



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

# **Sportinio automobilio galinio aptako aerodinaminė analizė**

Baigiamasis magistro projektas

---

**Justinas Valčiukas**  
Projekto autorius

**Prof. dr. Valdas Eidukynas**  
Vadovas

---

**Kaunas, 2024**



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

# **Sportinio automobilio galinio aptako aerodinaminė analizė**

Baigiamasis magistro projektas  
Mechanikos inžinerija (6211EX009)

---

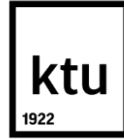
**Justinas Valčiukas**  
Projekto autorius

**Prof. dr. Valdas Eidukynas**  
Vadovas

**Prof. dr. Linas Paukštaitis**  
Recenzentas

---

**Kaunas, 2024**



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

## **Sportinio automobilio galinio aptako aerodinaminė analizė**

### **Akademinio sąžiningumo deklaracija**

Patvirtinu, kad:

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

Justinas Valčiukas

*Patvirtinta elektroniniu būdu*



Kauno technologijos universitetas  
Mechanikos inžinerijos ir dizaino fakultetas

## Baigiamojo magistro projekto užduotis

Studentui(-ei) – Justinas Valčiukas

### 1. Projekto tema

Sportinio automobilio galinio aptako aerodinaminė analizė

*(Lietuvių kalba)*

Aerodynamical Analysis of Sports Car Rear Wing

*(Anglų kalba)*

### 2. Projekto tikslas ir uždaviniai

Tikslas: ištirti sportinio automobilio galinio aptako aerodinaminis savybes ir jų įtaką automobilio dinaminėms savybėms.

Uždaviniai:

1. atlikti literatūros apžvalgą apie sportinių automobilių aerodinamiką, galinio aptako tipus ir jų įtaką dinaminėms savybėms;
2. suprojektuoti galinio aptako modelio konfigūraciją, pagrįstą moksliniais tyrimais ir skaičiavimais;
3. ištirti, kaip įvairūs galinio aptako dizainai veikia „Mazda MX-5 NB“ automobilio dinamiką, įvertinant jų įtaką automobilio pasipriešinimo ir kėlimo koeficientams;
4. pateikti rekomendacijas, pagrįstas atliktų tyrimų rezultatais, galutiniam aptako naudotojui padėsiančias pasirinkti tinkamiausią atakos kampą.

### 3. Pagrindiniai reikalavimai ir sąlygos

Skaitinę analizę atlikti naudojant sertifikuotą programinę įrangą.

Tyrime gauti duomenys turi būti pritaikomi automobilių sporte.

Suprojektuotas aptakas turi padidinti automobilių veikiančią aerodinaminę spaudžiančiąją jėgą.

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

Netaikomas

Projekto autorius

Justinas Valčiukas

*(Vardas, Pavardė)*

*(Parašas)*

*(Data)*

Projekto vadovas

Valdas Eidukynas

*(Vardas, Pavardė)*

*(Parašas)*

*(Data)*

Krypties studijų  
programų vadovas

Kęstutis Pilkauskas

*(Vardas, Pavardė)*

*(Parašas)*

*(Data)*

Justinas Valčiukas. Sportinio automobilio galinio aptako aerodinaminė analizė. Magistro baigiamasis projektas / vadovas Valdas Eidukynas; Kauno technologijos universitetas, Mechanikos inžinerijos ir dizaino fakultetas.

Studijų kryptis ir sritis (studijų krypčių grupė): Mechanikos inžinerija, Technologiniai mokslai.

Reikšminiai žodžiai: aptakas, sparnas, aerodinamika, SolidWorks, CFD.

Kaunas, 2024. 61 p.

## Santrauka

Jau gana seniai automobilių gamintojai spėjo pastebėti aerodinamikos daromą įtaką automobilių dinaminėms savybėms. Aerodinaminius pranašumus kiek įmanoma stengiamasi išnaudoti ir automobilių sporte. Prasidėjus automobilių sporto vystymuisi, iš pradžių buvo bandoma sportinius automobilius daryti kuo aptakesnius, panašesnius į lašo formą. Tačiau vėliau buvo pastebėti ir spaudžiamosios jėgos teikiami privalumai, leidžiantys automobiliui greičiau įveikti trasos posūkius. Dar kiek vėliau šie atradimai pradėti taikyti ir kasdieniniuose automobiliuose. Šiame darbe bus apžvelgiamas vienas iš pagrindinių aerodinaminių įrenginių sportiniame automobilyje – galinis aptakas.

Tyrimo objektas – sportinio automobilio galinis aptakas.

Tyrimo tikslas – atlikti sportinio automobilio galinio aptako aerodinaminę analizę.

Tyrimo metu pasirinkta vadovautis 2024 metų „Time Attack“ lenktynių Lietuvos čempionato „Time Attack Pro“ klasės techniniame reglamente galiniam aptakui taikomais reikalavimais. Šiame darbe apžvelgiami skirtingi galinių aptakų tipai, išsiaiškinta, kad pjedestalinio tipo galinis aptakas gali padaryti didžiausią įtaką automobilio dinamikai, todėl šiame tyrime pasirinkta analizuoti būtent šio tipo galinį aptaką.

Teorinėje darbo dalyje apžvelgiami moksliniai straipsniai apie galinio aptako sparno profilio formos ir atakos kampo įtaką aptako efektyvumui.

Projektinėje dalyje, naudojantis informacijos šaltinių analize, sudaryta aptako konfigūracija. Aptako gamybai parinkta naudoti 1660 mm pločio apverstą MSHD sparno profilį, kurio stygos ilgis yra 200 mm, tvirtinimo būdas – iš viršaus. Taip pat apskaičiuotas antsparnių plotas.

Tiriamąjoje dalyje apskaičiuota, kad sparnas bus naudojamas Reynoldso skaičiui esant intervale nuo 277500 iki 695000. Tada su „SolidWorks Flow Simulation“ programine įranga CFD modeliavimo būdu parinkta tinkamiausia aptako tvirtinimo pozicija ant „Mazda MX-5 NB“ automobilio. Taip pat ištirta sparno atakos kampo įtaka automobilio pasipriešinimo ir kėlimo koeficientams intervale nuo  $-5^\circ$  iki  $60^\circ$ . Nustatytas mažiausias kėlimo koeficientas sparno atakos kampui esant  $40^\circ$  padėtyje.

Pagal gautus rezultatus sudaryta rekomendacija galutiniam sparno naudotojui. Taip pat rekomenduojama su galiniu aptaku naudoti papildomus aerodinaminius elementus ir automobilio priekinėje dalyje.

Valčiukas Justinas. Aerodynamical Analysis of Sports Car Rear Wing. Master's Final Project / supervisor Valdas Eidukynas; The Faculty of Mechanical Engineering and Design, Kaunas University of Technology.

Study field and area (study field group): Mechanical Engineering, Technological Sciences.

Keywords: spoiler, wing, aerodynamics, SolidWorks, CFD.

Kaunas, 2024. 61 p.

## Summary

It's been a long time since car manufacturers have noticed the impact of aerodynamics on the dynamic performance of cars. Motorsport also tries to exploit aerodynamic advantages as much as possible. When motorsport started to develop, there was an initial attempt to make sports cars as sleek as possible, more like a drop shape. However, the advantages of downforce were later discovered, allowing the car to be quicker around corners. Later still, these discoveries were applied to everyday cars. In this paper we will look at one of the main aerodynamic devices in a sports car, the rear wing / spoiler.

The object of the study – the rear wing / spoiler of a sports car

The aim of the study – to perform an aerodynamic analysis of the rear fairing of a sports car

The study was based on the requirements for the rear wing of the Time Attack Pro class of the 2024 Time Attack Lithuanian Championship. This paper reviews the different types of rear wings and spoilers, it has been found that the pedestal type of rear wing can have the greatest influence on the dynamics of the car, and this is the type of rear wing has been chosen for analysis in this study.

The theoretical part of the thesis reviews scientific papers on the influence of the shape of the airfoil and the angle of attack on the performance of the wing.

In the design part, the wing configuration is developed using an analysis of information sources. The wing is manufactured using a 1660 mm wide upside down MSHD airfoil with a chord length of 200 mm and a top-mounting method. Also, the area of the endplates has been calculated.

In the investigation part, it is calculated that the wing will be used for a Reynolds number in the range 277500 to 695000. Then, the most suitable position for the wing on the Mazda MX-5 NB was selected by CFD simulation using SolidWorks Flow Simulation software. The effect of the wing angle of attack on the drag and lift coefficients of the vehicle in the range of  $-5^{\circ}$  to  $60^{\circ}$  was also investigated. The minimum lift coefficient for the wing angle of attack at  $40^{\circ}$  was determined.

Based on the results obtained, a recommendation to the end user of the wing was made. It is also recommended that additional aerodynamic elements be used with the rear fairing and in the front part of the vehicle.

## Turinys

|   |           |
|---|-----------|
| <b>Lentelių sąrašas .....</b>   | <b>8</b>  |
| <b>Paveikslų sąrašas .....</b>  | <b>9</b>  |
| <b>Santrumpų ir terminų sąrašas .....</b>                                     | <b>10</b> |
| <b>Įvadas.....</b>  | <b>11</b> |
| <b>1. Automobilių galinio aptako analogų analizė.....</b>                     | <b>13</b> |
| 1.1. Galinio aptako tipai .....   | 13        |
| 1.2. Analogų analizės išvada .....  | 22        |
| <b>2. Mokslinių tyrimų apie galinį aptaką analizė.....</b>                    | <b>23</b> |
| 2.1. Atakos kampas.....   | 23        |
| 2.2. Sparno profilis .....  | 23        |
| 2.3. Santykis tarp spaudžiamosios jėgos ir aerodinaminio pasipriešinimo ..... | 24        |
| 2.4. Mokslinių tyrimų analizės išvada .....                                   | 24        |
| <b>3. Galinio aptako projektavimas .....</b>                                  | <b>25</b> |
| 3.1. Galiniam aptakui keliami apribojimai .....                               | 25        |
| 3.1.1. Galinio aptako apribojimų svarba .....                                 | 25        |
| 3.2. Sparno profilio parinkimas .....   | 26        |
| 3.3. Tvirtinimo būdo parinkimas .....   | 28        |
| 3.3.1. Spaudžiančioji jėga.....   | 28        |
| 3.3.2. Pasipriešinimo jėga.....   | 31        |
| 3.4. Antsparnių ploto radimas .....   | 32        |
| 3.5. Sparno sukimosi taško radimas .....                                      | 33        |
| <b>4. Tyrimo metodika .....</b>   | <b>35</b> |
| 4.1. Tiriamas modelis .....   | 35        |
| 4.2. Tiriamosios aplinkos duomenys .....                                      | 36        |
| 4.3. Skaičiavimai .....   | 37        |
| 4.3.1. $C_D$ ir $C_L$ koeficientai .....                                      | 37        |
| 4.3.2. Reynoldso skaičius .....   | 37        |
| 4.4. Rezultatų interpretavimas .....  | 38        |
| <b>5. CFD tyrimo eiga .....</b>   | <b>40</b> |
| 5.1. Be galinio aptako .....  | 40        |
| 5.2. Pozicijos sparno tvirtinimui parinkimas .....                            | 42        |
| 5.3. Antsparnių nauda.....  | 48        |
| 5.4. Atakos kampo parinkimas .....  | 49        |
| <b>6. Atakos kampo nustatymo rekomendacijos galutiniam vartotojui.....</b>    | <b>52</b> |
| <b>Išvados .....</b>  | <b>54</b> |
| <b>Literatūros sąrašas .....</b>  | <b>55</b> |
| <b>Priedai.....</b>   | <b>59</b> |
| 1 priedas. MSHD sparno profilio koordinatės [45] .....                        | 59        |

## Lentelių sąrašas

|  |    |
|--|----|
| <b>1 lentelė.</b> Sparno profilių specifikačiai duomenys [23] .....            | 26 |
| <b>2 lentelė.</b> Automobilio $C_L$ sparnui esant skirtingose pozicijose.....  | 45 |
| <b>3 lentelė.</b> Automobilio $C_D$ sparnui esant skirtingose pozicijose ..... | 46 |



## Paveikslų sąrašas

|  |    |
|--|----|
| <b>1.1 pav.</b> Pjėdestalinio tipo aptakas, tvirtinamas iš viršaus [2] .....                                 | 13 |
| <b>1.2 pav.</b> Pjėdestalinio tipo aptakas, tvirtinamas prie automobilio kėbulo [3] .....                    | 14 |
| <b>1.3 pav.</b> „Lamborghini Countach“ galinis aptakas [5] .....   | 15 |
| <b>1.4 pav.</b> „Volkswagen Corrado“ aktyvaus tipo galinis aptakas [7] .....                                 | 16 |
| <b>1.5 pav.</b> „Tesla Model X“ aktyvaus tipo galinis aptakas [8] .....                                      | 17 |
| <b>1.6 pav.</b> „Ford GT“ aktyvaus tipo galinis aptakas aerodinaminio stabdžio pozicijoje [10] .....         | 18 |
| <b>1.7 pav.</b> „Zenvo TSR-S“ aktyvaus tipo galinis aptakas posūkyje [11] .....                              | 18 |
| <b>1.8 pav.</b> Mercedes AMG 2022 sezono F1 bolidas su aktyvuota DRS [15] .....                              | 19 |
| <b>1.9 pav.</b> „Volkswagen Golf R mk6“ su galiniu stogo linijos aptaku [16] .....                           | 20 |
| <b>1.10 pav.</b> Juostinis aptakas [1] .....   | 21 |
| <b>2.1 pav.</b> Srauto greičio, slėgio ir linijų evoliucijos skaliariniai žemėlapiai [19] .....              | 23 |
| <b>3.1 pav.</b> Perimetrai aerodinaminiams elementams [21] .....   | 25 |
| <b>3.2 pav.</b> MSHD sparno profilis [24] .....  | 27 |
| <b>3.3 pav.</b> Sparno tvirtinimas iš viršaus [25] .....   | 28 |
| <b>3.4 pav.</b> Sparno tvirtinimas iš apačios [25] .....   | 28 |
| <b>3.5 pav.</b> Kėlimo koeficientų palyginimas, tvirtinant sparną skirtingais būdais [26] .....              | 29 |
| <b>3.6 pav.</b> Kėlimo koeficientų vizualizacija apatinėje sparno pusėje su tvirtinimu iš apačios [26] ...   | 29 |
| <b>3.7 pav.</b> Kėlimo koeficientų vizualizacija apatinėje sparno pusėje su tvirtinimu iš viršaus [26] ..... | 30 |
| <b>3.8 pav.</b> Kėlimo koeficientų vizualizacija viršutinėje sparno pusėje su tvirtinimu iš apačios [26] ..  | 30 |
| <b>3.9 pav.</b> Kėlimo koeficientų vizualizacija viršutinėje sparno pusėje su tvirtinimu iš viršaus [26] ..  | 30 |
| <b>4.1 pav.</b> Blake'o McConahy sukurtas Mazda MX-5 modelis [33] .....                                      | 35 |
| <b>4.2 pav.</b> CFD tyrimo aplinkos sąlygos .....  | 36 |
| <b>4.3 pav.</b> Skaičiuojamosios erdvės tinklelis ir kraštinės sąlygos .....                                 | 36 |
| <b>4.4 pav.</b> Mazda MX-5 NB priekinis skerspjūvio plotas .....   | 37 |
| <b>5.1 pav.</b> CFD oro slėgio analizė be galinio aptako .....   | 40 |
| <b>5.2 pav.</b> CFD oro slėgio ir greičio analizė be galinio aptako .....                                    | 41 |
| <b>5.3 pav.</b> Sparno tvirtinimo pozicijų koordinačių sistema .....   | 42 |
| <b>5.4 pav.</b> CFD analizė su MSHD sparnu A1 pozicijoje .....   | 43 |
| <b>5.5 pav.</b> CFD analizė su MSHD sparnu A1 pozicijoje. Automobilio galas .....                            | 43 |
| <b>5.6 pav.</b> CFD analizė su MSD sparnu K1 pozicijoje .....  | 44 |
| <b>5.7 pav.</b> CFD analizė su MSHD sparnu K3 pozicijoje .....   | 45 |
| <b>5.8 pav.</b> II sparno tvirtinimo pozicija .....  | 46 |
| <b>5.9 pav.</b> CFD analizė su MSHD sparnu I1 pozicijoje .....   | 47 |
| <b>5.10 pav.</b> CFD analizė MSHD sparno be anstparnių .....   | 48 |
| <b>5.11 pav.</b> CFD analizė MSHD sparno su anstparniais .....   | 48 |
| <b>5.12 pav.</b> Atakos kampo nustatymas [43] .....  | 49 |
| <b>5.13 pav.</b> Sparno aerodinaminių jėgų priklausomybė nuo sparno atakos kampo .....                       | 50 |
| <b>5.14 pav.</b> Oro srautas, tekantis į sparną .....  | 50 |
| <b>5.15 pav.</b> Sparno įtaka aukšto ir žemo slėgio zonų susidarymui .....                                   | 51 |
| <b>5.16 pav.</b> Automobilio aerodinaminių koeficientų priklausomybė nuo sparno atakos kampo .....           | 51 |
| <b>5.17 pav.</b> MSHD sparnas su 40° atakos kampas .....   | 52 |

## Santrumpų ir terminų sąrašas

### Santrumpos:

DRS – pasipriešinimo mažinimo sistema (angl. *Drag Reduction System*);

CFD – skaitinė fluidų dinamika (angl. *Computational Fluid Dynamics*);

MSHD – angl. *Motor Sports High Downforce*;

FIA – Tarptautinė automobilių federacija (pran. *Fédération Internationale de l'Automobile*).

### Terminai:

**Spaudžiančioji jėga** – (angl. *downforce*) aerodinaminės jėgos vektorius, nukreiptas žemyn, priešingas kėlimo jėgai  $F_L$ .

**Aptakas** – automobilio aerodinaminis elementas / konstrukcija.

**Sparnas** – (angl. *airfoil*) plokščias aerodinaminis elementas su asimetriškai išlenktais paviršiais, kuris dėl srauto greičio skirtumų tarp apatinio ir viršutinio paviršiaus sukuria keliamąją jėgą, o apverstas – spaudžiančiąją jėgą. Gali būti panaudojamas automobilio aptako gamybai.

**Sparno styga** – atstumas tarp priekinės ir galinės sparno briaunų.

**Tinklaraštis** – internetinis dienoraštis, kuriame publikuojami įrašai (straipsniai), dalijamasi patirtimi.

## Įvadas

1960 metais, „Le Mans“ lenktynių metu, „Ferrari“ komandos įkūrėjas ir vadovas Enzo Ferrari teigė, kad aerodinamika yra nemokantiems konstruoti variklių. Tačiau, nuo to laiko supratimas apie aerodinamiką ir jos teikiamą naudą spėjo labai pasikeisti. Ir jau 1961 metais „Ferrari“ komanda pristatė „246 SP“ modelį – pirmąjį automobilį istorijoje, aprūpintą galiniu aptaku, kuris jam padėjo ne tik padidinti ratų spaudžiamąją jėgą, bet ir sumažinti aerodinaminį pasipriešinimą.

Aerodinamikos reikšmė automobilių sporte yra labai svarbi. Aerodinaminiai elementai, tokie kaip galinis aptakas, atlieka svarbų vaidmenį, didinant automobilio stabilumą ir sukibimą su kelio danga. Tačiau galinio aptako veiksmingumas priklauso nuo daugybės faktorių, įskaitant transporto priemonės kūbulo formą, važiavimo greitį, pačio aptako formą, atakos kampą ir kt.

Šiame darbe gilinamasi į sudėtingą automobilių aerodinamikos pasaulį, ypatingą dėmesį skiriant galinio aptako daromai įtakai „Mazda MX-5 NB“ automobilio dinaminėms savybėms. Tiriamasis darbas pradedamas nuo analogų analizės, kurios metu apžvelgiami populiariausi galinio aptako tipai ir parenkamas tinkamiausias. Darbe taip pat nagrinėjami mokslinių tyrimų šia tema rezultatai, atkleidžiantys galinio aptako dizaino ir efektyvumo tobulinimo galimybes, naudojant pažangias technologijas.

Projektavimo dalyje apžvelgiami lenktynių reglamente keliami apribojimai automobilio galiniam aptakui. Taip pat parenkamas tinkamas sparno profilis, jo plotis, atsižvelgiant į reglamentą, parenkamas jo tvirtinimo būdas, apskaičiuojamas antsparnių plotas ir surandamas sparno sukimosi taškas.

Tiriamoji dalis pradedama nuo tyrimo metodikos aprašymo. Tyrimas atliekamas pasitelkiant „SolidWorks“ programinę įrangą. Jos pagalba atliekamas CFD modeliavimas, kuriuo randama tinkama sparno tvirtinimo pozicija ir ištiriama atakos kampo įtaka sparno efektyvumui.

Rekomendacinėje dalyje yra pateikiama informacija galutiniam aptako vartotojui. Šioje dalyje pateikiami duomenys apie tai, kokią įtaką daro sparno atakos kampo reguliavimas kėlimo ir pasipriešinimo koeficientams.

Šiuo darbu siekiama atskleisti sportinių automobilių galinio aptako konstrukcinius niuansus ir tai, kaip juos galima išnaudoti, kad būtų pasiekti užsibrėžti rezultatai. Gerai suprojektuotas galinis aptakas gali atlikti labai svarbų vaidmenį automobilių sporte.

Šiais laikais, kai lenktynių trasoje svarbi kiekviena sekundės dalis, būtina suprasti ir optimizuoti sportinių automobilių aerodinamines savybes. Šiuo darbu siekiama pagerinti sportinių automobilių aerodinamiką ir išsamiai išanalizuoti vieną svarbiausių aerodinaminių komponentų – galinį aptaką.

**Tyrimo objektas** – „Mazda MX-5 NB“ automobilio galinis aptakas.

**Tyrimo tikslas** – ištirti sportinio automobilio galinio aptako aerodinaminius savybes ir jų įtaką automobilio dinaminėms savybėms.

**Tyrimo problema** – kaip pasirinkti geriausią aerodinaminio aptako konfigūraciją, kad būtų pasiekiamas didžiausias vidutinis greitis lenktynių trasoje.

**Temos aktualumas** – prieš montuojant galinį aptaką yra svarbu atlikti išsamų aerodinaminį tyrimą, siekiant užtikrinti, jog aptakas teigiamai veiktų automobilio dinamiką. Netinkamai suprojektuotas aptakas gali netgi pabloginti automobilio dinamines savybes.

**Temos ištirtumas** – galinio aptako įtaka sportiniams automobiliams yra plačiai tyrinėjama tema, tačiau dėl skirtingų automobilių kėbulo formų kiekvienas automobilio modelis reikalauja individualių aerodinaminių tyrimų. Prieš pradėdant darbą, pastebėtas tyrimų trūkumas apie galinio aptako įtaką „Mazda MX-5 NB“ automobiliui.

#### **Uždaviniai:**

1. atlikti literatūros apžvalgą apie sportinių automobilių aerodinamiką, galinio aptako tipus ir jų įtaką dinaminėms savybėms;
2. suprojektuoti galinio aptako modelio konfigūraciją, pagrįstą moksliniais tyrimais ir skaičiavimais;
3. ištirti, kaip įvairūs galinio aptako dizainai veikia „Mazda MX-5 NB“ automobilio dinamiką, įvertinant jų įtaką automobilio pasipriešinimo ir kėlimo koeficientams;
4. pateikti rekomendacijas, pagrįstas atliktų tyrimų rezultatais, galutiniam aptako naudotojui padėsiančias pasirinkti tinkamiausią atakos kampą.

#### **Pagrindiniai reikalavimai ir sąlygos:**

- skaitinę analizę atlikti, naudojant sertifikuotą programinę įrangą;
- tyrime gauti duomenys turi būti pritaikomi automobilių sporte;
- suprojektuotas aptakas turi padidinti automobilį veikiančią aerodinaminę spaudžiančiąją jėgą.

## 1. Automobilių galinio aptako analogų analizė

Automobilių industrija yra sukūrusi daugybę skirtingo tipo galinių aptakų, išsiskiriančių skirtingais dizaino sprendimais, veikimo principais, pagaminimo medžiagomis ir kitais skirtumais. Taip pat skirtingo tipo aptakai kuriami skirtingų funkcijų atlikimui. Vieni montuojami ant automobilio, kad sudarytų didesnę prispaudžiamąją jėgą, kiti netgi gali sumažinti automobilio aerodinaminio pasipriešinimo koeficientą ir degalų sąnaudas. Taip pat galiniai aptakai gali būti montuojami ir tik dėl estetinių priežasčių.

### 1.1. Galinio aptako tipai

Šioje dalyje apžvelgiami populiariausi galinių aptakų tipai, apžvelgiami jų privalumai, trūkumai ir panaudojimo sritys.

#### Pjederalinis aptakas

Tai yra vienas labiausiai atpažįstamų galinio aptako tipų. Šio tipo aptakas pasižymi tuo, kad konstrukcija yra sudaryta iš apversto sparno, tvirtinamo prie pjederalo, sudaryto iš dviejų kojų [1]. Galinis aptakas dažniausiai yra tvirtinamas ant kojų, bet taip pat gali būti naudojama konstrukcija, kai kojos sparną prilaiko iš viršaus. Dėl kojų formos tvirtinimo šis būdas dar yra vadinamas „gulbės kaklu“ (angl. *swan neck*) (žr. 1.1 pav.).



1.1 pav. Pjederalinio tipo aptakas, tvirtinamas iš viršaus [2]

Šio tipo aptakai yra mėgstami ir populiarūs tarp automobilių entuziastų ir gamintojų dėl labai plačių panaudojimo galimybių.

Automobilių sporte šis tipas yra labai dažnai sutinkamas dėl savo funkcionalumo ir efektyvumo. Pradedant nuo dizaino, įgalinančio nesudėtingą atakos kampo reguliavimą, vos kelių varžtų pagalba leidžiantį greitai pakeisti automobilio dinamiką, priklausomai nuo trasos konfigūracijos. Taip pat šio tipo aptakai yra plačiai naudojami dėl galimybės montuoti ant skirtingo kėbulo tipo automobilių. Dažniausiai tokie aptakai yra montuojami ant galinio dangčio, tačiau gali būti montuojami ir prie automobilio kėbulo (žr. 1.2 pav.).



**1.2 pav.** Pjėdastalinio tipo aptakas, tvirtinamas prie automobilio kėbulo [3]

Kita priežastis, dėl kurios dažnai naudojami šio tipo galiniai aptakai – tai dėl bendro automobilio estetinio vaizdo pagerinimo. Dažnai gamintojai tokiu būdu siekia automobiliui suteikti sportiškumo įvaizdį, taip siekdami padidinti pardavimus. Puikus tokio panaudojimo pavyzdys būtų automobilis „Lamborghini Countach“. Šis modelis buvo suprojektuotas naudojimui be galinio aptako, dėl to bet koks funkcionalus galinis aptakas dėl sverto principo būtų ženkliai sumažinęs priekinių automobilių ratų prispaudimo jėgą ir drastiškai pakenkęs automobilio dinamikai. Tačiau, vos prasidėjus masinei prekybai automobiliu, pirkėjai išreiškė norą turėti galinį aptaką. Tai paskatino „Lamborghini“

inžinierius sukurti galinį aptaką su nuliniu atakos kampu ir dizainu, beveik nedarančiu jokios įtakos automobilio dinamikai [4]. Ilgainiui šis aptakas netgi tapo skiriamuoju „Lamborghini Countach“ bruožu (žr. 1.3 pav.).



1.3 pav. „Lamborghini Countach“ galinis aptakas [5]

Galima išskirti šiuos pagrindinius pjedestalinio galinio aptako privalumus ir trūkumus.

#### **Privalumai:**

- **reguliavimo galimybė** – dažnai pjedestalinis aptakas yra projektuojamas su galimybe nesudėtingai pakeisti atakos kampą, nes tai leidžia greitai ir efektyviai keisti automobilio aerodinaminius rodiklius;
- **plačios panaudojimo galimybės** – dėl savo konstrukcijos pjedestaliniai aptakai gali turėti skirtingų formų tvirtinimo kojas ir būti montuojami ant įvairių automobilių modelių su skirtingais kėbulo tipais;
- **estetika** – pjedestalinis aptakas gali būti panaudojamas, norint automobiliui suteikti sportiškesnį įvaizdį.

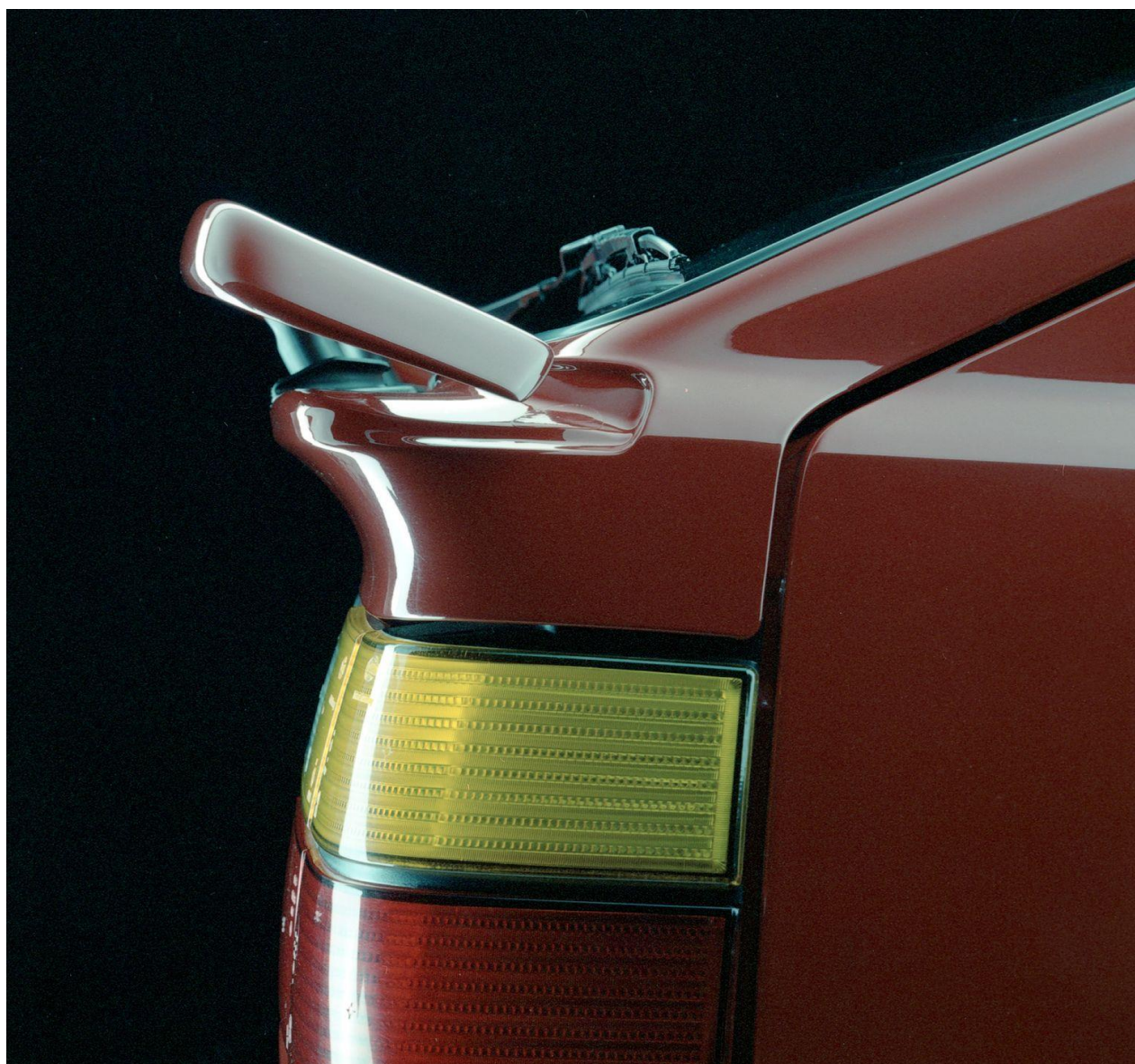
#### **Trūkumai:**

- **galimas aerodinamikos pablogėjimas** – siekiant ženklaus automobilio spaudžiamosios jėgos padidinimo yra neišvengiamas ir automobilio aerodinaminio pasipriešinimo koeficiento padidėjimas. Taip pat netinkamoje padėtyje sumontuotas arba negerai sureguliuotas pjedestalinis aptakas gali ženkliai pabloginti automobilio dinamiką, nesuteikiant privalumų;
- **sudėtingumas** – nors pjedestalinis aptakas gali būti lengvai reguliuojamas, tačiau reikalauja tam tikrų žinių ir supratimo, kad būtų pasiekiami pageidaujami rezultatai;
- **montavimas** – šio tipo aptako tvirtinimo kojos prie automobilio dažniausiai yra tvirtinamos varžtais, tai reikalauja skylių padarymo automobilyje.

Apibendrinant galima teigti, kad pjeđestalinio tipo galinis aptakas yra vienas iš populiariausių ir labai dažnai sutinkamas automobilių sporte. Jis išsiskiria iš kitų savo universalumu ir reguliavimo galimybėmis. Tačiau, norint, kad aptakas atliktų savo paskirtį, jo montavimas ir reguliavimas gali pareikalauti aerodinaminių principų supratimo ir atitinkamų tyrimų.

### **Aktyvaus tipo aptakas**

Aktyvaus tipo aptakai taip pat dar žinomi kaip adaptyvūs arba dinaminiai, yra aptakai galintys keisti savo padėtį, priklausomai nuo greičio ar kitų važiavimo sąlygų, taip optimizuodami automobilio dinامينius parametrus realiu laiku [1]. Pirmasis automobilio modelis, pasirodęs su aktyvaus tipo galiniu aptaku, valdomu iš automobilio salono, buvo „Lancia Thema“ 1984 metais. O pirmasis aktyvaus tipo galinis aptakas, valdomas automatiškai, priklausomai nuo automobilio greičio, pasirodė „Volkswagen Corrado“ automobilyje 1988 metais (žr. 1.4 pav.) [6].



**1.4 pav.** „Volkswagen Corrado“ aktyvaus tipo galinis aptakas [7]

Šiuolaikiniuose automobiliuose naudojamus aktyvaus tipo galinius aptakus pagal veikimo principą galima išskirti į kelis skirtingus tipus.



## Ijungta / Išjungta tipas

Šios rūšies aptakai dažniausiai yra sutinkami automobiliuose, skirtuose kasdieniniam naudojimui, tokiuose kaip „Audi A7“, „Porsche Panamera“, „Tesla Model X“ (žr. 1.5 pav.)...



1.5 pav. „Tesla Model X“ aktyvaus tipo galinis aptakas [8]

Šiuo principu veikiantys galiniai aptakai funkcionuoja, atsižvelgiant į automobilio važiavimo greitį. Kuomet automobilis važiuoja lėtesniu greičiu, automobilio galinis aptakas būna pasislėpęs neaktyvioje (išjungtoje) padėtyje, o tai leidžia automobiliui išlaikyti vientisesnes dizaino linijas, mažesnę pasipriešinimo koeficientą ir mažesnes degalų sąnaudas. Kuomet automobilis pasiekia tam tikrą suprogramuotą greičio ribą, galinis aptakas pakyla į aktyvią (įjungtą) padėtį. Tai suteikia automobiliui geresnę stabilumą.

## Kintančio kampo

Serijinėje automobilių gamyboje šis galinio aptako valdymo mechanizmas dažniau yra sutinkamas automobiliuose, priskiriamuose superautomobilių kategorijai. Šio tipo galinio aptako valdymo mechanizmas gali pasižymėti ir savybėmis paminėtomis aukščiau išvardintuose tipuose. Tačiau pagrindinis išskirtinis šio aptako bruožas yra keisti atakos kampą priklausomai ne tik nuo automobilio greičio, bet ir nuo kitų važiavimo parametru, tokių kaip automobilio pedalų paspaudimai, vairavimo

režimo pasirinkimo ir kita. Šis metodas leidžia sumažinti pasipriešinimo koeficientą prie mažesnių greičių ir padidinti galinių ratų prispaudimo jėgą prie didesnių greičių, bei vairuotojui nuspaudus stabdžio pedalą, gali suveikti ir kaip aerodinaminis stabdis (ang. *Aero brake*), pakreipdamas galinio aptako atakos kampą į beveik vertikalią padėtį (žr. 1.6 pav), ir tokiu būdu sutrumpinti automobilio stabdymo kelią [9].



**1.6 pav.** „Ford GT“ aktyvaus tipo galinis aptakas aerodinaminio stabdžio pozicijoje [10]

Dar vienas puikus kintančio kampo galinio aptako panaudojimo pavyzdys yra automobilis „Zenvo TSR-S“ (žr. 1.7 pav.).



**1.7 pav.** „Zenvo TSR-S“ aktyvaus tipo galinis aptakas posūkyje [11]

Šiame automobilyje naudojamos technologijos leidžia keisti ne tik galinio aptako atakos kampą, bet ir jo pasvirimą į šonus, atsižvelgiant į automobilį veikiančių šoninių G jėgų jutiklio (akselerometro) parametrus. Įprastai dėl inercinių jėgų posūkiuose automobilio ratai, esantys posūkio išorinėje pusėje, patiria didesnę spaudžiamąją jėgą. Ši „Zenvo“ automobiliuose naudojama technologija užtikrina didesnę spaudžiamąją jėgą ratams, esantiems posūkio vidinėje pusėje, taip suvienodindama automobilio padangas veikiančių jėgų balansą, atlieka automobilio stabilizatoriaus funkciją [11].

## DRS sistema

Pasipriešinimo mažinimo sistema, žinoma kaip DRS (žr. 1.8 pav.), yra dar vienas aktyvaus galinio aptako tipas [12]. Pirmą kartą ši sistema panaudota 2011 metų sezoną Formulės 1 (F1) boliduose [13], taip pat atsirado ir kitose Formulės serijose. Panašaus principo sistemą galima aptikti ir kėbuliniuose automobiliuose. 2023 metais ši sistema pristatyta ir serijiniu būdu gaminamame „Porsche 911 992 GT3 RS“ automobilyje [14].



1.8 pav. Mercedes AMG 2022 sezono F1 bolidas su aktyvuota DRS [15]

F1 boliduose galinis aptakas yra sudarytas iš dviejų horizontalių plokštumų. Viršutinė plokštuma yra atsakinga už DRS [12]. Kuomet ši sistema neaktyvuota, šis aptakas mažai kuo skiriasi nuo pjedestalinio dviejų elementų aptako. DRS Sistema yra aktyvuojama mygtuko, esančio ant vairo, paspaudimu. Kuomet sistema aktyvuojama, viršutinės galinio aptako plokštumos atakos kampas yra sumažinamas iki  $10^\circ$ , taip sumažinamas bolido pasipriešinimo koeficientas ir priekinis plotas [9]. Tai leidžia bolidui pasiekti didesnę greitį, tačiau prarandama dalis prispaudimo jėgos. F1 boliduose varžybų metu šią sistemą leidžiama naudoti tik FIA reglamentu aprašytais atvejais, kai bandoma aplenkėti oponentą trasoje tam nurodytose vietose.

Apibendrinus galima išskirti šiuos pagrindinius aktyvaus tipo galinio aptako privalumus ir trūkumus.

### Privalumai:

- **dinamiškumas** – aktyvaus tipo aptakai gali keisti savo darbo režimą realiu laiku, priklausomai nuo važiavimo sąlygų;
- **platus panaudojimas** – šio tipo aptakai gali būti naudojami tiek sportiniuose, tiek kasdieninio naudojimo automobiliuose dėl galimybės prisitaikyti prie važiavimo režimo.

## Trūkumai:

- **sudėtingumas** – nors šio tipo aptakai pasižymi nesudėtingu valdymu, tačiau jų konstrukcija yra labai sudėtinga;
- **didelė masė** – mechaninė sistema sudaryta ne tik iš galinio aptako, bet ir iš komplekto įvairių valdiklių, vykdyklių, jutiklių ir kitų komponentų, automobilyje užima nemažai vietos ir suteikia papildomą masę;
- **kaina ir priežiūra** – aktyvaus tipo aptakai dėl savo sudėtingos sandaros gali kainuoti net iki kelių kartų brangiau nei paprastesnių tipų aptakai. Taip pat dėl nemažo judančių dalių kiekio šio tipo sistemos reikalauja ir dažnesnės priežiūros.

Apibendrinant galima teigti, kad aktyvaus tipo aptakai yra labiau praktiški, nes veikia tik tada, kai to reikia, ir prisitaiko prie važiavimo sąlygų, todėl yra pamėgti galingų sportinių automobilių gamintojų. Tačiau šios sistemos pasižymi konstrukcijos sudėtingumu, aukšta kaina ir didesniu svoriu už stacionarių tipų aptakus.

## Stogo linijos aptakas

Šio tipo galinis aptakas dažniausiai yra tvirtinamas automobiliuose virš galinio stiklo, taip pratęsiant stogo liniją (žr. 1.9 pav.). Šie aptakai dažniausiai yra naudojami hečbekų, universalų ir visureigių kėbulų automobiliuose. Šiek tiek rečiau naudojami kitokių kėbulo formų automobiliuose.



1.9 pav. „Volkswagen Golf R mk6“ su galiniu stogo linijos aptaku [16]

Pagrindinis šio tipo išskirtinumas iš apžvelgtų aukščiau yra tai, kad šio tipo aptakai gali ne tik pagerinti automobilio dinamines savybes, bet ir sumažinti degalų sąnaudas. Šio tipo galiniai aptakai pasižymi paprasta ir nebrangia konstrukcija. Dėl šių priežasčių tokie aptakai labai dažnai naudojami ne tik galinguose ir sportiniuose automobiliuose, bet ir ekonominės klasės automobiliuose [17].

Apibendrinus galima išskirti šiuos pagrindinius stogo linijos aptako privalumus ir trūkumus.

#### **Privalumai:**

- **maža masė** – šio tipo aptakai dažniausiai yra gaminami iš plastiko arba kompozitinių medžiagų, dėl to pasižymi labai nedidele mase;
- **žema kaina** – aptako konstrukcija nereikalauja sudėtingų mechanizmų ar sudėtingai pagaminamų detalių. Tai leidžia išlaikyti žemą kainą;
- **mažas pasipriešinimo koeficientas** – gerai suprojektuotas ir tinkamai pritvirtintas stogo linijos aptakas gali netgi sumažinti automobilio pasipriešinimo koeficientą.

#### **Trūkumai:**

- **ribotas efektyvumas** – su šiuo aptako tipu pasiekama mažesnė įtaka automobilio dinamikai, nei naudojant pjedestalinius ar aktyvaus tipo galinius aptakus;
- **nereguliuojamas** – šio tipo aptakai dažniausiai yra kaip vientisa detalė, dėl to neturi reguliavimo galimybių.

Apibendrinant galima teigti, kad stogo linijos aptakas pasižymi žema kaina ir praktiškumu, nes gali padidinti ne tik automobilio ratų sukibimą su kelio danga, bet ir sumažinti pasipriešinimo koeficientą. Tačiau, šio tipo aptakai nepasižymi labai didele spaudžiamąja jėga, todėl automobilių sporte siekiama taikyti efektyvesnius sprendimus.

#### **Juostinis aptakas**

Juostinis aptakas yra paprasčiausios konstrukcijos aptakas iš visų. Jis dažniausiai sudarytas iš plastikinės arba elastinės juostelės, klijuojamos ant bagažinės dangčio (žr. 1.10 pav.). Tačiau net ir toks minimalistinis aptako dizainas gali pagerinti automobilio aerodinaminius parametrus [1].



**1.10 pav.** Juostinis aptakas [1]

Gerai suprojektuotas juostinis aptakas gali sumažinti automobilį keliančiąją aerodinaminę jėgą ir sumažinti pasipriešinimo koeficientą. Tai leidžia automobilio ratams turėti truputį geresnį sukibimą su kelio danga ir mažesnes degalų sąnaudas.

Tyrimą apibendrinus, galima išskirti šiuos pagrindinius juostinio aptako privalumus ir trūkumus.

#### **Privalumai:**

- **maža masė** – labai minimalistinis dizainas leidžia užtikrinti mažą aptako masę;
- **maža kaina** – minimalistinis dizainas ir produktas, nereikalaujantis sudėtingos konstrukcijos nei brangių žaliavų, leidžia užtikrinti labai mažą produkto kainą;
- **paprastas montavimas** – aptakas gali būti sumontuojamas vos per keletą minučių ir tam nereikia specifinių žinių ar įrankių.

#### **Trūkumai:**

- **mažas efektyvumas** – aptako minimalistinis dizainas neleidžia pasiekti labai reikšmingų aerodinaminių rodiklių pagerėjimo;
- **nereguliuojamas** – šio tipo aptakas dažniausiai yra vientisa detalė, dėl to neturi reguliavimo galimybių.

Apibendrinant galima teigti, kad juostinis aptakas pasižymi labai minimalistiniu dizainu ir itin paprastu tvirtinimu. Jeigu gerai suprojektuotas, šio tipo aptakas gali ne tik automobiliui suteikti sportiškesnį įvaizdį, bet ir pagerinti aerodinaminius rodiklius. Tačiau su šio tipo aptakais pasiekiami labai nedideli aerodinaminių parametrų pagerėjimai, todėl automobilių sporte siekiama taikyti efektyvesnius sprendimus.

### **1.2. Analogų analizės išvada**

Apžvelgus populiariausius ant lengvųjų automobilio montuojamų galinių aptakų tipus, nuspręsta tolimesniuose tyrimo etapuose giliau apžvelgti pjedestalinio tipo galinį aptaką. Šie aptakai pasižymi labai dideliu efektyvumu, dėl to yra labiau tinkami panaudojimui sportiniuose automobiliuose, kuriems reikalinga ypač didelė spaudžiamoji jėga.

## 2. Mokslinių tyrimų apie galinį aptaką analizė

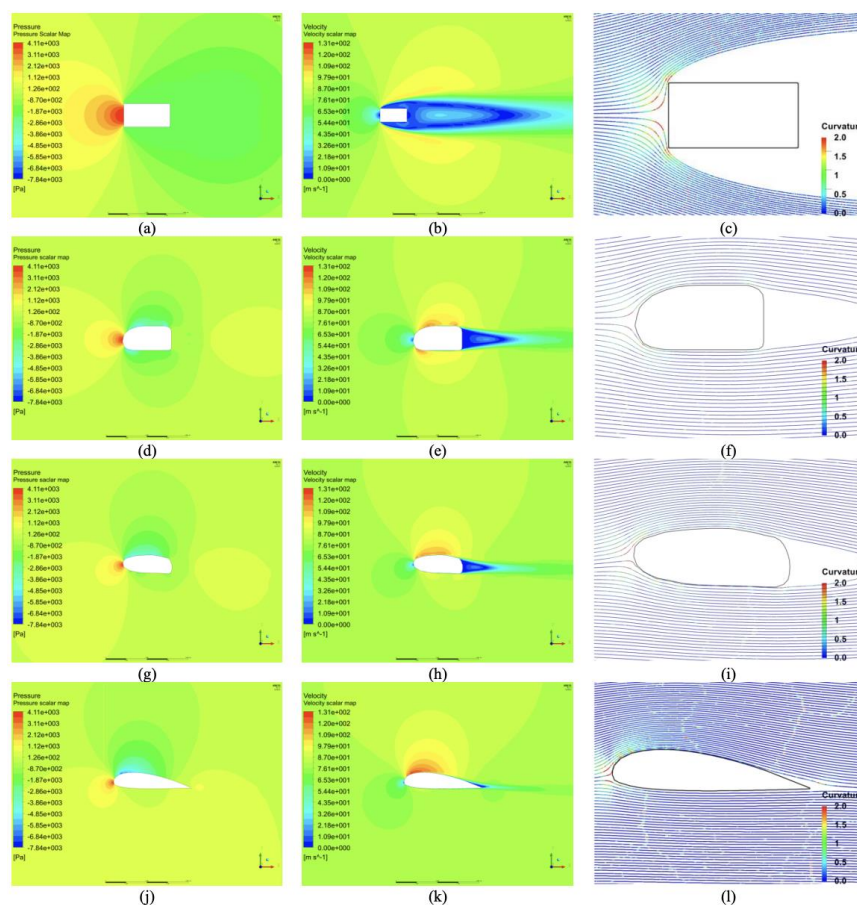
Galinis aptakas lenktyniniuose automobiliuose atlieka svarbų vaidmenį, gerinant automobilio dinamines savybes, ir padeda pasiekti geresnių rezultatų trasoje. Šiame skyriuje analizuojamas galinio aptako konstrukcinių parametrų, tokių kaip atakos kampas ir aptako profilis, poveikis aerodinaminiams rodikliams, taip pat nagrinėjamas ryšys tarp aptako pasipriešinimo koeficiento ir spaudžiamosios jėgos.

### 2.1. Atakos kampas

Galinio aptako atakos kampas stipriai įtakoja balansą tarp oro pasipriešinimo ir spaudžiamosios jėgos. Remiantis 2017 metais atliktu tyrimu, didelis atakos kampas gali leisti išlaikyti didesnę greitį posūkiuose, tačiau padidina oro pasipriešinimo koeficientą. Šią problemą galima išspręsti, naudojant DRS sistemą arba kintančio atakos kampo aptaką. Tai leistų sumažinti oro pasipriešinimą, kai nėra reikalinga didelė spaudžiamoji jėga. Tai padėtų pasiekti greitesnę trasos įveikimo laiką [18].

### 2.2. Sparno profilis

Sparno profilis taip pat turi didelę įtaką sugeneruojamai prispaudimo jėgai ir bendroms aerodinaminėms savybėms. Siekiant išsiaiškinti geriausią sparno formą, buvo atliekamas tyrimas kompiuteriniu modeliavimu su „Ansys“ programine įranga (žr. 2.1 pav.) [19].



2.1 pav. Srauto greičio, slėgio ir linijų evoliucijos skaliariniai žemėlapiai [19]

Atliktas tyrimas rodo, kad srautui statmeni paviršiai sukuria aukšto slėgio zonas ir taip didina pasipriešinimą. Suapvalinus paviršius galima pasiekti mažesnę pasipriešinimą ir išlaikyti laminarinį

srautą. Taip pat, pastebėta, kad norint sugeneruoti keliamąją / spaudžiančiąją jėgą yra reikalinga asimetrinė profilio forma, kurios nuolydis yra lemiantis aspektas. Taip pat, smailinant galinę dalį, pavyko beveik panaikinti žemo slėgio ir nulinio srauto greičio zonas [19].

### **2.3. Santykis tarp spaudžiamosios jėgos ir aerodinaminio pasipriešinimo**

Santykis tarp spaudžiamosios jėgos ir aerodinaminio pasipriešinimo yra svarbus aspektas. Kuriant aptaką, yra siekiama sugeneruoti kuo didesnę spaudžiamąją jėgą ir kuo mažesnį pasipriešinimą. 2019 m. atlikto tyrimo metu buvo siekiama išsiaiškinti, koks sparno profilis būtų efektyviausias aptako gamybai. Buvo tiriami NACA 2412, NACA 5210, NACA 5205, NACA 3205 profiliai. Nustatyta, kad NACA 5205 profilis yra efektyviausias iš tirtųjų profilių ir sugeneruoja didžiausią spaudžiamąją jėgą. Tyrimo metu nustatytas jo santykis tarp spaudžiamosios jėgos ir pasipriešinimo koeficiento yra 0,97 [20].

### **2.4. Mokslinių tyrimų analizės išvada**

Apibendrinant galima teigti, kad galinio aptako dizainas stipriai įtakoja jo funkcionalumą ir automobilio aerodinamines savybes. Atidžiai parinkus tinkamiausią atakos kampą, sparno profilio formą, galima ženkliai pagerinti automobilio dinamiką.



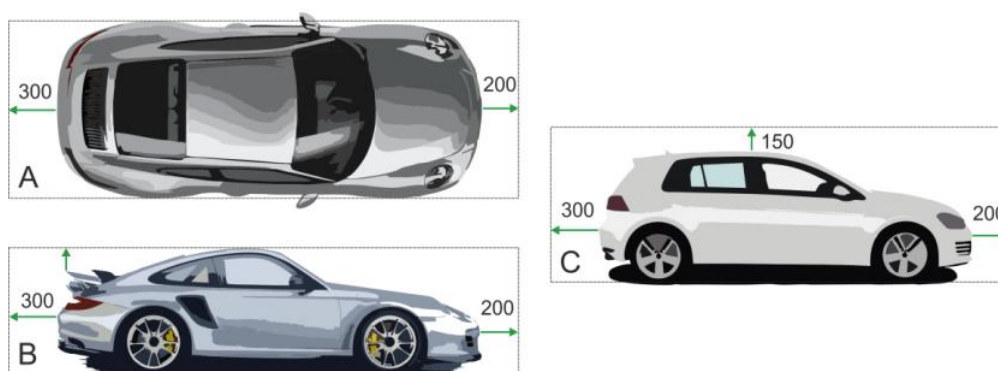
### 3. Galinio aptako projektavimas

Automobilių sporte yra plati galinių aptakų įvairovė. Naudojami įvairūs sparno profiliai, skirtingi tvirtinimo būdai. Šia dalimi siekiama parinkti galinio aptako konfiguraciją, kuri tenkintų siekiamus tikslus ir atitiktų lenktynių reglamente keliamus reikalavimus galiniam aptakui.

#### 3.1. Galiniam aptakui keliami apribojimai

Remiantis LASF (Lietuvos automobilių sporto federacija) pateikiamu 2024 metų „Time Attack“ lenktynių čempionato techniniu reglamentu, lenktynėse dalyvaujančių „Time Attack Pro“ klasės sportinių automobilių aerodinaminiams elementams yra taikomi šie reikalavimai [21]:

- a) aerodinaminiai įrenginiai – be apribojimų, tačiau privalo išsitemkti perimetruose nurodytuose paveikslėliuose: A – visiems automobiliams, B – kupė, sedanas, kabrioletas, C – hečbekas, universalas; matmenys nurodyti milimetrais.



3.1 pav. Perimetrai aerodinaminiams elementams [21]

- b) draudžiamos sistemos (mechanizmai), leidžiančios aerodinaminių įrenginių reguliavimą važiavimo metu.

Atsižvelgiant į šiuos reglamento reikalavimus ir į „Miata MX-5 NB“ automobilio matmenis, galinio aptako plotis negali būti didesnis nei 1680 mm [22]. Siekiant didžiausio efektyvumo, **pasirinkta tolimesniuose projektavimo etapuose naudoti 1660 mm pločio sparną**, paliekant po 10 mm galuose antsparniams ir jų tvirtinimo elementams.

#### 3.1.1. Galinio aptako apribojimų svarba

Šie lenktynių reglamente aptariami nuostatai yra skirti balanso palaikymui tarp aerodinaminių privalumų ir lenktynių saugumo. Pernelyg į galą išlindęs galinis aptakas gali sukurti didesnę spaudžiamąją jėgą galiniams ratams, taip pat sumažinti spaudžiamąją jėgą priekiniams ratams. Dėl to gali nukentėti automobilio stabilumas, važiuojant didesniu greičiu. Automobilio galinis aptakas, pernelyg išsikišęs į šonus, gali sutrikdyti vairuotojo matomumą per galinio vaizdo veidrodėlius, taip pat gali būti kontaktų su kitais dalyviais ar trasos elementais priežastimi.

Galiniam aptakui keliami apribojimai yra svarbi lenktynių reglamento dalis, užtikrinanti lenktynių saugumą bei lygias jėgas tarp dalyvių. Tačiau visiškai uždrausti galinio aptako naudojimą automobilių sporte taip pat būtų netikslinga, nes galinis aptakas sportiniams automobiliams suteikia stabilumo, pagerina padangų sukibimą su trasos danga bei pagerina kitas automobilio dinamines savybes.

### 3.2. Sparno profilio parinkimas

Sportinio automobilio gamybai pasirinkta naudoti apverstą sparno profilį, kurio styga būtų 200 mm.

Renkantis sparno profilį, buvo žiūrima į sparno savybes, kai Reinoldso skaičius ( $Re$ ) siekia apie 500000. Pačiu svarbiausiu kriterijumi laikytas kėlimo koeficientas  $C_L$ . Atsižvelgta, kad šis koeficientas būtų ne mažesnis nei 1,5.

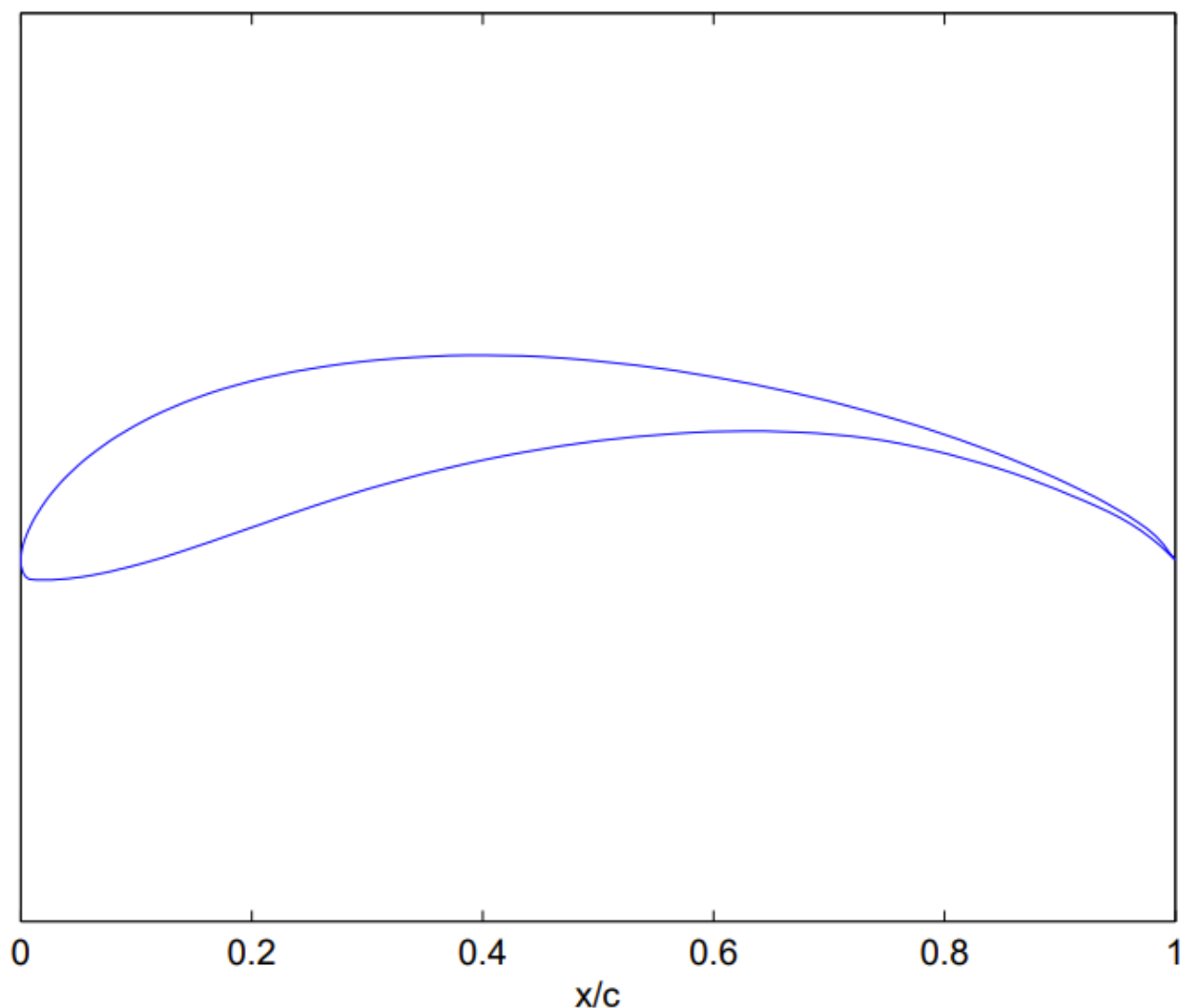
Sparnas, turintis didelį kėlimo koeficientą, jį apvertus, gali sugeneruoti daug spaudžiamosios jėgos. Ši jėga padeda pagerinti automobilio sukibimą su kelio dangą. Dėl geresnio sukibimo galima išlaikyti didesnę automobilio greitį trasos posūkiuose.

Renkantis sparno profilį, taip pat buvo vadovaujama dažniausiai automobilių sporte naudojamų sparnų apžvalga *occamsracers.com* tinklaraštyje. Svarbiausi apžvelgtų sparno profilių specifikačiai duomenys, kai  $Re=500000$ , pateikiami 1 lentelėje.

**1 lentelė.** Sparno profilių specifikačiai duomenys [23]

| Sparnas        | Maksimalus $C_L$ | Maksimalus $C_L/C_D$          |
|----------------|------------------|-------------------------------|
| Clark Y        | 1.45             | 90.2 kai $\alpha=4^\circ$     |
| NACA 6412      | 1.6              | 111.3 kai $\alpha=6.25^\circ$ |
| Cambered plate | 1.7              | 42.5 kai $\alpha=5.75^\circ$  |
| NASCAR COT     | 1.75             | 113.7 kai $\alpha=10^\circ$   |
| Douglas LA203A | 1.75             | 127.7 kai $\alpha=6.5^\circ$  |
| MIC FX 72      | 1.8              | 121.1 at $\alpha=6.75^\circ$  |
| GOE 464        | 1.85             | 97 kai $\alpha=7.5^\circ$     |
| CH10           | 1.95             | 132.4 kai $\alpha=3.25^\circ$ |
| GOE 652        | 2.05             | 102.8 kai $\alpha=2.25^\circ$ |
| Eppler 420     | 2.1              | 106.1 kai $\alpha=6.25^\circ$ |
| Wortmann FX 74 | 2.25             | 115.5 kai $\alpha=6.75^\circ$ |
| s1223          | 2.3              | 97.4 kai $\alpha=5.75^\circ$  |
| s1223 RTL      | 2.35             | 85.4 kai $\alpha=5.5^\circ$   |
| Be 123-125     | >2.35            | Trūksta duomenų               |
| Be 183-155     | >2.35            | Trūksta duomenų               |
| MSHD           | >2.35            | Trūksta duomenų               |

Atsižvelgiant į šiuos duomenis, **pasirinkta aptako gamybai naudoti MSHD sparno profilį** (žr. 3.2 pav.). Šio sparno profilio koordinatės pateikiamos 1 priede.

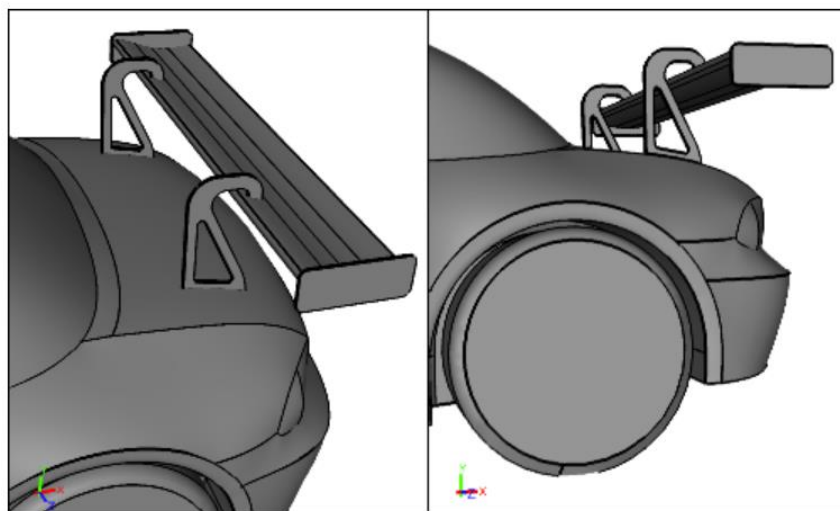


**3.2 pav.** MSHD sparno profilis [24]

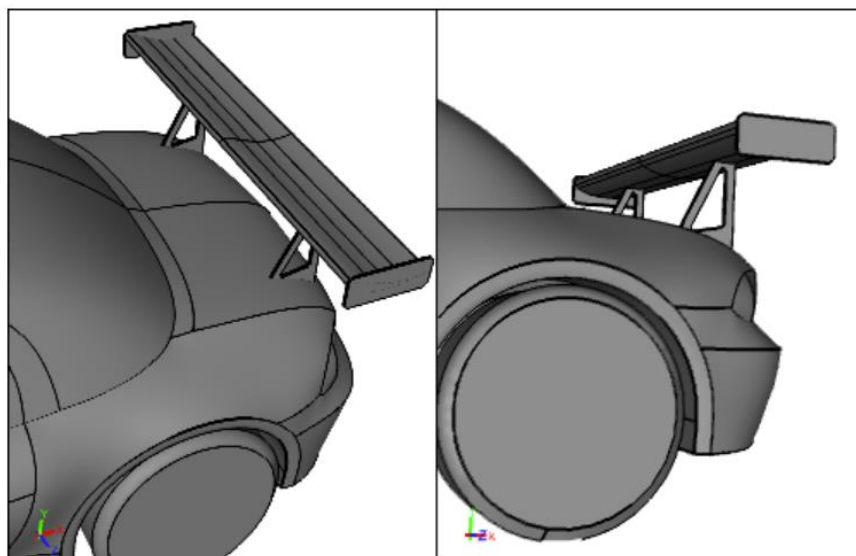
Šis sparno profilis išsiskiria tuo, kad buvo kuriamas specialiai naudoti automobilių sporte. Kuriant šio sparno profilį, vienas iš pagrindinių tikslų buvo sukurti sparną, kuris galėtų sugeneruoti didžiausią spaudžiamąją jėgą, kai Reinoldso skaičius režyje yra nuo 300 tūkst. iki 600 tūkst. Taip pat buvo siekiama, kad sparnas galėtų būti naudojamas plačiame atakos kampo diapazone be oro srauto atsiskyrimo [24]. Šių tikslų įgyvendinimas padėjo MSHD sparnui išpopuliarėti automobilių sporte.

### 3.3. Tvirtinimo būdo parinkimas

Kaip jau pastebėta analogų analizės metu, projektuojant pjedestalinį aptaką, yra du populiariausi sparno tvirtinimo būdai – iš viršaus (aukšto slėgio pusės) (žr. 3.3 pav.) arba iš apačios (žemo slėgio pusės) (žr. 3.4 pav.). Šie tvirtinimo būdai turi įtakos ne tik automobilio estetikai, bet ir aerodinaminėms savybėms. Pasirinkimą tarp šių dviejų metodų lemia dvi svarbios charakteristikos: spaudžiančiosios jėgos generavimas ir aerodinaminis pasipriešinimas.



3.3 pav. Sparno tvirtinimas iš viršaus [25]



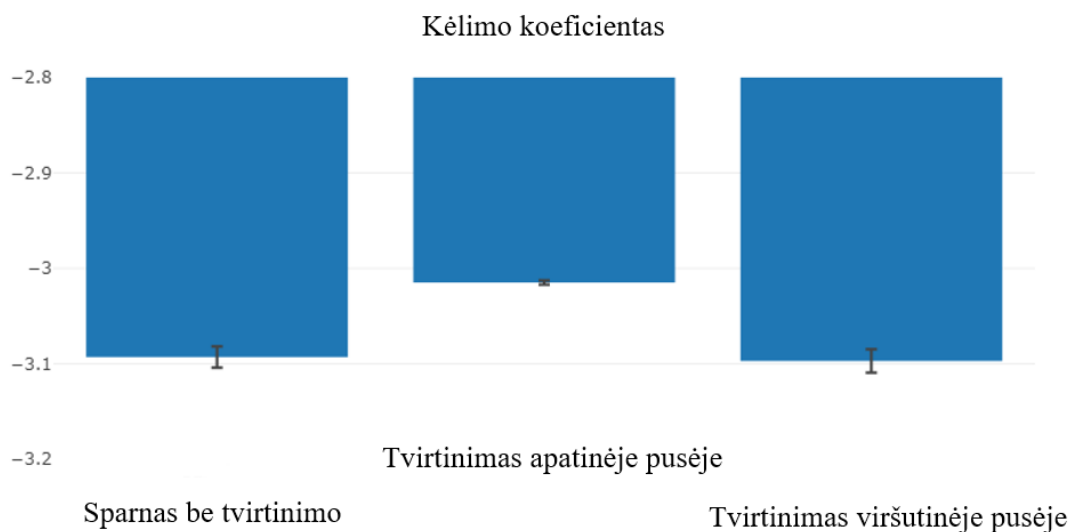
3.4 pav. Sparno tvirtinimas iš apačios [25]

Toliau šioje dalyje apžvelgiami abiejų tvirtinimo būdų privalumai ir trūkumai.

#### 3.3.1. Spaudžiančioji jėga

Ši aerodinaminė jėga yra labai svarbi lenktyniniuose automobiliuose. Siekiant padidinti sparno spaudžiančią jėgą, dažniausiai atsižvelgiama į sparno profilį, atakos kampą, bet rečiau atsižvelgiama į sparno tvirtinimo būdą. Tačiau net ir tai gali turėti įtakos sparno efektyvumui.

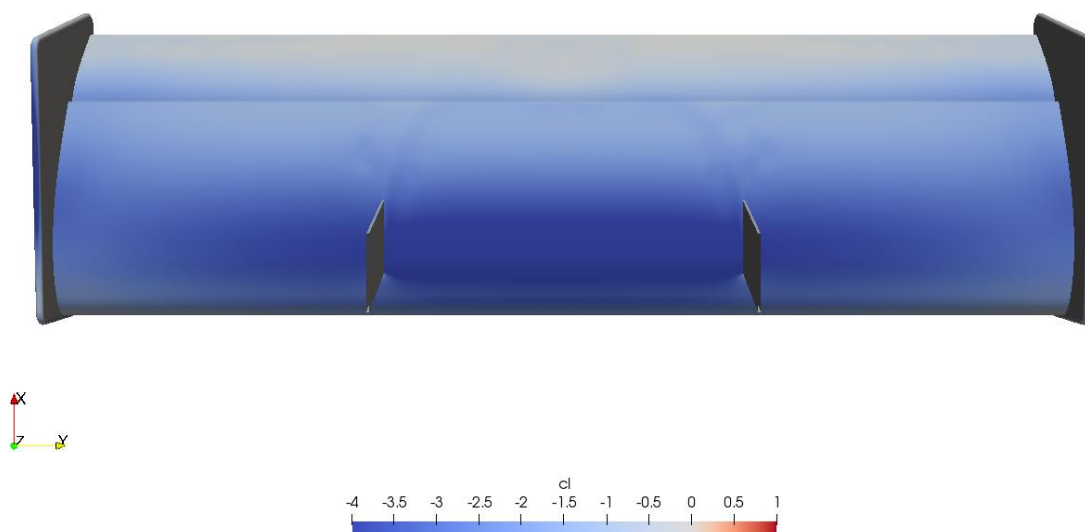
Interneto puslapyje *theansweris27.com* yra pateikiami tyrimo rezultatai, kurių metu buvo lyginami abu šie tvirtinimo būdai, naudojant vienodą sparną. Tyrimo metu nustatyta, kad, kai tvirtinimo elementai yra sparno viršutinėje dalyje, gaunama didesnė spaudžiančioji jėga (žr. 3.5 pav.), dėl kurios gaunamas mažesnis kėlimo koeficientas (mažiau yra geriau) [26].



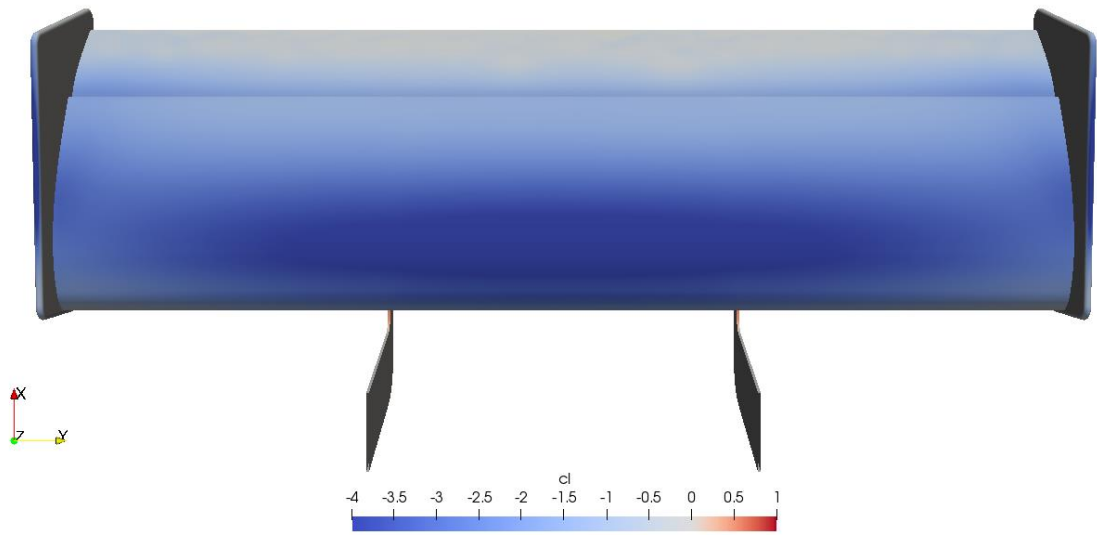
**3.5 pav.** Kėlimo koeficientų palyginimas, tvirtinant sparną skirtingais būdais [26]

Straipsnyje teigiama, kad žemo slėgio oro srautas, tekantis ties sparno apačia, yra daug lengviau paveikiamas trukdžių. Todėl šioje pusėje primontuoti tvirtinimo elementai sudrumsčia oro srautą, ties kliūtimis susidaro sūkuriai, sulėtėja srauto greitis ir srautas tampa labiau linkęs atsiskirti. Todėl kiekvienas trikdys sparno apatinėje dalyje smarkiai veikia sparno efektyvumą [26].

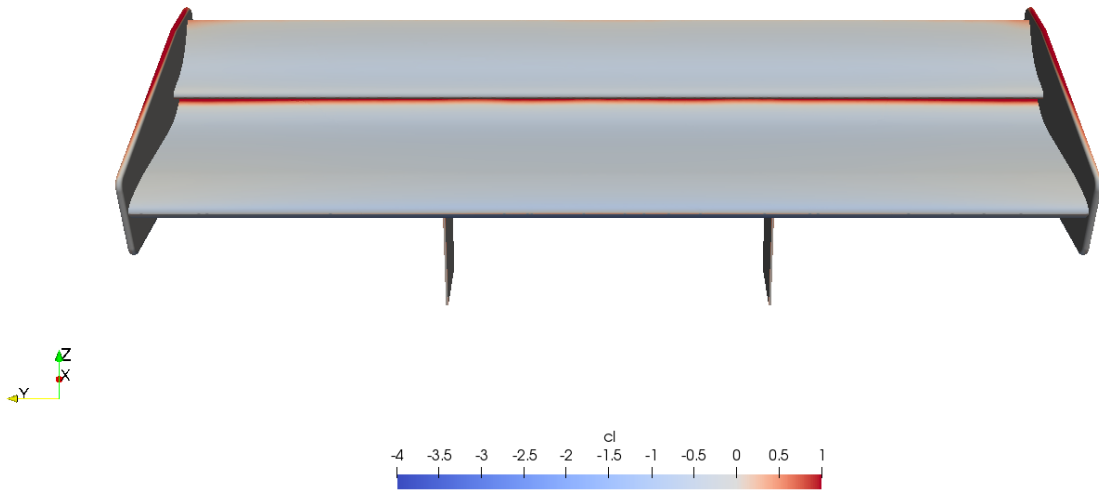
Tai įrodo ir vizualizacijos gautos CFD modeliavimo būdu (žr. 3.6-3.9 pav.).



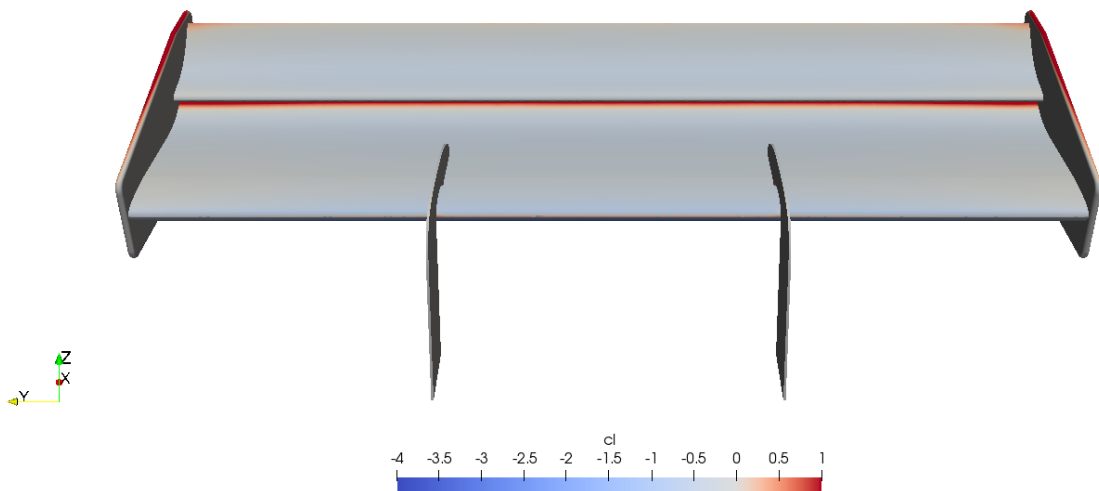
**3.6 pav.** Kėlimo koeficientų vizualizacija apatinėje sparno pusėje su tvirtinimu iš apačios [26]



**3.7 pav.** Kėlimo koeficientų vizualizacija apatinėje sparno pusėje su tvirtinimu iš viršaus [26]



**3.8 pav.** Kėlimo koeficientų vizualizacija viršutinėje sparno pusėje su tvirtinimu iš apačios [26]

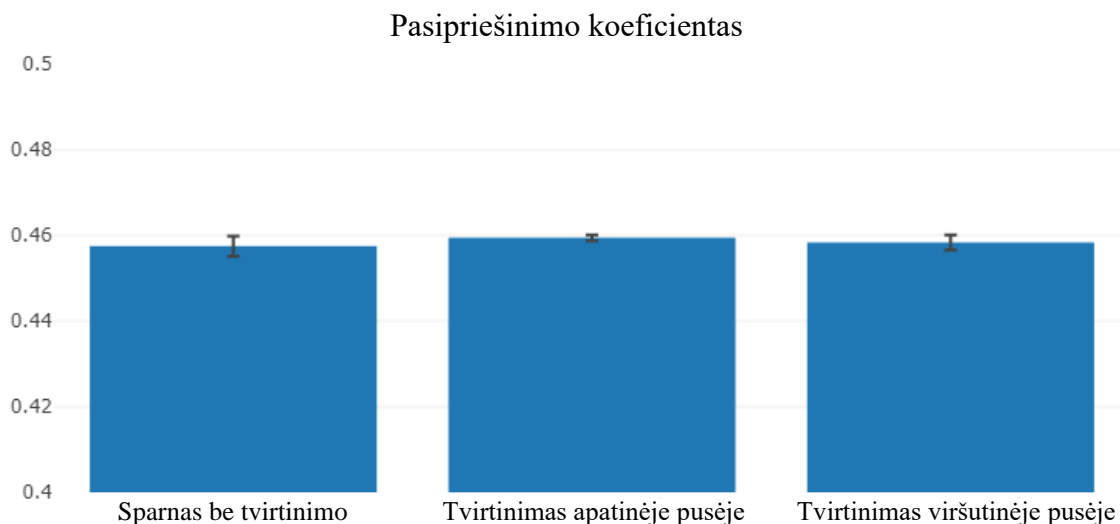


**3.9 pav.** Kėlimo koeficientų vizualizacija viršutinėje sparno pusėje su tvirtinimu iš viršaus [26]

Vizualizacijose pastebimas aiškus oro srauto sudrumstimas, neigiamai veikiantis sparno  $C_L$ , sparne su tvirtinimu apatinėje pusėje. Taip pat pastebima, kad tvirtinimo elementai viršutinėje sparno pusėje nedaro beveik jokios įtakos sparno efektyvumui.

### 3.3.2. Pasipriešinimo jėga

Šio tyrimu metu buvo analizuojamas ir pasipriešinimo koeficientas (žr. 3.10 pav.) tarp skirtingų galinio aptako tvirtinimo būdų.



**3.10 pav.** Pasipriešinimo koeficientų palyginimas, tvirtinant sparną skirtingais būdais [26]

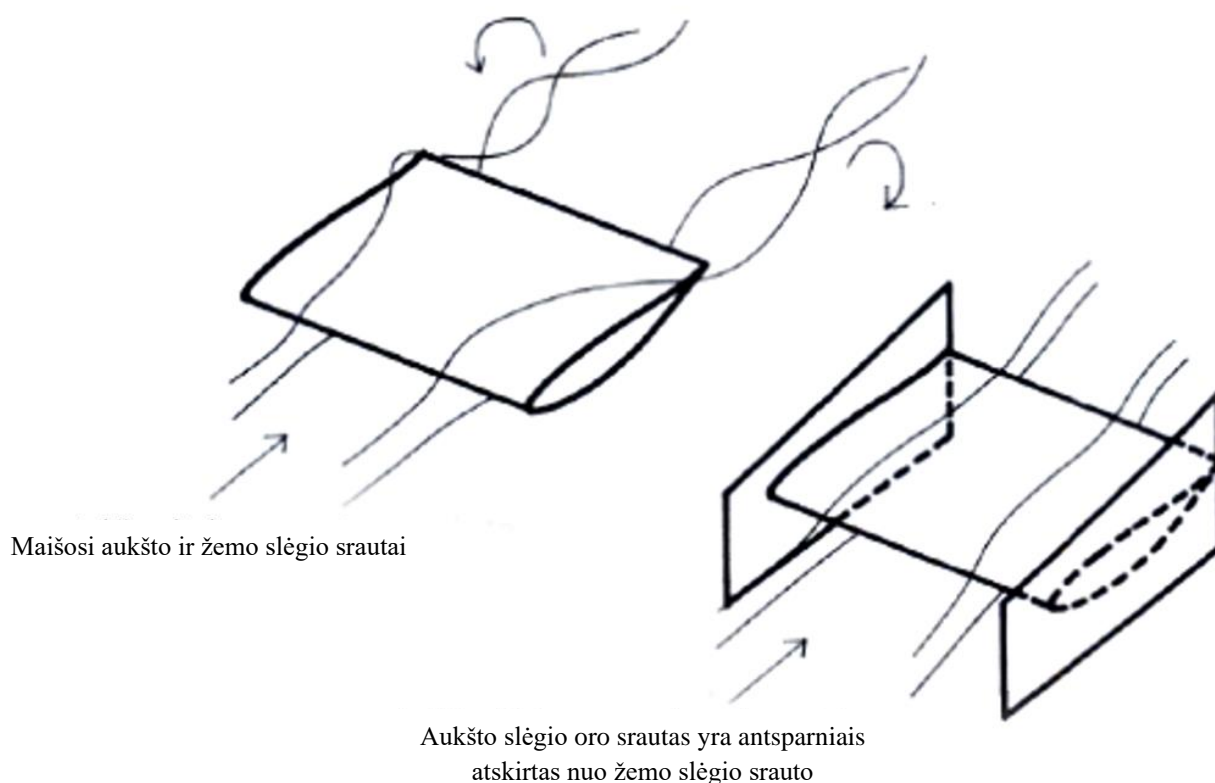
Iš gautų rezultatų matoma, kad gauti skirtumai tarp skirtingų tvirtinimo būdų yra labai minimalūs. Skirtumai mažesni nei 0,5 %. Priklausomai nuo tvirtinimo kojų dizaino rezultatai gali taip neženkliai skirtis [26].

Dėl sugeneruojamos didesnės spaudžiančiosios jėgos yra **pasirinkta aptako gamybai naudoti tvirtinimą iš viršutinės sparno pusės.**

Taip pat pastebėta, kad tvirtinimui esant viršutinėje dalyje, gaunami rezultatai yra labai panašūs į skaičiavimus, atliekamus be tvirtinimo. Todėl tolimesniuose tyrimo etapuose CFD modeliavimo metu pasirinkta tvirtinimo kojų neįtraukti į skaičiavimo modelį.

### 3.4. Antsparnių ploto radimas

Pagrindinė sparno funkcija automobilyje yra sukurti prispaudimo jėgą. Sparno efektyvumas priklauso nuo susidarančių slėgių skirtumo sparno apatinėje ir viršutinėje pusėse [27]. Kuo šis skirtumas didesnis, tuo ir sparno efektyvumas yra didesnis. Tačiau sparno galuose, jeigu neatskirtos, šios zonos gali maišytis tarpusavyje, sudarydamos oro sūkurius ir taip mažindamos sparno efektyvumą. To išvengti padeda sparno galuose montuojami antsparniai. Šios plokštumos atskiria aukšto ir žemo slėgio zonas nuo maišymosi tarpusavyje, apsaugo nuo slėgių supanašėjimo sparno galuose ir taip padidina sparno naudingumą (žr. 3.11 pav.) [28].



3.11 pav. Antsparnių veikimo schema [29]

Antsparnio plotas yra apskaičiuojamas pagal (1) formulę [30]:

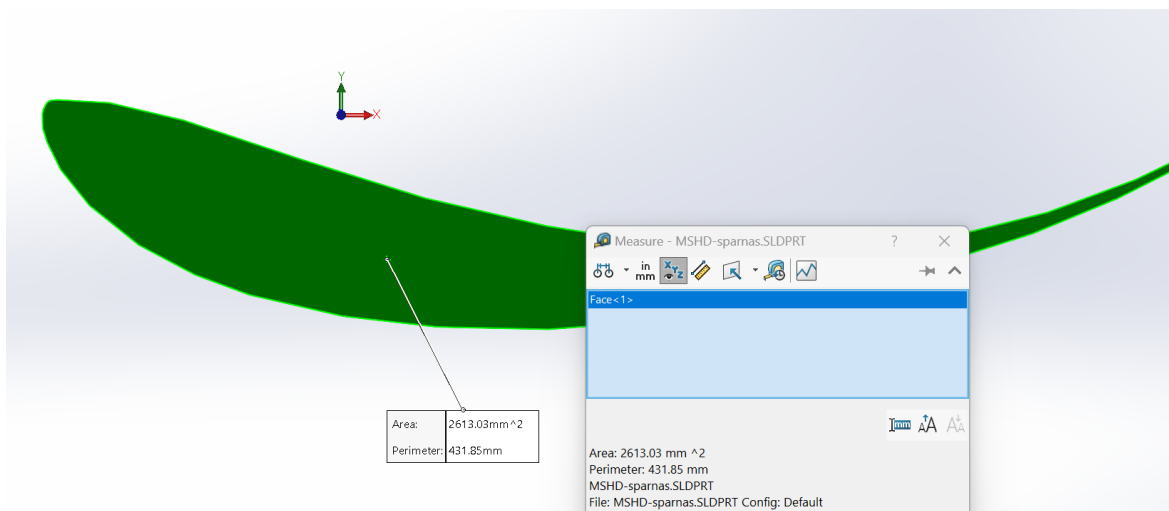
$$S_a = S_s \cdot k_s; \quad (1)$$

čia  $S_a$  – antsparnio plotas,  $m^2$ ;  $S_s$  – sparno profilio plotas,  $m^2$ ;  $k_s$  – antsparnių ploto koeficientas.

Koeficientas  $k_s$  yra parenkamas atsižvelgiant į sparno profilio tipą. Asimetriniam sparnui  $k_s = 5$ .



Sparno profilio plotas  $S_s$  apskaičiuojamas programa „SolidWorks“ (žr. 3.12 pav.).



3.12 pav. Sparno profilio plotas

Apskaičiuotas sparno profilio plotas  $S_s \approx 2613 \text{ mm}^2 \approx 0.002613 \text{ m}^2$ .

Pagal šiuos duomenis apskaičiuojamas antsparnio plotas  $S_a = 0.002613 \cdot 5 = 0,013065 \text{ m}^2$ .

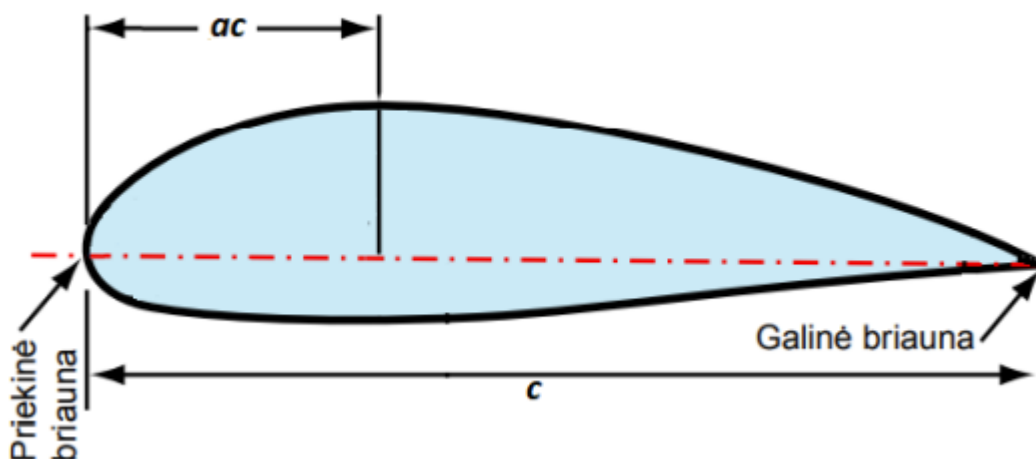
Gauta, kad vieno **antsparnio plotas turėtų būti ne mažesnis kaip  $S_a = 0,013065 \text{ m}^2$ .**

Išsiaiškinta, kad antsparnio forma nedaro didelės įtakos sparno efektyvumui, todėl antsparnio dizainas parenkamas laisvai [30].

### 3.5. Sparno sukimosi taško radimas

Sparno aerodinaminis centras yra spaudžiančiosios jėgos pokyčio veikimo taškas, kai keičiamas atakos kampas. Keičiantis atakos kampui, jo vieta nesikeičia [31].

Ikgarsiniuose greičiuose šis taškas yra stygos ketvirčio atstumu nuo priekinės briaunos (žr. 3.13pav.) [31].



3.13 pav. Sparno aerodinaminio centro radimas [30]

Sparno aerodinaminio centro padėtis nuo priekinės briaunos randama pagal (2) formulę:

$$ac = \frac{c}{4}; \quad (2)$$

čia  $ac$  – aerodinaminio centro atstumas nuo priekinės briaunos, m;  $c$  – sparno stygos ilgis, m.

Ankstesniame projekto etape pasirinkta naudoti sparną, kurio  $c = 0,2$  m.

$$ac = \frac{0,2}{4} = 0,05 \text{ m}$$

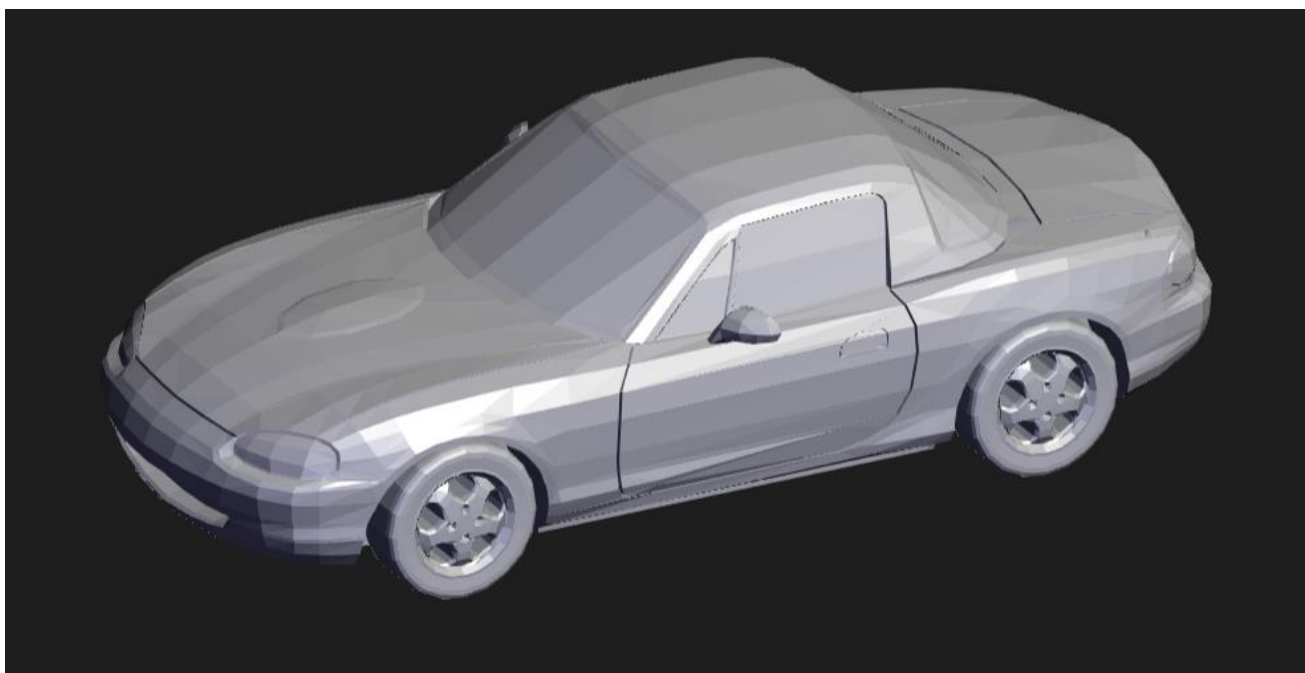
Apskaičiuota **sparno aerodinaminio centro padėtis yra  $ac = 0,05$  m** atstumu nuo priekinės sparno briaunos. Iš šio centro statmenai į viršų išvedama tiesė, ant kurios įrengiamas sparno sukimosi taškas. Apie šį tašką bus sukamas sparnas, keičiant atakos kampą [30].

#### 4. Tyrimo metodika

Šio tyrimo atlikimui pasirinkta naudoti CFD modeliavimo metodą. Tai yra labai svarbus įrankis šiuolaikinėje inžinerijoje, analizuojant įvairių skysčių, dujų srautų dinamiką skirtingose situacijose. Šis tyrimo metodas pasitelkia skaitinius ir algoritminius skaičiavimus. Transporto inžinerijoje CFD analizė yra labai reikšminga, optimizuojant transporto priemonės aerodinamiką, kuri yra viena iš esminių veiksnių, veikiančių transporto priemonės dinamines savybe, taip pat ir automobilio ekonomiškumą [32]. Šiame CFD tyrime atliekamame su „SolidWorks“ programine įranga, tiriamos „Mazda MX-5 NB“ automobilio aerodinaminės savybės. Tikslas – pagerinti automobilio dinamines savybes, padidinant aerodinaminę spaudžiančiąją jėgą, pasitelkiant automobilio galinį aptaką.

##### 4.1. Tiriamas modelis

Šio tyrimo atlikimui „SolidWorks“ modeliavimo aplinkoje kaip tyrimo objektas yra naudojamas 1:1 mastelio supaprastintas „Mazda MX-5 NB“ 3D modelis, sukurtas modeliotojo Blake'o Mcconahy (žr. 4.1 pav.) [33].



4.1 pav. Blake'o Mcconahy sukurtas Mazda MX-5 modelis [33]

Šis modelis nėra labai tikslus. Yra supaprastintų formų, turi daug aštrių kampų ir linijų, dėl to turi nemažai neatitikimų ir nukrypimų nuo originalių formų. Todėl šiame tyrime gauti rezultatai negalės būti vertinami kaip tikslūs ir neginčijami, tačiau bus tinkami bendrosioms išvadoms atlikti ir tyrimo metodui sudaryti. Šio tyrimo metu sudaryti metodai ir išvados padės tolimesniems tyrimams, naudojant tikslesnius modelius CFD modeliavimo aplinkoje, atliekant tyrimus vėjo tunelyje ir atliekant bandymus realiomis sąlygomis su tikru automobiliu.

## 4.2. Tiriamosios aplinkos duomenys

CFD modeliavimas atliekamas, panaudojant „SolidWorks“ programinę įrangą. CFD tyrimo erdmė – išorinio aptekėjimo. Modeliavimo aplinkos sąlygos pasirinktos kuo panašesnės į realias oro sąlygas lenktynių trasoje (žr. 4.2 pav.).

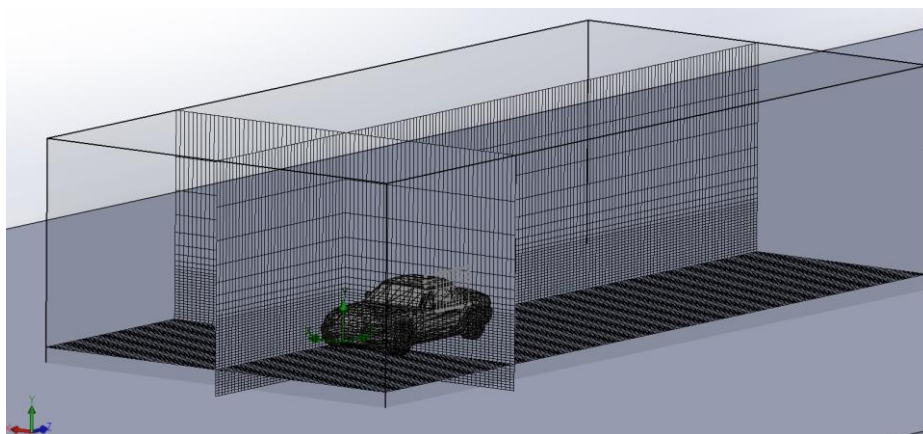
| Parameter                       | Value                           |
|---------------------------------|---------------------------------|
| <b>Parameter Definition</b>     | User Defined                    |
| <b>Thermodynamic Parameters</b> |                                 |
| Parameters                      | Pressure, temperature           |
| Pressure                        | 101325 Pa Ex                    |
| Temperature                     | 293.15 K Ex                     |
| <b>Velocity Parameters</b>      |                                 |
| Parameter                       | Velocity                        |
| Defined by                      | 3D Vector                       |
| Velocity in X direction         | 0 km/h Ex                       |
| Velocity in Y direction         | 0 km/h Ex                       |
| Velocity in Z direction         | 100 km/h Ex                     |
| <b>Turbulence Parameters</b>    |                                 |
| Parameters                      | Turbulence intensity and length |
| Turbulence intensity            | 0.1 % Ex                        |
| Turbulence length               | 0.0119439362 m Ex               |

4.2 pav. CFD tyrimo aplinkos sąlygos

### Pagrindiniai tyrimo duomenys:

- aptekėjimas – išorinis;
- fluidas – oras;
- slėgis – 101,3 kPa;
- temperatūra – 293,15 K (20°C);
- srauto greitis – 100 km/h.

Šiam tyrimui pasirinkta naudoti automatinį tinklėlį, kurio pasirinktas tankumo lygis – 6 (žr. 4.3 pav.).



4.3 pav. Skaičiuojamosios erdvės tinklėlis ir kraštinės sąlygos

### Skaičiuojamoji erdvė:

- plotis – 8 m;
- aukštis – 4,5 m;
- ilgis – 17 m;
- elementų kiekis – 483357.

### 4.3. Skaičiavimai

Skaičiavimų atlikimas yra svarbi inžinerinio tyrimo dalis.

#### 4.3.1. $C_D$ ir $C_L$ koeficientai

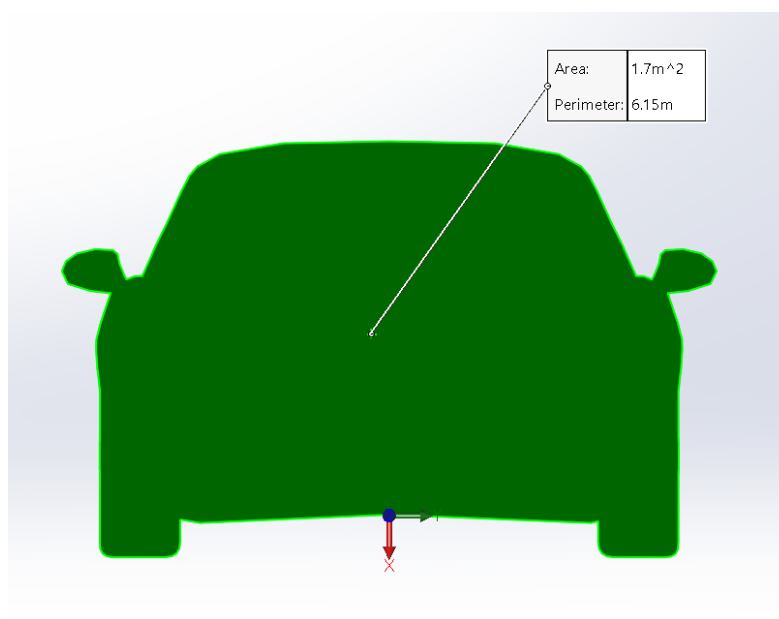
Šiame tyrime analizuojama galinio aptako įtaka automobilio aerodinaminio pasipriešinimo ir aerodinaminio kėlimo (prispaudimo) koeficientams. Šiems koeficientams apskaičiuoti naudojamos formulės (3) ir (4) [34]:

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

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

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

Dydžiai  $F_D$  ir  $F_L$  yra nustatomi CFD modeliavimo metu, pasitelkiant „SolidWorks Flow Simulation“ programinę įrangą. Plotas  $A$  taip pat apskaičiuotas, pasitelkiant „SolidWorks“ skaičiavimus (žr. 4.4 pav.).



4.4 pav. Mazda MX-5 NB priekinis skerspjūvio plotas

Pagal pateiktą priekinį automobilio vaizdą, gautas priekinis automobilio plotas yra  $1,72 \text{ m}^2$ .

#### 4.3.2. Reynoldso skaičius

Reynoldso skaičius yra vienas iš lemiančių veiksnių, projektuojant automobilio galinį aptaką [35]. Šis skaičius apibūdina oro srauto elgesį aplink sparną. Reynoldso skaičius nusako, koks yra oro srautas: laminarinis ( $Re \leq 2300$ ), turbulentinis ( $Re \geq 4000$ ) ar tarpinis ( $2300 < Re < 4000$ ) [36]. Nuo to priklauso sparno profilio pasirinkimas galinio aptako gamybai. Teisingai apskaičiuotas Reynoldso skaičius ir, atsižvelgiant į jį, parinktas sparno profilis gali užtikrinti didelį spaudžiamosios jėgos efektyvumą ir mažą aerodinaminį pasipriešinimą.

Automobilio sparną veikiantis Reynoldso skaičius nėra pastovus, nes šis dydis priklauso nuo oro srauto greičio. Šio tyrimo tikslas nėra nustatyti tikslų Reynoldso skaičių, o tik apytikslį intervalą, todėl skaičiavimams naudojami apytiksliai parametrai.

Atlikus informacinių šaltinių analizę, pastebėta, kad projektuojamo automobilio greitis lenktynių trasoje būtų kintantis maždaug nuo 80 km/h iki 200 km/h [37]. Atsižvelgiant į tai, apskaičiuojamas ir Reynoldso skaičiaus intervalas. Reynoldso skaičius išreiškiamas pagal (5) formulę [38]:

$$Re = \frac{\rho v L}{\mu} = \frac{v L}{\nu}; \quad (5)$$

$$Re_1 = \frac{v_1 L}{\nu} = \frac{22,2 \times 0,20}{1,6 \times 10^{-5}} = 2,775 \times 10^5$$

$$Re_2 = \frac{v_2 L}{\nu} = \frac{55,6 \times 0,20}{1,6 \times 10^{-5}} = 6,95 \times 10^5$$

$$v_1 = 80 \text{ km/h} = 22,2 \text{ m/s}$$

$$v_2 = 200 \text{ km/h} = 55,6 \text{ m/s}$$

$$L = 0,20 \text{ m}$$

$$\nu = 1,6 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$$

čia  $\rho$  – oro tankis  $\text{kg}/\text{m}^3$ ;  $\nu$  – oro tėkmės greitis,  $\text{m}/\text{s}$ ;  $L$  – sparno profilio stygos ilgis,  $\text{m}$ ;  $\mu$  – dinaminė klampa,  $\text{N} \cdot \text{s}/\text{m}^2$ ;  $\nu$  – kinematinė klampa,  $\text{m}^2/\text{s}$ .

Iš atlikto skaičiavimo matome, kad važiavimo metu **Reynoldso skaičius kis intervale nuo 277500 iki 695000**. Iš to galima daryti išvadą, kad oro srauto tėkmė ties galiniu sparnu lenktynių metu bus turbulentiška.

#### 4.4. Rezultatų interpretavimas

CFD tyrimo metu pagrindinis dėmesys yra skiriamas į dvi aerodinamines jėgas: keliamąją jėgą (angl. *lift*) ir pasipriešinimą (angl. *drag*). Pasipriešinimo jėga tiesiogiai įtakoja automobilio aukščiausią pasiekiamą greitį, pagreitį, degalų sąnaudas. Kita, keliančioji jėga, atsiranda dėl slėgių skirtumo ties automobilio apatiniais ir viršutiniais paviršiais [39]. Ši jėga yra priešingos krypties prispaudimo jėgai ir įtakoja automobilio sukibimą su kelio danga. Susidarius didelei keliančiajai jėgai, automobilis gali parasti sukibimą su kelio danga ir tapti nevaldomas. Ir atvirkščiai, automobilis su didele prispaudimo jėga turi gerą sukibimą su kelio danga, yra stabilus, dėl to trasos posūkius gali įveikti didesniu greičiu, neprarasdamas sukibimo su keliu.

Vienas iš transporto inžinerijos tikslų – kiek įmanoma, sumažinti abi šias jėgas. Tačiau, kai norimą drastiškai sumažinti kėlimo jėgą (padidinti prispaudimo jėgą) pasitelkiant papildomus aerodinaminius elementus, dažnai yra neišvengiamas ir pasipriešinimo jėgos padidėjimas [40].

Kasdieniniam naudojimui skirti automobiliai didesniąją dalį eksploatacijos važiuoja tiesiai, todėl, projektuojant tokį automobilį, labiau yra atsižvelgiama į pasipriešinimo jėgos sumažinimą. Todėl, priešingai nei kasdieniniam naudojimui skirti automobiliai, lenktyniniai žiediniai automobiliai yra kuriami greitam posūkių įveikimui. Šių manevrų atlikimui yra labai svarbus geras padangų sukibimas su kelio danga. Todėl, projektuojant tokį automobilį, daugiau dėmesio yra skiriama prispaudimo jėgos didinimui.

Tačiau ne visos lenktynių trasos yra vienodos konfigūracijos. Vienos turi daugiau tiesių atkarpų, kitos daugiau greitų posūkių. Dėl šios priežasties lenktyniniai automobiliai dažnai yra aprūpinami reguliuojamais aerodinaminiais elementais, leidžiančiais pasiekti optimaliausią santykį tarp prispaudimo ir pasipriešinimo jėgos, atsižvelgiant į trasos konfigūraciją ir vairuotojo vairavimo stilių.

Šio tyrimo tikslas yra nukreiptas būtent į vieno aerodinaminio elemento – galinio aptako įtaką automobilio dinamikai. Todėl šiame tyrime daugiausiai dėmesio yra skiriama galinės automobilio dalies analizei, tačiau galutiniai skaičiavimai atliekami visu automobilio plotu.

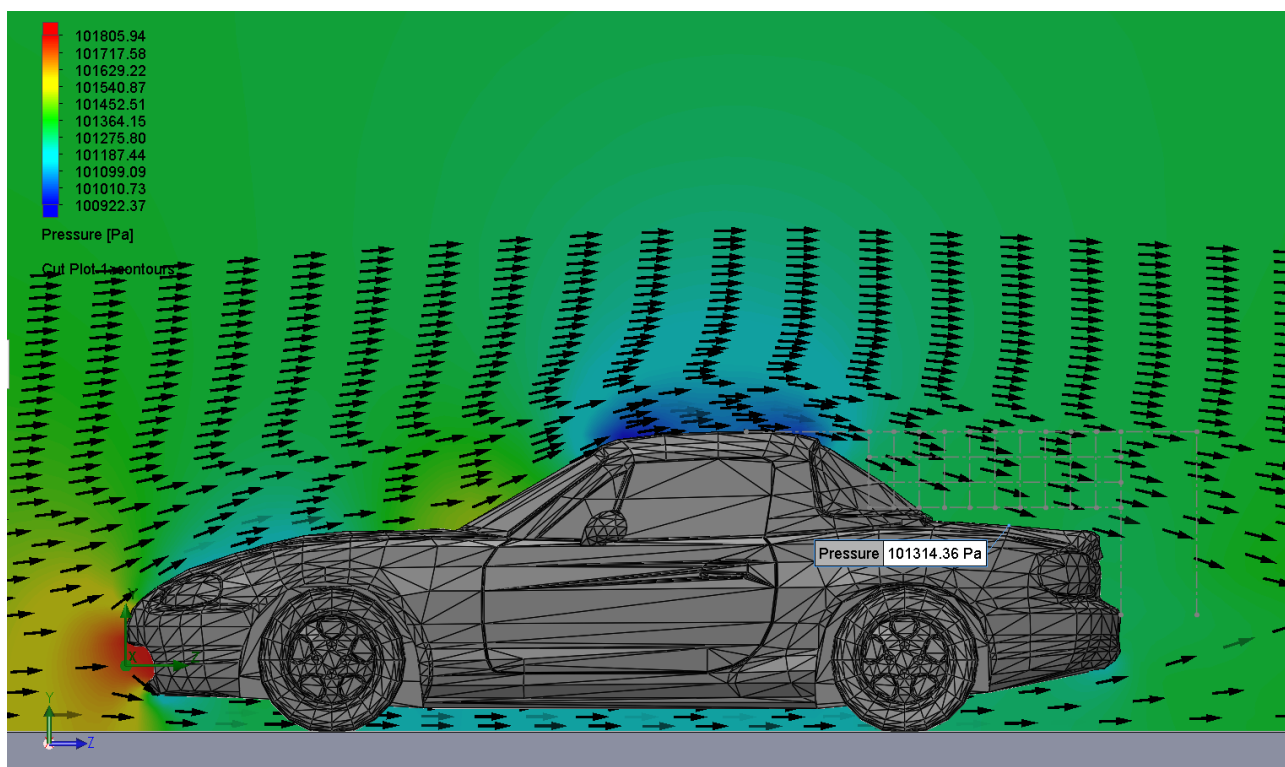
## 5. CFD tyrimo eiga

Tyrimo metu siekiama iširti automobilio aerodinamines savybes be galinio aptako, tada pagal parinktą tinkamiausią galinio aptako tipą lenktyniniam automobiliui atrasti tinkamiausią tvirtinimo poziciją, bei iširti atakos kampo įtaką automobilio dinamikai. Palyginus gautus rezultatus, parengti ir pateikti rekomendacijas galutiniam vartotojui.

### 5.1. Be galinio aptako

Pradiniame tyrimo etape atliekama „Mazda MX-5 NB“ modelio CFD analizė be jokių papildomų aerodinaminių elementų. Šio tyrimo tikslas yra nustatyti „Mazda MX-5 NB“ aerodinamines savybes originaliame būvyje ir gautus rezultatus vėliau palyginti su tyrimų rezultatais, gautais su pridėtiniais aerodinaminiais elementais.

Iš CFD modeliavimo metu gautų rezultatų pastebime, kad ties automobilio stogu susidaro nemaža žemo slėgio zona, generuojanti keliančiąją jėgą (žr. 5.1 pav.).

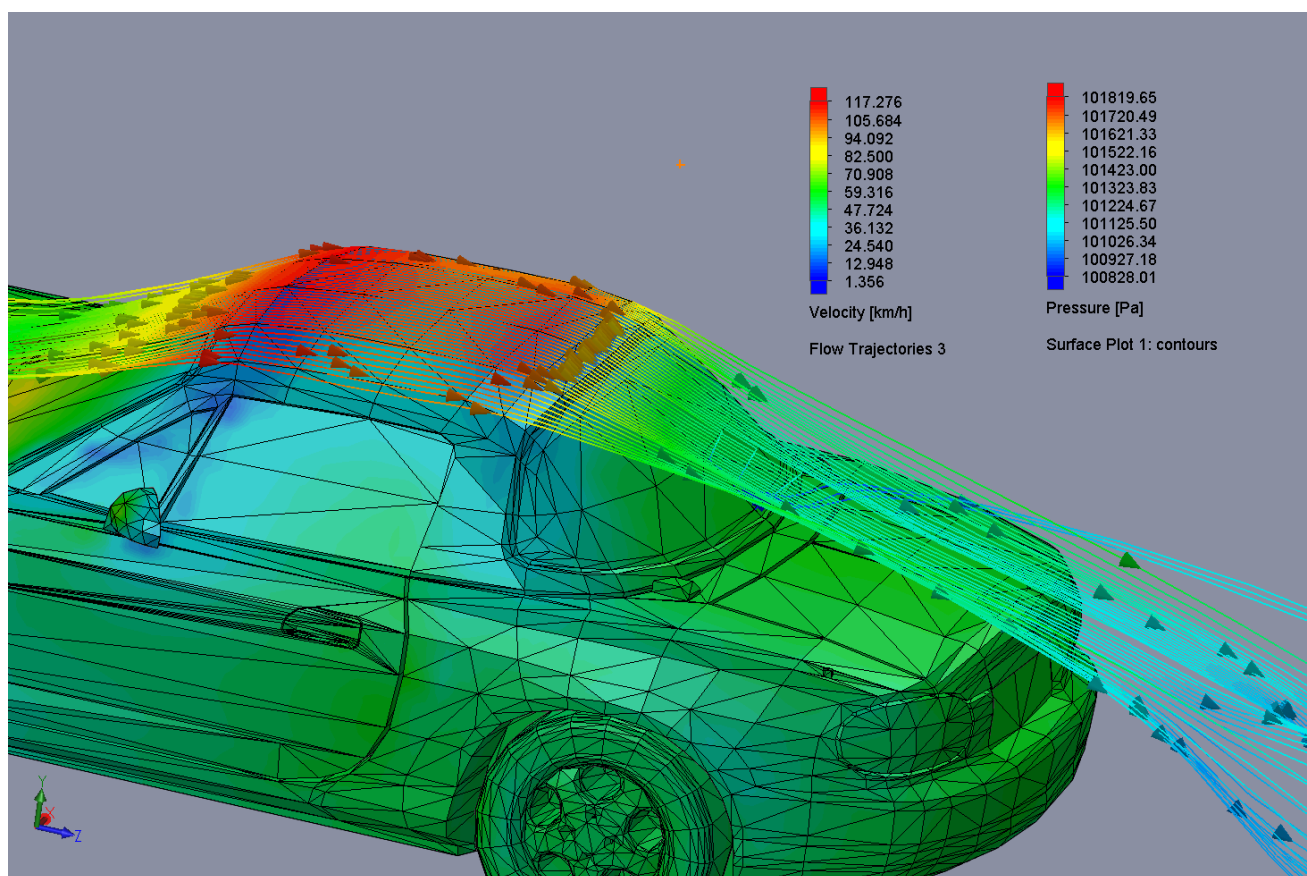


5.1 pav. CFD oro slėgio analizė be galinio aptako

Taip pat iš gauto vaizdo pastebime, kad oro srauto linijos automobilį apteka, nesudarydamos sūkurių. Oro srauto atsiskyrimai pastebimi ties automobilio galine dalimi ir dar vienas nedidelis atsiskyrimas ties automobilio galiniu langu.



Siekiant suprasti žemo slėgio zonos priežastį ties automobilio stogu, taip pat atlikta srauto greičio analizė (žr. 5.2 pav.).



5.2 pav. CFD oro slėgio ir greičio analizė be galinio aptako

Iš gauto vaizdo matome, kad ties stogu oro srautas juda didžiausiu greičiu. Iš Bernulio dėsnio žinome, kad fluideo slėgis sumažėja, kai padidėja jo greitis [41]. Taip pat matome, kad oro sraute nėra susidariusių sukurių. Sukurių nebuvimas leidžia daryti išvadą, kad galinio aptako tvirtinimas virš galinio dangčio bus efektyvus ir sugeneruos nemažą spaudžiamąją jėgą.

Atlikus skaičiavimus, gauti tokie **rezultatai**:

- Keliančioji jėga  $F_L = 111 \text{ N}$ ;
- Pasipriešinimo jėga  $F_D = 262,5 \text{ N}$ ;
- Kėlimo koeficientas  $C_L = 0,139$ ;
- Pasipriešinimo koeficientas  $C_D = 0,329$ .

Ankstesniais tyrimais atliktais realiomis sąlygomis yra nustatyta, kad „Mazda MX-5 NB“ automobilio pasipriešinimo koeficientas  $C_D = 0,36$  [42]. Tai žinant galima apskaičiuoti gauto rezultato santykinę paklaidą procentine išraiška pagal (6) formulę:

$$\left| \frac{0,36 - 0,329}{0,36} \right| \times 100 = 8,61 \% \quad (6)$$

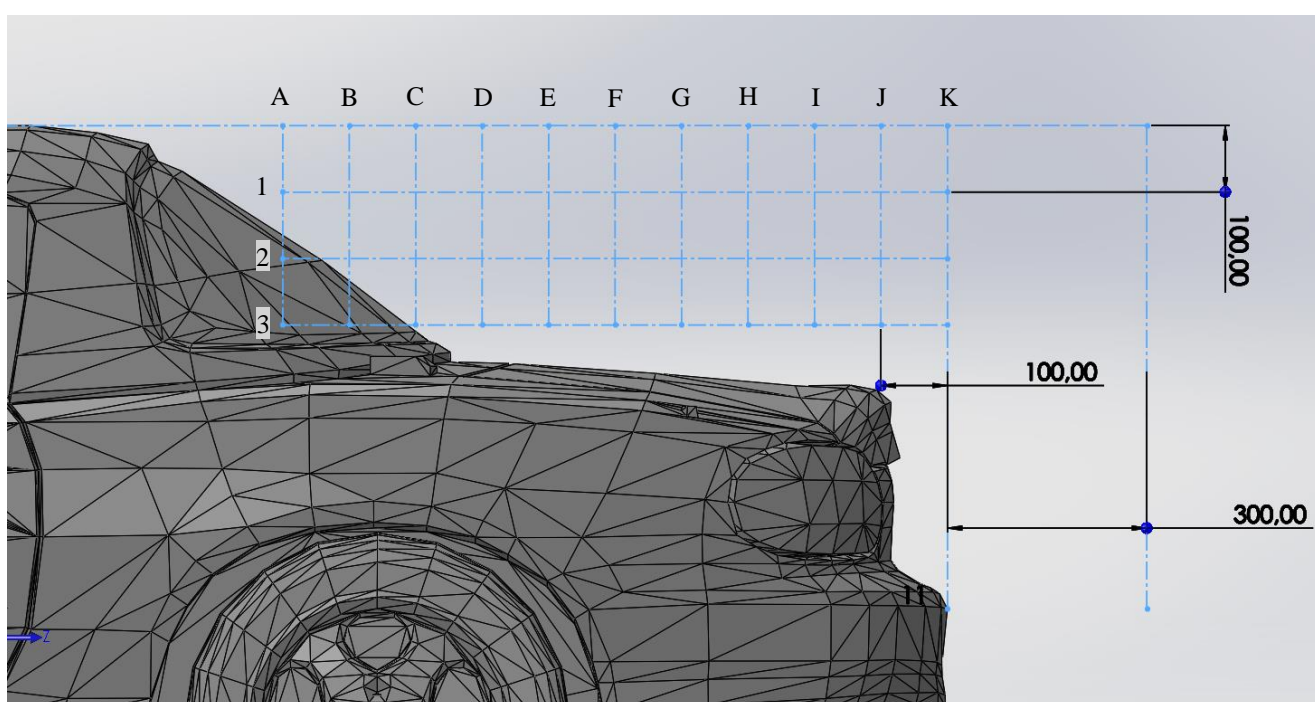
Tolimesnis šio tyrimo eigos tikslas yra sumažinti aerodinaminę automobilio keliančiąją jėgą, pasitelkiant galinį aptaką.

## 5.2. Pozicijos sparno tvirtinimui parinkimas

Remiantis anksčiau apžvelgtu „Time Attack“ lenktynių čempionato techniniu reglamentu, lenktynėse dalyvaujančių „Time Attack Pro“ klasės kabrioletų aerodinaminiai elementai negali būti aukščiau automobilio stogo linijos ir gali išsikišti ne daugiau kaip 300 mm į galą nuo galinio bamperio. [21]:

Pagal šiuos reikalavimus CFD modeliavimo būdu bus testuojamas sparno efektyvumas skirtingose pozicijose, ieškant tinkamiausios. Taip pat vėlesniuose etapuose prie sparno dar bus montuojami tvirtinimo elementai ir antsparniai, todėl priimta, kad aplink sparną turėtų būti paliekama bent 100 mm erdvės.

Atsižvelgiant į šiuos reikalavimus ir į 200 mm ilgio sparno stygą, sudaryta sparno tvirtinimo pozicijų koordinatinių sistema su 100 mm intervalais tarp pozicijų (žr. 5.3 pav.).



5.3 pav. Sparno tvirtinimo pozicijų koordinatinių sistema

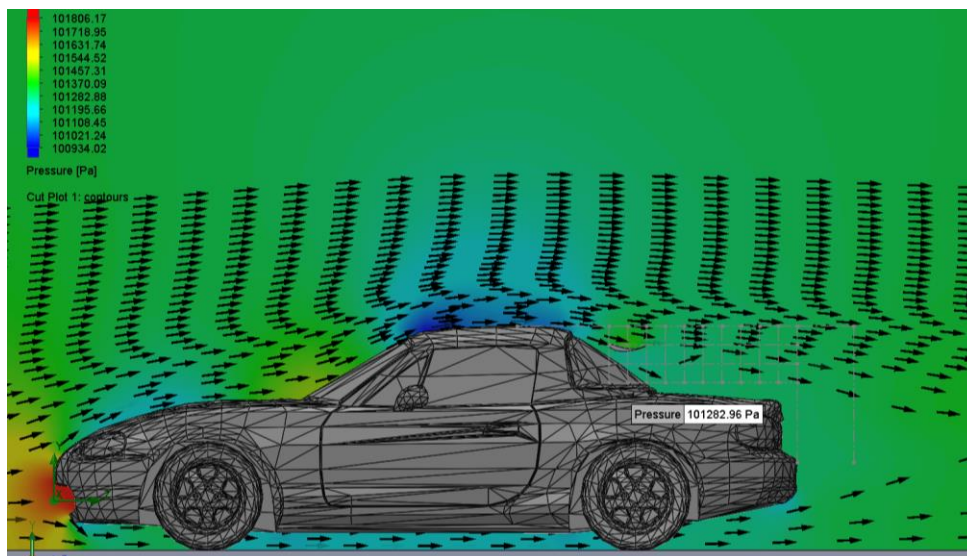
Tyrimo metu bus tikrinamas sparno efektyvumas visose šiose pozicijose, išskyrus pozicijas A2, A3, B2, B3, D3, nes šios pozicijos patenka į automobilio gabaritus arba labai arti jų.

Tinkamiausios pozicijos bandymai atliekami sparnui esant  $0^\circ$  atakos kampo padėtyje.

Tyrimas pradedamas nuo trijų kampinių pozicijų:

## A1 pozicija

Pirmoji tiriama A1 pozicija (žr. 5.4 pav.).

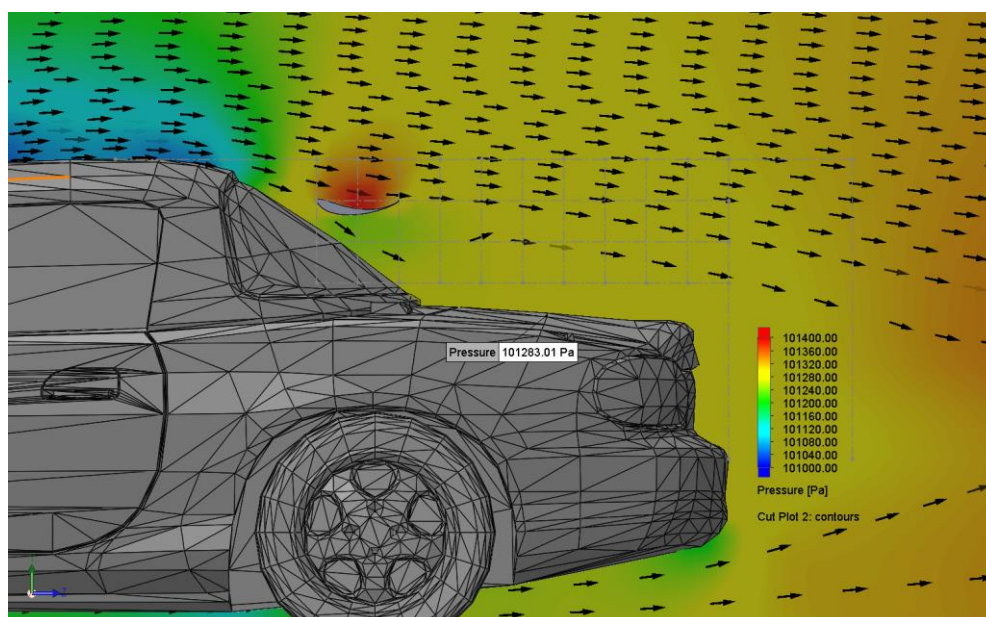


5.4 pav. CFD analizė su MSHD sparnu A1 pozicijoje

### Gauti rezultatai:

- Keliančioji jėga  $F_L = 15,5$  N;
- Pasipriešinimo jėga  $F_D = 278,7$  N;
- Kėlimo koeficientas  $C_L = 0,019$ ;
- Pasipriešinimo koeficientas  $C_D = 0,348$ .

Iš gautų rezultatų matome, kad ženkliai sumažėjo automobilio keliančioji jėga ir nedaug padidėjo automobilio pasipriešinimas. CFD analizės vaizde (žr. 5.5 pav.) matoma susidariusi aukšto slėgio zona sparno viršutinėje dalyje ir žemesnio slėgio zona sparno apatinėje dalyje. Šios zonos ir lėmė gautus rezultatus. Taip pat pastebimas slėgio padidėjimas ties automobilio stogo galine dalimi.

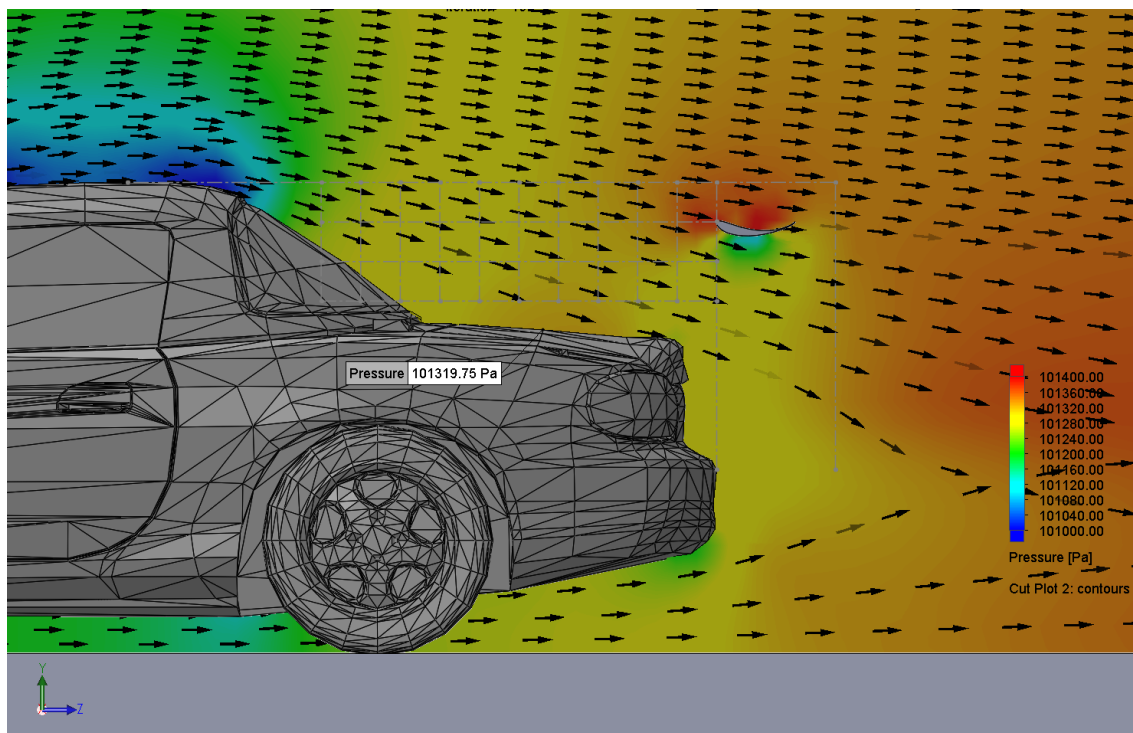


5.5 pav. CFD analizė su MSHD sparnu A1 pozicijoje. Automobilio galas

Tokį rezultatą galime laikyti tenkinančiu. Taip pat ši pozicija turi pranašumą prieš kitas, nes yra tiesiai virš galinės automobilio ašies. Žemo slėgio zonos sumažėjimas ties automobilio stogu yra į priekį nuo galinės automobilio ašies. Tai reiškia, kad visa sparno sugeneruota spaudžiančioji jėga su automobilio galine ašimi nesudaro svarto, kuris keltų priekinius automobilio ratus. Todėl nauda būtų jaučiama ne tik automobilio galiniams ratams, bet ir priekiniams. Tačiau bus išbandoma ir daugiau skirtingų pozicijų, siekiant atrasti padėtį, sugeneruojančią mažiausią kėlimo koeficientą  $C_L$ .

### K1 pozicija

Antrojo bandymo metu testuojama, kaip horizontalaus atstumo padidėjimas nuo automobilio galinio lango įtakoja sparno efektyvumą (žr. 5.6 pav.).



5.6 pav. CFD analizė su MSD sparnu K1 pozicijoje

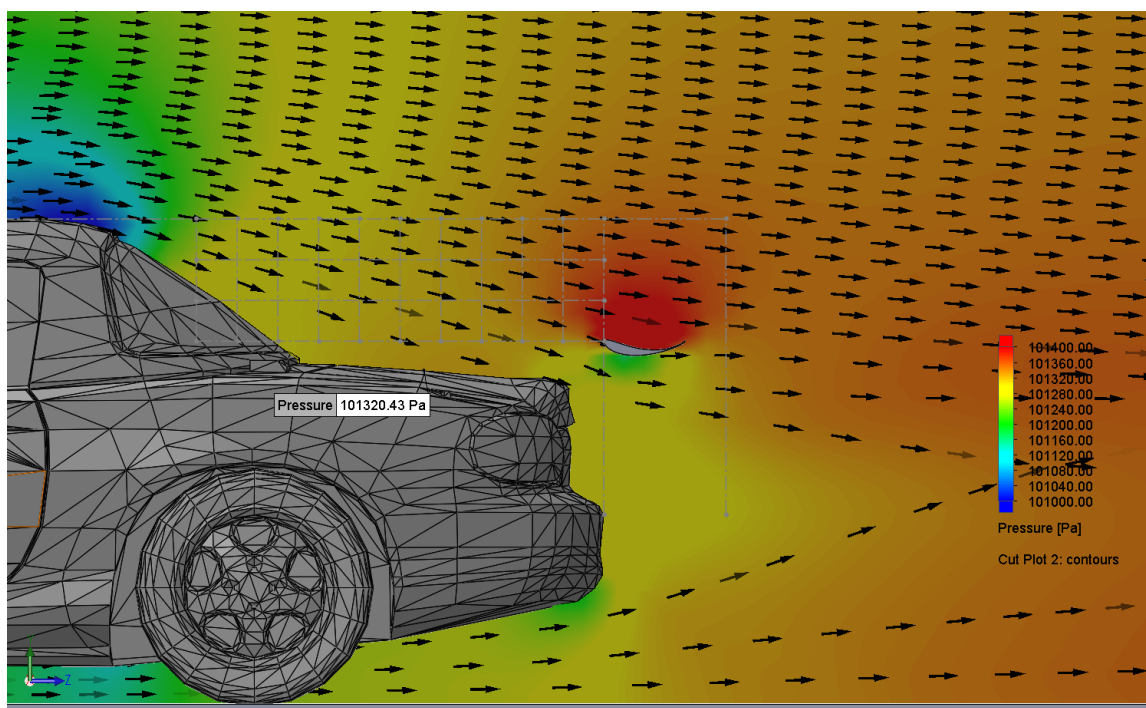
### Gauti rezultatai:

- keliančioji jėga  $F_L = 59,3$  N;
- pasipriešinimo jėga  $F_D = 282,6$  N;
- kėlimo koeficientas  $C_L = 0,074$ ;
- pasipriešinimo koeficientas  $C_D = 0,354$ .

Iš gautų rezultatų matome didesnę aerodinaminę pasipriešinimą ir kiek didesnę kėlimo jėgos dydį už A1 pozicijoje. Priešingai nei A1 pozicija, ši nesudaro žemo slėgio zonos sumažėjimo ties automobilio stogu. Todėl pastebima sugeneruojama kiek mažesnė prispaudimo jėga. Didesnę aerodinaminio pasipriešinimo jėgą galėjo lemti atsiradusi aukšto slėgio zona sparno priekinėje dalyje. Taip pat šio sparno sugeneruojama spaudžiančioji jėga sudaro nemažą svartą su galine automobilio ašimi. Tai gali įtakoti prastesnę automobilio priekinių ratų prispaudimą prie kelio dangos. Tokia pozicija vertinama kaip netinkama.

## K3 pozicija

Trečiojo bandymo metu testuojama vertikalaus atstumo nuo bagažinės dangčio įtaka sparno efektyvumui, jį nuleidžiant į žemesnę poziciją (žr. 5.7 pav.).



5.7 pav. CFD analizė su MSHD sparnu K3 pozicijoje

### Gauti rezultatai:

- keliančioji jėga  $F_L = 26,8 \text{ N}$ ;
- pasipriešinimo jėga  $F_D = 270 \text{ N}$ ;
- kėlimo koeficientas  $C_L = 0,034$ ;
- pasipriešinimo koeficientas  $C_D = 0,338$ .

Lyginant šią poziciją su K1, rezultatai yra gan panašūs. Gauta kiek mažesnė keliančioji jėga ir pastebėtas žemesnis slėgis sparno priekinėje dalyje. Dėl šios priežasties sukuriama pasipriešinimo jėga yra mažesnė.

### Visos pozicijos

Ištyrus tris kampines sparno tvirtinimo pozicijas, pastebėtas didesnis sparno efektyvumas, kai jis tvirtinamas žemiau ir arčiau galinės automobilio ašies. Tačiau, siekiant surasti geriausią sparno tvirtinimo poziciją, analizė atliekama visose padėtyse. Gauti kėlimo koeficientai  $C_L$  pateikiami 2 lentelėje, o pasipriešinimo koeficientai  $C_D$  pateikiami 3 lentelėje.

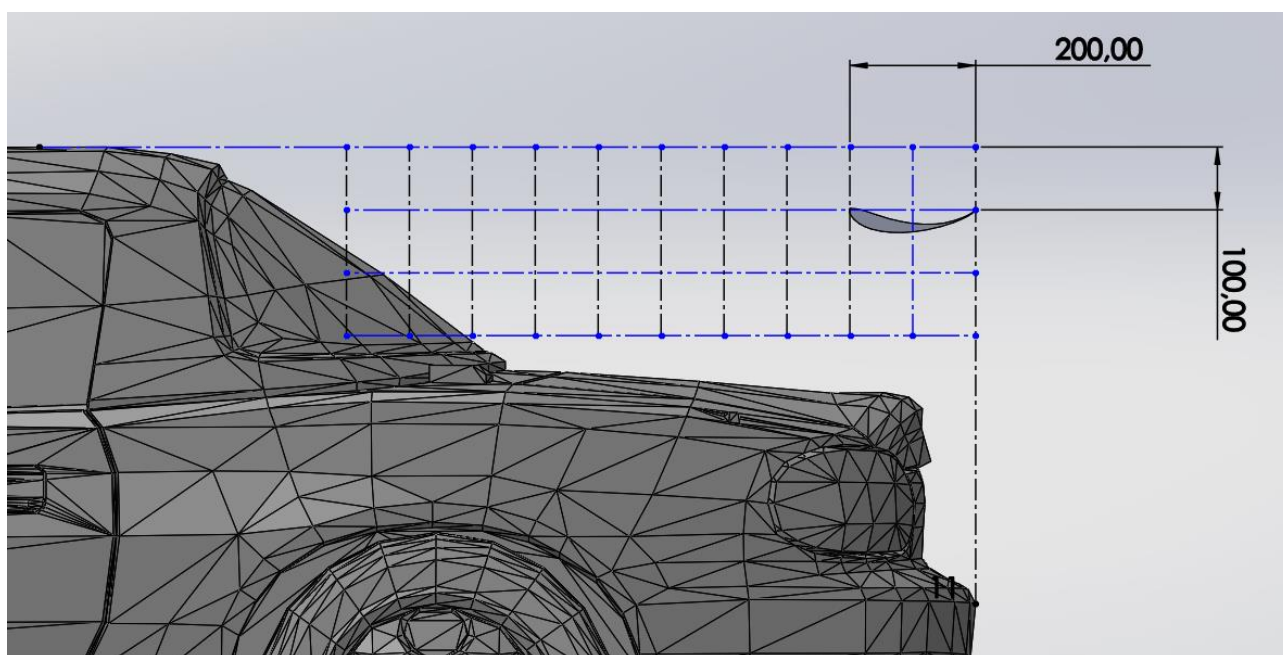
**2 lentelė.** Automobilio  $C_L$  sparnui esant skirtingose pozicijose.

|   | A     | B     | C     | D     | E      | F       | G      | H      | I      | J      | K     |
|---|-------|-------|-------|-------|--------|---------|--------|--------|--------|--------|-------|
| 1 | 0,019 | 0,027 | 0,039 | 0,006 | -0,024 | -0,0245 | -0,049 | -0,057 | -0,081 | 0,02   | 0,074 |
| 2 | –     | –     | 0,061 | 0,053 | 0,041  | 0,024   | -0,003 | -0,02  | -0,041 | -0,025 | -0,02 |
| 3 | –     | –     | –     | 0,121 | 0,1    | 0,07    | 0,052  | 0,035  | 0,008  | 0,004  | 0,034 |

### 3 lentelė. Automobilio C<sub>D</sub> sparnui esant skirtingose pozicijose

|   | A     | B     | C     | D     | E     | F     | G     | H     | I     | J     | K     |
|---|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 1 | 0,348 | 0,357 | 0,357 | 0,364 | 0,365 | 0,363 | 0,364 | 0,37  | 0,37  | 0,341 | 0,354 |
| 2 | –     | –     | 0,351 | 0,345 | 0,349 | 0,352 | 0,354 | 0,357 | 0,359 | 0,358 | 0,359 |
| 3 | –     | –     | –     | 0,338 | 0,335 | 0,335 | 0,336 | 0,338 | 0,34  | 0,345 | 0,338 |

Apžvelgus rezultatus, pateiktus šiose lentelėse, pastebėta, kad mažiausias užfiksuotas kėlimo koeficientas (mažiau yra geriau) yra -0,081. Šis rezultatas pasiektas sparnui esant II pozicijoje (žr. 5.8 pav.). Taip pat, šioje pozicijoje užfiksuotas ir didžiausias pasipriešinimo koeficientas, siekiantis 0,37. Tačiau pastebėta, kad pasipriešinimo koeficiento skirtumai tarp skirtingų pozicijų yra ne didesni nei 15 %, todėl pasirinkta šio dydžio nevertinti.

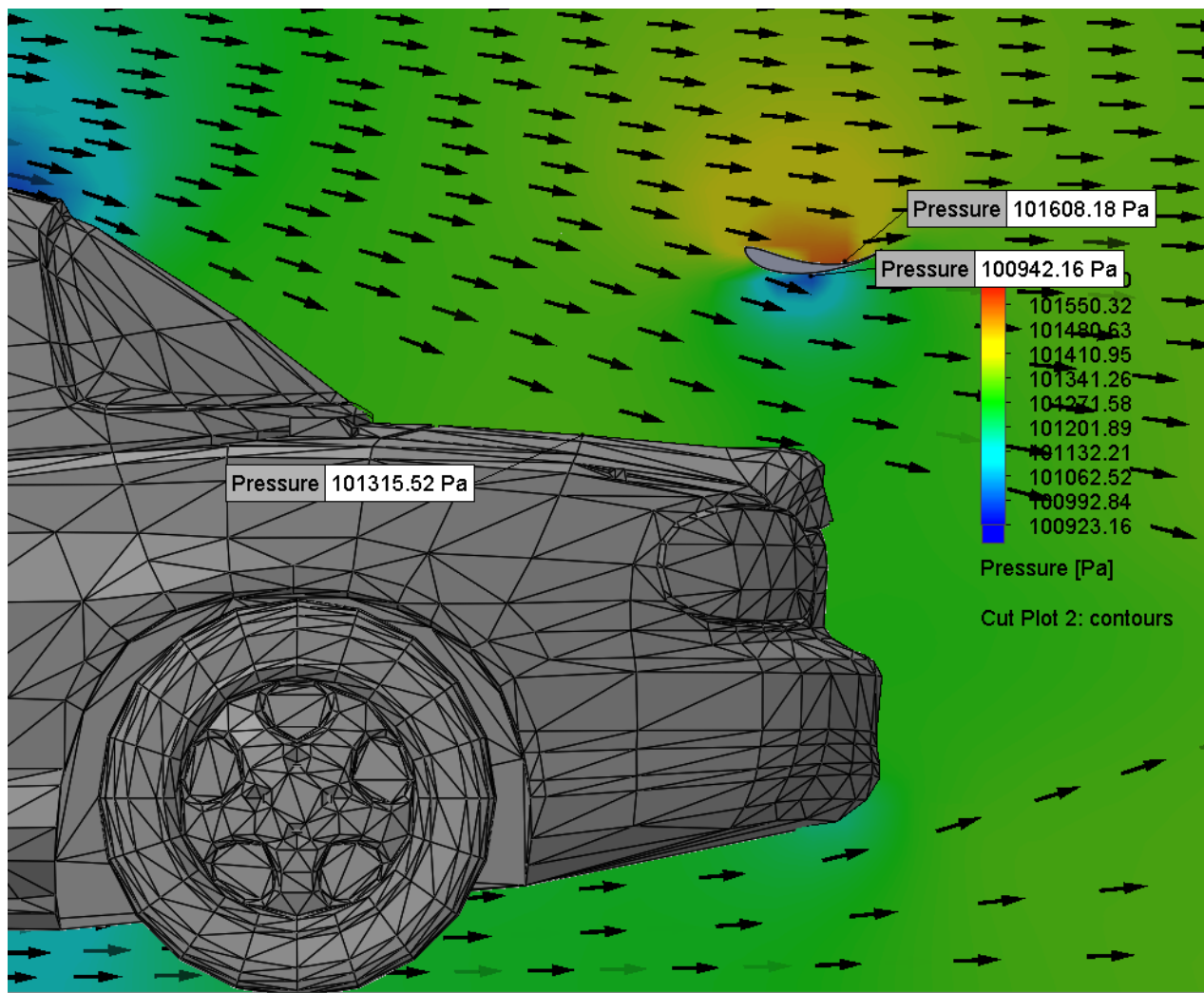


5.8 pav. II sparno tvirtinimo pozicija

Dėl mažiausio kėlimo koeficiento tolimesniuose tyrimo etapuose **pasirinkta naudoti sparną II pozicijoje.**

## I1 pozicija

Šiame tyrimo etape detaliau apžvelgiama I1 pozicija pasitelkiant CFD vizualizacijas (žr. 5.9 pav.).



5.9 pav. CFD analizė su MSHD sparnu I1 pozicijoje

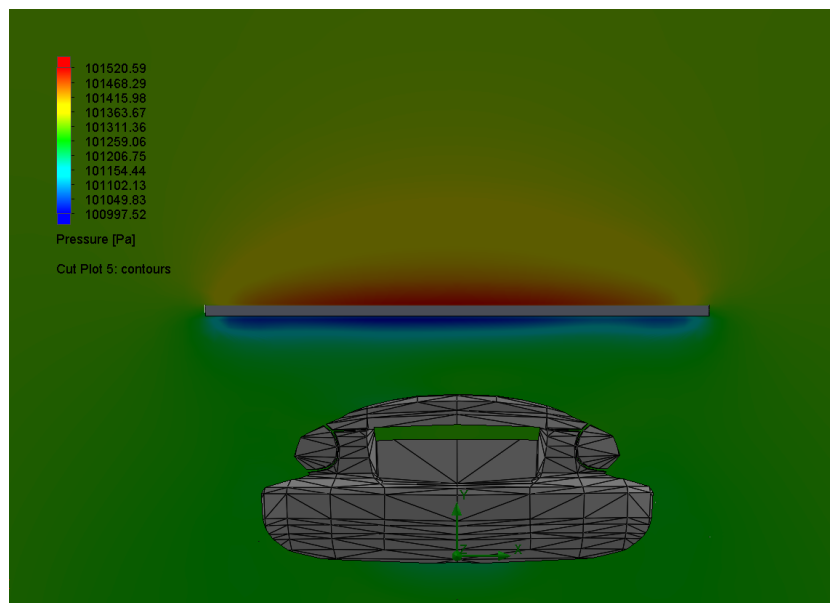
### Gauti rezultatai:

- keliančioji jėga  $F_L = -65$  N;
- pasipriešinimo jėga  $F_D = 295,7$  N;
- kėlimo koeficientas  $C_L = -0,081$ ;
- pasipriešinimo koeficientas  $C_D = 0,37$ ;

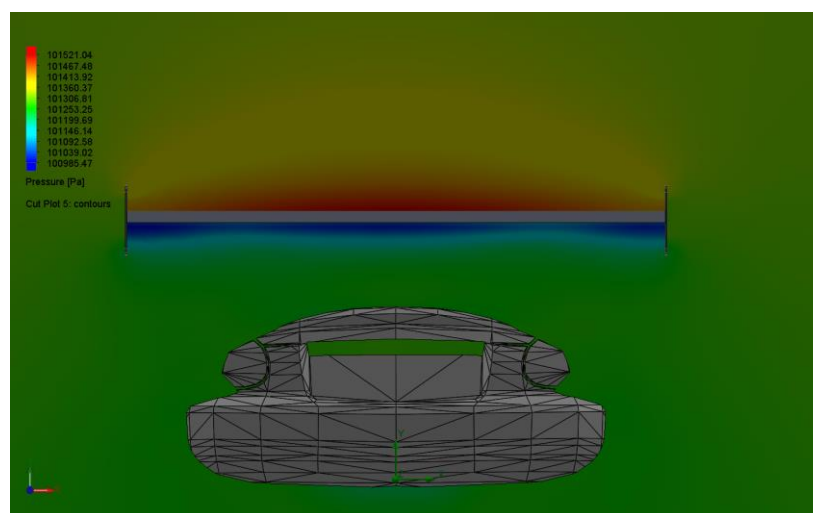
Iš gautos CFD vizualizacijos matome, kad sparnas šioje pozicijoje nesudaro žemo slėgio zonos ties bagažo dangčiu. Taip pat matomos susidariusios aukšto ir žemo slėgio zonos ties sparno viršutine ir apatine pusėmis, generuojančios sparno spaudžiančiąją jėgą.

### 5.3. Antsparnių nauda

Dėl plataus reguliuojamo atakos kampo diapazono aptake pasirinkta antsparnius naudoti didesnius, nei apskaičiuota 3.4 dalyje. Gamybai pasirinktos naudoti dvi kvadratinės plokštelės, suapvalintais kampais, kurių matmenys yra  $210 \times 210$  mm. Šios plokštelės montuojamos abėjuose sparno galuose. Jų efektyvumas tiriamas CFD analizės būdu (žr. 5.10 pav. ir 5.11 pav.).



5.10 pav. CFD analizė MSHD sparno be anstparnių



5.11 pav. CFD analizė MSHD sparno su anstparniais

#### Gauti rezultatai:

- keliančioji jėga  $F_L = -74,43$  N;
- pasipriešinimo jėga  $F_D = 298,7$  N;
- kėlimo koeficientas  $C_L = -0,093$ ;
- pasipriešinimo koeficientas  $C_D = 0,374$ .

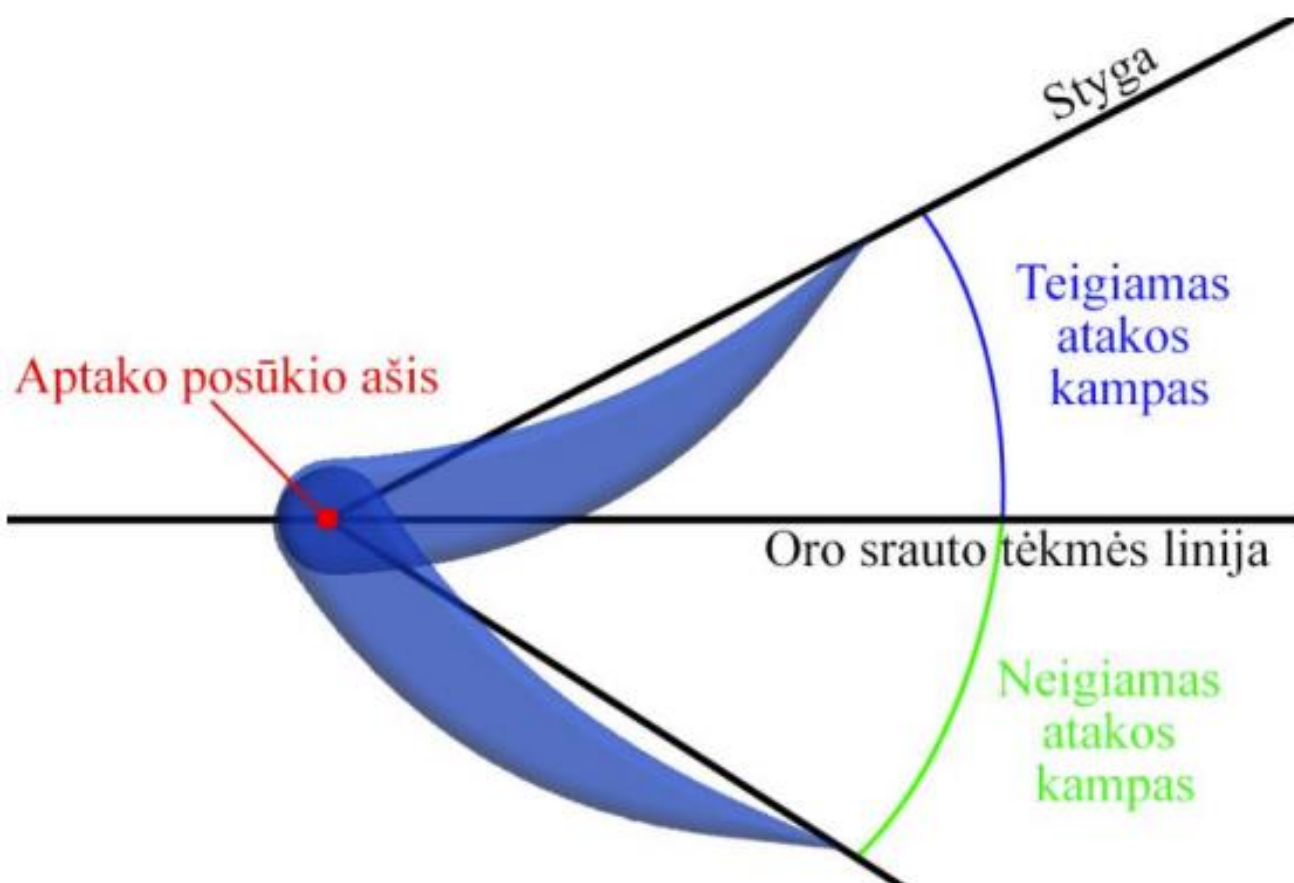


CFD analizės metu gautose vizualizacijose matoma, kad sumontavimas padėjo sparnui pasiekti didesnę slėgių skirtumą tarp sparno apatinės ir viršutinės pusių. Taip pat pastebima, kad užmontavus antsparnius yra išvengiama slėgių suvienodėjimo sparno galuose. Tai leidžia efektyviau išnaudoti visą sparno plotą. Aukšto ir žemo slėgio zonos tęsiasi nuo vieno sparno krašto iki kito.

#### 5.4. Atakos kampo parinkimas

Šiame tyrimo etape bus analizuojama sparno atakos kampo įtaka jo efektyvumui.

Atakos kampas apibūdina krypties, kuria juda laisvas oro srautas, ir sparno profilio stygos linijos susikirtimo kampą [31]. Ši sąvoka yra iliustruota 5.12 paveikslėlyje, kuris vaizduoja, kaip šis kampas yra nustatomas.



5.12 pav. Atakos kampo nustatymas [43]

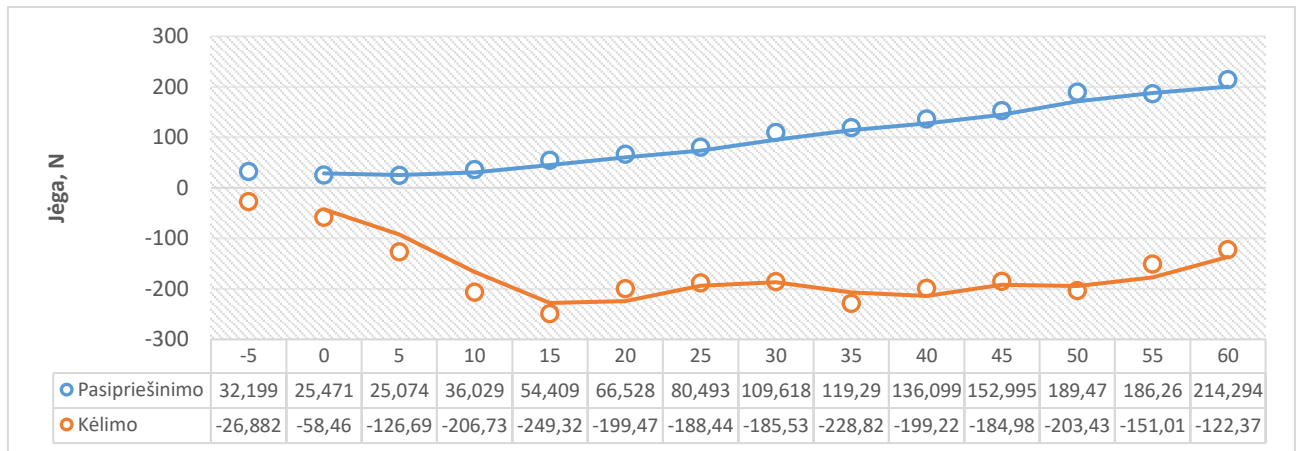
Atakos kampo parinkimas daro įtaką sparno spaudžiančiajai ir pasipriešinimo jėgoms. Įprastomis sąlygomis, didinant atakos kampą, didėja ir šios jėgos iki tokios ribos, kai, esant labai dideliame atakos kampui, prasideda oro srauto atsiskyrimas nuo apatinės sparno dalies. Tuomet sparnas praranda efektyvumą ir pradeda veikti kaip oro stabdis dėl stipriai išaugusio pasipriešinimo.

Lenktynių trasos turi skirtingas konfigūracijas: vienose daug posūkių, kitose daug greitų tiesių... Dėl šios priežasties lenktyniniuose automobiliuose atakos kampas dažnai yra reguliuojamas, priklausomai nuo trasos konfigūracijos ir vairuotojo vairavimo stiliaus. Reguluojant atakos kampą, siekiama išgauti optimaliausią santykį tarp prispaudimo jėgos ir pasipriešinimo.

Šiame skyriuje siekiama ištirti atakos kampo įtaką aerodinaminėms prispaudimo ir pasipriešinimo jėgoms. Tyrimas atliekamas pasitelkiant „SolidWorks Flow Simulation“ programinę įrangą.

Atliekant šį tyrimą, skaičiuojamos jėgos, veikiančios sparną ir visą automobilio paviršiaus plotą. Tyrimo metu sparno atakos kampas, pradedant nuo  $-5^\circ$ , kas  $5^\circ$  didinamas iki  $60^\circ$ .

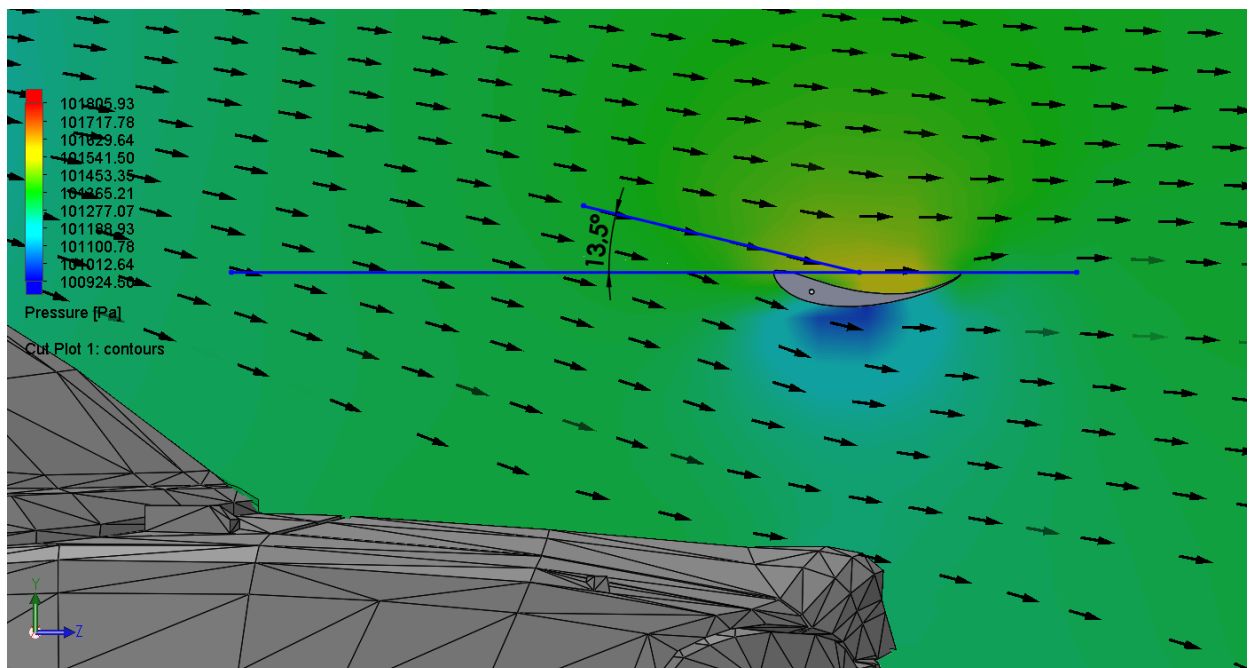
Pirmiausia ištiriama atakos kampo įtaka sparno sugeneruojamoms jėgoms, važiuojant 100 km/h greičiu. Gauti rezultatai – keliančioji jėga ir pasipriešinimo jėga – pateikiamos 5.13 paveiksle.



5.13 pav. Sparno aerodinaminių jėgų priklausomybė nuo sparno atakos kampo

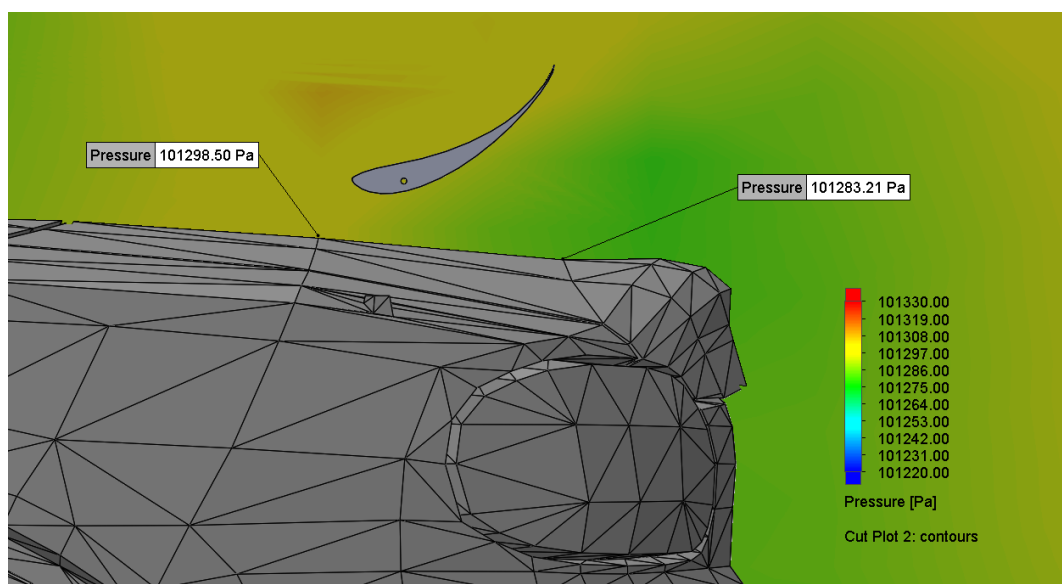
Tačiau, reguliuojant automobilio galinį aptaką, nereikėtų vadovautis vien tik šiuo grafiku. Vertinant automobilio aerodinamiką, negalima vertinti kiekvieno elemento aerodinaminių savybių atskirai. Automobilis turėtų būti vertinamas kaip elementų visuma, nes kiekvienas elementas gali daryti įtaką kitų elementų aerodinaminėms savybėms [44].

Atliekant CFD tyrimą pastebėti keli atvejai, kai vienu elementų geometrija daro įtaką kitų elementų aerodinaminėms savybėms. Pastebėta, kad ties automobilio vidurine dalimi dėl geometrijos įtakos pasirinktoje pozicijoje oro srautas į sparną teka ne horizontaliai, o sudarydamas apie  $13,5^\circ$  kampą (žr. 5.14 pav.).



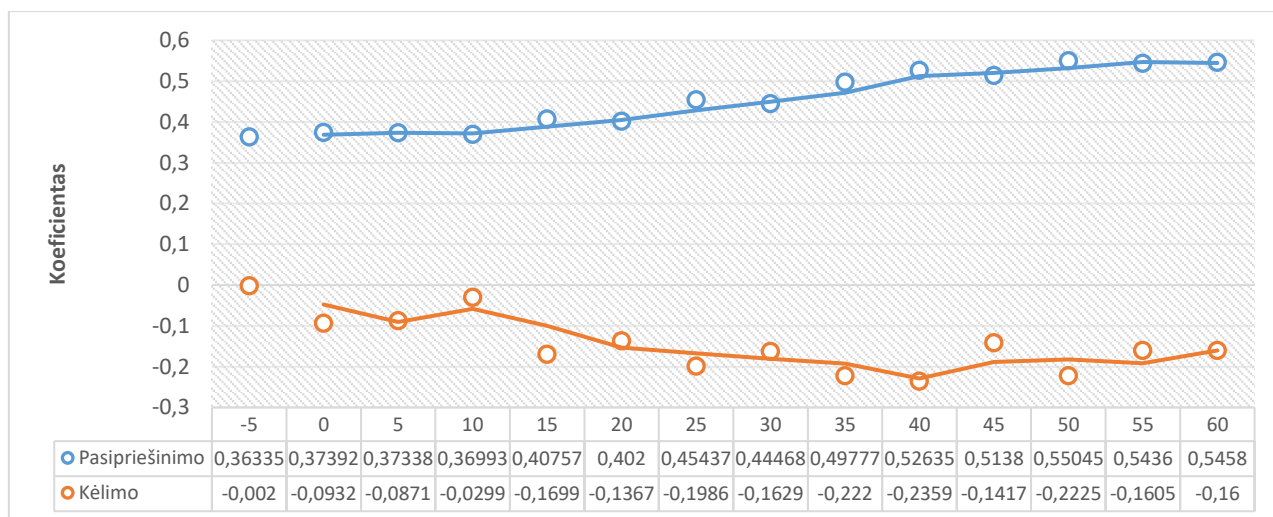
5.14 pav. Oro srautas, tekantis į sparną

Taip pat pastebėta, kad sparno pozicija ir atakos kampas gali lemti aukšto ir žemo slėgio zonų susidarymą ties galine automobilio dalimi (žr. 5.15 pav.).



5.15 pav. Sparno įtaka aukšto ir žemo slėgio zonų susidarymui

Todėl, ruošiant atakos kampo reguliavimo rekomendaciją galutiniam vartotojui, „Mazda MX-5 NB” automobilis ir jo aptakas tiriami kaip bendras objektas. Tyrimas atliekamas, pasitelkiant „SolidWorks Flow Simulation“ programinę įrangą, kurioje CFD analizės būdu iširtos automobilį ir aptaką veikiančios kėlimo  $F_L$  ir pasipriešinimo  $F_D$  jėgos, o iš jų pagal 3 ir 4 formules apskaičiuoti  $C_L$  ir  $C_D$  koeficientai. Gauti rezultatai pateikiami 5.16 paveiksle.



5.16 pav. Automobilio aerodinaminių koeficientų priklausomybė nuo sparno atakos kampo

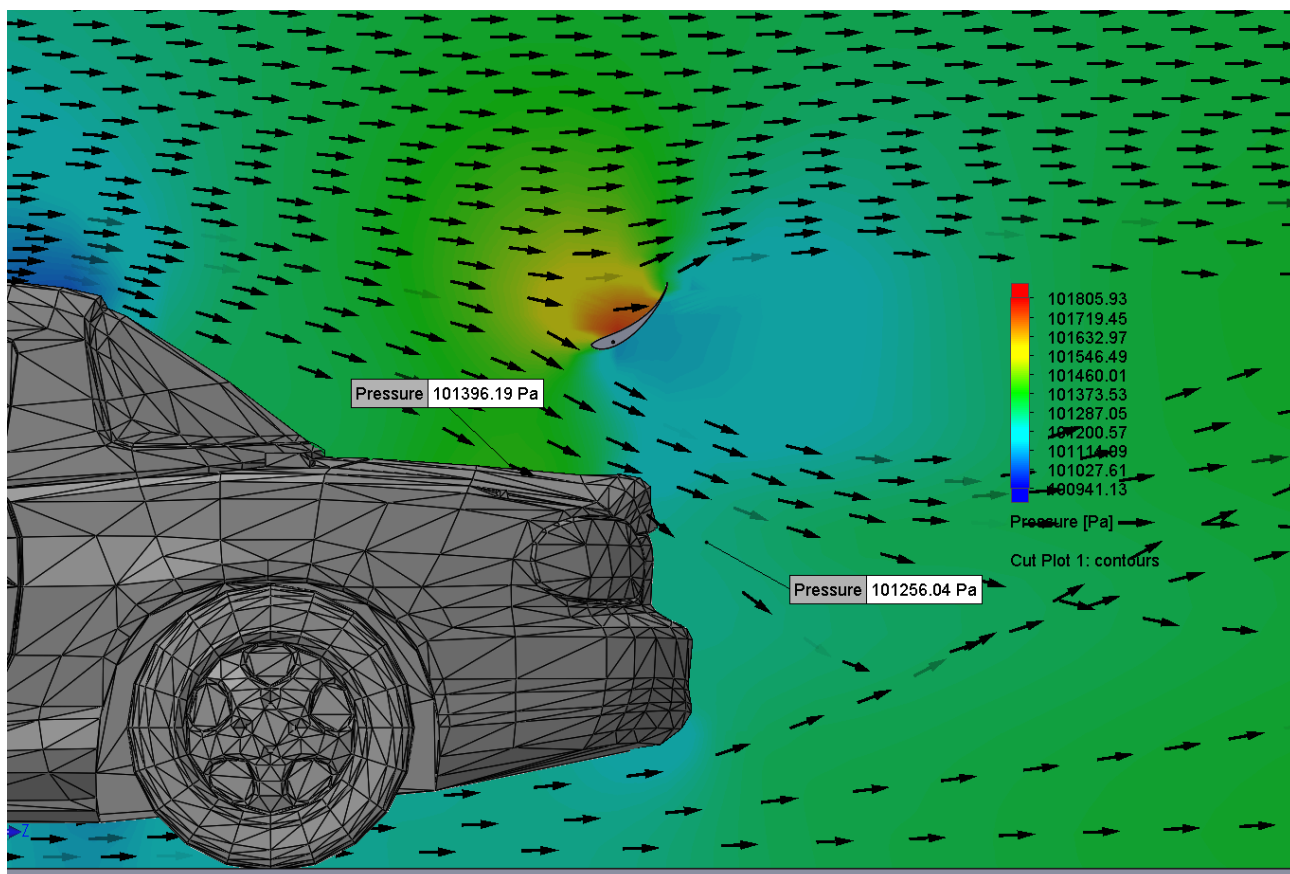
Iš gautų rezultatų matoma, kad pasitelkiant galinį aptaką, pavyko automobilio kėlimo koeficientą  $C_L$  sumažinti nuo 0,019 iki -0,2359. Tačiau pasipriešinimo koeficientas  $C_D$  padidėjo nuo 0,348 iki 0,5263 (ties 40° atakos kampu).

## 6. Atakos kampo nustatymo rekomendacijos galutiniam vartotojui

Iš 5.16 paveiksle pateiktų duomenų matoma, kad mažiausias pasipriešinimas gaunamas atakos kampui esant intervale tarp  $-5^\circ$  ir  $10^\circ$ . Tačiau matoma, kad  $-5^\circ$  ir  $10^\circ$  pasirinkimai nepasižymi didele spaudžiamąja jėga. Todėl lenktynių trasose su daug tiesių kelio ruožo atkarpų ir nedaug posūkių rekomenduojama naudoti pasirinkimą tarp  $0^\circ$  ir  $5^\circ$ . Šis atakos kampo pasirinkimas nesudaro didelio aerodinaminio pasipriešinimo, tačiau papildoma spaudžiamoji jėga suteikia automobiliui stabilumo.

Vidutinio greičio trasose rekomenduojama rinktis atakos kampo pasirinkimus intervale tarp  $15^\circ$  ir  $35^\circ$ , atsižvelgiant į duomenis, pateiktus 5.16 paveiksle, ir į lenktynių trasos konfigūraciją.

Trasose su labai daug greitų posūkių ir mažai tiesių atkarpų labai svarbus kuo didesnis padangų sukibimas su kelio danga, tačiau ne toks svarbus pasipriešinimo dydis, nes automobilis neturi ilgų tiesių atkarpų išbėgėjimui. Tokioms trasoms, atsižvelgiant į 5.16 paveikslą, rekomenduojama naudoti didesnę atakos kampą. Pastebėta, kad mažiausias kėlimo koeficientas yra fiksuojamas, kai atakos kampas yra  $40^\circ$  (žr. 5.17 pav.). Viršijus šį kampą, sparno efektyvumas pradeda mažėti dėl atsiskyrusio oro srauto nuo apatinės sparno dalies, o pasipriešinimo koeficientas tik didėja didinant kampą.



5.17 pav. MSHD sparnas su  $40^\circ$  atakos kampu

Gautoje vizualizacijoje matome, kad sparno atakos kampui esant  $40^\circ$  pozicijoje susidaro labai didelė aukšto slėgio zona, kuri spaudžia ne tik viršutinę sparno dalį, bet ir bagažinės dangčio paviršių dideliu plotu. Taip pat susidaro žemo slėgio zona automobilio galinėje dalyje. Ši sritis įtakoja greitesnį oro pasišalinimą iš po automobilio ir dėl Bernulio dėsnio susidaranti žemo slėgio zona po automobilio

## **Įspėjimas**

Galinio aptako sugeneruota spaudžiamoji jėga didina automobilio padangų sukibimą su kelio danga galiniams automobilio ratams. Montuojant galinį aptaką yra būtina atkreipti dėmesį į tai, kad drastiškai padidinus aerodinaminę spaudžiamąją jėgą į automobilio galinius ratus gali suveikti svertų principas. Tuomet automobilio priekiniai ratai gali prarasti sukibimą su kelio danga ir automobilis gali tapti nevaldomas. Todėl rekomenduojama dėl geresnio aerodinaminių jėgų balanso ir dar didesnio efektyvumo kartu su galiniu aptaku priekinėje automobilio dalyje montuoti papildomus aerodinaminius elementus, kurie padidintų spaudžiamąją jėgą automobilio priekiniams ratams.

## Išvados

1. Atlikta aptako analogų analizė, apžvelgti populiariausi ant automobilių montuojamų galinių aptakų tipai. Įvertinus skirtingų aptakų tipų privalumus ir trūkumus, nuspręsta naudoti pjedestalinio tipo aptaką, nes nustatyta, kad šis aptako tipas sugeneruoja daugiausia spaudžiančiosios jėgos. Taip pat apžvelgus mokslinius tyrimus išsiaiškinta, kad galinio aptako dizainas stipriai įtakoja automobilio funkcionalumą ir aerodinamines savybes. Atidžiai parinkus tinkamiausią atakos kampą, sparno profilio formą, galima ženkliai pagerinti automobilio dinamiką.
2. Suprojektuota galinio aptako konfiguracija. Aptako gamybai pasirinkta naudoti 1660 mm pločio MSHD sparno profilį, kurio stygos ilgis 200 mm. Pasirinkta sparną tvirtinti iš viršaus, sparno galuose naudoti 210 × 210 mm dydžio antsparnius.
3. CFD analizės būdu ištirta, kaip skirtingi galinio aptako dizainai paveiks automobilio dinamiką. Parinkta sparno tvirtinimo pozicija – 100 mm žemiau stogo linijos, galinė sparno dalis ties automobilio bamperio perimetru. Taip pat sudarytas grafikas, vaizduojantis automobilio kėlimo ir pasipriešinimo koeficientus ties skirtingais atakos kampais. Nustatyta, kad didžiausia spaudžiančioji jėga yra ties 40° atakos kampu. Automobilio kėlimo koeficientą  $C_L$  pavyko sumažinti nuo 0,019 iki -0,2359.
4. CFD tyrimais pagrįsta rekomendacija dėl sparno atakos kampo parinkimo pateikiama galutiniam vartotojui. Rekomenduojama greitose trasose naudoti 0° arba 5° atakos kampą. Trasose su kiek daugiau posūkių naudoti 15-35° atakos kampus. Labai sudėtingose trasose su daug posūkių, patartina naudoti sparno atakos kampą iki 40°.

## Literatūros sąrašas

1. 11 Types Of Car Spoilers Explained (With Photos) [interaktyvus]. 2022 [žiūrėta 2023-04-19]. Prieiga per: <https://lemonbin.com/types-of-car-spoilers/>
2. CARL GELIN. A close up of a motorcycle parked in a garage [interaktyvus]. 2022 [žiūrėta 2024-04-09]. Prieiga per: <https://unsplash.com/photos/zcSeBvNBTNM>
3. Lamborghini Huracan Chassis Mounted Wing [interaktyvus]. [žiūrėta 2023-05-23]. Prieiga per: <https://sadisticironwerks.com/products/lamborghini-huracan-chassis-mounted-wing>
4. 5 Things You Didn't Know About the Lamborghini Countach [interaktyvus]. 2016 [žiūrėta 2023-05-23]. Prieiga per: <https://www.thedrive.com/vintage/5226/5-things-you-didnt-know-about-the-lamborghini-countach>
5. 1982 Lamborghini Countach LP400 S #1121446 [interaktyvus]. [žiūrėta 2023-05-23]. Prieiga per: <https://ferraris-online.com/cars/1982-lamborghini-countach-lp400-s-1121446/#gallery-12>
6. These 5 production cars were the first to bring spoilers to the market [interaktyvus]. 2020 [žiūrėta 2023-05-23]. Prieiga per: <https://driving.ca/features/feature-story/these-5-production-cars-were-the-first-to-bring-spoilers-to-the-market>
7. Spoileralarm [interaktyvus]. 2021 [žiūrėta 2023-05-23]. Prieiga per: <https://www.spiegel.de/auto/fahrkultur/vw-corrado-als-guenstiger-oldtimer-spoileralarm-auf-dem-discoparkplatz-a-edeal067-ace1-428f-b70e-4b6adfb4382d>
8. Tesla Model X: 13 Things You Need to Know [interaktyvus]. 2015 [žiūrėta 2023-05-23]. Prieiga per: <https://www.autoguide.com/auto-news/2015/10/tesla-model-x-13-things-you-need-to-know.html>
9. KUREC, KRZYSZTOF, REMER, MICHAŁ, PIECHNA, JANUSZ. The influence of different aerodynamic setups on enhancing a sports car's braking. 2019 [žiūrėta 2024-05-09]. Prieiga per: DOI:10.1016/j.ijmecsci.2019.105140
10. Ford GT Aero Brake (album in comments) [OC] [4032x3024] [interaktyvus]. [žiūrėta 2023-05-23]. Prieiga per: <https://www.pinterest.com/pin/ford-gt-aero-brake-album-in-comments-oc-4032x3024-rcarporn--377739487475568570/>
11. Zenvo TSR-S review [interaktyvus]. 2021 [žiūrėta 2023-05-23]. Prieiga per: <https://www.topgear.com/car-reviews/zenvo/tsr-s>
12. RAJ, R. R. OM, THARAKARAM, NAGGARI, PRAKASH, N. Design and CFD Analysis of a Rear Wing of a Motorsport Car. International Journal of Vehicle Structures & Systems (IJVSS). 2022, Vol. 14 Issue 1, p58-62. 5p. Prieiga per: DOI:10.4273/ijvss.14.1.14
13. Formula 1 Doesn't Need DRS Anymore [interaktyvus]. 2022 [žiūrėta 2023-05-23]. Prieiga per: <https://www.roadandtrack.com/car-culture/a39864224/formula-1-doesnt-need-drs-anymore/>
14. The 2023 Porsche 911 GT3 RS Adds a Wild DRS-Style Rear Wing [interaktyvus]. 2022 [žiūrėta 2023-05-23]. Prieiga per: <https://www.thedrive.com/news/2023-porsche-911-gt3rs-specs-debut-reveal-price>

15. Much-criticised DRS is here to stay with ‘active aerodynamics’ in 2026 [interaktyvus]. 2023 [žiūrėta 2023-05-23]. Prieiga per: <https://www.planetf1.com/news/f1-2026-cars-drs-remains/>
16. 2012 VW Golf R – Rear [interaktyvus]. [žiūrėta 2023-05-23]. Prieiga per: [https://www.caricos.com/cars/v/vw/2012\\_volkswagen\\_golf\\_r/images/6.html](https://www.caricos.com/cars/v/vw/2012_volkswagen_golf_r/images/6.html)
17. Reducing hatchback aerodynamic drag and lift [interaktyvus]. 2020 [žiūrėta 2023-05-23]. Prieiga per: <https://youtu.be/sB-FPrYWLJo>
18. KAJIWARA, S. Passive variable rear-wing aerodynamics of an open-wheel racing car. *Automot. Engine Technol.* 2, 107–117. 2017 [žiūrėta 2024-05-09]. Prieiga per: DOI:10.1007/s41104-017-0021-9
19. RENDON, CRISTIAN C., HERNANDEZ, JOSÉ L., RUIZ-SALGUERO, OSCAR, ALVAREZ, CARLOS A., TORO, MAURICIO. Wing profile evolution driven by computational fluid dynamics. *UIS Ingenierías*. abr-jun 2019, Vol. 18 Issue 2, p139-146. 8p. 2019 [žiūrėta 2024-05-09]. Prieiga per: DOI: 10.18273/revuin.v18n2-2019013
20. NACHIPPAN, N. MURUGU. Computational Analysis of Air Wings to Evaluate Downforce and Lift-Drag Ratio: Technical Note. *International Journal of Vehicle Structures & Systems (IJVSS)*. 2019, Vol. 11 Issue 1, p102-106. 5p. 2019 [žiūrėta 2024-05-09]. Prieiga per: DOI: 10.4273/ijvss.11.1.18
21. 2024 m. techninis reglamentas „Time Attack Pro“ grupės automobiliams [interaktyvus]. 2024 [žiūrėta 2024-04-06]. Prieiga per: <https://www.lasf.lt/wp-content/uploads/2024/02/2024-TA-PRO-grupes-techninis-reglamentas.pdf>
22. 1998 Mazda MX-5 II (NB) 1.6 i 16V (125 Hp) [interaktyvus]. [žiūrėta 2024-04-08]. Prieiga per: <https://www.auto-data.net/en/mazda-mx-5-ii-nb-1.6-i-16v-125hp-11258>
23. Car Wing Comparisons [interaktyvus]. 2023 [žiūrėta 2024-04-07]. Prieiga per: <https://occamsracers.com/2023/08/08/car-wings-examined/>
24. PAKKAM, SRIRAM SARANATHY. High Downforce Aerodynamics for Motorsports. 2011 [žiūrėta 2024-04-07]. Prieiga per: <https://repository.lib.ncsu.edu/bitstream/handle/1840.16/7256/etd.pdf?sequence=2>
25. CFD Study Comparing Racecar Wing Mounts [interaktyvus]. 2013 [žiūrėta 2024-04-08]. Prieiga per: <https://www.symscape.com/blog/cfd-study-comparing-racecar-wing-mounts>
26. Aerodynamics of rear wing mountings [interaktyvus]. 2018 [žiūrėta 2024-04-08]. Prieiga per: <https://theansweris27.com/aerodynamics-of-rear-wing-mountings/>
27. Dynamics of Flight [interaktyvus]. [žiūrėta 2024-04-12]. Prieiga per: <https://www.grc.nasa.gov/www/k-12/UEET/StudentSite/dynamicsofflight.html>
28. FAREEQ, SHELAN. Aerodynamic Evolution of Racing Wings of a Formula Car [interaktyvus]. 2015. [žiūrėta 2024-04-08]. Prieiga per: [https://www.researchgate.net/publication/290964900\\_AERODYNAMIC\\_EVALUATION\\_OF\\_RACING\\_WINGS\\_OF\\_A\\_FORMULA\\_CAR](https://www.researchgate.net/publication/290964900_AERODYNAMIC_EVALUATION_OF_RACING_WINGS_OF_A_FORMULA_CAR)



29. MCBEATH S. Competition car downforce: a practical guide. Sparkford, Nr Yeovil: haynes; 1998.
30. PETRAUSKAS LINAS. Reguliuojamo oro aptako įtakos automobilio dinaminėms savybėms tyrimas. Baigiamasis magistro darbas. [interaktyvus]. 2019 [žiūrėta 2024-04-12]. Prieiga per: <https://vb.vgtu.lt/object/elaba:38927805/>
31. LASAUSKAS, EDUARDAS. Skrydžio principai. Vilniaus Technika, 2008, pp 19-20. ISBN 978- 9955-28-255-6. [žiūrėta 2024-01-17] Prieiga per: <https://bit.ly/3urEp68>
32. BANSOD, N., & CHOUDHARY, D. Aerodynamic analysis of vehicle using CFD. 2016. [žiūrėta 2024-01-17] Prieiga per: DOI:10.23883/ijrter.2017.3056.s0sem.
33. MX5 Miata NB [interaktyvus]. 2022 [žiūrėta 2024-01-19]. Prieiga per: <https://grabcad.com/library/mx5-miata-nb-1>
34. Aerodinaminio pasipriešinimo ir kėlimo/prispaudimo koeficientų formulė. [interaktyvus]. [žiūrėta 2024-01-18]. Prieiga per: <https://www1.grc.nasa.gov/beginners-guide-to-aeronautics/drag-coefficient/>
35. EPPLE, P., ESSLER, T., BLOCH, G., BELOW, V., & GAST, S. Aerodynamic Devices for Formula Student Race Cars. 2014 [žiūrėta 2024-04-09]. Prieiga per: DOI:10.1115/IMECE2014-39041
36. What is Reynolds Number? [interaktyvus]. [žiūrėta 2024-01-18]. Prieiga per: <https://www.simscale.com/docs/simwiki/numerics-background/what-is-the-reynolds-number/>
37. 19 Passes in 15 Minutes | 2022 Mazda MX-5 Cup Race #1 at Mid-Ohio. [interaktyvus]. 2022 [žiūrėta 2024-01-18]. Prieiga per: [https://youtu.be/REsAMXnTuo4?si=LFK5ESbNaaSxZI\\_k](https://youtu.be/REsAMXnTuo4?si=LFK5ESbNaaSxZI_k)
38. Reynolds number calculator. [interaktyvus]. [žiūrėta 2024-01-18]. Prieiga per: <http://airfoiltools.com/calculator/reynoldsnumber>
39. YIQING XU, JIANPING ZHANG, MING LIU, PENGJU ZHANG, AND LIQUAN WANG. Aerodynamic Characteristic Analysis of Wind Turbine Blades Based on CSA-KJ Airfoil Optimization. Design. Journal of Vibroengineering 25, no. 7 (November 2023): 1395–1410. 2023. [žiūrėta 2024-04-09]. Prieiga per: DOI:10.21595/jve.2023.23255
40. PAKALNIS, E., E. LASAUSKAS, AND J. STANKŪNAS. Analysis of Calculation Results of Lift and Drag Forces for Several Wings Using Nonlinear Section Data. Aviation (1648-7788) 9, no. 1 (January 2005): 26–31. 2005. [žiūrėta 2024-04-09]. Prieiga per: DOI:10.3846/16487788.2005.9635893
41. Bernulio dėsnis. [interaktyvus]. [žiūrėta 2024-01-18]. Prieiga per: [https://lt.wikipedia.org/wiki/Bernulio\\_d%C4%97snis](https://lt.wikipedia.org/wiki/Bernulio_d%C4%97snis)
42. Mazda MX-5 (NB) [interaktyvus]. [žiūrėta 2024-05-19]. Prieiga per: [https://en.wikipedia.org/wiki/Mazda\\_MX-5\\_\(NB\)](https://en.wikipedia.org/wiki/Mazda_MX-5_(NB))

43. MILERIS MANTAS. Sportinio automobilio aerodinaminių savybių tyrimas. Kauno technologijos universitetas, 2021 [žiūrėta 2024-01-17] Prieiga per:  
<https://epubl.ktu.edu/object/elaba:96684985/>
44. KATZ, J. Aerodynamics of Race Cars. *Annual Review of Fluid Mechanics*, 38(1), 27–63. , 2006 [žiūrėta 2024-04-09] Prieiga per: DOI:10.1146/annurev.fluid.38.050304.092016
45. MSHD\_AirfoilPoints\_sorted [interaktyvus]. [žiūrėta 2024-04-07]. Prieiga per:  
[https://drive.google.com/file/d/1-FIzh4\\_zjwOdZzbCynGrOzlHNvhXpaG9/view](https://drive.google.com/file/d/1-FIzh4_zjwOdZzbCynGrOzlHNvhXpaG9/view)

## Priedai

### 1 priedas. MSHD sparno profilio koordinatės [45]

| X       | Y       |
|---------|---------|
| 1.00141 | 0       |
| 0.99323 | 0.01068 |
| 0.989   | 0.01597 |
| 0.98406 | 0.0209  |
| 0.97807 | 0.02618 |
| 0.97208 | 0.03041 |
| 0.96643 | 0.03428 |
| 0.96008 | 0.03816 |
| 0.95361 | 0.042   |
| 0.94701 | 0.04584 |
| 0.94096 | 0.04923 |
| 0.93582 | 0.05202 |
| 0.93038 | 0.05497 |
| 0.92391 | 0.0581  |
| 0.91758 | 0.06121 |
| 0.91126 | 0.06423 |
| 0.90438 | 0.06755 |
| 0.89723 | 0.07084 |
| 0.89035 | 0.07389 |
| 0.88348 | 0.0769  |
| 0.87632 | 0.0799  |
| 0.86917 | 0.08292 |
| 0.86202 | 0.08588 |
| 0.85459 | 0.08888 |
| 0.84689 | 0.09192 |
| 0.83891 | 0.09492 |
| 0.83066 | 0.09798 |
| 0.82213 | 0.10103 |
| 0.8136  | 0.10411 |
| 0.80507 | 0.10697 |
| 0.79599 | 0.11004 |
| 0.78664 | 0.11309 |
| 0.77701 | 0.11616 |
| 0.7671  | 0.11916 |
| 0.75692 | 0.12211 |
| 0.74619 | 0.1252  |

|         |         |
|---------|---------|
| 0.73546 | 0.12824 |
| 0.72445 | 0.1312  |
| 0.71317 | 0.13418 |
| 0.70189 | 0.13713 |
| 0.69033 | 0.13985 |
| 0.67877 | 0.14256 |
| 0.66721 | 0.14516 |
| 0.65565 | 0.1476  |
| 0.64409 | 0.15007 |
| 0.63253 | 0.1525  |
| 0.62097 | 0.15474 |
| 0.60941 | 0.15674 |
| 0.59785 | 0.15866 |
| 0.58629 | 0.16058 |
| 0.57473 | 0.1626  |
| 0.56317 | 0.16435 |
| 0.55161 | 0.16593 |
| 0.54005 | 0.1675  |
| 0.52849 | 0.1689  |
| 0.51692 | 0.17014 |
| 0.50536 | 0.17137 |
| 0.4938  | 0.17252 |
| 0.48224 | 0.17358 |
| 0.47067 | 0.17445 |
| 0.45911 | 0.17521 |
| 0.44755 | 0.17589 |
| 0.43598 | 0.1764  |
| 0.42442 | 0.17683 |
| 0.41285 | 0.17705 |
| 0.40129 | 0.17705 |
| 0.38972 | 0.17701 |
| 0.37815 | 0.17678 |
| 0.36659 | 0.17644 |
| 0.35502 | 0.17588 |
| 0.34345 | 0.1753  |
| 0.33189 | 0.17458 |
| 0.32032 | 0.17372 |

|         |         |
|---------|---------|
| 0.30875 | 0.17273 |
| 0.29718 | 0.17155 |
| 0.28561 | 0.17019 |
| 0.27404 | 0.16866 |
| 0.26247 | 0.16696 |
| 0.2509  | 0.16507 |
| 0.23933 | 0.16311 |
| 0.22776 | 0.16077 |
| 0.21619 | 0.15831 |
| 0.20461 | 0.15559 |
| 0.19304 | 0.15262 |
| 0.18202 | 0.14956 |
| 0.17182 | 0.14655 |
| 0.16273 | 0.14364 |
| 0.15418 | 0.1406  |
| 0.14591 | 0.13756 |
| 0.13819 | 0.13445 |
| 0.13103 | 0.13144 |
| 0.12413 | 0.12842 |
| 0.11752 | 0.12537 |
| 0.11145 | 0.1224  |
| 0.10539 | 0.11923 |
| 0.09959 | 0.11611 |
| 0.09408 | 0.11307 |
| 0.08856 | 0.10986 |
| 0.08332 | 0.1066  |
| 0.07836 | 0.1033  |
| 0.07339 | 0.09992 |
| 0.0687  | 0.09656 |
| 0.06456 | 0.09345 |
| 0.0607  | 0.09059 |
| 0.05656 | 0.08729 |
| 0.0527  | 0.08404 |
| 0.04939 | 0.08111 |
| 0.04607 | 0.07796 |
| 0.04276 | 0.07494 |
| 0.03945 | 0.07164 |

|          |          |
|----------|----------|
| 0.03613  | 0.06835  |
| 0.0331   | 0.06495  |
| 0.03033  | 0.06182  |
| 0.02757  | 0.05852  |
| 0.02481  | 0.05512  |
| 0.02205  | 0.05144  |
| 0.01956  | 0.0479   |
| 0.01735  | 0.04454  |
| 0.01513  | 0.04111  |
| 0.01292  | 0.03768  |
| 0.01099  | 0.03431  |
| 0.00933  | 0.0312   |
| 0.00766  | 0.02754  |
| 0.006    | 0.02368  |
| 0.00462  | 0.0199   |
| 0.00295  | 0.01546  |
| 0.00156  | 0.01119  |
| 0.00045  | 0.00686  |
| 0.00016  | 0.00247  |
| 0.00016  | -0.00082 |
| 5.00E-05 | -0.00494 |
| 0.00085  | -0.009   |
| 0.0026   | -0.01274 |
| 0.00552  | -0.01609 |
| 0.00975  | -0.01701 |
| 0.02132  | -0.01757 |
| 0.03288  | -0.01715 |
| 0.04445  | -0.01609 |
| 0.05602  | -0.01454 |
| 0.06759  | -0.01243 |
| 0.07916  | -0.00993 |
| 0.09074  | -0.00714 |
| 0.10176  | -0.00431 |
| 0.11223  | -0.00136 |
| 0.12243  | 0.00162  |
| 0.13207  | 0.00463  |
| 0.14144  | 0.00769  |
| 0.15054  | 0.01072  |
| 0.15936  | 0.01372  |
| 0.16818  | 0.01671  |

|         |         |
|---------|---------|
| 0.177   | 0.01978 |
| 0.18582 | 0.0228  |
| 0.19464 | 0.02589 |
| 0.20318 | 0.02879 |
| 0.21173 | 0.03179 |
| 0.22027 | 0.03481 |
| 0.22909 | 0.03788 |
| 0.23791 | 0.04086 |
| 0.24673 | 0.04392 |
| 0.25583 | 0.04694 |
| 0.2652  | 0.04991 |
| 0.27484 | 0.05301 |
| 0.28449 | 0.05606 |
| 0.29441 | 0.05908 |
| 0.30461 | 0.06209 |
| 0.31508 | 0.06503 |
| 0.3261  | 0.06806 |
| 0.3374  | 0.07107 |
| 0.3487  | 0.07406 |
| 0.36027 | 0.07687 |
| 0.37184 | 0.07959 |
| 0.38341 | 0.08226 |
| 0.39499 | 0.08482 |
| 0.40656 | 0.08727 |
| 0.41813 | 0.08958 |
| 0.4297  | 0.09172 |
| 0.44127 | 0.09379 |
| 0.45284 | 0.09572 |
| 0.46441 | 0.09771 |
| 0.47598 | 0.09941 |
| 0.48755 | 0.10102 |
| 0.49912 | 0.1026  |
| 0.51069 | 0.10392 |
| 0.52226 | 0.10519 |
| 0.53383 | 0.10641 |
| 0.5454  | 0.10736 |
| 0.55697 | 0.10827 |
| 0.56853 | 0.10912 |
| 0.5801  | 0.10984 |
| 0.59167 | 0.11045 |

|         |         |
|---------|---------|
| 0.60324 | 0.11087 |
| 0.6148  | 0.11099 |
| 0.62637 | 0.11117 |
| 0.63793 | 0.11117 |
| 0.6495  | 0.11108 |
| 0.66106 | 0.11074 |
| 0.67263 | 0.11032 |
| 0.68419 | 0.1098  |
| 0.69576 | 0.10903 |
| 0.70732 | 0.10802 |
| 0.71888 | 0.107   |
| 0.73044 | 0.10563 |
| 0.74201 | 0.10404 |
| 0.75357 | 0.10217 |
| 0.76513 | 0.1     |
| 0.77669 | 0.09764 |
| 0.78825 | 0.09513 |
| 0.7998  | 0.09248 |
| 0.81109 | 0.08954 |
| 0.82209 | 0.0865  |
| 0.83283 | 0.08351 |
| 0.84301 | 0.08044 |
| 0.85264 | 0.07741 |
| 0.86172 | 0.07442 |
| 0.87052 | 0.07135 |
| 0.87877 | 0.06831 |
| 0.88675 | 0.06533 |
| 0.89473 | 0.06225 |
| 0.90216 | 0.05927 |
| 0.90931 | 0.05629 |
| 0.91673 | 0.05323 |
| 0.92521 | 0.04982 |
| 0.93238 | 0.04671 |
| 0.93991 | 0.04326 |
| 0.94727 | 0.03951 |
| 0.95389 | 0.03643 |
| 0.96044 | 0.03244 |
| 0.96596 | 0.02906 |
| 0.97149 | 0.02546 |
| 0.97613 | 0.02228 |

|         |         |
|---------|---------|
| 0.98018 | 0.01888 |
|---------|---------|

|         |         |
|---------|---------|
| 0.98611 | 0.01411 |
|---------|---------|

|         |         |
|---------|---------|
| 0.99083 | 0.01013 |
|---------|---------|