo 1,18 m. Toliau didėjant greičiui, didėja ir stabdymo kelio skirtumas. Automobiliui stabdant nuo 200 km/h aerodinamiškai modernizuotas modelis stabdymo kelias sutrumpėjo 15,054 m.

## 5.2. Maksimalus šoninis pagreitis

Automobiliui judant posūkyje, jį veikia išcentrinė jėga. Toliau paaiškinama kaip pakeistos aerodinaminės savybės veikia automobilį judant kreive.[9] 33 pav. Pateiktos veikiančios jėgos:



33 pav. automobilį veikiančios jėgos judant apskritimu[9]

Atramos reakcijos jėga, veikianti visus automobilio padangas išreikšta sekančia lygtimi:

$$F_v = (mg - F_L); \quad (23)$$

Trinties jėga veikianti automobilio padangas:

$$F_f = \mu F_v; \quad (24)$$

Automobiliui judant apskritimu, jam nepraslystant, jį veikia tik tai išcentrinė jėga, kurią galima išreikšti:

$$ma_{L_{\max}} = F_f = \mu F_v = \mu(mg - F_L) = \mu(mg - F_L) = \mu(mg - \rho C_L A_H v^2); \quad (34)$$

Išreiškiame maksimalų

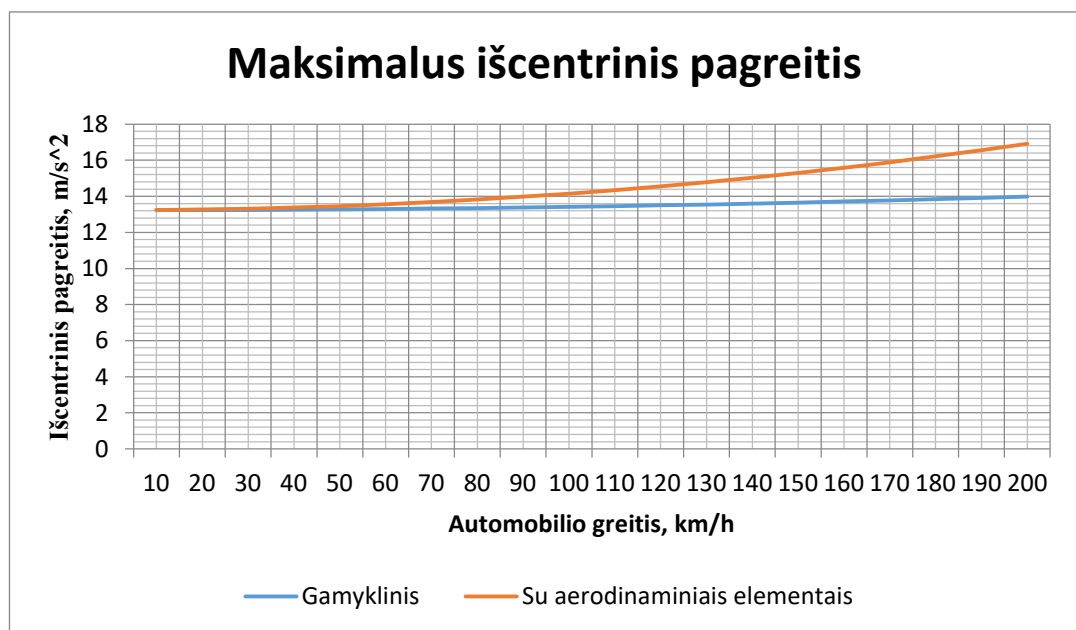
$$a_{L_{\max}} = \mu g \left(1 - \frac{F_L}{mg}\right) = \mu g \left(1 - 0.5 \frac{\rho C_L A_H v^2}{mg}\right); \quad (25)$$

Čia:

$a_{L_{\max}}$  - maksimalus išcentrinis pagreitis

Viską sustačius gaunami tokie maksimalūs pagreičiai:

Rezultatai pavaizduoti grafiškai 34 pav.:



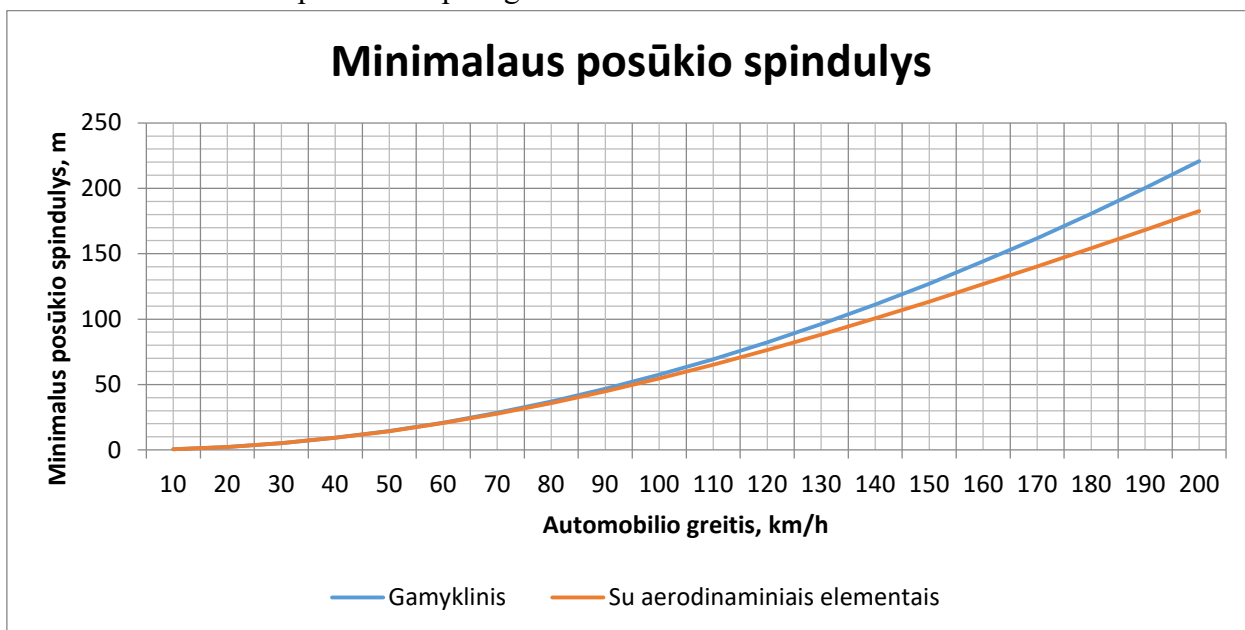
34 pav. maksimalus išcentrinio pagreičio grafikas

Iš 34 pav. Pavaizduoto grafiko, galima matyti, kad didesnę išcentrinį pagreitį gali pasiekti modernizuotas automobilio modelis. Ryškesnis skirtumas matomas, kai automobilio greitis pasiekia 80 km/h greitį gamyklinis modelis tada pasiekia  $13,35 \text{ m/s}^2$ , kai modernizuotas modelis  $13,82 \text{ m/s}^2$

Apskaičiavus pagreitį, posūkio spindulius galima apskaičiuoti pagal formulę:

$$r = \frac{v^2}{a}; \quad (26)$$

Skaičiavimo rezultatai pateikti 35 pav. grafiškai:



35 pav. automobilio įveikiamas minimalaus posūkio spindulio grafikas

Iš gautų rezultatų matyti, kad pridėti aerodinaminiai padidina didžiausią išcentrinį pagreitį, kas leidžia automobiliui greičiau važiuoti posūkiuose. Gamykliniui modeliui judant 100 km/h greičiu minimalus posūkio spindulys yra 57,50 m, modernizuoti automobiliui (papildytu priekine lūpa, difuzoriumi ir galiniu sparnu) judant 100 km/h greičiu gali įveikti 54,52 m spindulio posūkį. Judant greičiau minimalaus posūkio spindulio skirtumas vis didėja, judant 200 km/h gamyklinis modelis gali įveikti 220,75 m spindulio posūkį, kai modernizuotas modelis 182,50 m

## Išvados

1. SolidWorks programoje nubraižytas trimatis BMW e46 Coupe modelis.
2. ANSYS Fluent programa išnagrinėta gamyklinio modelio BMW e46 Coupe aerodinaminė analizė, nustatytos pasipriešinimo ir prispaudimo jėgos. Automobiliui judant 110 km/h greičiu pasipriešinimo jėga lygi 328,03 N, prispaudimo jėga–201,35 N.
3. Nustatytas optimalus difuzoriaus atakos kampas, ištirtas automobilis pagrindiniais oro srauto greičiais, geriausias difuzoriaus kampas 8 laipsniai.
4. Atlikus dvimatę analizę, rastos trys optimaliausios galinio sparno tvirtinimo pozicijos. Oro srauto greičiui judant 110 km/h 13 pozicija sukurdavo 4092,47 N prispaudimo jėgą, 2 pozicija– 3713,26N, o 5 pozicija– 3607,4N.
5. Gamyklinis automobilio modelis buvo papildytas (optimizuotais) aerodinaminiais elementais ir nustatytos pasipriešinimo bei prispaudimo jėgos. Modernizuotui automobiliui judant 110 km/h greičiu prispaudimo jėga lygi 986,34 N, pasipriešinimo jėga– 566,79N.
6. Išanalizavus aerodinaminių jėgų poveikį automobilio stabdymui, nustatyta, kad aerodinaminiais elementais papildytas automobilio stabdymo kelias nuo 100 km/h iki 0 km/h buvo 1,18m trumpesnis. Tokius skirtumus lėmė aerodinaminiai elementai, kurie sukuria prispaudimo jėgą.
7. Atlikus aerodinaminių jėgų poveikio analizę, automobilio dinamikai judant posūkyje, įvertinti maksimalūs išcentriniai pagreičiai ir minimalūs posūkio spinduliai, palyginus rezultatus, automobilis su papildomai aerodinaminiais elementais gali išvystyti maksimalų  $16,91 m/s^2$  išcentrinį pagreitį, kai standartinis automobilis gali pasiekti  $13,98 m/s^2$  pagreitį. Automobiliui judant 100 km/h greičiu gamyklinis automobilis gali įveikti minimalų 57,50 m spindulio posūkį, kai modernizuotas automobilis– 54,52 m.



## Informacijos šaltinių sąrašas

1. Eduardas Lesauskas, Skrydžio principai. VGTU leidykla TECHNIKA 2008 m 182 p. ISBN 978-9955-28-255-6
2. Joseph Katz, Automotive aerodynamics. Wiley; 1 edition ,2016m,608p. ISBN: 1119185726
3. Joseph Katz Race car aerodynamics. Bentley publishers 1998m, 280p ISBN: 0-8376-0142-8
4. Simon McBeath Competition car aerodynamics. Veloce Publishing; 3 edition 2015m , 320p ISBN:978-1-787110-86-1
5. Joseph Katz 2006m „Aerodynamics of Race Cars“prieiga per internetą:<http://www.fem.unicamp.br/~phoenics/EM974/PROJETOS/Temas%20Projetos/Cars%20aerodynamics/annurev.fluid.38.050304.092016.pdf>
6. Internetinė svetainė, [žiūrėta 2019-04-26]: prieiga per internetą: <https://ganeshvisavale.wordpress.com/2012/12/07/understanding-cfd-simulation-process-with-examples/>
7. Internetinė svetainė, [žiūrėta 2019-04-26]: prieiga per internetą: [http://www.mayr.in.tum.de/konferenzen/Jass05/courses/2/Zuo/Zuo\\_paper.doc](http://www.mayr.in.tum.de/konferenzen/Jass05/courses/2/Zuo/Zuo_paper.doc)
8. Internetinė svetainė, [žiūrėta 2019-04-26]: prieiga per internetą: <https://www.lasf.lt/wp-content/uploads/2013/11/Techniniai-reikalavimai.pdf>
9. Internetinė svetainė, [žiūrėta 2019-04-26]: prieiga per internetą: <http://hpwizard.com/index.html>
10. Internetinė svetainė, [žiūrėta 2019-04-26]: prieiga per internetą: <https://www.sgcarmart.com/news/gallery.php?AID=270&CUR=2&TYPE=advice>
11. Internetinė svetainė, [žiūrėta 2019-04-26]: prieiga per internetą: [https://hips.hearstapps.com/hmg-prod/amv-prod-cad-assets/images/media/493547/the-physics-of-diffusers-inline-photo-549975-s-original.jpg?resize=768:\\*](https://hips.hearstapps.com/hmg-prod/amv-prod-cad-assets/images/media/493547/the-physics-of-diffusers-inline-photo-549975-s-original.jpg?resize=768:*)
12. Internetinė svetainė, [žiūrėta 2019-04-26]: prieiga per internetą: <http://www.seriouswheels.com/pics-2011/bc/2011-BMW-1-Series-M-Coupe-MotoGP-Safety-Car-Rear-Wing-1280x960.jpg>
13. Internetinė svetainė, [žiūrėta 2019-04-26]: prieiga per internetą: [http://www.formula1-dictionary.net/Images/diffuser\\_enzo.gif](http://www.formula1-dictionary.net/Images/diffuser_enzo.gif)
14. Internetinė svetainė, [žiūrėta 2019-04-26]: prieiga per internetą: [http://www.formula1-dictionary.net/Images/splitter\\_nascar.jpg](http://www.formula1-dictionary.net/Images/splitter_nascar.jpg)
15. Internetinė svetainė, [žiūrėta 2019-04-26]: prieiga per internetą: [https://www.fia.com/sites/default/files/190312\\_2019\\_wtcr\\_technical\\_regulations\\_final.pdf](https://www.fia.com/sites/default/files/190312_2019_wtcr_technical_regulations_final.pdf)
16. Joseph Katz 2002 m „Aerodynamic Effects of Indy Car Components“prieiga per internetą:[https://www.researchgate.net/publication/288381096\\_Aerodynamic\\_Effects\\_of\\_Indy\\_Car\\_Components](https://www.researchgate.net/publication/288381096_Aerodynamic_Effects_of_Indy_Car_Components)
17. Internetinė svetainė [žiūrėta 2019-02-20] prieiga per internetą: <https://uni.leapaust.com.au/course/view.php?id=132>
18. Jason Moffat 2016 m „Aerodynamic Vehicle Design and Analysis“ [žiūrėta 2019-05-02]:prieiga per internetą:[https://www.researchgate.net/publication/310019902\\_Aerodynamic\\_Vehicle\\_Design\\_and\\_Analysis](https://www.researchgate.net/publication/310019902_Aerodynamic_Vehicle_Design_and_Analysis)
19. Ram Bansal 2013 m „Drag and lift reduction on passenger car with rear spoiler" [žiūrėta 2019-05-02]:prieiga per internetą:[https://www.researchgate.net/publication/284720454\\_DRAG\\_AND\\_LIFT\\_REDUCTION\\_ON\\_PASSENGER\\_CAR\\_WITH\\_REAR\\_SPOILER](https://www.researchgate.net/publication/284720454_DRAG_AND_LIFT_REDUCTION_ON_PASSENGER_CAR_WITH_REAR_SPOILER)

## Priedai

### 1 priedas. Lentelės

#### 9 lentelė stabdymo kelio analizės rezultatai

Stabdymo kelias, m										
Greitis, km/h	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
<b>Gamyklinis modelis</b>	0,38	1,55	3,48	6,19	9,66	13,89	18,86	24,58	31,02	38,17
<b>Modifikuotas modelis</b>	0,38	1,55	3,47	6,16	9,58	13,72	18,57	24,08	30,23	36,99

2

Stabdymo kelias, m										
Greitis, km/h	110	120	130	140	150	160	170	180	190	200
<b>Gamyklinis modelis</b>	46,03	54,57	63,78	73,65	84,15	95,28	107,00	119,30	132,16	145,56
<b>Modifikuotas modelis</b>	44,33	52,20	60,59	69,45	78,74	88,43	98,48	108,87	119,55	130,50

#### 10 lentelė išcentrinio pagreičio analizė

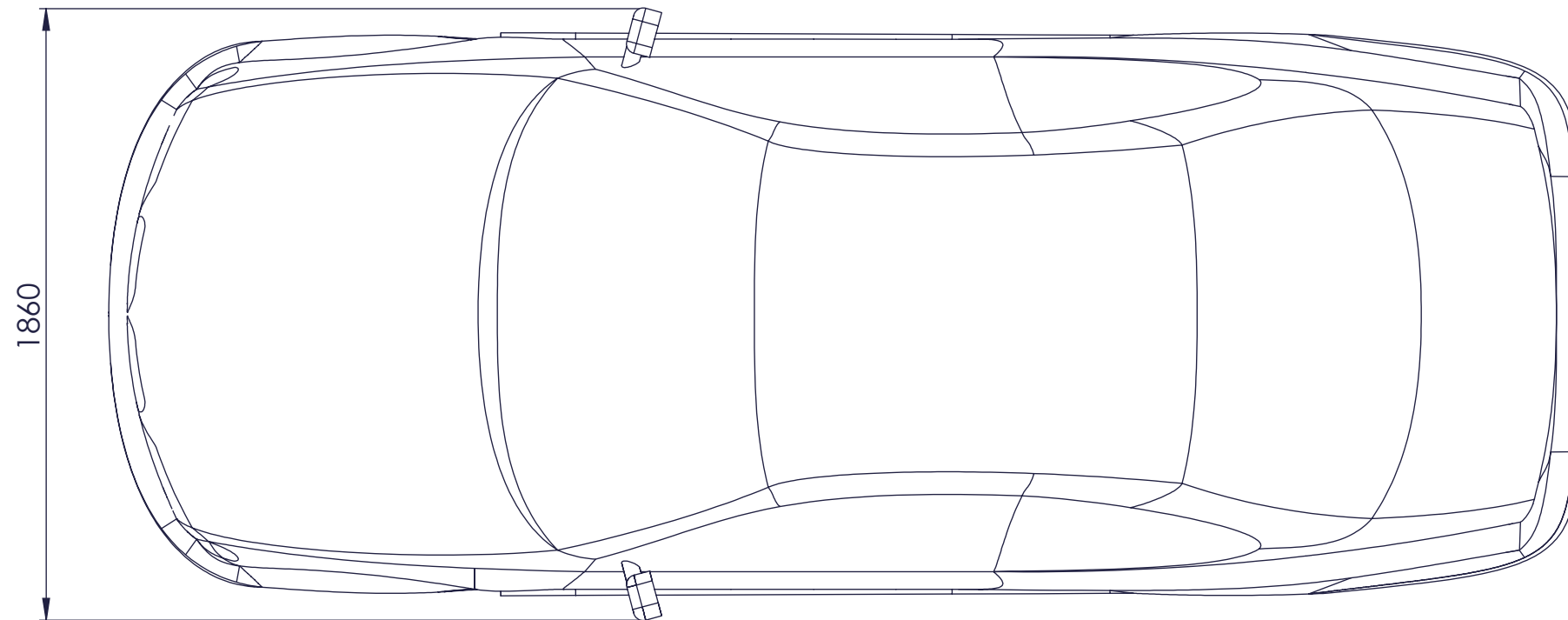
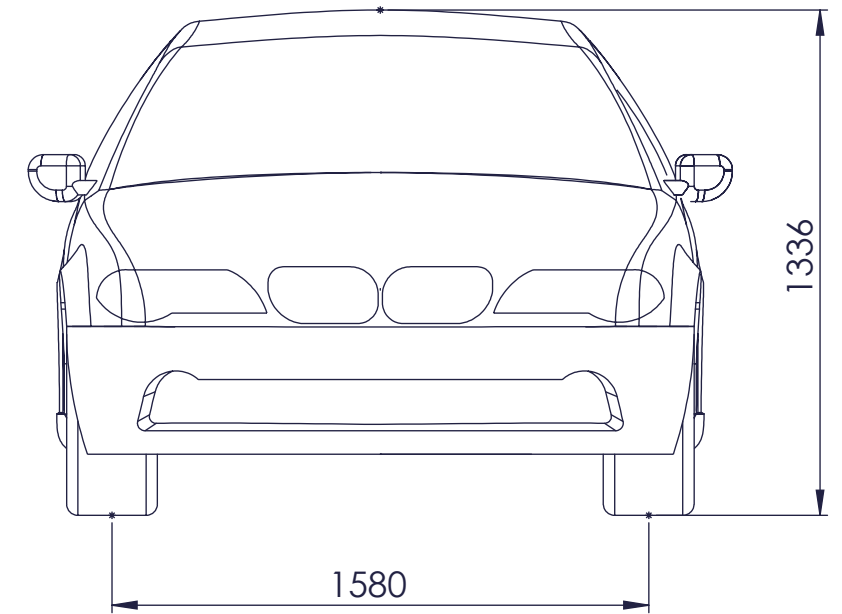
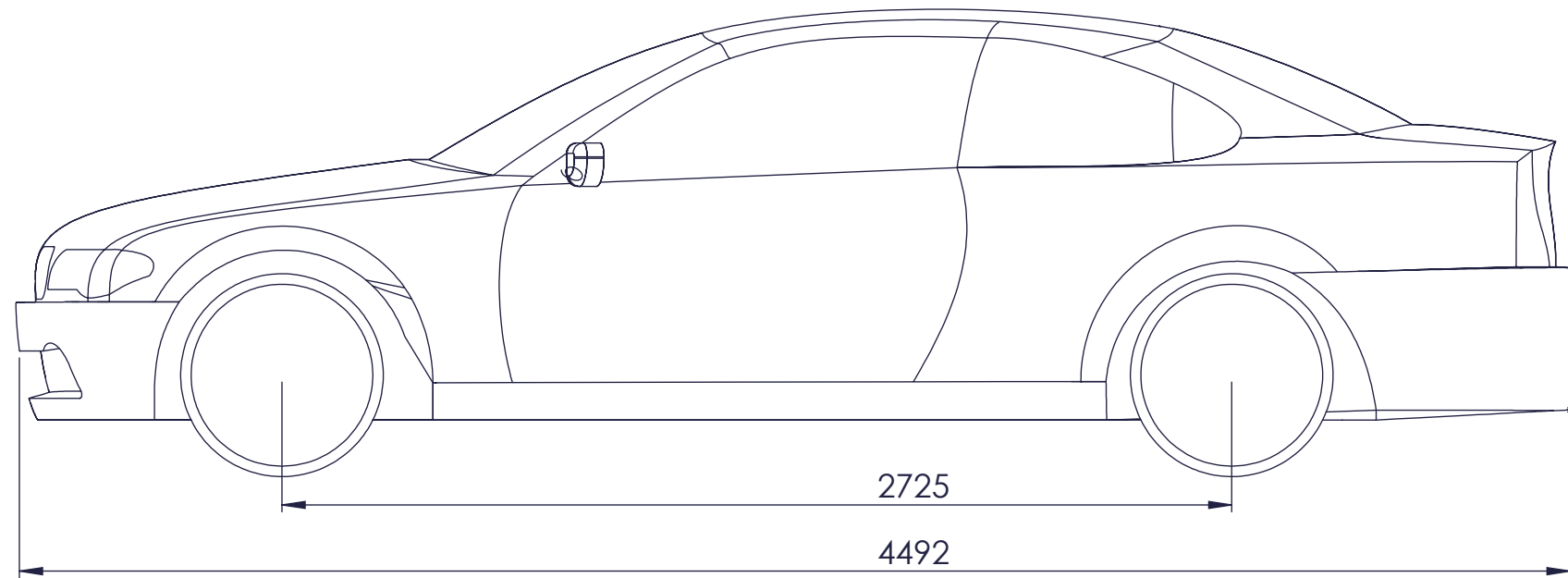
Maksimalus išcentrinis pagreitis										
Greitis, km/h	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
<b>Gamyklinis modelis</b>	13,23	13,24	13,25	13,26	13,28	13,30	13,32	13,35	13,38	13,42
<b>Modifikuotas modelis</b>	13,24	13,27	13,31	13,38	13,46	13,56	13,68	13,82	13,98	14,15

Maksimalus išcentrinis pagreitis										
Greitis, km/h	110	120	130	140	150	160	170	180	190	200
<b>Gamyklinis modelis</b>	13,46	13,50	13,55	13,60	13,65	13,71	13,77	13,84	13,91	13,98
<b>Modifikuotas modelis</b>	14,34	14,56	14,79	15,03	15,30	15,59	15,89	16,21	16,55	16,91

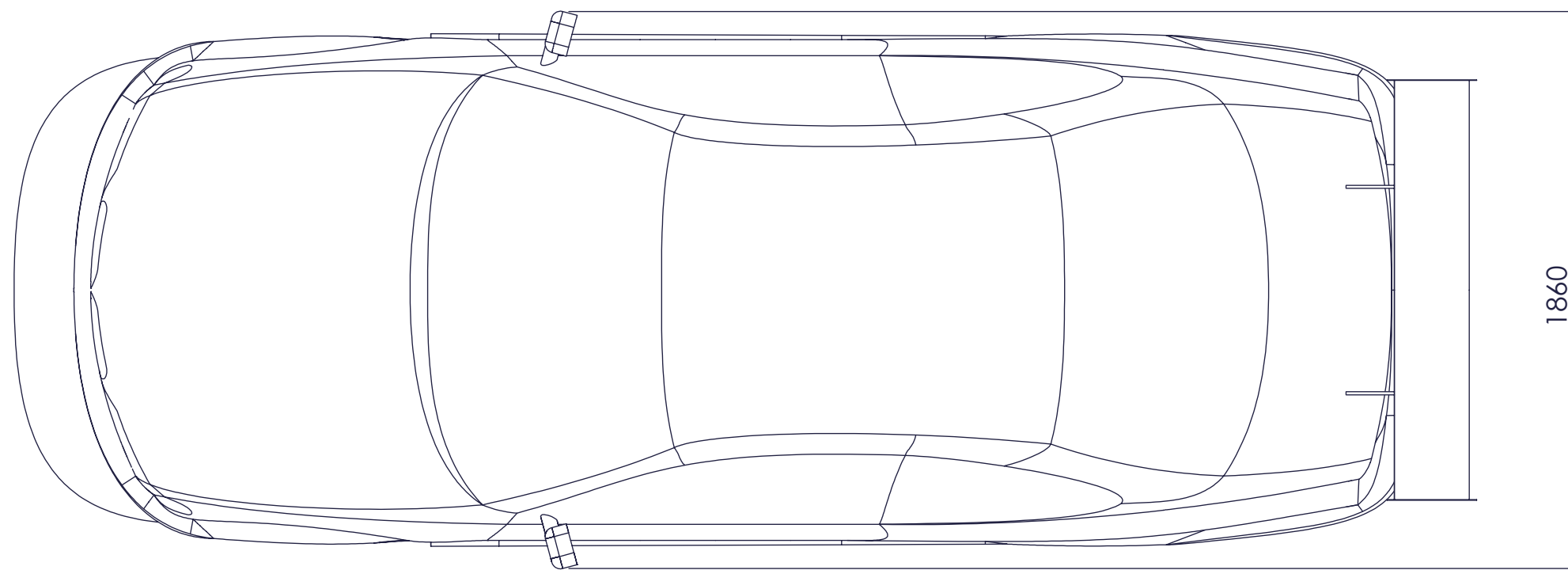
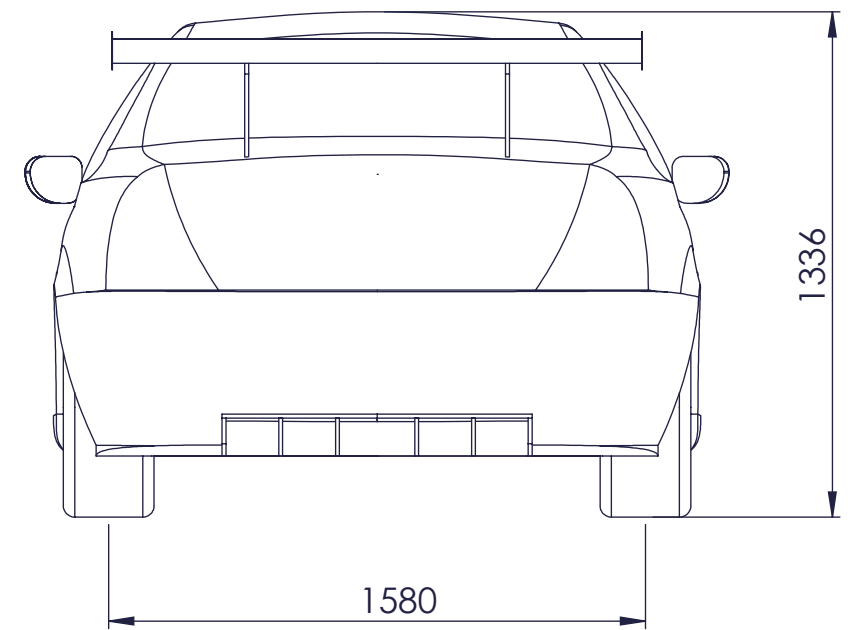
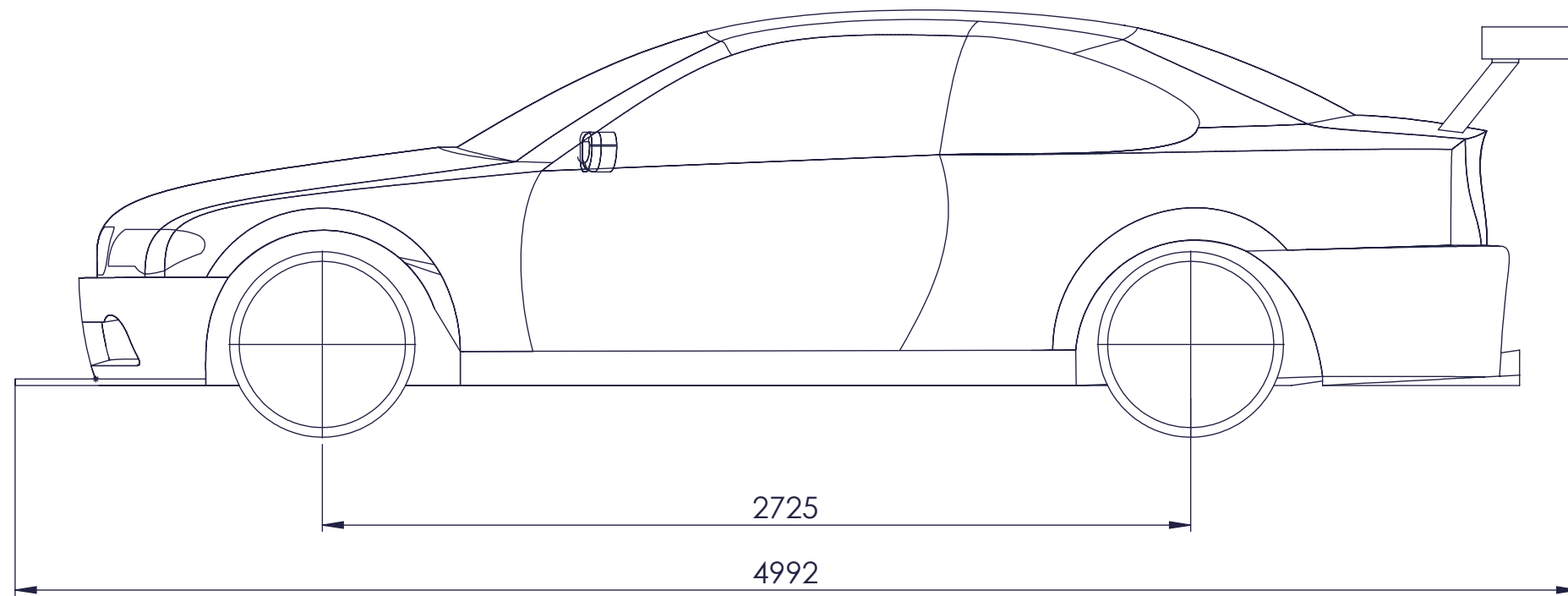
#### 11 lentelė minimalus posūkio spindulys

Minimalus posūkio spindulys, m										
Greitis, km/h	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
<b>Gamyklinė</b>	0,58	2,33	5,24	9,31	14,52	20,88	28,38	36,99	46,70	57,50
<b>Modifikuotas</b>	0,58	2,32	5,21	9,22	14,33	20,48	27,63	35,73	44,72	54,52

Minimalus posūkio spindulys, m										
Greitis, km/h	110	120	130	140	150	160	170	180	190	200
<b>Gamyklinė</b>	69,38	82,30	96,25	111,22	127,16	144,07	161,91	180,65	200,27	220,75
<b>Modifikuota</b>	65,09	76,34	88,19	100,59	113,46	126,73	140,33	154,20	168,28	182,50



		Byla, laikmena	Papildoma informacija	Medžiaga	Mastelis
Padalinys TIK	Techninis vadovas		Dokumento tipas Bendro vaizdo brezinys		Dokumento statusas
Organizacija KTU	Ruošė T.Čeida	Pavadinimas Gamyklinis modelis		Revisija	
	Tvirtino J.jablonskyte	Laida A	Data 5/21/2019	Kalba Lt	Lapas 1/1



		Byla, laikmena	Papildoma informacija	Medžiaga	Mastelis
Padalinys TIK	Techninis vadovas		Dokumento tipas Bendro vaizdo brezinys		Dokumento statusas
Organizacija KTU	Ruošė T.Čeida	Pavadinimas Modernizuotas modelis		<small>Keimuo</small>	
	Tvirtino J.jablonskyte	<small>Laida</small> A	<small>Data</small> 5/21/2019	<small>Kalba</small> Lt	<small>Lapas</small> 1/1