



Diplomová práce

Aerodynamický paket pro vozidlo Formule Student

Studijní program:

N0716A270006 Automobilové inženýrství

Autor práce:

Bc. Jozef Jaroslav Fekiač

Vedoucí práce:

doc. Ing. Miroslav Malý, CSc.

Katedra vozidel a motorů

Liberec 2024



Zadání diplomové práce

Aerodynamický paket pro vozidlo Formule Student

<i>Jméno a příjmení:</i>	Bc. Jozef Jaroslav Fekiač
<i>Osobní číslo:</i>	S22000252
<i>Studijní program:</i>	N0716A270006 Automobilové inženýrství
<i>Zadávací katedra:</i>	Katedra vozidel a motorů
<i>Akademický rok:</i>	2023/2024

Zásady pro vypracování:

Tato práce je zaměřena na analýzu a aplikaci poznatků v oblasti vývoje aerodynamických prvků na vozech Formule Student. Hlavní část bude věnována návrhu vybraných aerodynamických prvků, analýze vlastností a tvorbě prototypu. Pokyny pro vypracování:

1. Zpracujte rešerši s ohledem na vliv aerodynamiky na výkony sportovních a závodních vozů (se zaměřením na známé konstrukce Formule Student). Rešerši doplňte diskusí o možnostech modelování a simulace dějů, resp. o případných možnostech verifikace.
2. Proveďte rozbor požadavků kladených na geometrii a konstrukci karosérií vozů Formule Student.
3. Navrhněte vhodné prvky pro úpravy karosérie, pozornost zaměřte zejména na inovaci konstrukce předního přitlačného křídla.
4. Využijte možností simulací (metodou CFD) pro porovnání parametrů konstrukčních variant.
5. K vyhodnocení variant (a zvolené varianty) zvolte vhodný a dostupný nástroj (praktická měření, počítačový experiment aj.).
6. Zpracujte dokumentaci návrhu ve formě 3-D modelu inovovaných dílů (pro výrobu prototypu).
7. Zhodnoťte výsledky práce a připojte případné doporučení pro další úpravy aerodynamiky a jízdních vlastností vozu.

Rozsah grafických prací: Dokumentace 3-D modelu, výkresová dokumentace
Rozsah pracovní zprávy: 40 – 60 stran textu
Forma zpracování práce: tištěná/elektronická
Jazyk práce: čeština

Seznam odborné literatury:

Seznam doporučené odborné literatury:

- [1] Hucho, W., -H., (Ed.) Aerodynamics of Road Vehicles, 4th ed.; SAE R-177; SAE International: Warrendale, PA, USA, 1998; ISBN 0-7680-0029-7.
- [2] Katz, J., Race Car Aerodynamics: Designing for Speed, Robert Bentley, ISBN 0837601428
- [3] Hoerner, S., F., Borst, H., V., Fluid-Dynamic Lift, Hoerner Fluid Dynamics, 1985
- [4] Athanasios, T. Aerodynamic optimization of Chalmers Formula Student Vehicle. In: STAR Global Conference 2014 [online]. Vienna, 2014.
- [5] Dahlberg, Henrik. Aerodynamic development of Formula Student race car [online]. Stockholm: KTH, Department of Mechanics, 2015. Bakalářská práce. Dostupné z: <http://kth.diva-portal.org/smash/get/diva2:737287/FULLTEXT01.pdf>
- [6] Katz, Joseph. Aerodynamics of Race Cars. Annual Review of Fluid Mechanics. 2006, roč. 2006, č. 1, s. 27-63.

Vedoucí práce: doc. Ing. Miroslav Malý, CSc.
Katedra vozidel a motorů

Datum zadání práce: 9. listopadu 2023
Předpokládaný termín odevzdání: 9. května 2025

doc. Ing. Jaromír Moravec, Ph.D.
děkan

L.S.

prof. Dr. Ing. Pavel Němeček
garant studijního programu

V Liberci dne 9. listopadu 2023

Prohlášení

Prohlašuji, že svou diplomovou práci jsem vypracoval samostatně jako původní dílo s použitím uvedené literatury a na základě konzultací s vedoucím mé diplomové práce a konzultantem.

Jsem si vědom toho, že na mou diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., o právu autorském, zejména § 60 – školní dílo.

Beru na vědomí, že Technická univerzita v Liberci nezasahuje do mých autorských práv užitím mé diplomové práce pro vnitřní potřebu Technické univerzity v Liberci.

Užiji-li diplomovou práci nebo poskytnu-li licenci k jejímu využití, jsem si vědom povinnosti informovat o této skutečnosti Technickou univerzitu v Liberci; v tomto případě má Technická univerzita v Liberci právo ode mne požadovat úhradu nákladů, které vynaložila na vytvoření díla, až do jejich skutečné výše.

Současně čestně prohlašuji, že text elektronické podoby práce vložený do IS/STAG se shoduje s textem tištěné podoby práce.

Beru na vědomí, že má diplomová práce bude zveřejněna Technickou univerzitou v Liberci v souladu s § 47b zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů.

Jsem si vědom následků, které podle zákona o vysokých školách mohou vyplývat z porušení tohoto prohlášení.

Aerodynamický paket pro vozidlo Formule Student

Abstrakt

Táto diplomová práca sa zaoberá návrhom a konštrukciou predného krídla pre monopost tímu FS TUL racing, ktorý sa účastní pretekov Formula Student. Práca sa zameriava na využitie poznatkov z oblasti mechaniky tekutín, konštrukcie, CAD systémov a CFD simulácií. Práca skúma históriu aerodynamiky v motoršporte, analyzuje problémy, ktoré museli riešiť konštruktéri, a porovnáva súčasné aerodynamické ciele konkurenčných tímov. Súčasťou práce je aj vývoj a porovnanie troch variantov krídel pomocou CFD simulácií a následné vyhodnotenie reálneho testovania na testovacej dráhe. Výsledkom je výber optimálneho variantu krídla, ktorý spĺňa stanovené požiadavky a jeho porovnanie s CAD modelom a pomocou 3D skenovania. Práca prispieva k pokroku v oblasti aerodynamiky pretekárskych áut a poskytuje hodnotné poznatky pre budúce vývojové tímy.

Kľúčová slova

aerodynamika, CAD, CFD simulácie, Formula Student, predné kridlo, Solidworks

Aerodynamic package for a Formula Student vehicle

Abstract

This master's thesis focuses on the design and construction of a front wing for a single-seater race car for the FS tul racing team, which participates in the Formula Student races. The work aims to utilize knowledge in the field of fluid mechanics, construction, CAD systems, and CFD simulations. It examines the history of aerodynamics in motorsport, analyzes the problems that constructors had to solve, and compares the current aerodynamic goals of competing teams. Part of the work is the development and comparison of three wing variants using CFD simulations and subsequent evaluation of real testing on the test track. The result is the selection of an optimal wing variant that meets the set requirements, and its comparison with the CAD model and using 3D scanning. The work contributes to progress in the field of aerodynamics of racing cars and provides valuable insights for future development teams.

Keywords

aerodynamics, CAD, CFD simulation, Formula Student, front wing, Solidworks

Poděkování

Chcem sa poďakovať školiteľovi doc. Ing. Miroslavovi Malému, CSc., ktorý si napriek mnohým povinnostiam vždy našiel čas na prekonzultovanie predkladanej diplomovej práce, pracovníkom katedier (KEZ a KSP), ktorí mi pomohli k príprave a prevedeniu experimentov, odbornému vedeniu a tímu FS TUL Racing pri spracovávaní danej témy.

Obsah

1 Úvod	14
2 Aerodynamika	15
2.1 Prúdenie vzduchu	15
2.2 Bernuliho rovnica.....	16
2.3 Medzná vrstva	16
2.4 Prítlak a vztlak.....	18
2.5 Odpor.....	20
2.6 Aerodynamické profily	22
2.8 Gurneyho klapka	24
2.9 Aerodynamické koeficienty a ich porovnanie	25
3 História využívání aerodynamiky v motošporte	27
3.1 Študentská formula	34
3.2 Možnosti merania aerodynamiky	35
3.2.1 Flow-vis	36
3.2.2 Aerodynamické tunely	37
3.2.2.1 Aerodynamický tunel s otvoreným okruhom	37
3.2.2.2 Aerodynamický tunel s uzavretým okruhom	37
3.2.3 CFD (Computational Fluid Dynamics)	38
4 Návrh aerodynamického balenia pre monopost	39
4.1 Predné krídlo	41
4.2 Koncept predného krídla	43
4.3 Inovácie – nový koncept predného krídla	43
4.3.1 Sietovanie modelu.....	44
4.3.2 Prvá varianta predného krídla.....	44
4.3.3 Druhá varianta predného krídla	49
4.3.4 Tretia varianta predného krídla.....	Chyba! Záložka nie je definovaná.
4.4 Vyhodnotenie simulácií a parametrov krídel.....	59
5 Výroba	60
5.1 Výroba a príprava foriem	60
5.2 Tkaniny a vlastnosti tkanín	61
5.3 Laminácia	65
5.4 Skladanie predného krídla.....	66
5.5 3D sken predného krídla	66

6 Veterný tunel.....	68
6.1 Príprava modelu pre experiment a vizualizáciu	68
6.2 Záznam PIV obrazom.....	72
6.3 Vyhodnotenie.....	72
7 Technická dokumentácia	73
8 Záver	77
9 Použitá literatúra.....	79
10 Zoznam príloh	84
11 Prílohy	85

Zoznam obrázkov

- Obr. 1 Obtekanie automobilu a následne tvorenie medznej vrstvy [2] 16
Obr. 2 Vytváranie medznej vrstvy kde sa z laminárneho prúdenia stáva turbulentné [4] 17
Obr. 3 Schéma popisu laminárnej bubliny a prechodu z laminárnej na turbulentnú hraničnú vrstvu [5] 17
Obr. 4 Ground effect je aerodynamický jav, ktorý zvyšuje vztlak krídel, keď sú umiestnené blízko zeme. Tento efekt je zrejmy aj pre obrátené krídla [6] 18
Obr. 5 Nízky tlak na hornej strane a vyšší tlak na spodnej strane tohto profilu sa sčítajú do zdvihovej sily. Samozrejme, keď sa používa na závodnom aute, profil je obrátený [8] 19
Obr. 6 Zobrazenie rôznych povrchov a následne vytváranie turbulentného prúdenia za nimi [9] 20
Obr. 7 Vplyv tvaru karosérie na vírenie vzduchu za vozidlom [10] 21
Obr. 8 Difúzor vozidiel kategórie Group C a Indy Car 21
Obr. 9 Prúdové čiary v ustálenom prúde nad krídlom [12] 22
Obr. 10 Tlaku na profile - s ohľadom na rozloženie rýchlosti pozdĺž profilu nie sú tlaky nad a pod profilom rovnaké. Výsledkom je vztlaková sila [12] 22
Obr. 11 Vytváranie tlaku na rôznych profiloch [13] 23
Obr. 12 Účinok zastavenia na krivku zdvihu oproti uhlu nábehu, pre dva typy profilov [14] 24
Obr. 13 ukázaný vývoj medznej vrstvy na oboch stranách profilu [15] 24
Obr. 14 zvýraznenie prúdových čiar v blízkosti zadnej hrany krídla s normálnym prekrytím [16] 25
Obr. 15 Smerovky používané na identifikáciu troch zložiek aerodynamickej sily [17] 27
Obr. 16 Porsche 550 Spyder [19] 27
Obr. 17 Lotus 49 [21]. 28
Obr. 18 Prierez Ferrari 312T [23] 28
Obr. 19 Prierez Williams FW14 [25] 29
Obr. 20 Technický popis konštrukcie monopostu Williams FW14 [26] 30
Obr. 21 Riešenie problému Obr.5 [27] 31
Obr. 22 Monopost McLaren MP-4-20 [29] 32
Obr. 23 Riešenie problému s podvozkom [30] 32
Obr. 24 Monopost Red Bull RB 8 [31] 33
Obr. 25 Optimalizácia zadnej nápravy formule RB8 [32] 34
Obr. 26 Nanášanie Flow-vis [35] 36
Obr. 27 Znázornenie Flow-vis [37] 36
Obr. 28 Aerodynamický tunel s otvoreným systémom [38] 37
Obr. 29 Aerodynamický tunel s uzavretým okruhom [39] 38
Obr. 30 CFD simulácia [41] 39
Obr. 31 Predné krídlo [42] 39
Obr. 32 Bočnice [42] 40
Obr. 33 Zadné krídlo [42] 40
Obr. 34 Stanovené rozmery dané Pravidlami FSG [43] 40
Obr. 35 Zloženia predného krídla [44] 41

- Obr. 36 Prídavné lopatky na prednom krídle F1 monoposte Renault [45] 42
- Obr. 37 Znárodnenie prúdenia na endplatoch (*outwash*) na ľavej strane (*inwash*) na pravej [46] 42
- Obr. 38 Pohľad na krídlo minuloročného monopostu [42] 43
- Obr. 39 Prvá varianta predného krídla pohľad spredu [42] 44
- Obr. 40 Prvá varianta predného krídla pohľad z boku [42] 45
- Obr. 41 Simulácia rýchlosti vzduchu v priereze s 2 lopatkami varianta 1 [42] 45
- Obr. 42 Simulácia rýchlosti vzduchu v priereze s 3 lopatkami varianta 1 [42] 46
- Obr. 43 3D vizualizácia prúdenia rýchlosti vzduchu - pohľad zhora [42] 46
- Obr. 44 Vizualizácia prúdenia spodnej strany krídla- pohľad zdola [42] 47
- Obr. 45 Vizualizácia prúdenia cez vertikálne klapky - pohľad zhora [42] 47
- Obr. 46 Simulácia prúdenia vzduchu okolo vozu s použitím predného krídla varianta 1 [42] 48
- Obr. 47 Druhá varianta predného krídla pohľad spredu [42] 49
- Obr. 48 Druhá varianta predného krídla pohľad z boku [42] 50
- Obr. 49 Simulácia rýchlosti vzduchu v priereze s 2 lopatkami varianta 2 [42] 50
- Obr. 50 Simulácia rýchlosti vzduchu v priereze s 3 lopatkami varianta 2 [42] 51
- Obr. 51 3D vizualizácia prúdenia rýchlosti vzduchu varianta 2 [42] 51
- Obr. 52 Vizualizácia prúdenia spodnej strany krídla varianta 2 pohľad zdola [42] 52
- Obr. 53 Vizualizácia prúdenia cez vertikálne klapky varianta 2 pohľad zhora [42] 52
- Obr. 54 Simulácia prúdenia vzduchu okolo vozu s použitím predného krídla variant 2 [42] 53
- Obr. 55 Tretia varianta predného krídla pohľad spredu [42] 54
- Obr. 56 Tretia varianta predného krídla pohľad z boku [42] 55
- Obr. 57 Simulácia rýchlosti vzduchu v priereze s 3 lopatkami varianta 3 [42] 55
- Obr. 58 Simulácia rýchlosti vzduchu v priereze s 2 lopatkami varianta 3 [42] 55
- Obr. 59 3D vizualizácia prúdenia rýchlosti vzduchu varianta 3 [42] 56
- Obr. 60 Vizualizácia rýchlosti prúdenia [42] 57
- Obr. 61 Vizualizácia prúdenia spodnej strany krídla varianta 3 pohľad zdola [42] 57
- Obr. 62 Simulácia prúdenia vzduchu okolo vozu s použitím predného krídla varianta 3 [42] 58
- Obr. 63 Forma na hlavný profil [42] 61
- Obr. 64 3D tlačené formy z materiálu PLA [42] 61
- Obr. 65 schéma ukladania tkaniny [47] 62
- Obr. 66 Skúšobná vzorka pre skúšku ťahom [42] 62
- Obr. 67 rozmery skúšobného vzorku pre ohybovú skúšku [42] 63
- Obr. 68 Pohľad na prípravu pred lamináciou [42] 65
- Obr. 69 Infúzna laminácia [42] 65
- Obr. 70 Ručná laminácia [42] 65
- Obr. 71 Príprava ručnej laminácie [42] 65
- Obr. 72 Konštrukcia predného krídla [42] 66
- Obr. 73 Zarovnaný 3D model znázornený čierno s 3D skenom, ktorý je šedej farby [48] 67
- Obr. 74 3D sken s odchýlkami pohľad zhora [49] 67
- Obr. 75 Model zmenšenej polovice predného krídla vo veternom tunely [50] 69
- Obr. 76 Uchytenie modelu do veterného tunela [42] 69
- Obr. 77 Simulácia prúdenia vzduchu v reze s 3 lopatkami - zmenšený model ku pomeru 1:2,7 [42] 70
- Obr. 78 Záznam z merania z aerodynamického tunela v reze s 3 lopatkami [51] 70
- Obr. 79 Simulácia prúdenia vzduchu v reze s 2 lopatkami- zmenšený model ku pomeru 1:2,7 [42] 71
- Obr. 80 Záznam z merania z aerodynamického tunela v reze s 2 lopatkami [52] 71
- Obr. 81 Schéma a popis zaznamenávania obrazu pomoc PIV [53] 72

Seznam zkratek

C_d	koeficient odporu}	[-]
C_y	koeficient bočnej sily	[-]
C_l	koeficient vztlaku	[-]
ρ	hustota vzduchu	[kg/m ³]
D	odporová sila	[N]
L	vztlaková sila	[N]
Y	bočná sila	[N]
p	tlak	[Pa]
v	rýchlosť	[m/s]
A	referenčná plocha	[m ²]
a	hrúbka vzorky	[mm]
b	šírka vzorky	[mm]
σ_m	medza pevnosti	[MPa]
ϵ_m	predĺženie v oblasti medze pevnosti	[%]
E_f	modul pružnosti	[MPa]
σ_{fm}	pevnosť v ohybe	[MPa]
l	dĺžka vzorky	[mm]
FS	Formula Student	
TUL	Technická univerzita v Liberci	
CAD	počítačom podporovaný návrh	
CFD	počítačom podporovaná simulácia prúdenia tekutín	
Tzv.	takzvané	
PIV	metóda na meranie rýchlosti tekutín	
CCD	elektronický svetelný senzor	

1 Úvod

Táto diplomová práca sa zaoberá návrhom a konštrukciou predného krídla na monopost pre tím FS TUL racing, ktorý sa účastní pretekov Formula Student. Hlavným cieľom práce je využiť poznatky z oblasti mechaniky tekutín, konštrukcie, CAD systémov a CFD simulácií pri návrhu predného krídla.

Na začiatku sa zameria na základné aspekty aerodynamiky a jej využitie v motoršporte. Následne sa spomenú historické prelomové monoposty F1, ktoré boli vo svojej dobe dominantné a preskúmame niektoré problémy, ktoré museli konštruktéri riešiť.

Pri konštrukcii a návrhu sa zameria na CFD simulácie, ktoré sa budú vykonávať v programe Solidworks. Budú sa voliť základné nastavenia mriežky a vstupné parametre a potom sa budú porovnávať simulácie troch rôznych variantov krídel a ich výsledky. Po simuláciách sa zameria na samotné konštrukcie variant predných krídel, a potom sa vyberie finálny model. Spomenú sa aj procesy výroby a porovnávanie CAD modelu s reálne vyrobeným kusom pomocou 3D skenovania. Následne sa bude vyhodnocovať aj reálny model vo veternom tuneli.

Prínosom tejto diplomovej práce bude varianta krídla, ktorá splní naše požiadavky, následne porovnať vyrobený model s CAD modelom s pomocou 3D skenovania. Následným výstupom budú reálne hodnoty sily prítlaku, odporu a koeficienty C_i , C_d . Táto práca tak prispieva k vývoji v oblasti aerodynamiky pretekárskych áut.

2 Aerodynamika

Aerodynamika je odbor zaoberajúci sa štúdiom pohybu plynov a ich interakcií s pevnými objektami, ako je napríklad krídlo formule alebo tvar automobilu. Význam aerodynamiky nájdeme napríklad v leteectve, automobilovom priemysle, architektúre a za posledných 50 rokov vo väčšom množstve aj v motoršporte [1].

Ak prúd vzduchu prúdi okolo telesa, tlak vzduchu sa na jeho jednotlivých častiach povrchu stláča a vytvára nerovnomerné tlakové pole, ktoré spôsobuje silovú nerovnováhu. V dôsledku tohto efektu môžu lietadlá lietať a pretekárske autá využívať prítlak. Tlak vzduchu môžeme posudzovať na základe merania alebo merať. [1]

1. Statický tlak - môže sa merať, keď sa vzduch nepohybuje,
2. dynamický tlak – (je vyvolaný dynamickými účinkami prúdu vzduchu) môže sa merať, keď sa vzduch pohybuje ako pokles statického tlaku,
3. celkový tlak - je súčtom statického a dynamického tlaku.

Ak sa objekt pohybuje, jeho tvar ovplyvňuje smer a rýchlosť vzduchu v sledovanom mieste. Aerodynamická sila je daná rovnicou ktorá ukazuje, že sila závisí na kvadráte rýchlosti a na ďalších parametroch. [1]

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

ρ - hustota tekutiny - vzduchu [kg/m³]

A - referenčná plocha objektu [m²]

C_d - koeficient odporu [-]

C_l - koeficient vztlaku [-]

v – rýchlosť nenarušeného prúdu [m/s]

2.1 Prúdenie vzduchu

Pri pohybe vzduchu okolo prekážok dochádza k vytvoreniu prúdnic, tá je závislá na tvare prekážky a rýchlosti prúdenia vzduchu. Medzná vrstva je tenká vrstva, ktorá sa vytvára na povrchu a v blízkosti povrchu prekážky, v ktorej sa vyskytujú zmiešané prúdy. Víry sú oblasť prúdu, v ktorých dochádza k zakriveniu prúdových línií. Trecí odpor je spôsobený trením vzduchu o povrch prekážky. [1]

2.2 Bernuliho rovnica

Bernuliho rovnica popisuje vzťah medzi rýchlosťou a tlakom vzduchu. Tvarom a veľkosťou objektu dôjde k zmene rýchlosti, tlaku a narušenia prúdu vzduchu. Pri zvýšení rýchlosti sa nám tlak znižuje a naopak pri spomalení tlak narastá. [1]

$$\text{konst.} = p + \frac{1}{2} * \rho * v^2 \quad (3)$$

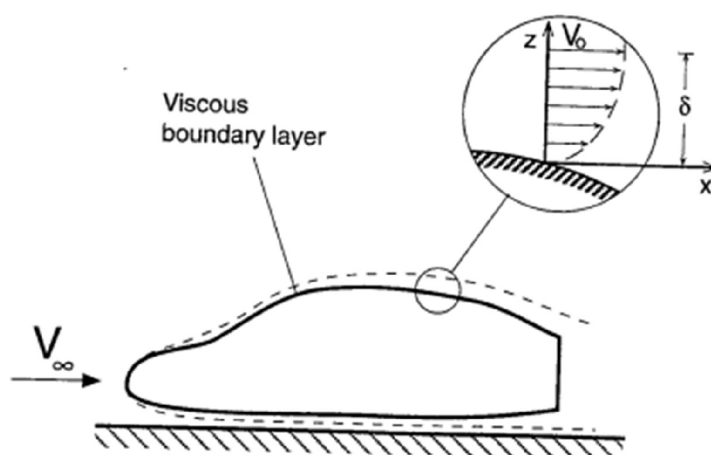
p = tlak [Pa]

ρ = hustota vzduchu [kg/m³]

v = rýchlosť [m/s]

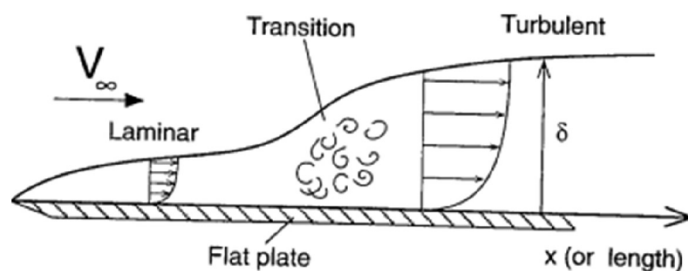
2.3 Medzná vrstva

Medzná vrstva je kľúčovým aspektom, ktorý môžeme ilustrovať na príklade toku okolo plochej dosky v rovnomernom prúde. V dôsledku viskozity kvapaliny sa rýchlosť na povrchu stacionárnej dosky redukuje na nulu. Medzná vrstva sa vyskytuje aj na zložitejších tvaroch, ako je napríklad automobil na Obr. 1. Typický profil rýchlosti v tejto vrstve je popísaný na začiatku obrázka Obr. 1. Hrúbka tejto medznej vrstvy je len niekoľko milimetrov na prednej strane auta jazdiaceho 100 km/h a môže dosiahnuť niekoľko centimetrov na zadnej strane aerodynamického auta. Ako je možné vidieť, hrubšia medzná vrstva vytvára viac viskózneho trenia. [1]

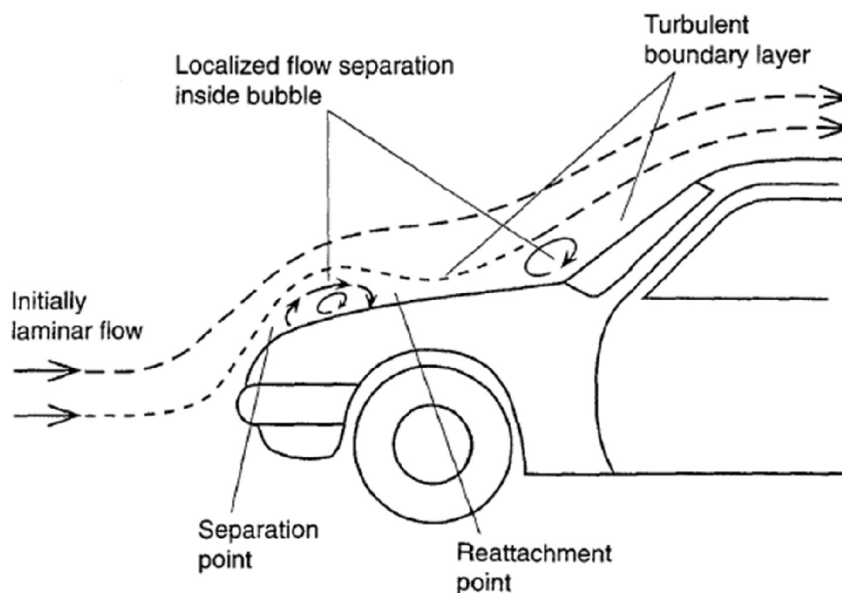


Obr. 1 Obtekanie automobilu a následne tvorenie medznej vrstvy [2]

Medzná vrstva môže byť laminárna alebo turbulentná. Zvyčajne sa začína ako laminárna a postupne sa stáva turbulentnou, čo je schematicky znázornené na Obr.2 pre prípad plochej dosky. V nerušenom prúde je medzná vrstva spočiatku laminárna, ale s rastúcou miestnou vzdialenosťou (a súvisiacim miestnym číslom Reynoldsa) sa tok stáva turbulentným. Oblasť, kde k tejto zmene dochádza, sa nazýva prechodová oblasť. [3]



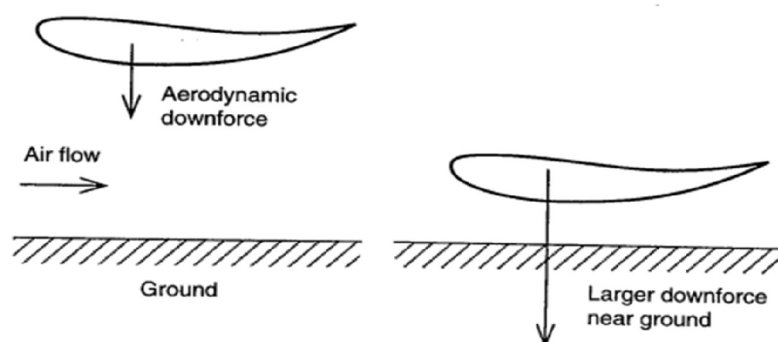
Obr. 2 Vytváranie medznej vrstvy kde sa z laminárneho prúdenia stáva turbulentné [4]



Obr. 3 Schéma popisu laminárnej bubliny a prechodu z laminárnej na turbulentnú hraničnú vrstvu [5]

2.4 Prítlak a vztlak

Prítlačná sila je sila rovnakého charakteru ako vztlak, ktorý pociťujú krídla lietadla, avšak pôsobí v opačnom smere - tlačí nadol, nie zdvíha nahor. Každý objekt, ktorý sa pohybuje vzduchom, generuje buď vztlak alebo prítlačnú silu. Mnoho závodných áut a niektoré cestné autá využívajú aerodynamické prvky, ako sú napríklad obrátené krídla, aby tlačili auto bližšie k ceste a tým zvyšovali trakciu. Na druhej strane, bežné mestské auto má sklon vytvárať vztlak. Dôvodom je tvar karosérie auta, ktorý nad sebou vytvára oblasť nízkeho tlaku. Keď vzduch s vyšším tlakom pôsobí na čelné sklo, jeho odporom a náklonom dôjde k zníženiu tlaku. Tento nižší tlak doslova zdvíha strechu auta, keď ponad ňu obteká prúd vzduchu. [28]

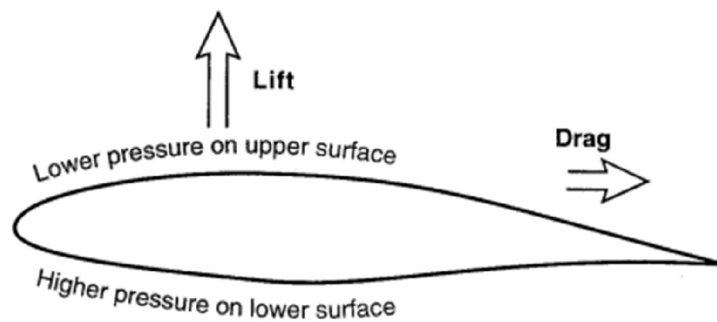


Obr. 4 Ground effect je aerodynamický jav, ktorý zvyšuje vztlak krídel, keď sú umiestnené blízko zeme. Tento efekt je zrejmy aj pre obrátené krídla [6]

V pretekárskych vozidlách sú účinky prítlaku významne, preto sa vytvárajú zámery. Na vytvorenie veľkej prítlačnej sily sa používajú dva prostriedky. Prvým je Venturiho kanál v spodnej časti karosérie, ktorého účinnosť sa zvyšuje zabránením bočného prúdenia pomocou bočných prahov. [1]

Aby boli prvky vytvárajúce prítlak čo najúčinnnejšie pre dosiahnutie jazdných výkonov, mali by len minimálne zvyšovať odpor vzduchu. Jedným zo spôsobov, ako to dosiahnuť, je použitie pohyblivej klapky na krídlach. V zákrute, kde je prítlačná sila limitujúca faktorom stability, by sa mohli vychýliť do veľkého uhla, aby sa vytvoril maximálny prítlak, zatiaľ čo na rovine by sa mohli vychýľovať do nulovej výchylky, aby bol odpor minimálny. [7]

Osobné a športové vozidlá využívajú technológie a poznatky, ktoré boli pôvodne vyvinuté pre pretekárske autá [7].



Obr. 5 Nízky tlak na hornej strane a vyšší tlak na spodnej strane tohto profilu sa sčítajú do zdvihovej sily. Samozrejme, keď sa používa na závodnom aute, profil je obrátený [8]

Niektoré športové autá sú navyše vybavené pohyblivým zadným krídlom. Toto krídlo sa pri nízkych rýchlostiach stiahne, aby neobmedzovalo výhľad dozadu. Pri vyšších rýchlostiach sa však vysunie, aby zvýšilo prítlak a zlepšilo tak jazdné vlastnosti vozidla. [1]

Vozidlá využívajú sily, ktoré vznikajú medzi pneumatikou a cestou pri jazde, brzdení a zatáčaní. Tieto sily sú silne ovplyvnené vertikálnou silou, ktorá pôsobí na pneumatiky a sú obmedzené maximálnym koeficientom adhézie. [1]

Ak by sme mohli zvýšiť normálovú silu pneumatiky tým, že by sme pneumatiku viac stlačili na cestu, mohli by sme zvýšiť bočnú pozdĺžnu silu či brzdenie alebo zrýchlenie bez rizika sklzu, preklzu či šmyku. Jedným zo spôsobov, ako to dosiahnuť, by bolo zvýšiť tiaž zvýšením hmotnosti, ale to by malo negatívny vplyv na jazdné vlastnosti - zrýchlenie a zatáčanie auta.

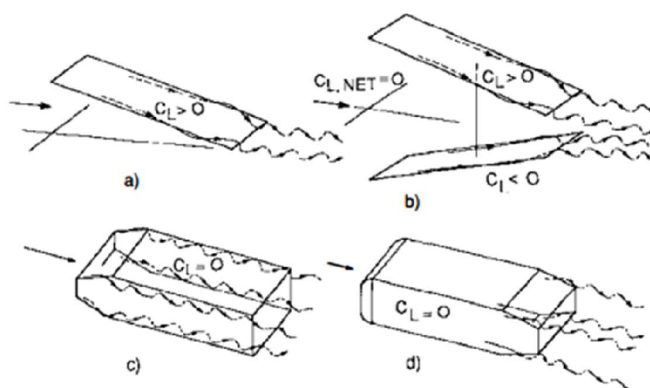
Aerodynamický prítlak však ponúka riešenie, pretože zvyšuje zaťaženie pneumatík bez zvýšenia hmotnosti vozidla. Je fascinujúce, že dôležitosť aerodynamického prítlaku bola uznávaná pretekárskou inžinierskou komunitou až koncom 60. rokov. [1]

2.5 Odpor

Odpor, ktorý pôsobí na vozidlo pri jazde, môže byť analyzovaný z dvoch rôznych uhlov pohľadu: z pohľadu samotného vozidla a z pohľadu tekutiny, v tomto prípade vzduchu. [1]

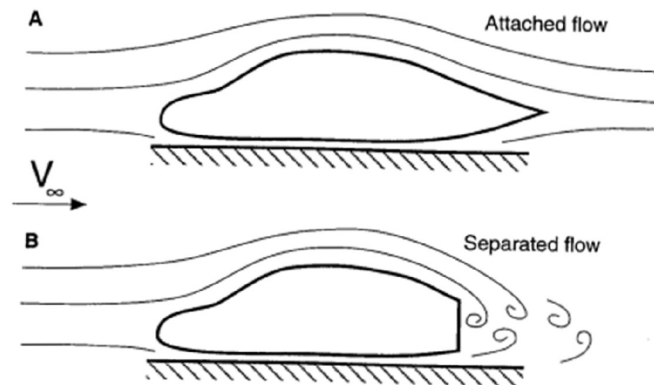
Keď sa na to pozeráme z pohľadu vozidla, odpor je výsledkom sily, ktorú vzduch vyvíja na karosériu vozidla. Táto sila je kombináciou dvoch zložiek: tlakovej a trecej sily. Tlaková zložka vzniká v dôsledku rozdielov v tlaku na rôznych miestach vozidla, zatiaľ čo trecia zložka je výsledkom trenia medzi vzduchom a povrchom vozidla. [1]

Pre moderné autá, ktoré boli aerodynamicky optimalizované, je odpor prednej časti zvyčajne malý. To nevyžaduje špeciálne tvarovanie prúdenia, len dôkladnú pozornosť na detaily. Najväčší aerodynamický problém predstavuje zadná časť auta. [3]



Obr. 6 Zobrazenie rôznych povrchoch a následne vytváranie turbulentného prúdenia za nimi [9]

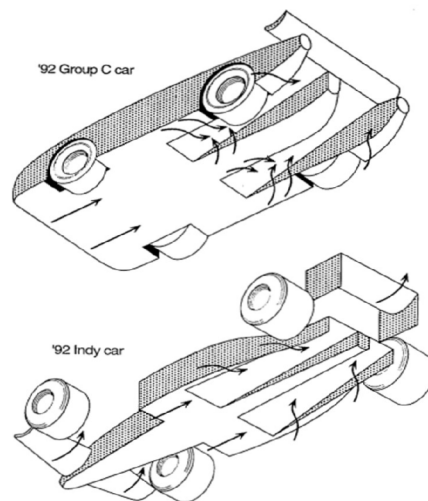
Jedným z problémov je, že vzduch by mal prúdiť laminárne okolo prednej časti vozidla a potom sa spojiť na zadnej časti [1].



Obr. 7 Vplyv tvaru karosérie na vírenie vzduchu za vozidlom [10]

Ďalším problémom je, že snaha o „aerodynamickejšie“ tvary, ktoré znižujú odpor, môže mať negatívny vplyv na stabilitu [1].

Výskum ukázal, že difúzory, ktoré sú často umiestnené na zadnej časti podvozku vozidla, môžu zvýšiť prítlak a umožniť hladký prechod z prúdenia podvozku späť do okolitého prostredia. [1]

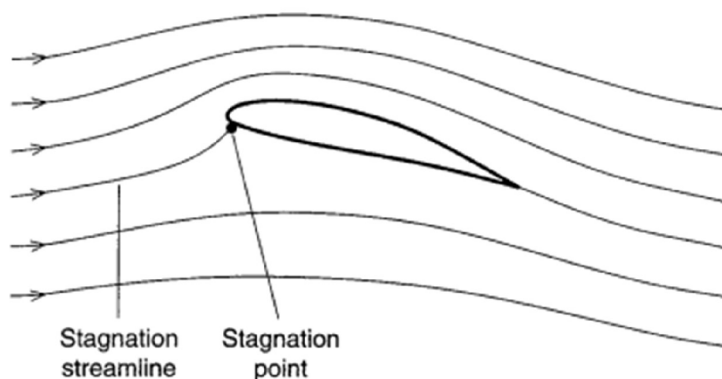


Obr. 8 Difúzor vozidiel kategórie Group C a Indy Car

Na Obr. 8 môžeme vidieť porovnanie difúzorov u závodného auta zo skupiny C a monopostu indy car. [11]

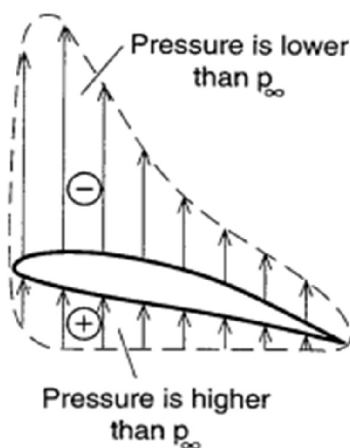
2.6 Aerodynamické profily

Aerodynamický profil je tvar krídla alebo iného objektu, ktorý je navrhnutý tak, aby vytváral vztlak a znižoval odpor vzduchu. Jeho geometria a zakrivenie sú dôkladne navrhnuté pre dosiahnutie vyžadovaných vlastností. [1]



Obr. 9 Prúdové čiary v ustálenom prúde nad krídlom [12]

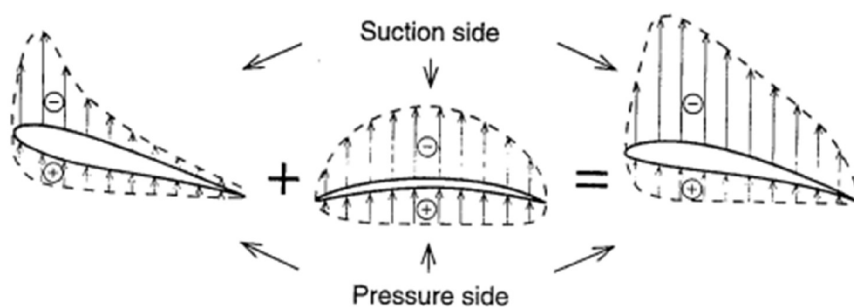
Tvar rozdelenia tlaku je priamy výsledok rozdelenia rýchlosti blízko profilu. Napríklad, častica tekutiny cestujúca pozdĺž prúdu umiestneného mierne nad stagnačným prúdom (na Obr. 9) sa blízko stagnačného bodu prudko stočí smerom k profilu. Keďže tento obrat je proti pevnej ploche profilu, častica sa spomalí, čo vedie k vyššiemu tlaku blízko tohto bodu na spodnej ploche. Ale keď dosiahne predný okraj, je nútená otočiť sa okolo neho (ale teraz častica chce odísť od povrchu), a preto sa jej rýchlosť zvyšuje, čo je dôsledkom nízkeho tlaku blízko predného okraja. [1]



Obr. 10 Tlaku na profile - s ohľadom na rozloženie rýchlosti pozdĺž profilu nie sú tlaky nad a pod profilom rovnaké. Výsledkom je vztlaková sila [12]

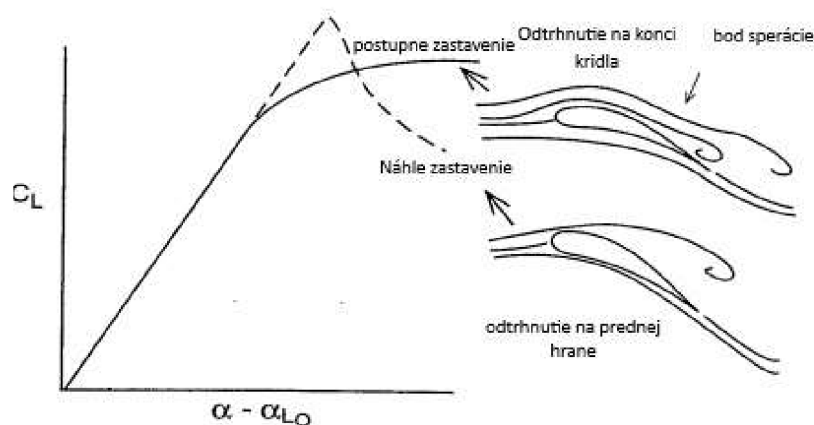
Častica, ktorá sa pohybuje pod stagnačným prúdom, a nevykazuje výrazné zmeny smeru, sa blízko profilu spomalí, čo vedie k zvýšeniu tlaku na jeho spodnej ploche. Na Obr. 11 znamienko (+) označuje oblasť, kde je tlak vyšší ako statický tlak vo voľnom prúde, zatiaľ čo znamienko (-) označuje oblasť s nižším tlakom. Zaujímavé je, že vo väčšine prípadov je príspevok sacej strany (-) k zdvihu oveľa väčší ako príspevok tlakovej strany (+). [1]

Ďalšou otázkou je, ako geometria profilu ovplyvňuje tvar rozdelenia tlaku. Táto otázka môže byť čiastočne zodpovedaná príkladom na Obr. 11. Na ľavej strane je zobrazené bežné rozdelenie tlaku na symetrickom profile pri určitom uhle nábehu α . Vertikálne šípky ukazujú smer tlakovej sily pôsobiacej na povrch profilu. Uprostred obrázka je zobrazený tvar rozdelenia tlaku na profile s camber tvarom oblúka pri nulovom uhle nábehu ($\alpha = 0$). Tieto dva základné tvary rozdelenia tlaku môžu byť kombinované na vytvorenie želaného rozdelenia tlaku, ako je zobrazené na pravej strane obrázka. Vďaka tomuto pozorovaniu sú profily často identifikované podľa ich distribúcie hrúbky (čo je symetrický profil) a ďalšieho tvaru camber (zakrivenie profilu od prednej hrany k zadnej hrane profilu) na stredovej línii. [1]



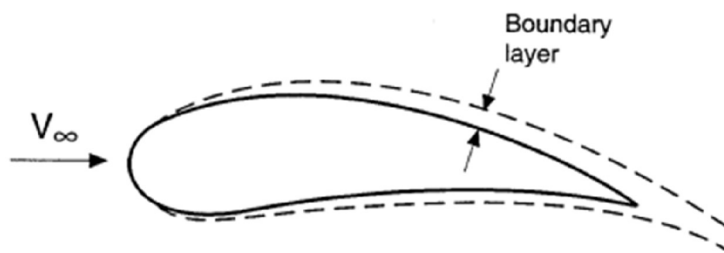
Obr. 11 Vytvárania tlaku na rôznych profiloch [13]

Pre dosiahnutie spoľahlivého výkonu profilu je potrebné vyhnúť sa stavu zastavenia. Ak je profil mimoriadne tenký alebo má jeho predný okraj relatívne ostrý tvar, dochádza k náhlemu zastaveniu. Tento jav sa označuje ako „separácia na prednom okraji“. U hrubších profilov, najmä tých s výrazným camberom (zakrivenie profilu od prednej hrany k zadnej hrane profilu), separácia postupne začína na zadnom okraji, čo sa nazýva „separácia na zadnom okraji“. [1]



Obr. 12 Účinok zastavenia na krivku zdvihu oproti uhlu nábehu, pre dva typy profilov [14]

V prípade priloženého toku je odpor profilu spôsobený trením, ktoré vzniká v dôsledku viskózneho medznej vrstvy. Toto je znázornené na schematickom Obr. 13. Keď je hrúbka vrstvy hrubšia, kvapalina sa viac spomaľuje, čo vedie k väčšiemu odporu. [1]



Obr. 13 ukázaný vývoj medznej vrstvy na oboch stranách profilu [15]

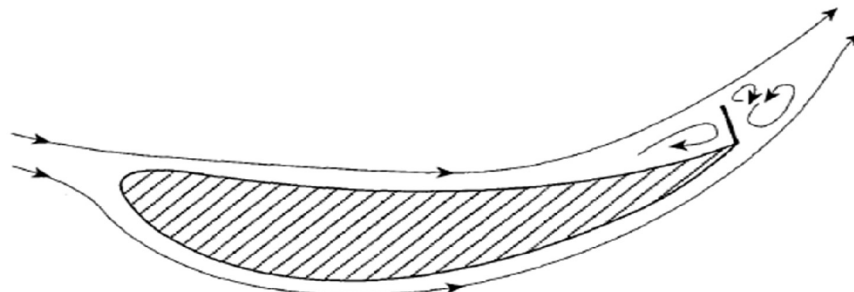
2.8 Gurneyho klapka

Gurneyho klapky, tiež známe ako wickerbills, sú malé výčnelky umiestnené na zadnej hrane krídla. Sú typicky orientované pod pravým uhlom k tlakovej ploche profilu a predstavujú 1% až 2% z rozpätia krídla. [1]

Funkcia Gurney klapky spočíva v zvyšovaní tlaku na tlakovej strane, znižovaní tlaku na sacej strane, a pomáhajú prúdeniu hraničnej vrstvy zostať pripojené až po zadnú hranu na sacej strane profilu. Sú bežne používané u pretekárskych vozidiel. [1]

Gurney klapky môžu byť tiež namontované na prednej časti vozidla a v prípade aut bez predných krídel môžu byť použité na úpravu pomeru prítlaku medzi prednou a zadnou časťou. [7]

Je dôležité poznamenať, že predĺženie týchto klapiek nad 20 mm zvyčajne nezvyšuje prítlak, ale zvyšuje odpor a preto sa neodporúča. [7]



Obr. 14 zvýraznenie prúdových čiar v blízkosti zadnej hrany krídla s normálnym prekrytím [16]

2.9 Aerodynamické koeficienty a ich porovnanie

Aerodynamické koeficienty, sa využívajú na kvantifikáciu aerodynamických síl a momentov[1].

Dva najvýznamnejšie aerodynamické koeficienty sú koeficient odporu (C_d) a koeficient vztlaku (C_l). Vyjadruje mieru odporovej sily, ktorý objekt vytvára pri pohybe cez fluidum, ako je vzduch alebo voda. Nižšia hodnota koeficientu odporu znamená menší aerodynamický alebo hydrodynamický odpor. [1]

Vyjadruje mieru odporovej sily, ktorý objekt vytvára. Vztlak je sila, ktorá pôsobí kolmo na prúd vzduchu a umožňuje vzlietnuť [1].

Tieto koeficienty sú kľúčové pre návrh a analýzu častí lietadiel, automobilov a iných objektov, ktoré sú závislé na prúdení vzduchu [1].

Výpočet koeficientu C_d :

$$C_d = \frac{D}{\frac{1}{2} * A * \rho * v^2}$$

D = odporová sila [N]

A = určená plocha ako referenčná [m^2]

ρ = hustota vzduchu [kg/m^3]

v = rýchlosť v smere jazdy [m/s]

Výpočet koeficientu C_l :

$$C_l = \frac{L}{\frac{1}{2} * A * \rho * v^2}$$

L = vztlaková sila [N]

A = čelná plocha [m^2]

ρ = hustota vzduchu [kg/m^3]

v = rýchlosť v smere jazdy [m/s]

Výpočet koeficientu C_y :

$$C_y = \frac{Y}{\frac{1}{2} * A * \rho * v^2}$$

Y = bočná sila [N]

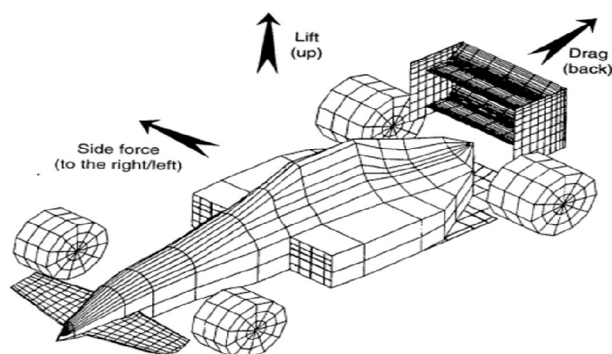
A = čelná plocha [m^2]

ρ = hustota vzduchu [kg/m^3]

v = rýchlosť [m/s]

Aerodynamická efektívnosť je pomer koeficientu vztlaku ku koeficientu odporu. Cieľom každého návrhu je dosiahnuť čo najvyššie toto číslo[1].

$$A_e = \frac{C_l}{C_d}$$



Obr. 15 Smerovky používané na identifikáciu troch zložiek aerodynamickej sily [17]

3 História využívání aerodynamiky v motošporte

Prvý oficiálne registrovaný pokus s prítlačným krídlom sa datuje k 27. máju 1956 na 1000 km Nürburgringu. Inžinier nemeckého pôvodu Michael May, ktorý získal vzdelanie vo švajčiarskom Zürichu, umiestnil na svoje Porsche 550 Spyder obrovskú plochu s profilom obráteného krídla. Po štvrtom tréningu bol však na základe protestu šéfa továrenského tímu Porsche Huchske von Hansteina vylúčený. [18]



Obr. 16 Porche 550 Spyder [19]

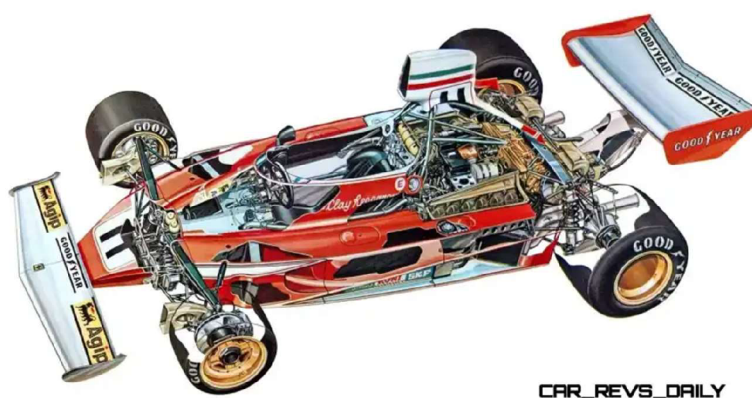
V roku 1968 sa Formule 1 navždy zmenila, keď boli do modelu Lotus 49 zavedené obrátené krídla. Tím Colina Chapmana, v jeho charakteristickom štýle, pripevnil krídla priamo k dielom odpruženia, čo umožnilo priamy prenos nových aerodynamických zátiaží. Toto tiež zabezpečilo, že krídla boli takmer po celý čas v horizontálnej polohe, čo ich robilo efektívnejšími. Napriek vynikajúcemu dizajnu sa však tenké nosníky krídel niekoľkokrát zlomili, čo inžinierov prinútilo pritiahnúť krídla bližšie k vozidlu. [20]



Obr. 17 Lotus 49 [21].

Ferrari 312T

Nové auto, ktoré navrhol Mauro Forghieri, ktorého nový manažér tímu dosadil na pozíciu hlavného inžiniera, bolo jednoduché auto s jasným dizajnom a najnovšími mechanickými vylepšeniami. Na prvý pohľad malo Ferrari 312T niektoré konštrukčné prvky vozidiel Tyrrell a March, bolo ľahko ovládateľné a v zákrutách agilnejšie ako ktorýkoľvek z jeho predchodcov. Nový plochý motor bol výkonný a mimoriadne spoľahlivý, ale hlavnou výhodou bola nová konštrukcia prevodovky. Revolučná prevodovka bola umiestnená pred zadnou nápravou, aby sa dosiahol nízky polárny moment zotrvačnosti, pričom odpruženie sa výrazne líšilo od všetkých predchádzajúcich vozidiel Ferrari F1. [22]



Obr. 18 Prierez Ferrari 312T [23]

Monopost Ferrari 312 T bol jedným z prvých monopostov, ktorý v rokoch 1968 prišiel s prvými náznakmi aerodynamických prvkov. Išlo o menšiu formu zadných krídel, ale už sa začali objavovať klasické, ako poznáme dnes. [22]

Ferrari 312T

Parametre:

Motor - plochý 12 valcový motor

Výkon - 364 kW (495 hp)

Hmotnosť - 575 kg

Prevodovka - 5 stupňová prevodovka

Rám - trubkový hliníkový rám

Williams FW14

Williams FW14 je vozidlo formuly 1 navrhnuté Adrianom Neweyom, ktoré používal tím Williams počas sezón 1991 a 1992. Vozidlo riadili Nigel Mansell a Riccardo Patrese. Vozidlo poháňané 3,5-litrovým motorom V10 Renault, ktorého konštrukciu a vývoj viedol Bernard Dudot, sa považuje za jedno z technologicky najvyspelejších, aké kedy súťažili vo formule 1. V roku 1992 mal FW14B poloautomatickú prevodovku, aktívne odpruženie, trakčnú kontrolu a na krátky čas aj protiblokovacie brzdy. Vďaka aerodynamike navrhnutej Neweyom a aktívnemu odpruženiu, ktoré vynašiel konštruktér a aerodynamik Frank Dernie, bolo auto ďaleko pred svojimi konkurentmi, ako napríklad McLaren MP4/7A, Ferrari F92A alebo Lotus 107, a tvorilo silný balík. FW14B bol taký úspešný, že jeho nástupca (pôvodný FW15), ktorý bol k dispozícii v polovici sezóny 1992, sa nikdy nepoužil. [24]



Obr. 19 Prierez Williams FW14 [25]

Williams FW14

Parametre:

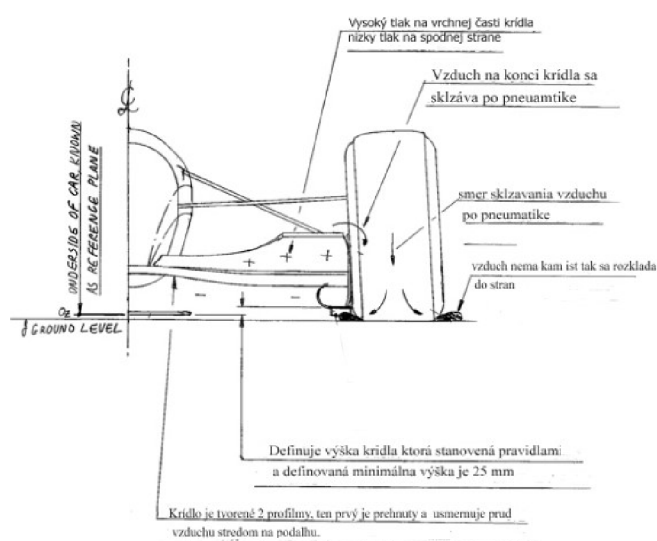
Motor - 3.5L V10 motor

Výkon - 670 kW (900 hp)

Hmotnosť - 500 kg

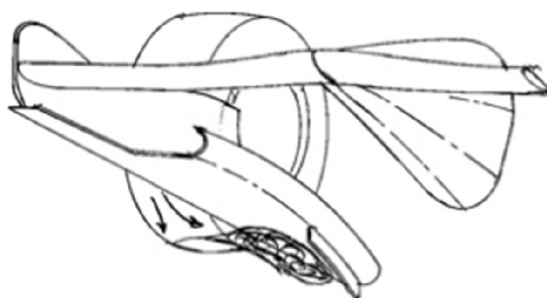
Prevodovka - poloautomatická prevodovka

Rám - trubkový hliníkový rám



Obr. 20 Technický popis konštrukcie monopostu Williams FW14 [26]

Na Obr.20 si môžeme všimnúť technický popis problému, ktorý nastával na monoposte Williams FW14. Jednalo sa o špinavý vzduch ktorý sa víri po pneumatike dole ku kontaktnej ploche, kde vzduch, ktorý ide mimo formule, nie je až taký problém, ale vzduch, ktorý vystrekuje z vnútornej strany, narušuje aerodynamické prúdenie, a tým poškodzuje aerodynamiku podlahy a difúzora [24]



Obr. 21 Riešenie problému Obr.5 [27]

Konštruktér predĺžil endplate, ktorý sa nachádzal na prednom krídle, tak, že koniec endplatu bol zároveň so zadnou hranou kolesa, čo následne zamedzilo nežiaducemu vplyvu odstrekovania špinavého vzduchu do podlahy a difúzora. [24]

McLaren MP4 20

Parametre:

Motor - V10 motor

Výkon - 694 kW (930 hp)

Hmotnosť - 600 kg

Prevodovka - 7 stupňová poloautomatická prevodovka

Rám - monokok z uhlíkových vlákien

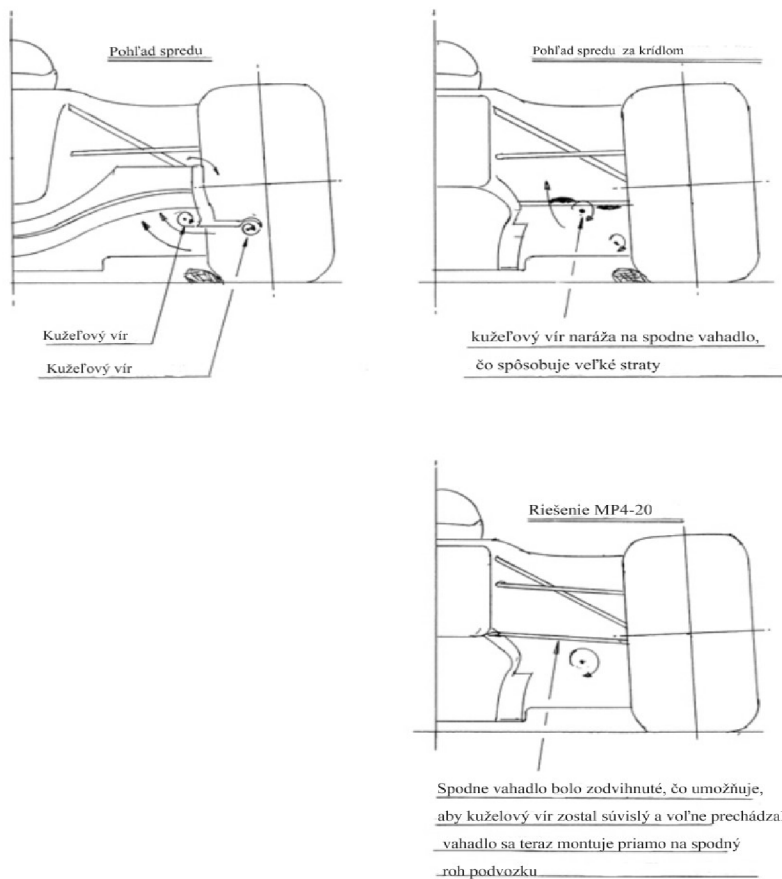
McLaren MP4-20 je názov pretekárskeho vozidla Formuly 1, ktoré spoločnosť McLaren používala v sezóne 2005. Navrhli ho Adrian Newey a Mike Coughlan. Nový podvozok je úplne odlišný od pôvodných modelov MP4-18 a MP4-19.

Nový monopost má úplne novú aerodynamiku a prispôsobuje sa novej sezóne. Má zvýšené predné krídlo, menší difúzor a úplne prepracovanú zadnú časť. Vyváženie vozidla maximalizuje výkon pneumatík Michelin, ale zároveň zvyšuje šetrnosť, ktorá je potrebná vzhľadom na zákaz výmeny pneumatík počas pretekov. [24]

Počas sezóny pribudli aj dva výrazné rohy nad hlavou jazdca, ktoré usmerňujú prúdenie vzduchu [24].



Obr. 22 Monopost McLaren MP-4-20 [29]



Obr. 23 Riešenie problému s podvozkom [30]

Na Obr.23 autor rieši problém s turbulentným vírením v oblasti ramien, kde predné krídlo vytvára vír, ktorý potom naráža do zavesenia a narúša tým plynulé prúdenie. Tento problém vznikol posunutím predného krídla o 50mm a následným odhalením zavesenia. Riešenie tohto problému bolo, že sa zavesenie uchytilo vyššie na ráme. [24]

Red Bull RB8

Parametre:

Motor - 2.4 L V8 motor

Výkon - 634 kW (850 hp)

Hmotnosť - 640 kg

Prevodovka - 7 stupňová poloautomatická prevodovka

Rám - monokok z uhlíkových vláken

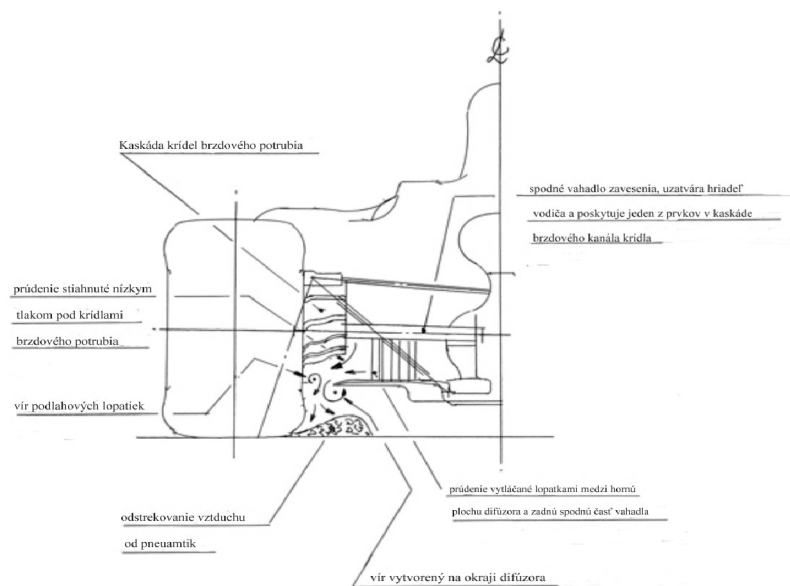
V roku 2012 na monoposte Red bull RB8 nedošlo k množstvu zmien oproti monopostu zo sezóny 2011, technické úpravy, ktoré sa objavili, boli významné z estetického aj aerodynamického hľadiska. [24]

Obavy o bezpečnosť vysokého podvozku vyústili do nevzhľadných stupňovitých nosov, zatiaľ čo neúprosne a čoraz zložitejšie využívanie fúkania výfukov bolo ešte prísnejšie kontrolované. [24]

Vynaliezavosť sa však ťažko potláča a tím stále nachádzal spôsoby, ako využiť výfukové plyny, a odhalil kľúčové aerodynamické zisky v iných oblastiach. A po 20 kolách, siedmich víťazstvách a siedmich ďalších pódiách získal RB8 pre tím tretí po sebe idúci double jazdcov a konštruktérov [24]



Obr. 24 Monopost Red Bull RB 8 [31]



Obr. 25 Optimalizácia zadnej nápravy formuly RB8 [32]

Pri tomto modeli bolo nutné upraviť zadnú časť monopostu, kvôli zmene pravidiel a zakázaniu dvojitého difúzora. Bolo nutné stratený prítlak získať späť, čo umožňovalo umiestnenia výfuku do spodnej časti monopostu a zároveň ho smerovať na zadnú stranu krídla, kde sa nachádzali chladiace lopatky. Tieto lopatky pomáhali chladeniu brzd a zároveň zabezpečovali prítlak na zadnej náprave, čím vlastne nahradili dvojité difúzor. [24]

3.1 Študentská formula

Formula Student je študentská súťaž v konštrukcii pretekárskych monopostov. Univerzitné tímy z celého sveta navrhujú, konštruujú a testujú pretekárske formulové vozidlá a neskôr s nimi pretekajú na prestížnych pretekárskych okruhoch po celom svete. Cieľom je navrhnuť a postaviť skutočný pretekársky monopost pre študentského jazdca. Na pretekoch tímy súťažia v dynamických aj statických disciplínach. [34]

Súťaž sa riadi dvoma typmi pravidiel FSG (európske) a FSAE (zvyšok sveta). Súčasťou pretekov sú aj technické kontroly, pri ktorých musia tímy preukázať, že monopost spĺňa pravidlá, najmä čo sa týka bezpečnosti. Tieto kontroly pozostávajú z prehliadky vozidla, testu náklonu, dažďového testu, testu brzd.[34]

Formula Student sa delí na 3 kategórie:

- *Kategória C – combustion*

„Kategória spaľovacích monopostov je najstaršia kategória ktorá vznikla pri založení súťaže“ [34]

- *Kategória E – electric*

„Od roku 2010 sa závodní študentskej formule zúčastňujú aj formule s elektrickým pohonom. Vznikla pre ne samostatná kategória, ktorá sa za posledné roky výrazne rozmohla. Táto kategória významne pomáha vývoju technológiám batériového úložiska a elektrického pohonu.“ [34]

- *Kategória DV - driverless*

„Táto kategória vznikla v roku 2017, tu sa tímy venujú autonómnejmu systému vozidla. Monoposty autonómnej kategórie sa pohybujú po trati pomocou súboru snímačov na samotnom vozidle. Ide najmä o kamery, LiDAR a GPS.“ [34]

3.2 Možnosti merania aerodynamiky

Pri vývoji aerodynamiky vozidla máme na výber tri základné metódy: testovanie na ceste, vo veternom tuneli a výpočty. Každá z nich má svoje výhody a nevýhody. [1]

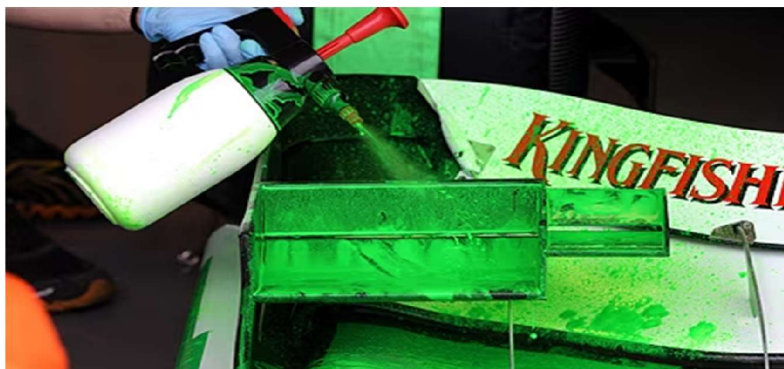
Testovanie na ceste môže byť na prvý pohľad jednoduché, ale narazíte na problémy ako vibrácie odpruženia a meniace sa okolité podmienky. Táto metóda je tiež obmedzená v raných štádiách dizajnu, keď ešte neexistuje skutočné auto na testovanie. [1]

Veterné tunely ponúkajú kontrolované prostredie, ale môžu byť drahé a nemusia byť dostupné modely. Malé modely a ich testovanie tiež nemusia presne duplikovať podmienky v plnej veľkosti. [1]

Výpočty a simulácie môžu byť ideálnou odpoveďou, ale v súčasnosti majú obmedzené schopnosti a môžu byť drahé. Dlhodobé investície do tohto smeru, však môžu byť veľmi užitočné. [1]

Záverom je, že tekutinová dynamika je komplikovaná a žiadny nástroj nie je dokonalý. Často je potrebné použiť viac ako jeden nástroj, alebo dokonca všetky možnosti. Zozbierané údaje by mali zahŕňať aerodynamické koeficienty, rozdelenie tlaku na povrchu a údaje o vizualizácii toku. Tieto informácie môžu pomôcť zlepšiť tvar vozidla a určiť, kde sa tok oddeľuje. [1]

3.2.1 Flow-vis



Obr. 26 Nanášanie Flow-vis [35]

Postrek, ktorý zobrazuje prúdenie (z anglického flow-visualisation, preto flow-vis), je zmesou fluorescenčných pigmentových častíc rozpustených v kvapaline na báze minerálneho oleja, obvykle parafínového oleja. [36]

Jednoducho povedané, tento postrek sa využíva na štúdium smeru prúdenia vzduchu. Hoci sa môže zdať, že smer prúdenia je celkom jasný, pri komplexnej interakcii prúdenia, napríklad okolo zadnej časti auta, to nemusí byť vždy také jednoduché, ako by ste si mohli myslieť. [36]

Hrúbka kvapaliny je taká, že sa pod vplyvom gravitácie nepohybuje. No keď okolo nej prúdi vzduch, častice sa pohybujú v smere tohto prúdenia. Kvapalina sa nevyparí, a tak sa počas jazdy vozidla po trati neustále posúva. [36]



Obr. 27 Znáznornenie Flow-vis [37]

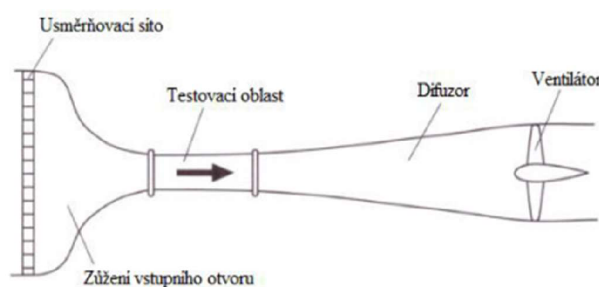
3.2.2 Aerodynamické tunely

Základná myšlienka výstavby aerodynamického tunela je jednoduchá. Namiesto prenasledovania lietajúceho lietadla alebo idúceho auta všetkými meracími prístrojmi zostáva testovací model v pokoji, zatiaľ čo vzduch sa voči nemu pohybuje. Akokoľvek jednoducho táto myšlienka vyzerá, ukázalo sa, že existuje mnoho spôsobov, ako postaviť aerodynamický tunel, a ešte viac problémov spojených s každým prístupom. [1]

V elementárnom aerodynamickom tuneli je vzduch fúkaný, zvyčajne ventilátorom (v niektorých aerodynamických tuneloch sa používajú vysokotlakové nádrže alebo trysky). [1]

3.2.2.1 Aerodynamický tunel s otvoreným okruhom

Pri tomto aerodynamickom tuneli je vzduch vŕhánaný do tunela a na konci opúšťa systém do ovzdušia a nie je možné znovu použitie tohto vzduchu. Teda v tuneli je neustále používaný nový vzduch. [1]



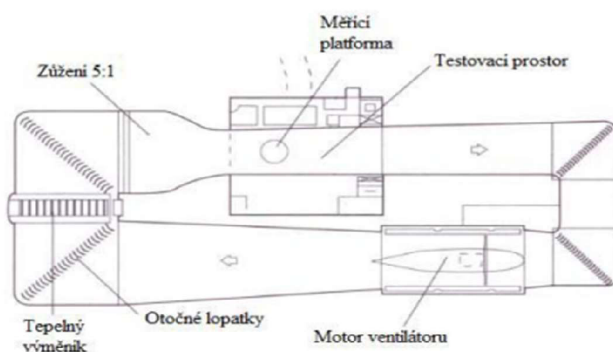
Obr. 28 Aerodynamický tunel s otvoreným systémom [38]

Aerodynamický tunel s otvoreným okruhom je náchylný na pohyby vetra, preto je ideálne mať takýto tunel umiestnený v interiérových priestoroch, aby tieto nežiaduce pohyby vetra neovplyvňovali výsledky merania. [1]

3.2.2.2 Aerodynamický tunel s uzavretým okruhom

Na rozdiel od aerodynamického tunela s otvoreným okruhom, tento tunel nie je ovplyvňovaný pohybmi vetra, a zároveň umožňuje recyklovať použitý vzduch ktorý vŕháme do systému. Jednou nevýhodou tohto systému je, že je náchylný na prehrievanie vzduchu,

preto sú potrebné v tejto sústave tepelné výmenníky tepla na ochladzovanie vzduchu v tuneli.
[1]

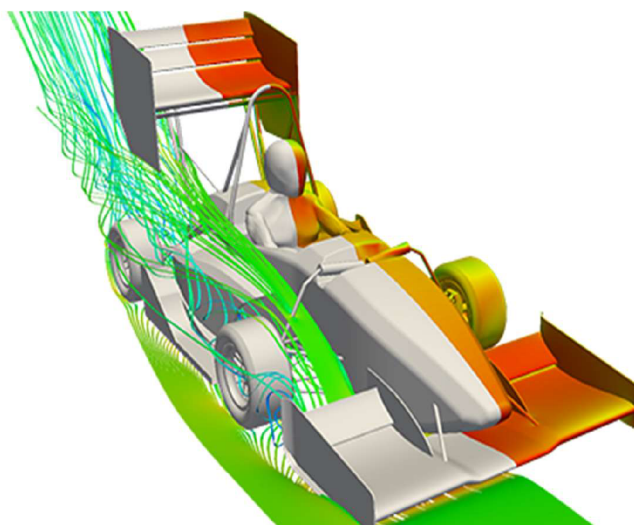


Obr. 29 Aerodynamický tunel s uzavretým okruhom [39]

3.2.3 CFD (Computational Fluid Dynamics)

CFD je odvetie mechaniky kvapalín, ktorá sa zaoberá numerickou analýzou a dátovými štruktúrami na skúmanie a riešenie problémov s prúdením kvapalín. CFD je v podstate počítačový program, ktorý získava informácie o systéme a procese prúdenia a potom nám ukazuje počítačové vizualizácie tohto procesu, aby sme mohli nájsť najlepšie riešenie problému. [34]

Použitie CFD umožňuje aerodynamikom lepšie pochopiť prúdenie vzduchu, čo je oveľa náročnejšie ako testovanie v aerodynamickom tuneli. Porovnanie vizualizácie prúdenia z reálneho auta s predpoveďou z CFD zvyšuje dôveru tímov v presnosť ich simulácií. No môže tiež odhaliť nežiaduce efekty, ako je odtrhnutie prúdenia od povrchu. [36]



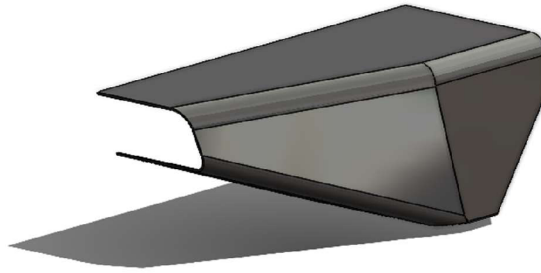
Obr. 30 CFD simulácia [41]

4 Návrh aerodynamického balenia pre monopost

Táto kapitola sa bude venovať inováciám aerodynamického balenia pre monopost tímu FS TUL Racing. Do tohto balenia spadajú predné krídlo, zadné krídlo a bočnice spolu s podlahou. Pozrieme sa na rôzne koncepty návrhu a spomenieme výhody a nevýhody daných návrhov. A podrobnejšie sa zameriame na návrh, výrobu, simulácie a validácie predného krídla.



Obr. 31 Predné krídlo [42]

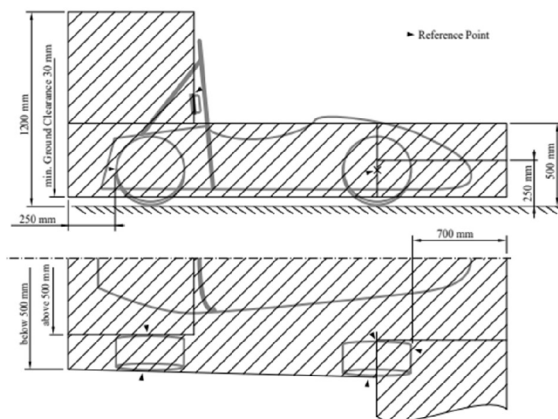


Obr. 32 Bočnice [42]



Obr. 33 Zadné krídlo [42]

Pri návrhu aeropaketu sa je potrebné sa na začiatku oboznámiť s pravidlami súťaže Formula Student, kde máme definované maximálne rozmery, oblasti v ktorých sa nesmie nič nachádzať a zaoblenia komponentov podľa požiadaviek pravidiel Formula Student.



Obr. 34 Stanovené rozmery dané Pravidlami FSG [43]

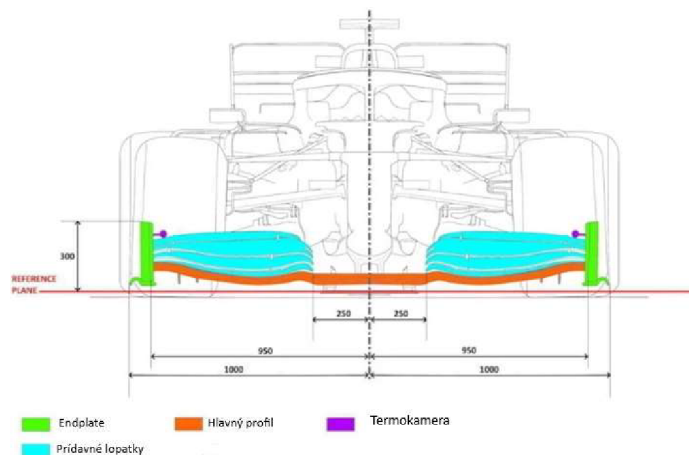
4.1 Predné krídlo

Predné krídlo je dôležitou súčasťou celého aerodynamického balenia z toho dôvodu, že nám vytvára a udáva smer prúdenia pre zvyšok vozidla.

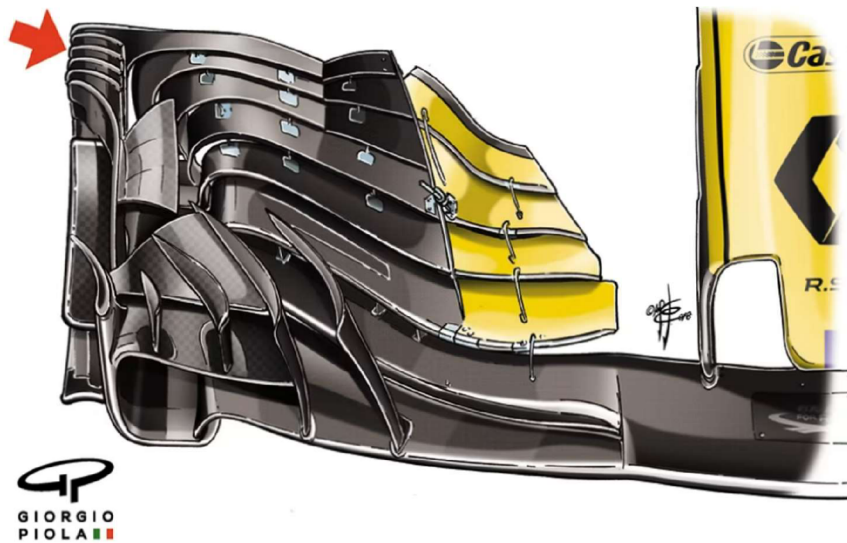
Za nosnú konštrukciu predného krídla sa považuje hlavný profil, ktorý je možné skonštruovať z jedného alebo viacerých profilov. Tvary týchto profilov, alebo profilu, sú prispôbené návrhu, ktoré stále podliehajú pravidlám študentskej formule. Prídavné lopatky sú neoddeliteľnou súčasťou návrhu predného krídla. Tieto lopatky, spolu s hlavným profilom, nám vytvárajú prítlak a zároveň generujú odpor, ktorý sa pri konštrukcii a voľbe tvaru prídavných lopatiek snažíme minimalizovať. Samotný tvar prídavných lopatiek nám už potom určuje, kam budú usmerňované jednotlivé prúdy vzduchu, ktoré sa tam vytvárajú. Poslednou hlavnou časťou predného krídla je jeho zakončenie koncovou doskou tzv. endplate, ktorá sa nachádza na Obr. 35, je zobrazená zelenou farbou.

Na Obr. 35 sú znázornené komponenty, z ktorých sa skladá predné krídlo. Na tomto obrázku sú svetlomodrou farbou znázornené prídavné lopatky, zelenou farbou vyznačené endplaty, hlavný profil je znázornený oranžovou farbou a termokamera, ktorá je uchytená na endplatoch, je vyznačená fialovou farbou.

Z tohto dôvodu bolo v minulosti vyvinutých množstvo variácií, inovácií a rôznych doplnkov, ktoré sa umiestňovali na predné krídla. Týmito prídavkami boli horizontálne a vertikálne lopatky, ktoré boli umiestnené na začiatku hlavného profilu, viď Obr. 36. Úlohou týchto lopatiek, a taktiež aj úlohou enplatov, je smerovať prúd vzduchu smerom do priestoru medzi kolesom a rámom, inak známe ako *Inwash*, alebo naopak odkláňať vzduch mimo kolies smerom od rámu, inak známe ako *outwash*. Toto prúdenie je znázornené na Obr. 37 na príklade odkláňania prúdu vzduchu pomocou endplatov.

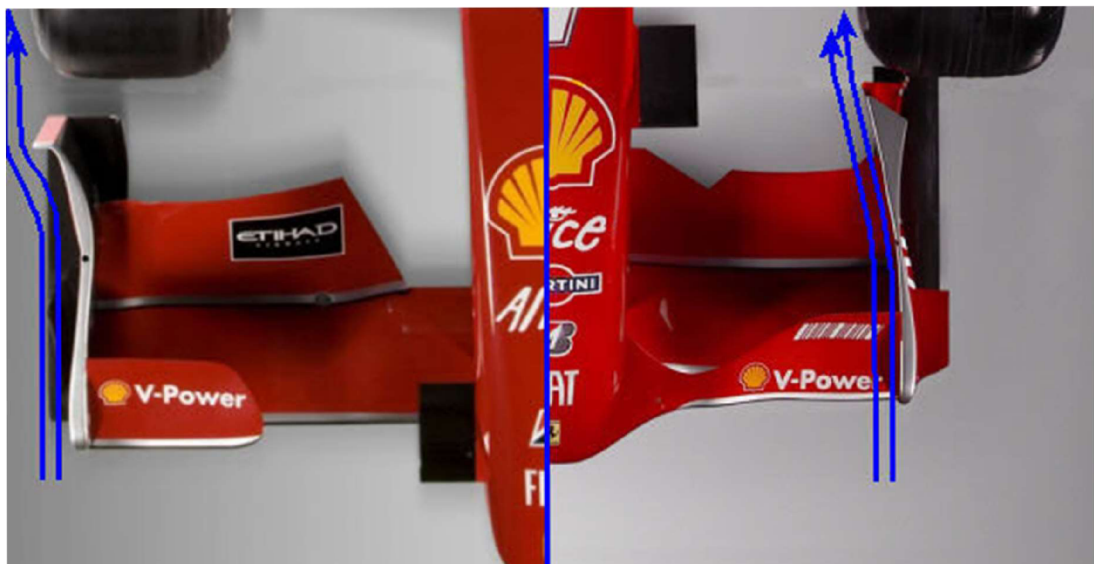


Obr. 35 Zloženia predného krídla [44]



Obr. 36 Prídavné lopatky na prednom krídle F1 monoposte Renault [45]

Pre tento účel sú na koncoch krídlach endplaty, ktoré tento účel zaisťujú a umožňujú prúdenie smerovať podľa požiadaviek. Ďalšou ich funkciou je uzatvárať vzduch medzi hlavným profilom a traťou, čo zabezpečuje maximalizovať stlačenie prúdu vzduchu pod hlavným profilom, čo umožňuje zväčšeniu rýchlosti prúdu vzduchu.

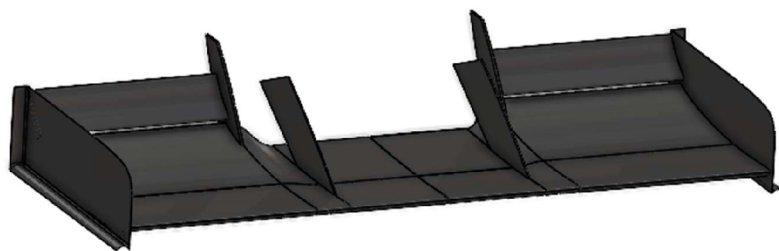


Obr. 37 Znázomenie prúdenia na endplatoch (*outwash*) na ľavej strane (*inwash*) na pravej [46]

4.2 Koncept predného krídla

Pri návrhu predného krídla sa vychádzalo z chýb predného krídla na minuloročnom monoposte, kde jeho hlavné chyby boli vo veľkosti. Krídlo bolo širšie ako rozchod kolies, čo malo za príčinu, že pri prejazde zákrutou sa stávalo, že piloti zhadzoval kužele, čo malo za následok časovú penalizáciu. Ďalšou slabinou bolo že, pôvodné krídlo nevytváralo dostatočnú prítlačnú silu na prednej náprave a neumožňovalo smerovanie prúdu vzduchu do podlahy, o čo bola tento rok snaha zmeniť. Hlavnou výhodou pôvodného krídla bola jednoduchá konštrukcia, čo zjednodušovalo proces výroby a možnosti vyskúšania rôznych možnosti aplikácie karbónových tkanín.

S týmito poznatkami sa mohlo zlepšiť novo navrhnuté krídlo a minimalizovať nedostatky toho pôvodného.



Obr. 38 Pohľad na krídlo minuloročného monopostu [42]

Na Obr. 38 je znázornené predné krídlo monopostu z roku 2022, ktoré sa skladá z jednoduchých prídavných lopatiek, hlavného profilu a endplatov. Myšlienkou tohto návrhu bolo vytvoriť jednoduché predné krídlo, ktoré bolo možné vyrobiť jednoducho a ekonomicky výhodne.

4.3 Inovácie – nový koncept predného krídla

Navrhli sa tri varianty predného krídla, kde každé krídlo ma svoje určité výhody a nevýhody.

V ďalšej časti textu budú popísané varianty, u ktorých bol kladený dôraz na jednoduchosť výroby, zvýšenie prítlaku a optimálne smerovanie prúdu obtekaného vzduchu.

4.3.1 Sieťovanie modelu

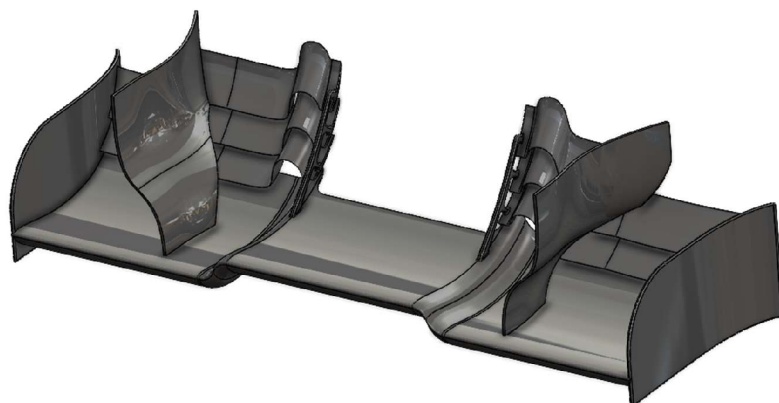
Sieťovanie modelu tak ako samotná simulácia prebiehala v programe Solidworks. Simulácia prebiehala K-epsilom modely na simulovanie sa používal laminárny a turbulentný model s nesymetrickým sieťovaním. Sieťovanie sa nastavovalo tak že model predného krídla mal jemnejšiu sieť a ako okolie. Sieť modelu mala veľkosť jednej bunky 0,25 mm. Veľkosť buniek okolí v ose x bolo 5,4 mm v ose y 4,7 mm a v ose z 5,6 mm celková plocha ktorá bola simulovaná bola pri zmenšenom modeli 1,26 m³ a celkový počet buniek v tomto modeli okolo 4-5 miliónov buniek. V simulácii kde sa simulovalo plnohodnotné predné krídlo bolo nastavené sieťovanie tak ako u zmenšeného modelu. Použil sa laminárny a turbulentný model s nesymetrickým nastavením siete. U modelu sa použila sieť vo veľkosti 0,31 mm a veľkosťami buniek v okolí v ose x bolo 8,6 mm v ose y 9,1 mm a v ose z 8,3 mm. Celkový počet buniek v simulácii plnohodnotného krídla bolo 9-10 miliónov buniek. Veľkosť simulačného modelu 6,3 m³.

4.3.2 Prvá varianta predného krídla

V prvej variante bolo snahou navrhnuť krídlo tak, aby generovalo čo najviac prítlaku. Keďže kolesá s pneumatikami vytvárajú špinavý vzduch, ktorý ďalej ovplyvňuje aerodynamiku celého vozu. Ďalšou možnosťou bolo navrhnuť a vyskúšať vertikálne lopatky Obr. 39, ktoré by umožňovali prácu s prúdom vzduchu a následne ten prúd vzduchu odkloniť. Ďalej sa vytvoril špecifický tvar horizontálnych lopatiek Obr. 39, ktoré mali na vnútornej strane krídla vytvorené oblúky, ktoré mali zachytávať turbulencie vytvárané od rámu a následné toto prúdenie smerovať do bočníc.

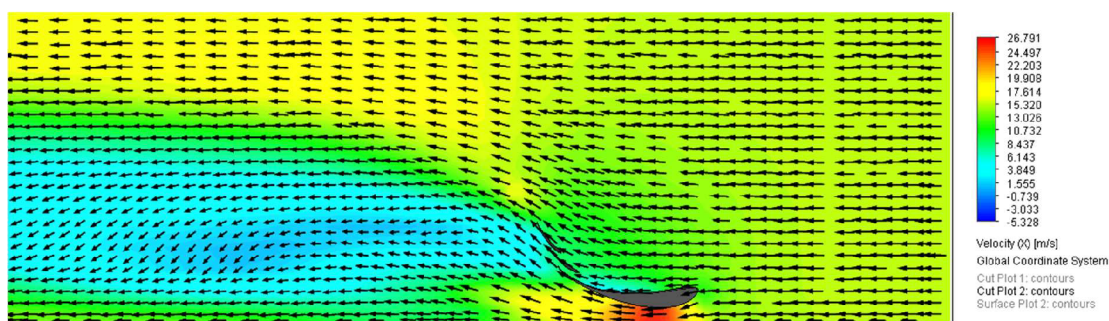


Obr. 39 Prvá varianta predného krídla pohľad spredu [42]



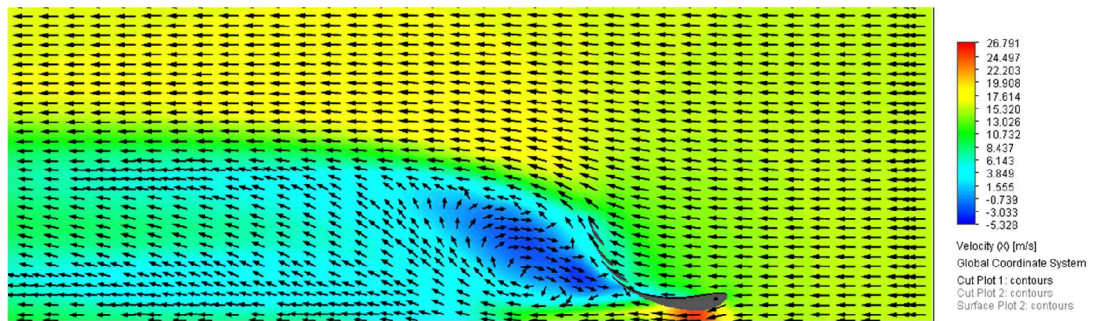
Obr. 40 Prvá varianta predného krídla pohľad z boku [42]

Pre nasledujúce simulácie všetkých 3 variant kridel boli zvolené počiatkové podmienky: výška krídla od podložky 35 mm, rýchlosť vzduchu 15 m/s, teplota prostredia 20 stupňov a atmosféricky tlak.



Obr. 41 Simulácia rýchlosti vzduchu v priereze s 2 lopatkami variantu 1 [42]

Na Obr. 41 je zobrazená simulácia zo zadanou počiatkovou rýchlosťou 15 m/s, atmosférickým tlakom a teplotou 20 stupňov. Vpravo je znázornená legenda so stupnicou od 5,3 m/s až po 26,8 m/s. Táto stupnica predstavuje škálu rýchlostí, ktoré sa nachádzajú v simulácii. Na simulácii sú znázornené aj vektory, ktoré zobrazujú smer prúdenia vzduchu. Tieto vektory sú ovplyvnené geometriou telesa, cez ktoré obteká prúd vzduchu. K stupnici bola zvolená farebná škála, ktorá predstavuje rýchlostné polia. Modrá farba značí spomaľovanie prúdu vzduchu za profilom. Červená farba zobrazuje najväčšiu dosiahnutú rýchlosť prúdenia vzduchu.

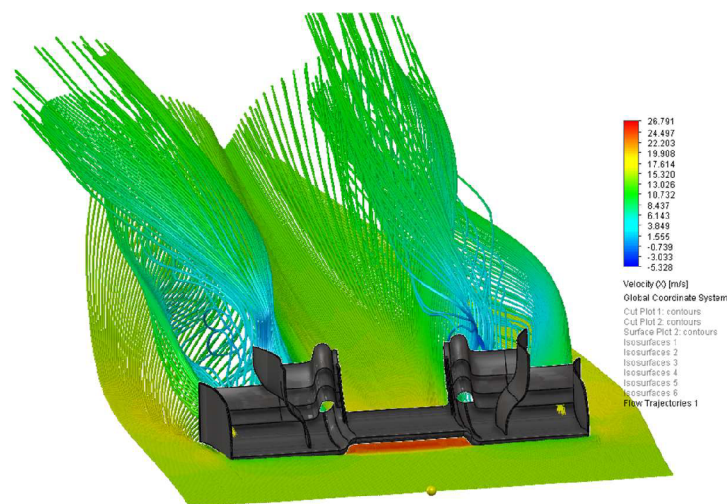


Obr. 42 Simulácia rýchlosti vzduchu v priereze s 3 lopatkami varianta I [42]

Na Obr. 42 je zobrazená simulácia, ktorej počiatkové podmienky sú rovnaké ako na simulácii z Obr. 41. V tejto simulácii je viditeľné úplne zastavenie prúdu vzduchu za prídavnými lopatkami, ktoré je vyznačené tmavomodrou farbou. V tejto časti sú hodnoty rýchlosti záporné čo naznačuje že prúd vzduchu sa v tejto časti otočí a smeruje späť ku krídlu. To je nežiaduci efekt ktorý obmedzuje následne prúdenie vzduchu a znižuje efektivitu predného krídla.

Na simuláciách rýchlosti vzduchu z Obr. 41 môžeme vidieť, že sa nám vzduch na zadnej strane lopatky začal spomaľovať, čo nám nasvedčuje, že dochádza k odtrhnutiu prúdenia na spodnej strane lopatky.

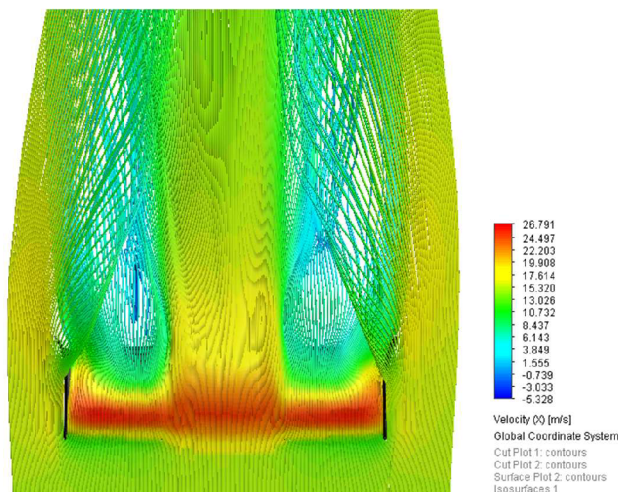
Na simulácii z Obr. 42 si môžeme všimnúť úplne odtrhnutie vzduchu a následné zastavenie vzduchu na spodnej strane lopatky, čo nám vytvára turbulencie. Chyba návrhu tohto predného krídla bola, že boli zle zvolené profily lopatiek a následne zvolený sklon a následne nadväzovanie lopatiek na seba. Čím došlo k odtrhnutiu vzduchu a znížením efektívnosti.



Obr. 43 3D vizualizácia prúdenia rýchlosti vzduchu - pohľad zhora [42]

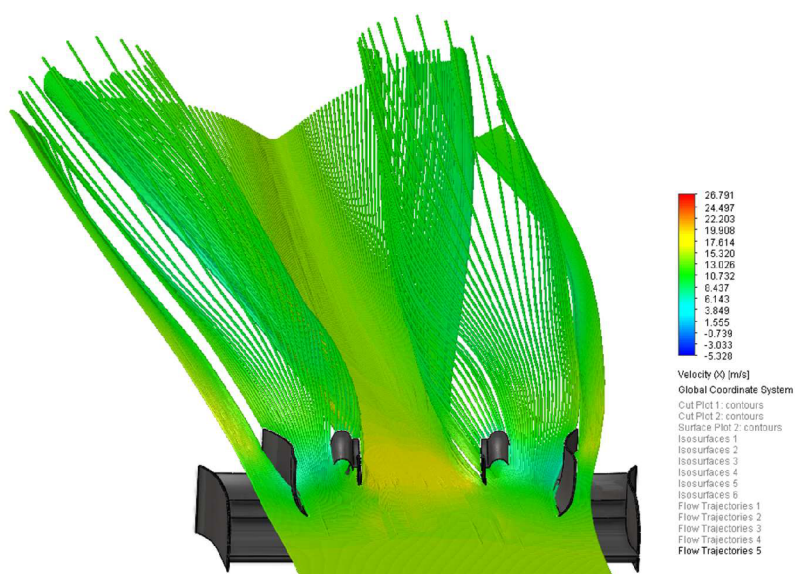
Pri návrhu krídla bol zvolený zložitejší hlavný profil, ktorý mal za úlohu smerovať vzduch pod vozidlo, kde sa nachádzal difúzor na ktorý to malo nadväzovať. Voľba profilu na hlavný profil sa ukázala ako správna, ako si môžeme všimnúť na simuláciách sa spodnej strane profilu sa nám rýchlosť zvýšila skoro dvojnásobne.

Pri 3D vizualizácii na Obr. 43 si môžeme všimnúť zastavenie prúdu vzduchu a vytvorenie vzduchového vaku na zadnej strane krídla.



Obr. 44 Vizualizácia prúdenia spodnej strany krídla- pohľad zdola [42]

Na Obr. 44 je vyobrazené prúdenie vzduchu zo spodnej strany krídla, simulácia ukazuje rýchlostne spektrum vzduchu na spodnej strane krídla, ktoré je od zeme vzdialené 30 mm. Prúd vzduchu sa s tláča medzi podložkou a spodnou stranou krídla, čo vytvára vyššiu rýchlosť.



Obr. 45 Vizualizácia prúdenia cez vertikálne klapky - pohľad zhora [42]

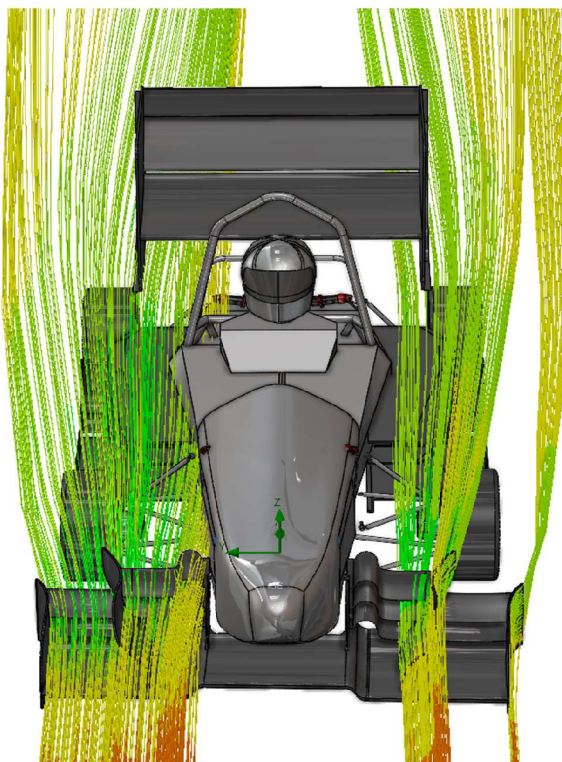
Vertikálnu klapku sme navrhovali na štýl (*outwash*), čiže sa snažíme odvádzať vzduch od kolies von do prostredia. Na Obr. 45 môžeme vidieť, že dochádzka k odklonu vzduchu. Tento smer bol vybraný aj pri konštrukcii endplatov, kde bočný tvar endplatu je smerovaný do von.

V tabuľke 1 sa nachádzajú vypočítane hodnoty zo simulácii, kde sme zisťovali hodnoty prítlaku (Lift force), hodnoty odporu (Drag force) a koeficienty prítlaku (C_l) a odporu (C_d). Následne hodnoty budú potrebné pre nasledujúce hodnotenie a porovnanie s druhými variantami krídel.

Tabuľka 1 Výsledné hodnoty simulácii prvej varianty krídla

	Jednotka	Posledná vypočítaná hodnota	Priemerná hodnota	Minimálna hodnota	Maximálna hodnota
Odpor	[N]	56,79	57,60	56,05	58,30
Vztlak	[N]	378,88	378,56	377,87	379,40
C_d	[-]	1,11	1,13	1,10	1,146
C_l	[-]	7,44	7,44	7,42	7,45

V tabuľke 1 sa nachádza priemerná hodnota výpočtu. Táto hodnota je priemerom z celkového počtu iterácii k danej vypočítanej zložke.



Obr. 46 Simulácia prúdenia vzduchu okolo vozu s použitím predného krídla varianta 1 [42]

Na Obr. 46 sa nachádza vizualizácia prúdenia vzduchu okolo vozidla s predným krídlom varianty 1. Na ľavej strane krídla je vyobrazené obtekanie prúdu vzduchu okolo všetkých častí predného krídla a následné ovplyvnené prúdenie okolo vozidla. Na pravej strane sú vybraté vertikálne časti, ktoré mali za úlohu odvádzať prúd vzduchu od vozidla.

Výhody krídla:

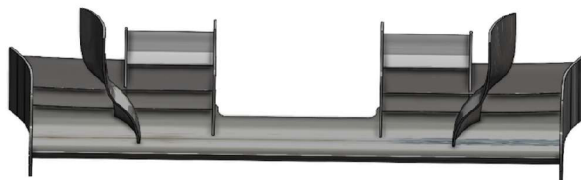
- + vysoký prítlak
- + prúdenie vzduchu do difúzora
- + endplaty odvádzajú prúd vzduchu od kolies

Nevýhody krídla:

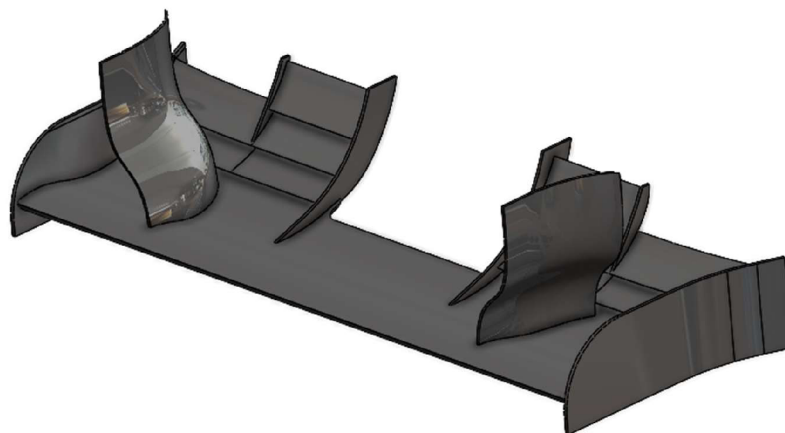
- vertikálne lopatky neodvádzajú dostatočne vzduch od kolies
- zvýšený odpor krídla
- zložitá konštrukcia (drahšia výroba)
- nedostatočné chladenie motorov (krídlo nepomáha prúdeniu do bočnic)

4.3.3 Druhá varianta predného krídla

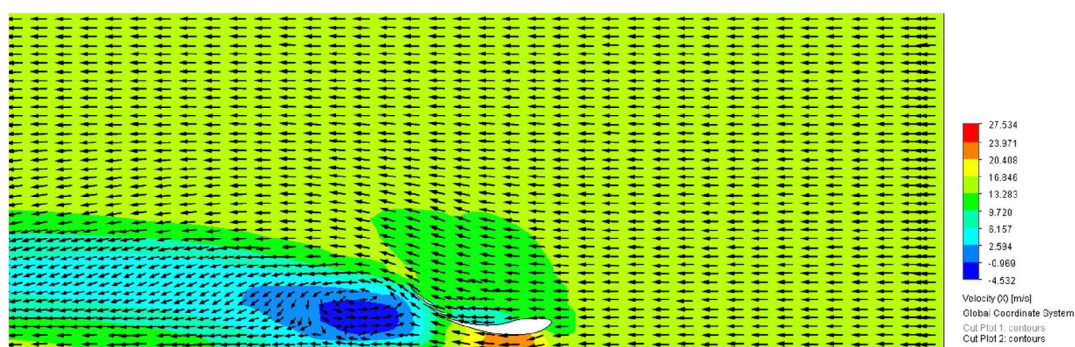
Pri druhej variante krídla sa využila geometria profilu z predchádzajúceho hlavného profilu, ktorý sa zjednodušil kvôli vyrobiteľnosti a celkovo koncept zjednodušiť. Pridavne lopatky, ktoré sa na krídle nachádzajú majú rovnaký tvar profilu, ale kvôli pravidlám sa tretia rada skrátila a musí mať vlastné uchytenie, na ktoré bude viesť od druhého profilu. Využila sa varianta použiť vertikálne lopatky, ktoré sa posunuli smerom viac od rámu na usmerňovanie vzduchu od kolies.



Obr. 47 Druhá varianta predného krídla pohľad spredu [42]

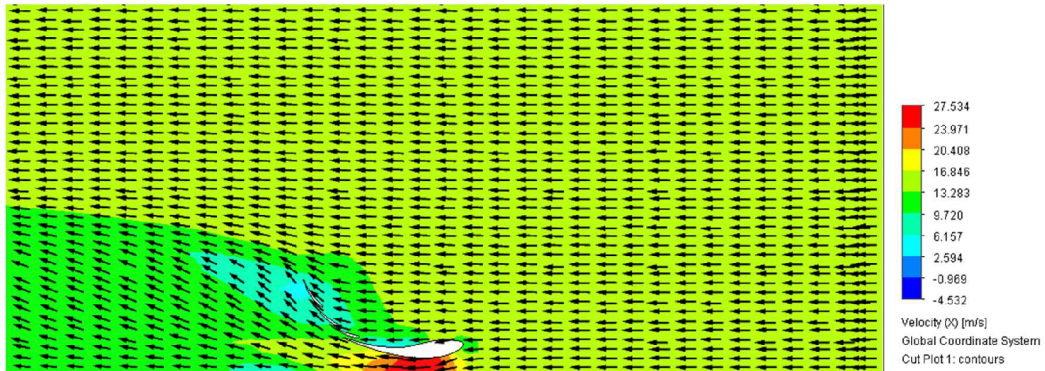


Obr. 48 Druhá varianta predného krídla pohľad z boku [42]



Obr. 49 Simulácia rýchlosti vzduchu v priereze s 2 lopatkami varianta 2 [42]

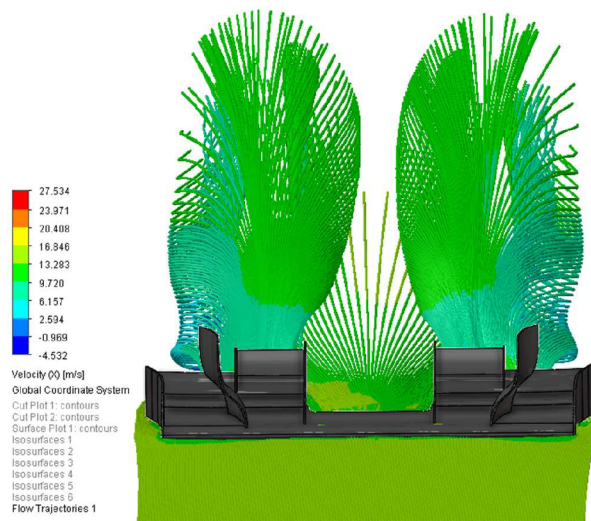
Na Obr. 49 je zobrazená simulácia so zadanou počiatočnou rýchlosťou 15 m/s, atmosférickým tlakom a teplotou 20 stupňov. Vpravo je znázornená legenda so stupnicou od 4,5 m/s až po 27,5 m/s. V tejto simulácii je možné opäť vidieť ako aj na simulácii z Obr. 43 zastavenie prúdu vzduchu a následné otočenie smerom späť ku krídlu. Tento efekt môže spôsobovať zvýšenie odporu predného krídla.



Obr. 50 Simulácia rýchlosti vzduchu v priereze s 3 lopatkami variantu 2 [42]

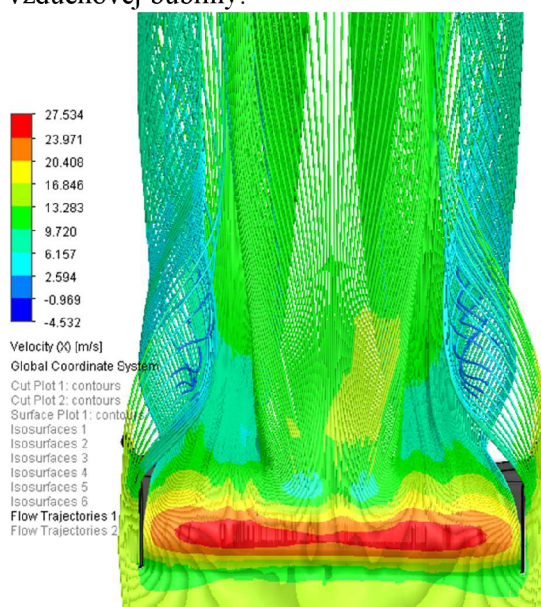
Na Obr. 50 je zobrazená simulácia, ktorej počiatkové podmienky sú rovnaké ako na simulácii z Obr. 49. V tejto simulácii je možné vidieť rýchlosť prúdenia vzduchu, kde nám nedochádza k zastaveniu a následnému otočeniu prúdenia vzduchu.

Pri návrhu druhej varianty krídla sa upravila geometria a poloha klapiek, kde sa využilo ponaučenie z návrhu predtým, kde na zadnej strane lopatiek dochádzalo k odtrhnutiu a následnému zastaveniu vzduchu. Podľa výsledkov simulácii druhej varianty krídla na simulácii z Obr. 49 a simulácii z Obr. 50, sa zistilo, že nastal presne opačný problém oproti variante 1. V priereze, kde sa nachádzajú 3 klapky, sa tento efekt podarilo eliminovať a následne, pri priereze s 2 klapkami, je vidieť, že sa tento efekt vytvoril a nastáva tam zastavenie prúdenia a následne otočenie, čo môže spôsobovať vyvýšenie odporu vzduchu. A celková efektívnosť krídla je znížená.



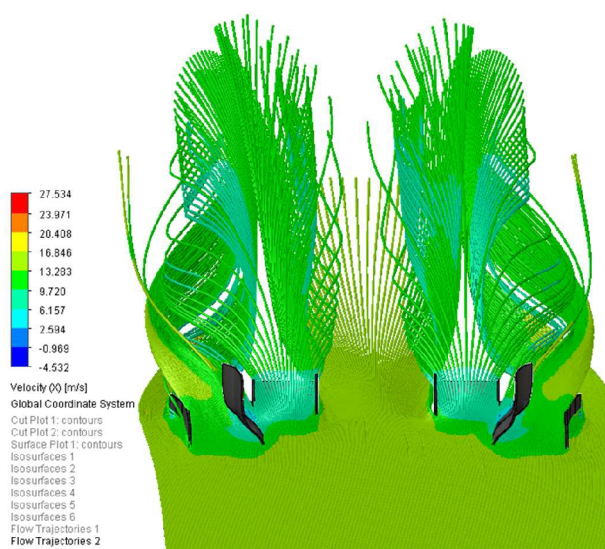
Obr. 51 3D vizualizácia prúdenia rýchlosti vzduchu variantu 2 [42]

V druhej variante sme použili profil hlavného profilu z prvej varianty, bol zjednodušený, čo by nám mohlo pomôcť pri výrobe, avšak následne sme si zamedzili vstup väčšieho objemu vzduchu do podlahy. A tým ovplyvňujeme následné fungovanie difúzora a podlahy. Na Obr. 51 je možné si všimnúť že po krajoch krídla dochádza k zastaveniu vzduchu a vytvoreniu vzduchovej bubliny.



Obr. 52 Vizualizácia prúdenia spodnej strany krídla variantu 2 pohľad zdola [42]

Na Obr. 52 je možné vidieť simuláciu rýchlosti prúdenia vzduchu na spodnej strane krídla, keďže geometria profilu ostala rovnaká, aj výsledky simulácie sú podobné ako na simulácii z Obr. 44. Menil sa len tvar celého profilu, ktorý sa spravil jednoduchší, tak že profil nie je zložito tvarovaný a vytvoril sa ako rovná plocha.



Obr. 53 Vizualizácia prúdenia cez vertikálne klapky variantu 2 pohľad zhora [42]

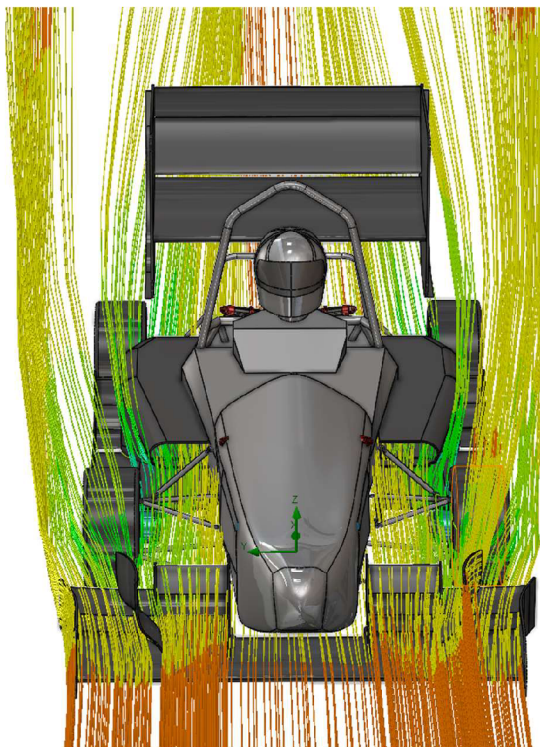
Pri tomto návrhu krídla sme upravili geometriu a polohu vertikálnych klapiek. Vo variante 1 krídla bola poloha vertikálnych klapiek bližšie k rámu, čím prúdenie, ktoré sme chceli odvieť od kolies nebolo dostatočné a nastával moment, kedy to prúdenie priamo smerovalo na kolesá. Bola nutná následná úprava polohy a geometrie. Na Obr. 53 môžeme vidieť radikálnu zmenu prúdenia oproti predchádzajúcemu modelu.

Výsledky simulácii hodnôt prítlaku a odporu a koeficienty C_l a C_d pre druhú variantu krídla, sú uvedené v tabuľke 2.

Tabuľka 2 Výsledné hodnoty simulácií druhej varianty krídla

	Jednotka	Hodnota	Priemerná Hodnota	Minimálna hodnota	Maximálna hodnota
Odpor	[N]	40,20	40,58	40,20	40,92
Vztlak	[N]	313,67	313,47	313,13	314,06
C_d	[-]	1,07	1,08	1,07	1,09
C_l	[-]	8,35	8,34	8,33	8,36

V tabuľke 2 sa nachádza priemerná hodnota výpočtu. Táto hodnota je priemerom z celkového počtu iterácií k danej vypočítanej zloke.



Obr. 54 Simulácia prúdenia vzduchu okolo vozu s použitím predného krídla variant 2 [42]

Na Obr. 54 je znázornenie prúdenia vzduchu s použitím predného krídla, variant 2. Na ľavej strane krídla je vyobrazené prúdenie vzduchu cez hlavný profil, prídavné lopatky a endplat. Toto prúdenie je vyobrazené z dôvodu zistenia, či prúd vzduchu, ktorý smeruje cez hlavný profil a prídavné lopatky, je vedený do bočníc, v ktorých sa nachádza chladiaci systém motora. Zároveň simulácia vyobrazuje prúdenie vzduchu cez endplat, ktorý odvádza vzduch od kolies von. Na pravej strane je vyobrazené prúdenie cez celé krídlo, kde sme doplnili aj časť vertikálnej klapky, ktorá napomáha odvádzaniu prúdu vzduchu von od kolies.

Výhody krídla:

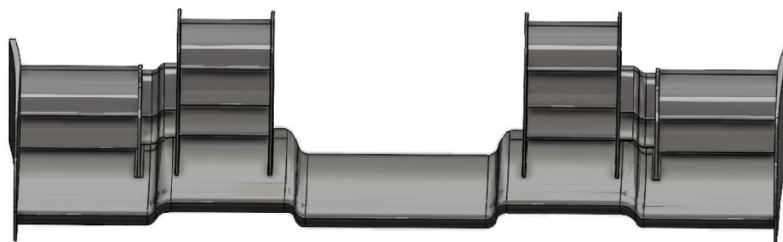
- + nízka hodnota prítlaku
- + lepšie odvádzanie vzduchu od kolies cez vertikálne klapky
- + lepšie prúdenie v okolí bočnice (možnosť lepšieho chladenia motora)
- + jednoduchý hlavný profil (lacnejšia výroba)

Nevýhody krídla:

- Zložité uchytanie vertikálnej klapky
- Šírka predného krídla je podobná šírka predošlého predného krídla

4.3.4 Tretia varianta predného krídla

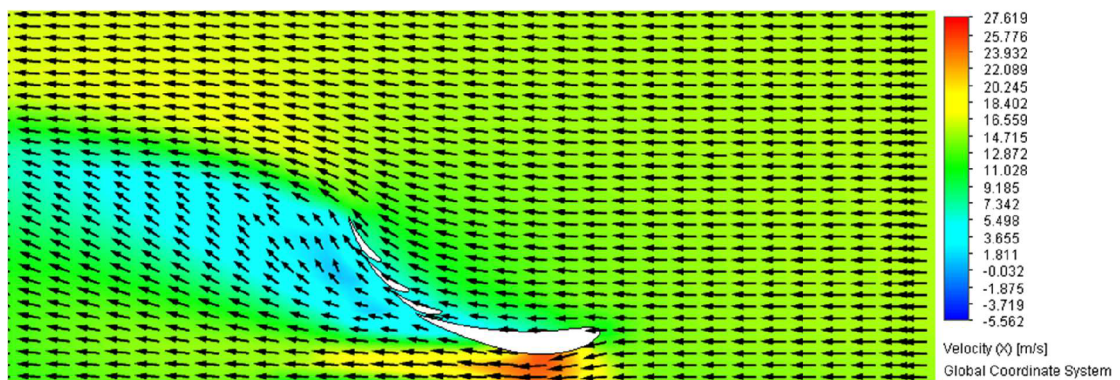
Pri tretej variante bola snaha o vytvorenie stupňovitého hlavného profilu, ktorý umožňuje smerovanie vzduchu do náfukov na podlahe. Malé lopatky krídla sa rozdelili do troch sekcií, kde bola snaha, aby stredová sekcia lopatiek krídla produkovala väčšiu prítlačnú silu, a aby stredná sekcia usmerňovala vzduch kvôli zaobleniu profilu a následnému vzniku turbulencií. Posledná vonkajšia sekcia zabezpečuje väčšiu plochu prítlaku, čím vynahrádza potrebu tretieho profilu, ktorý tam z dôvodu pravidiel o výške krídla nebolo možné umiestniť.



Obr. 55 Tretia varianta predného krídla pohľad spredu [42]

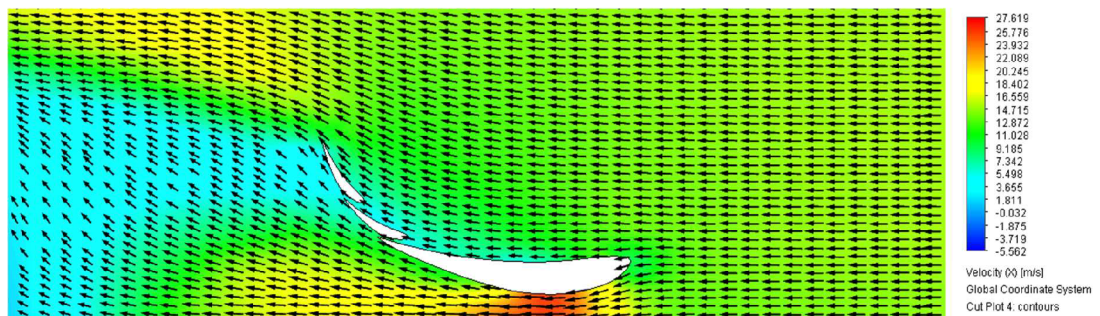


Obr. 56 Tretia varianta predného krídla pohľad z boku [42]



Obr. 57 Simulácia rýchlosti vzduchu v priereze s 3 lopatkami varianta 3 [42]

Na Obr. 57 je zobrazená simulácia so zadanou počiatočnou rýchlosťou 15 m/s, atmosférickým tlakom a teplotou 20 stupňov. Vpravo je znázornená legenda so stupnicou od 5,5 m/s až po 27,6 m/s. V tejto simulácii je možné vidieť, že síce dochádza k spomaleniu prúdu vzduchu, ale nedochádza k úplnému zastaveniu a následnému otočeniu prúdu vzduchu smerom späť ku krídlu, čo by bolo znázornené tmavomodrou farbou. Následne si môžeme všimnúť na vektoroch rýchlosti smer prúdenia, ktorý indikuje, že všetky prídavné klapky fungujú, lebo prúd vzduchu na zadnej strane lopatiek smeruje pozdĺž nich.

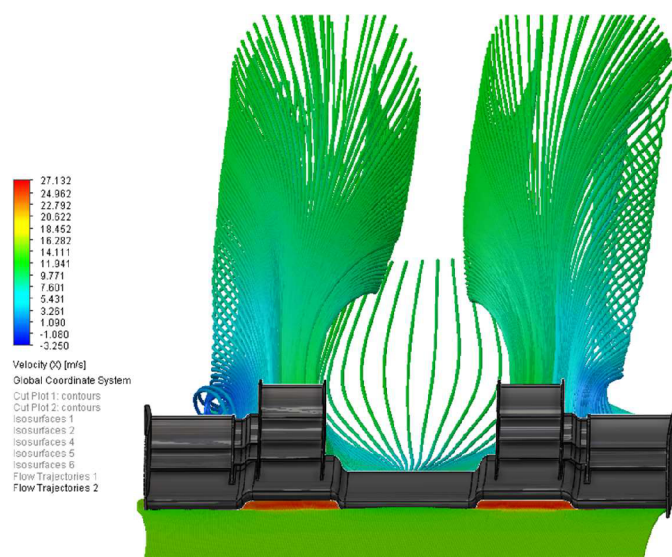


Obr. 58 Simulácia rýchlosti vzduchu v priereze s 2 lopatkami varianta 3 [42]

Na Obr. 58 je zobrazená simulácia, ktorej počiatkové podmienky sú rovnaké ako na simulácii z Obr. 57. V tejto simulácii je možné vidieť rýchlosť prúdenia vzduchu, kde nám nedochádza k zastaveniu prúdu vzduchu, ale je možné si všimnúť odtrhnutie vzduchu od druhej prídavnej klapky. Vektory rýchlosti ukazujú, že prúd vzduchu sa nedrží popri zadnej strane lopatky, ale odtrháva sa skôr, čo môže znižovať efektivitu krídla.

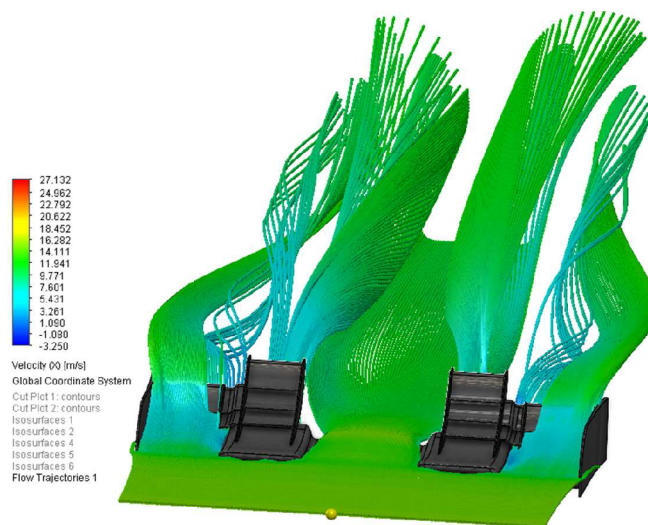
V tretej variante sa urobil najväčší posun v tom, že sa podarilo umiestniť lopatky tak, aby nedochádzalo k zastaveniu prúdu vzduchu na spodnej strane lopatiek. Taktiež sa použil agresívnejší profil, ktorý je viac zakrivený.

Jednou z ďalších vecí, ktorá bola navrhnutá, na prednom krídle, bolo úplne odstránenie vertikálnych lopatiek. Tým sa musel zmeniť náklon vonkajších lopatiek, čo umožňuje odvádzať prúd vzduchu ponad kolesá. Ďalšou inováciou ktorá bola použitá, bolo vytvorenie kaskádového profilu, ktorý má za účel vytvorenie turbulentného prúdu vzduchu.

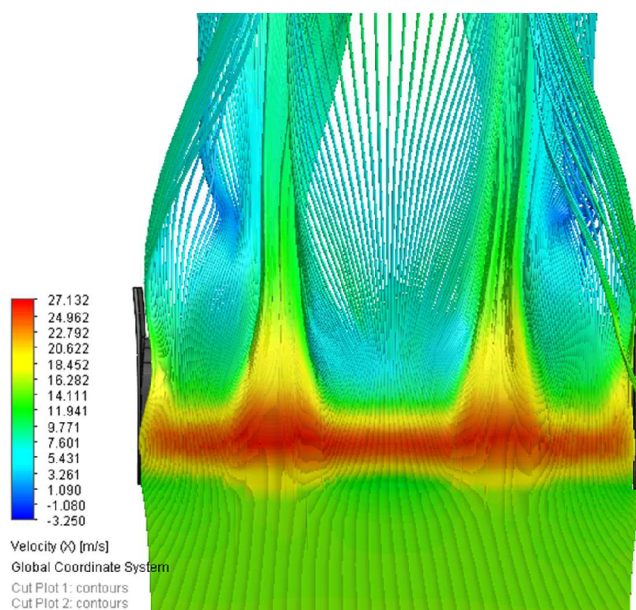


Obr. 59 3D vizualizácia prúdenia rýchlosti vzduchu varianta 3 [42]

Tvar hlavného profilu prešiel výraznou zmenou, kde bol pokus o vytvorenie väčšieho priestoru, ktorý by mal smerovať do bočníc a tým dostať väčší objem vzduchu do chladiaceho systému motora. Zároveň použitie kaskádového profilu, ktorý má za úlohu vytvárať turbulentný vír, a tým uzavrieť prúd vzduchu smerujúci od hlavného profilu k nafúkam podlahy, čo pomáha maximalizovať efektivitu podlahy. Tvar a profil hlavného krídla je totožný ako tvar profilu z predchádzajúcich verzií, a ktorý sa osvedčil vo všetkých 3 simuláciách.



Obr. 60 Vizualizácia rýchlosti prúdenia [42]



Obr. 61 Vizualizácia prúdenia spodnej strany krídla variantu 3 pohľad zdola [42]

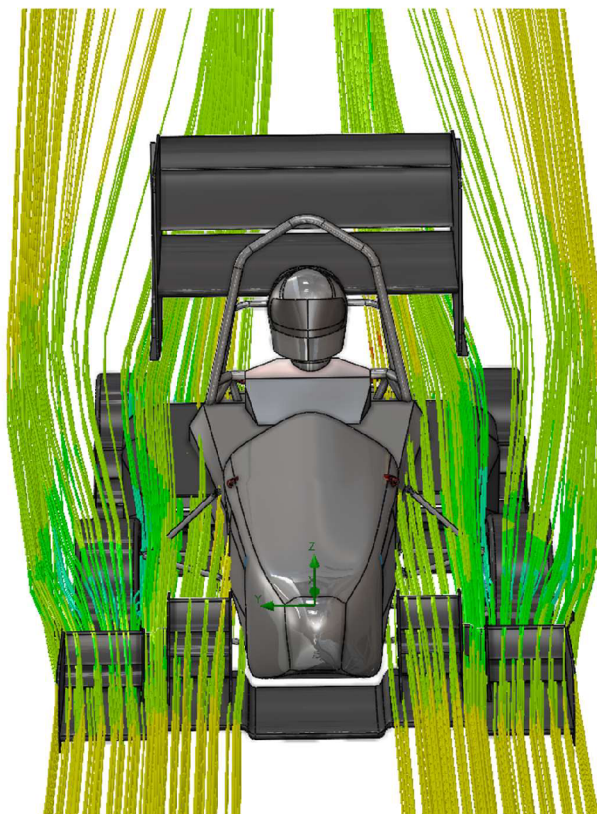
Na Obr. 61 je možné vidieť simuláciu rýchlosti prúdenia vzduchu na spodnej strane krídla. Keďže geometria profilu ostala rovnaká, aj výsledky simulácie sú podobné ako na simulácii z Obr. 44. Menil sa len celkový tvar profilu, ktorý má špecifický tvar, tým že sú na ňom vytvorené vyvýšené plochy, ktoré majú za úlohu smerovať viac vzduchu do bočníc. Na simulácii z Obr. 61 je možné si všimnúť, že v miestach kde je profil vyvýšený je väčšia plocha červenej farby, ktorá indikuje väčší podiel stlačenia vzduchu a nárastu rýchlosti prúdenia vzduchu.

Výsledky simulácií hodnôt prítlaku a odporu a koeficienty C_l a C_d pre tretiu variantu predného krídla, ktoré sú uvedené v tabuľke 3.

Tabuľka 3 Vybrané hodnoty simulácií tretej varianty krídla

	Jednotka	Posledná vypočítaná hodnota	Priemerná hodnota	Minimálna hodnota	Maximálna hodnota
Odpor	[N]	40,10	40,19	39,77	40,38
Vztlak	[N]	339,90	340,16	339,77	340,70
C_d	[-]	1,11	1,12	1,10	1,12
C_l	[-]	9,47	9,48	9,47	9,50

V tabuľke 3 sa nachádza priemerná hodnota výpočtu. Táto hodnota je priemerom z celkového počtu iterácii k danej vypočítanej zložke.



Obr. 62 Simulácia prúdenia vzduchu okolo vozu s použitím predného krídla varianta 3 [42]

Na Obr. 62 je znázornenie prúdenia vzduchu s použitím predného krídla, varianta 3. Tu je možné vidieť prúdenie vzduchu po celej časti krídla, ktoré sa nerozdeľovalo na sekcie kvôli absencii vertikálnych klapiek. Geometria vonkajších dvoch klapiek ukazuje, že dochádza k odkláňaniu prúdu vzduchu od kolies von, ale nie je to dostatočné oproti variante 2. Zároveň ale dochádza k lepšiemu prúdeniu vzduchu do bočníc.

Výhody krídla:

- + vyšší prítlak
- + nižší odpor
- + lepšie prúdenie v okolí bočnice (možnosť lepšieho chladenia)

Nevýhody krídla:

- zložitejší hlavný profil (drahšia výroba)
- väčší objem krídla (vyššia hmotnosť)
- nedostatočné odvádza vanie prúdu vzduchu od kolies

4.4 Vyhodnotenie simulácií a parametrov krídel

Po dokončení simulácií všetkých 3 variant krídel sa výsledne hodnoty zapísali do tabuľky, kde sa budú následne krídla porovnávať, a vyberie sa finálna varianta, ktorej sa následne bude venovať podrobnejšie. Tabuľka bude zložená z dvoch kategórií - jednou sú konštrukčné rozmery a objem a druhou sú následné výsledky simulácií. Ďalšou časťou hodnotenia bude následne zhodnotenie výhod a nevýhod daných konceptov.

Tabuľka 4 Tabuľka výsledných hodnôt jednotlivých krídel

	Varianta 1	Varianta 2	Varianta 3
Šírka [m]	1.563	1.577	1.514
Výška [m]	0.447	0.378	0.295
Dĺžka [m]	0.494	0.515	0.587
Objem [m ³]	0.016	0.016	0.019
Odpor [N]	57,601	40,587	40,198
Prítlak [N]	378,568	313,472	340,163
C _d	1,132	1,080	1,120
C _l	7,442	8,348	9,486

Prvá varianta krídla generuje najvyšší prítlak ale zároveň aj odpor. Ale konštrukcia by bola z hľadiska financovania náročná. Preto sa táto varianta zavrholá z dôvodu financovania.

Druhá varianta je na tom zo všetkých 3 variant najhoršie čo sa týka hodnôt zo simulácií a aj z hľadiska konštrukčných rozmerov. Táto varianta krídla je najdlhšia, čo bol jeden z najväčších problémov minuloročného návrhu.

Po zhodnotení výsledkov v tabuľke a následne hodnotenie každého krídla, s ohľadom na výrobu a financovanie, sa vybrala tretia varianta krídla. Vybrala sa z dôvodu menších rozmerov čo bol aj jeden z prvotných cieľov. Ďalším dôvodom bolo, že zo všetkých troch variant krídlo generuje najmenší odpor a zároveň druhý najväčší prítlak. Jednou z nevýhod tejto varianty je komplikovanejší hlavný profil, ktorý bude náročnejší na výrobu. Tá bude popísaná v samostatnej kapitole.

5 Výroba

Výroba aerodynamických prvkov je dôležitá z toho dôvodu, že každý aerodynamický prvok musí splniť určité záťažové testy. Pri veľkosti dielu nad 225 cm^2 musí mať daný aerodynamický prvok zaťaženie 200 N na rozloženej ploche. A daná súčiastka sa nesmie prehnúť o viac ako 10 mm.

Každý aerodynamický prvok, ktorý je menší ako 225 cm^2 , musí tiež splniť určité pravidlá. Je zaťažovaný 50 N a nesmie sa vychýliť o viac ako 25 mm. Preto samotná výroba a voľba tkanín je pri výrobe dôležitá.

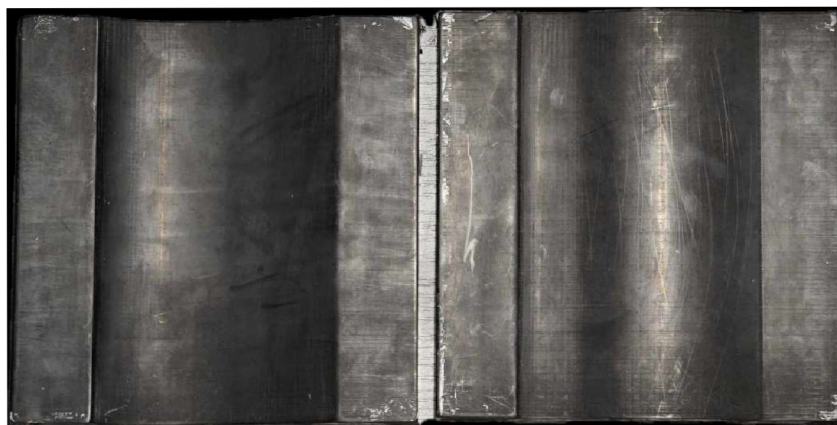
5.1 Výroba a príprava foriem

Pri výrobe predného krídla bolo nutné vytvoriť formy na hlavný profil a na prídavne lopatky. Formy na hlavný profil boli vytvorené z MDF formy, ktorá nám prišla vybrúsená a nastriekaná plniacim tmelom. Pre ďalší postup bolo potrebné formu pred samotnou lamináciou ešte separovať. Samotná separácia prebieha nanášaním separačného vosku. Každá vrstva sa necháva pôsobiť aspoň hodinu a následne rozpletiť. Na jednu formu sa nanáša 4–6 vrstiev separačného vosku.



Obr. 63 Forma na hlavný profil [42]

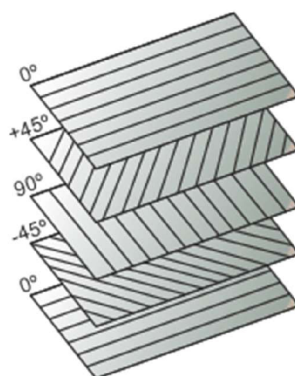
Formy na malé lopatky boli tlačené na 3D tlačiarňami z materiálu PLA, ktorý je na výrobu foriem ideálny svojou tvrdosťou a povrchovou kvalitou tlače. Formy pred lamináciou je potrebné vybrúsiť, aby sa docielil hladký povrch pre lepšiu pohľadovú plochu a pre lepšie oddelenie formy od vylaminovanej lopatky.



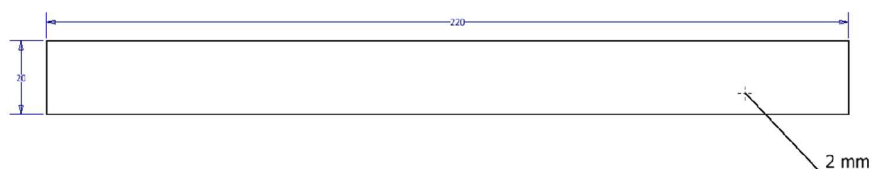
Obr. 64 3D tlačené formy z materiálu PLA [42]

5.2 Tkaniny a vlastnosti tkanín

Po dokončení príprav foriem nastáva voľba materiálov, ktoré budeme používať na jednotlivé diely predného krídla. Pre tieto zistenia sa za pomoci a podpory katedry strojárnských technológií urobili skúšobne tyče podľa normy ASTM D3039, ktoré sa následne podrobili ťahovej a ohybovej skúške a podľa výsledkov sa vybrali najvhodnejšie skladby materiálov. Vlákna sa na seba ukladali pod 45°.



Obr. 65 schéma ukladania tkaniny [47]



Obr. 66 Skúšobná vzorka pre skúšku ťahom [42]

Vysvetlené značky pre zadané parametre v ťahovej skúške:

a - hrúbka vzorky

b - šírka vzorky

σ_m - medza pevnosti

ϵ_m - predĺženie v oblasti medze pevnosti

l - dĺžka skúšobnej vzorky

Tabuľka 4 Výsledky ťahovej skúšky pre karbónové vlakom 600 g a 600 g uložené pod 45°

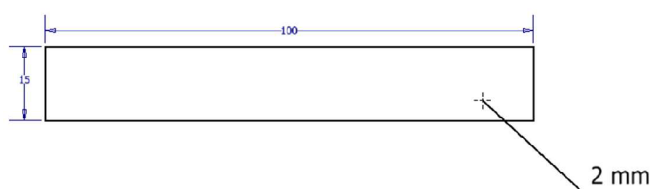
600 g x 600 g Pod 45°	a [mm]	b [mm]	σ_m [MPa]	ϵ_m [%]	l [mm]
1	1.75	20.00	363.2	2.51	220.00
2	1.94	20.00	267.5	2.27	220.00
3	1.80	20.00	272.1	2.29	220.00
4	1.76	20.00	359.7	2.69	220.00
5	1.80	20.00	282.0	2.72	220.00

Tabuľka 5: Výsledky ťahovej skúšky tkanina z karbónových vlákien 600 g a 200 g uložené pod 45°

600 g x 200 g Pod 45°	a [mm]	b [mm]	σ_m [MPa]	ε_m [%]	l [mm]
1	1.20	20.00	486.7	2.19	220.00
2	1.25	20.00	486.4	2.45	220.00
3	1.25	20.00	461.9	2.23	220.00
4	1.35	20.00	453.3	2.31	220.00
5	1.40	20.00	395.3	2.32	220.00

Tabuľka 6: Výsledky ťahovej skúšky tkanina z karbónových vlákien 200 g a 200 g uložené pod 45°

200 g x 200 g Pod 45°	a [mm]	b [mm]	σ_m [MPa]	ε_m [%]	l [mm]
1	0.82	20.00	143.1	0.81	220.00
2	0.90	20.00	166.4	1.06	220.00
3	0.90	20.00	222.1	1.50	220.00
4	1.02	20.00	157.4	1.12	220.00
5	0.92	20.00	149.5	1.21	220.00



Obr. 67 rozmery skúšobného vzorku pre ohybovú skúšku [42]

Vysvetlené značky pre zadané parametre v ohybovej skúške:

a – hrúbka materiálu

b – šírka materiálu

E_f – modul pružnosti

σ_{fM} – pevnosť v ohybe

l – dĺžka skúšobnej vzorky

Tabuľka 7: Výsledky ohybovej skúšky tkanina z karbónových vlákien 600g a 200g uložené pod 45°

600 g x 200 g Pod 45°	h [mm]	b [mm]	σ_{fm} [MPa]	E_f [MPa]	l [mm]
1	1.00	15.00	277.2	23472	100.00
2	1.00	15.00	296.6	23760	100.00
3	1.00	15.00	290.9	24768	100.00
4	1.00	15.00	284.0	24523	100.00
5	1.00	15.00	277.2	23472	100.00

Tabuľka 8: Výsledky ohybovej skúšky tkanina z karbónových vlákien 600g a 600g uložené pod 45°

600 g x 600 g Pod 45°	h [mm]	b [mm]	σ_{fm} [MPa]	E_f [MPa]	l [mm]
1	2.00	15.00	170.0	9744	100.00
2	2.00	15.00	137.2	8700	100.00
3	2.00	15.00	118.2	8184	100.00
4	2.00	15.00	122.8	7848	100.00
5	2.00	15.00	170.0	9744	100.00

Ťahové a ohybové skúšky nám ukázali, že najlepšie vlastnosti na ťah má uhlíková tkanina 600 g x 200 g pod uhlom 45 stupňov, a preto ju budeme používať na nosné časti predného krídla, takže hlavný profil, kde jeho spodná časť bude tvorená z týchto tkanín. Vrchná časť krídla bude tvorená 600 g a takzvaným uhlíkovým vláknom Textreme, ktorý má obdobné vlastnosti ako 200 g uhlíková tkanina.

Klapky na prednom krídle budú tvorené z 200 g x 200 g tkanín, ktoré sú uložené pod uhlom 45 stupňov. Túto voľbu z dôvodu zníženia hmotnosti, a aj preto, lebo tieto klapky nie sú nosnou časťou krídla. A majú rozmery pod 16 cm², čo znamená, že tieto lopatky budú zaťažované na závodoch maximálnou silou 50 N.

5.3 Laminácia

Pri výrobe predného krídla sa používali dva rôzne prístupy k vytváraniu samotných dielov. Hlavný profil sa vyrábala pomocou infúznej laminácie. A klapky sa vyrábali pomocou ručnej laminácie.

Proces infúznej laminácie spočíva v tom, že na formu sú umiestnené prv vrstvy tkaniny, ktoré sú zafixované lepidlom na tkaniny. Následne sa ukladá druhá vrstva pod uhlom 45 stupňov. Následne sa pridáva strhávacia tkanina, rozvodná sieť a dve rozvodky. Jednu na výstup do vývevy a druhá na vstup pre epoxid. Potom sa celá forma zabalí a pod vákuom sa tam privádza epoxid.



Obr. 68 Pohľad na prípravu pred lamináciou[42]

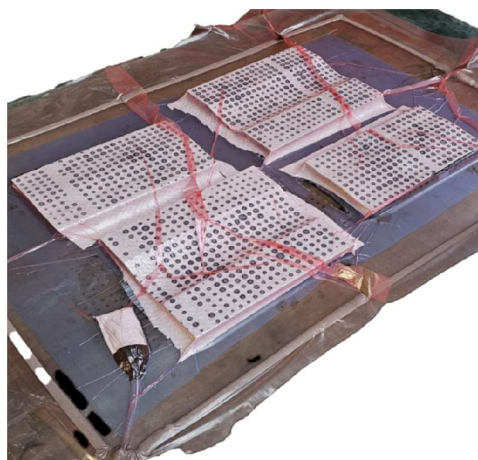


Obr. 69 Infúzna laminácia [42]

Ručná laminácia sa na rozdiel od infúznej laminácie líši v tom, že pri ručnej sa už od začiatku nanáša epoxid na formu a medzi každú vrstvu tkaniny. Následne sa tam dáva strhávacia tkanina a perforovaná fólia, ktorá umožňuje prebytočnému epoxidu sa nasiať do odsávacej tkaniny, ktorá je umiestená na perforovanej fólii. Následne sa celá forma zabalí a vákuuje pre lepšie previazanie tkanín.



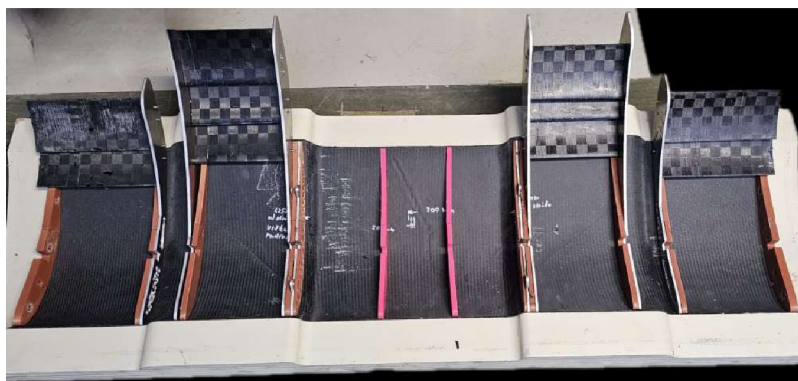
Obr. 71 Príprava ručnej laminácie [42]



Obr. 70 Ručná laminácia [42]

5.4 Skladanie predného krídla

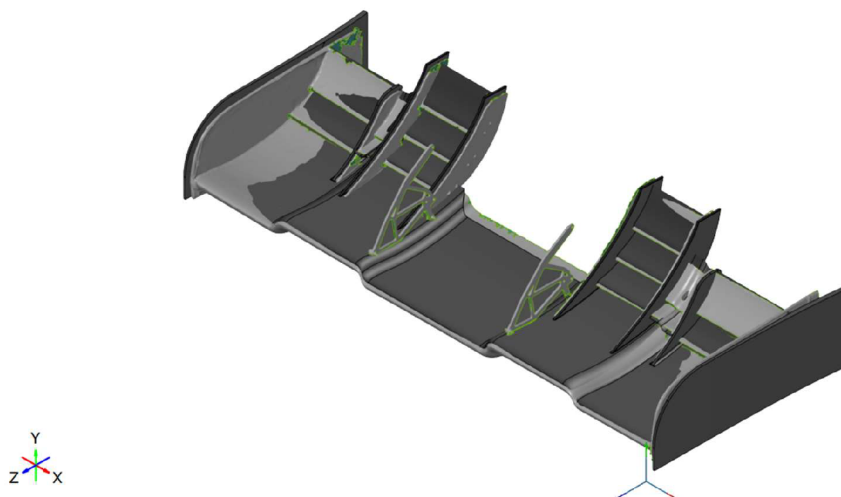
Kompletizácia predného krídla sa robila pomocou 3D tlačených insertov, ktoré sa následne lepili na spodný profil hlavného profilu. Inserty sa lepili na kritické miesta na profile, kde dochádzalo k ohybu. Aby sa minimalizovali ohyby profilu, následne sa pridávali hliníkové držiaky klapiek, ktoré sa lepili ako už na hlavný profil, tak aj na boky insertov, aby sa zabezpečila najväčšiu pevnosť. V hliníkových držiakoch boli optimalizáciou urobené výrezy na odľahčenie kvôli redukcii hmotnosti. Po úplnom zatvrdnutí insertov a hliníkových držiakov sa lepil vrchný profil hlavného profilu. Týmto postupom sa zlepili aj malé klapky. A však inserty do malých klapiek mali po stranách vytvorené otvory pre matice, ktoré sa tam zatačili, aby bolo možné klapky spojiť s držiakmi na hlavnom profile.



Obr. 72 Konštrukcia predného krídla [42]

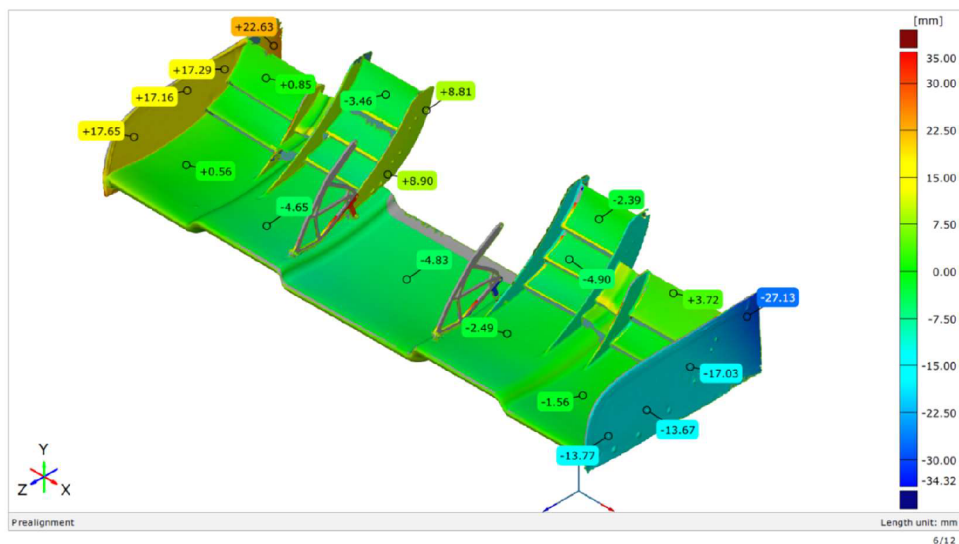
5.5 3D sken predného krídla

Na zistenie chýb vzniknutých pri výrobe a zostavením, sa využila technológia 3D-skenovania, ktorá dokáže porovnať reálny model od 3D modelu a teda zistiť vzniknuté odchýlky. Proces prípravy daného dielu pre skenovanie je nasledovný: v prvom rade nastane povrchová úprava dielu, pre správny priebeh skenovania musí byť povrch matný, ten získame pomocou kriedy. Druhým krokom je nalepenie záchytných bodov pre 3D sken.



Obr. 73 Zarovnaný 3D model znázornený čierno s 3D skenom, ktorý je šedej farby [48]

Pevnou plochou, tzv. referenčnou plochou, krídla je 3D model, cez ktorý bol zarovnaný 3D sken. Všetky odchýlky ktoré sa na krídle nachádzajú sú odchýlky od 3D modelu. Legenda, ktorá sa nachádza na pravej strane na obr. 74, značí rozsah veľkosti odchýlky od 34,32 mm, ktoré sú vyznačené tmavomodrou farbou až po hodnotu 35,00 mm, čo je vyznačené červenou farbou.



Obr. 74 3D sken s odchýlkami pohľad zhora [49]

6 Veterný tunel

Na meranie sa za pomoci a podpory katedry energetických zariadení (KEZ) využíval veterný s uzatvoreným okruhom. Tento veterný tunel mal meraciu plochu 500 x 500 mm. Preto sa pristúpilo k tomu, že sa nebude merať cele krídlo, ale len polovica krídla čo umožňovalo to, že krídlo je symetrické, a môže sa uvažovať o rovnakom zaťažení na oboch stranách. Následné sa musel model zmenšiť na požadované rozmery. Vytvoril sa model polovice krídla, ktorý sa následne ešte zmenšil. Polovica krídla sa následne zmenšila ku pomeru 1:2,7. Tento model má následne rozmery 300 x 250 x 17 mm, čo je pre umiestnia do veterného tunela ideálne. Z dôvodu veľkosti meracej plochy tunela ktorá je 500 x 500 mm. Pre meranie sme používali záznam PIV laserom. Následné vyhodnocovanie výsledkov bude prebiehať pomocou podobnostnej teórie na princípe zachovania Reynoldsoveho čísla. Kde pre zachovanie Reynoldsoveho čísla sa bude zvyšovať rýchlosť. Táto výsledná rýchlosť v tuneli pre zmenšený model ku pomeru 1:2,7 bude 40 m/s. Dôvod prečo sa model ešte viac nemohol zmenšiť bol ten, že pri väčšom zmenšení dochádzalo k vzniku malej medzere medzi lopatkami, alebo k úplnému spojeniu lopatiek. Toto zmenšenie by obmedzovalo prúdenie vzduchu a následne výsledky merania.

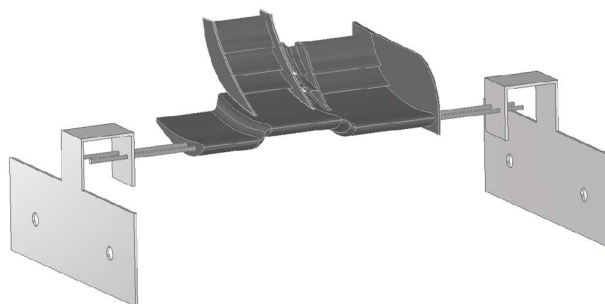
6.1 Príprava modelu pre experiment a vizualizáciu

Pre výrobu sa z finančného hľadiska zvolili variantu 3D tlače, kde sa polovica krídla zmenšila a následne vytlačila. Model, ktorý vyšiel z 3D tlačiarne nemal ešte dokonalý povrch, tak sa muselo celé krídlo prebrúsiť a odstrániť nedokonalosti, ktoré by mohli ovplyvňovať výsledky merania. A následné sme celý model nastriekali čiernou matnou farbou kvôli zmenšeniu odrazu častíc od lesklého povrchu. Po prvých pokusoch sa zistilo že sa ne zvolila správna farba lebo laser ktorý nám model meral mal veľké odlesky. Tak sa zvolila iná varianta a krídlo sa nastriekalo fluorescenčnou farbou, ktorá by mohla pomôcť pri zmenšení odleskov a následné kvalitnejším výsledkom.



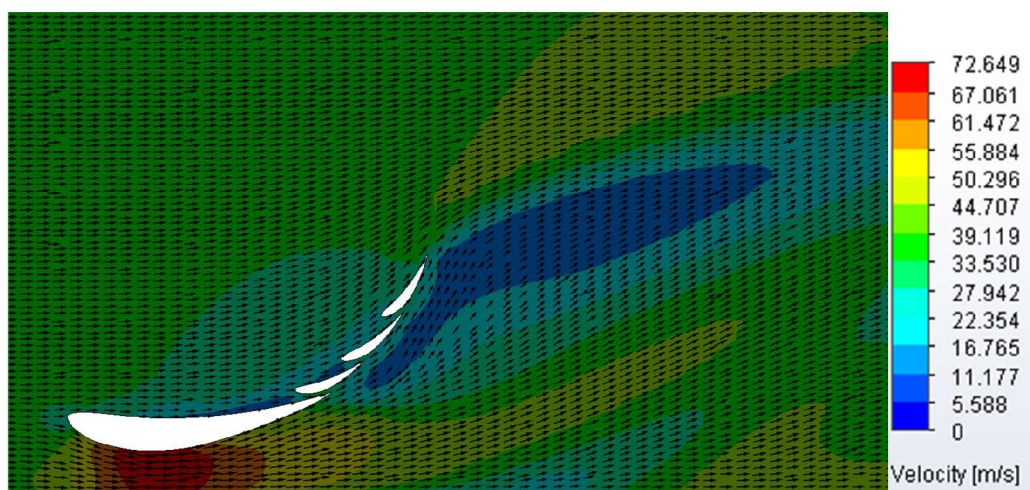
Obr. 75 Model zmenšenej polovice predného krídla vo veternom tunely [50]

Pri meraní sa bralo do úvahy aj ovplyvnenie výsledkov kvôli medznej vrstve, ktorá sa vytvára na stenách tunela, preto aj model predného krídla ma maximálnu šírku 300 mm. Počiatočné podmienky tunela sme stanovili rýchlosť neovplyvneného prúdenia bola 40 m/s, teplota vzduchu v aerodynamickom tuneli bola 20 stupňov. Kvôli meraniu pomoc PIV laseru sa nemeral tlak, merala sa len rýchlosť prúdenia vzduchu.



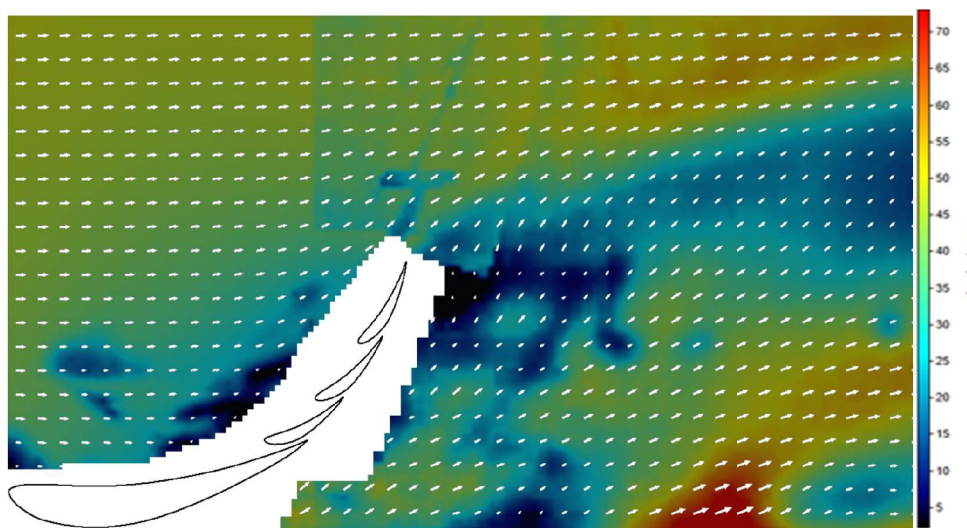
Obr. 76 Uchytenie modelu do veterného tunela [42]

Na Obr. 76 je znázornené uchytenie držiakov pomocou závitových tyčí k modelu. Následne je model centrován pomocou excentrických matic. Držiaky s modelom sú prichytené k vonkajšej strane tunela pomocou skrutiek, ktoré prichytávajú vonkajšiu stenu tunela.

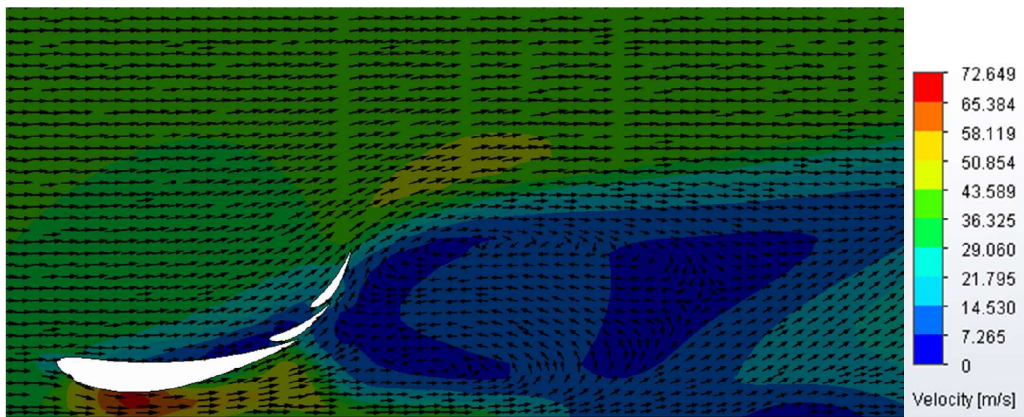


Obr. 77 Simulácia prúdenia vzduchu v reze s 3 lopatkami - zmenšený model ku pomeru 1:2,7 [42]

Na Obr. 77 je zobrazená počítačová simulácia prúdenia vzduchu. Kvôli veľkým rozdielom v simulácii pri rýchlosti 15 m/s bolo nutné zmenšiť simulačný model na pomer 1:2,7, ktorý bol zvolený pre model do veterného tunela. Následne sa upravila aj počiatočná rýchlosť, ktorá bola 40 m/s. Na Obr. 78 je znázornené prúdenie vzduchu na modeli vo veternom tuneli pre porovnanie výsledkov v reze s 3 lopatkami predného krídla.

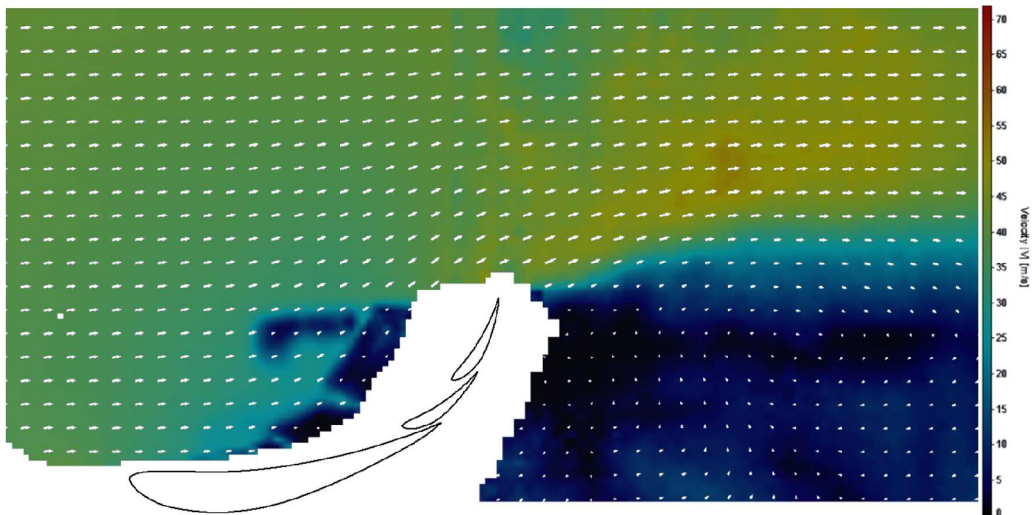


Obr. 78 Záznam z merania z aerodynamického tunela v reze s 3 lopatkami [51]



Obr. 79 Simulácia prúdenia vzduchu v reze s 2 lopatkami- zmenšený model ku pomeru 1:2,7 [42]

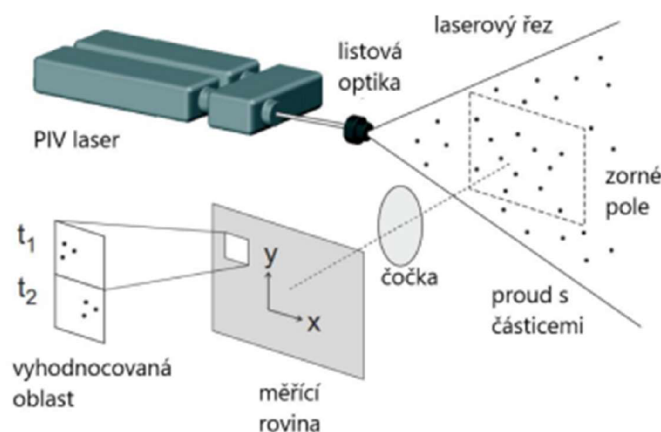
Na Obr. 79 je počítačová simulácia prúdenia vzduchu v reze s 2 lopatkami. Taktiež ako na Obr. 77 je model zmenšený v pomere 1:2,7 s počiatočnou rýchlosťou 40 m/s. Tieto simulácie boli vykonané kvôli veľkým rozdielom v simulačných modeloch. Pri simulácii pri 15 m/s sa model choval priaznivejšie. Rozdiely oproti meraniam vo veternom tuneli boli veľké. V simulačnom modeli a v modeli vo veternom tuneli je možné si všimnúť veľké zastavenie a následné otočenie prúdu vzduchu smerom späť ku krídlu. Toto zastavenie mohli spôsobiť malé medzery medzi lopatkami, ktoré nedokázali dostatočne odvádzať prúd vzduchu. Toto mohlo spôsobiť masívne zastavenie vzduchu za lopatkami.



Obr. 80 Záznam z merania z aerodynamického tunela v reze s 2 lopatkami [52]

6.2 Záznam PIV obrazom

Laserový rez vytvára osvetlenú rovinu pre meranie v prúde častíc. Tieto častice, ktoré sú unášané prúdom, v tejto rovine rozptyľujú svetlo do objektívu kamery alebo fotoaparátu. Optická osa objektívu je postavená kolmo na laserový rez a rovina objektu je s ním zhodná. Častice, ktoré sa nachádzajú v rovine objektu, sú premietnuté do obrazovej roviny digitálneho snímača a zaznamenané CCD/CMOS maticovým detektorom kamery alebo na film fotoaparátu. Na zázname kamery sa častice javia ako svetlé škvrny na tmavom pozadí. [54]



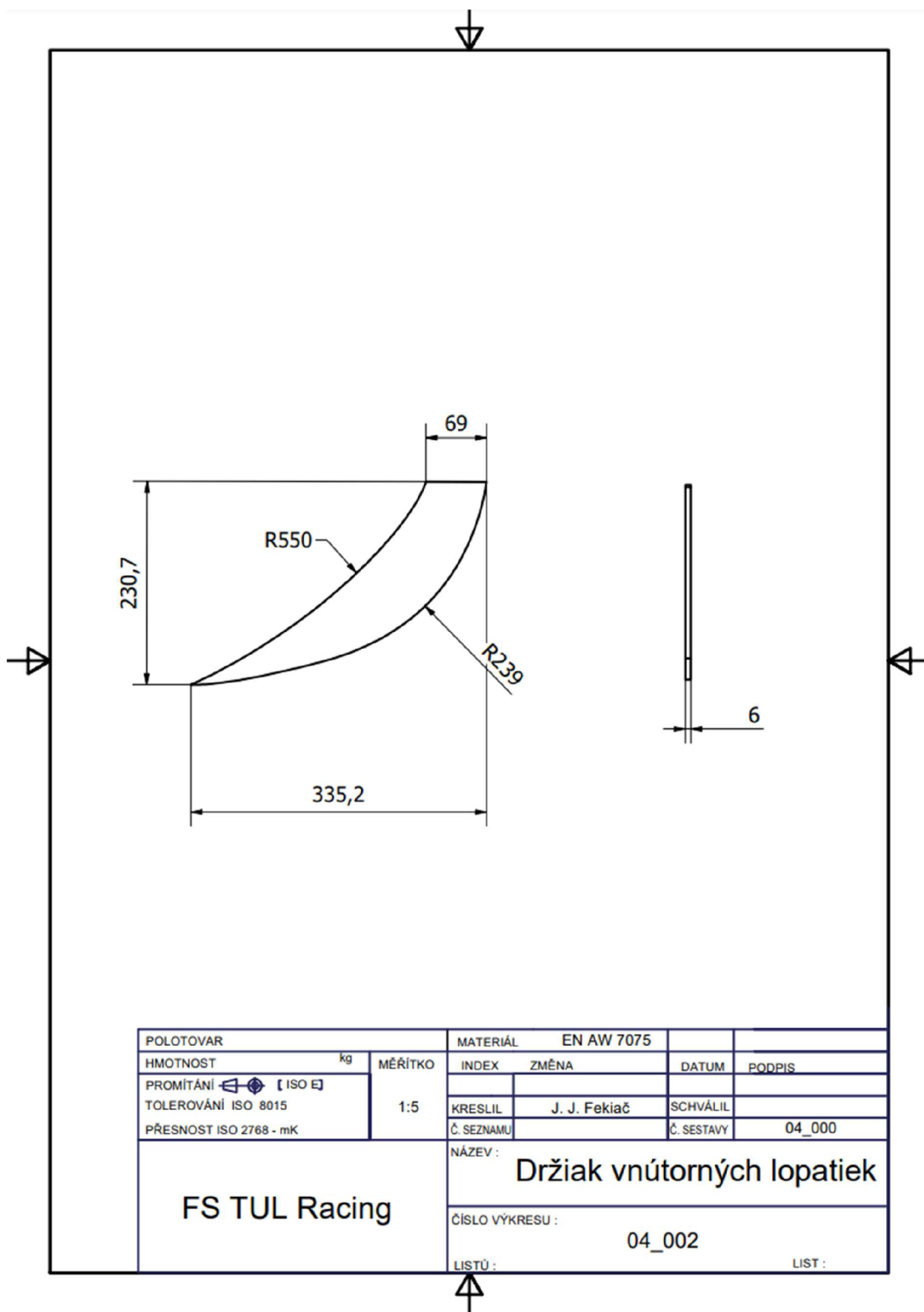
Obr. 81 Schéma a popis zaznamenávania obrazu pomoc PIV [53]

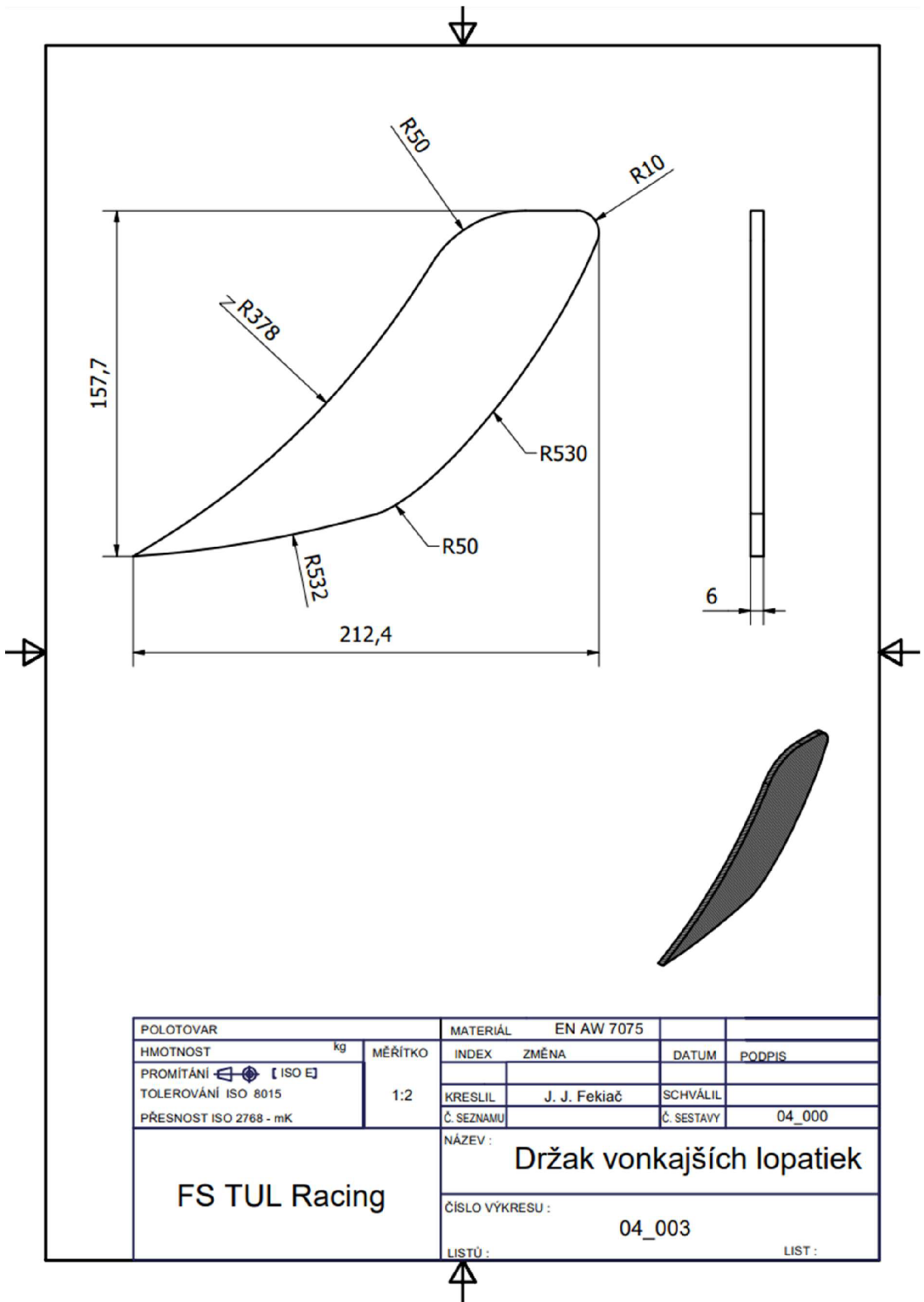
Meracia rovina nie je obvykle osvetlená nepretržite, ale len na krátky moment. Preto sa používajú pulzné lasery, ktoré osvetľujú meraciu rovinu, len po dostatočne krátku dobu, aby sa ostro zaznamenali okamžité polohy častíc, a súčasne poskytujú dostatočný svetelný výkon pre expozíciu obrazu. [54]

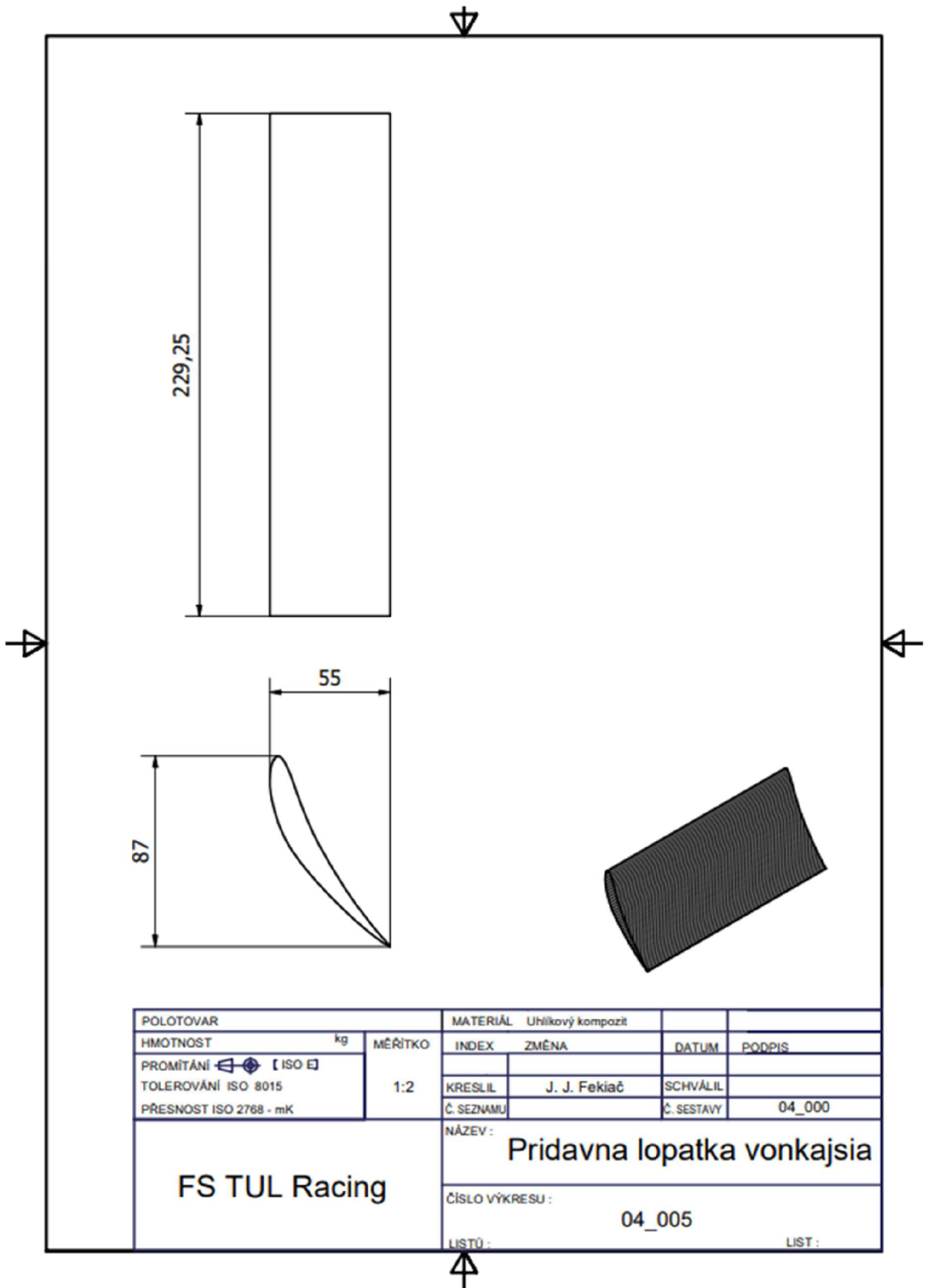
6.3 Vyhodnotenie

Pre dokonalejšie porovnanie simulačných modelov a modelov vo veternom tuneli bolo potrebné zmenšiť predné krídlo ku pomeru 1:2,7, čo viedlo aj ku zmene počiatkovej rýchlosti z 15 m/s na 40 m/s. Výsledky simulácií sú podobné výsledkom simulácii z veterného tunela. Odchýlky ktoré vznikajú na modeli s veterného tunela môžu byť spôsobené chybou merania alebo nedokonalým povrchom meraného modelu. Alebo chybou CFD výpočtu a nedostačením sieťovaným modelom.

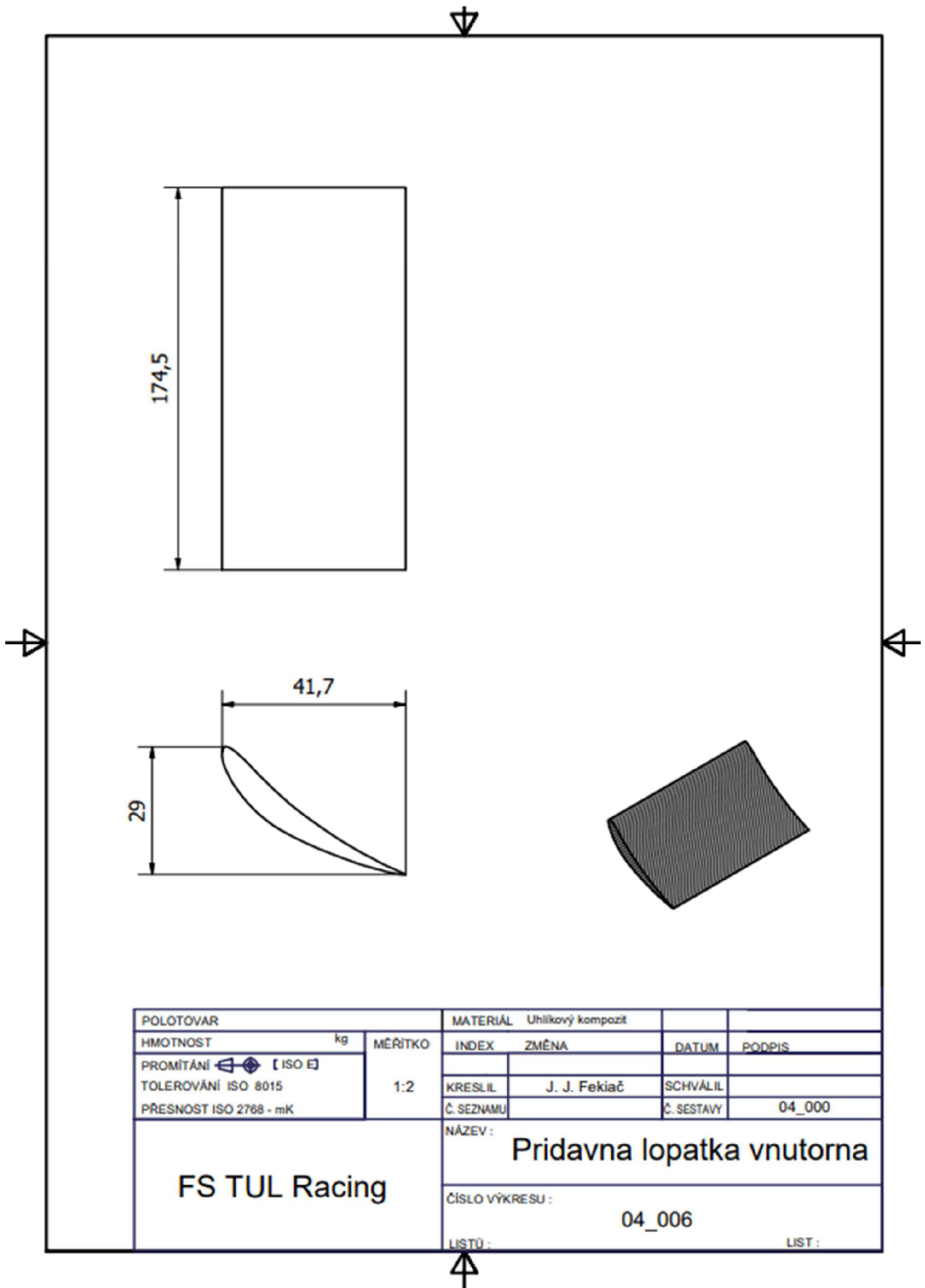
7 Technická dokumentácia







POLOTOVAR		MATERIÁL. Uhlíkový kompozit			
HMOTNOST	kg	MĚŘÍTKO	INDEX	ZMĚNA	DATUM
PROMĚTÁNÍ	ISO E1	1:2			PODPIS
TOLEROVÁNÍ	ISO 8015		KRESLIL	J. J. Fekiač	SCHVÁLIL
PŘESNOST	ISO 2768 - mK		Č. SEZNAMU		Č. SESTAVY 04_000
FS TUL Racing			NÁZEV: Pridavna lopatka vonkajsia		
			ČÍSLO VÝKRESU: 04_005		
			LISTŮ: LIST:		



POLOTOVAR		MATERIÁL: Uhlíkový kompozit			
HMOTNOST	kg	MĚRÍTKO	INDEX	ZMĚNA	DATUM
PROMÍTÁNÍ	ISO E1	1:2			PODPIS
TOLEROVÁNÍ	ISO 8015		KRESLIL	J. J. Fekiač	SCHVÁLIL
PRESNOST	ISO 2768 - mK		Č. SEZNAMU		Č. SESTAVY
FS TUL Racing			NÁZEV: Pridavna lopatka vnutorna		
			ČÍSLO VÝKRESU: 04_006		
			LISTŮ: LIST:		

8 Záver

V diplomovej práci sa venovalo histórii používania aerodynamických prvkov v motoršporte a následným konštrukčným riešeniam. Venovalo sa hlavne historickým a prelomovým monopostom formule 1 v ohľade aerodynamiky. Následne sa analyzovalo možné použitie CFD simulácií a testovania. Rozobrali tri hlavné riešenia, CFD simulácie, vizualizácia prúdenia vzduchu na trati pomocou Vis-flow a veterný tunel. Rozobrali sa pravidlá Formule Student, kde sa oboznamovalo s konštrukčnými obmedzeniami a záťažovými podmienkami, ktoré musia navrhnuté aerodynamické prvky splňovať. Následne sa prešlo na inováciu a konštrukciu predného krídla pre univerzitný tím Formula Student FS TUL Racing.

Boli vytvorené tri varianty krídla, ktoré sa následne simulačne porovnávali. Ku každej variante predného krídla bola vytvorená tabuľka s hodnotami prítlačnej a odporovej sily, ktoré boli porovnávané. V porovnaní sa nachádzali aj rozmery krídla. Následne sa všetky hodnoty porovnali v tabuľke a bola vybraná tretia varianta predného krídla. Po vybraní varianty sa prešlo na samotnú výrobu. Dôležitou súčasťou výroby bola voľba uhlíkových vlákien, pre ktorú bola vykonaná ťahová a ohybová skúška. Tieto skúšky ukázali, aká skladba uhlíkových vlákien sa použije na výrobu. Výsledkom týchto skúšok bolo, že na nosné a namáhané časti budú tvorené skladbou uhlíkových vlákien s kombináciou 600 g a 200 g, ktoré budú na seba ukladané pod 45 stupňami. Po voľbe materiálov sa následne pristúpilo k samotnej laminácii, kde sa používala infúzna laminácia na hlavný profil krídla, ktorá zabezpečuje rovnomerné rozloženie epoxidu. Na malé profily sa použila ručná laminácia kvôli redukcii hmotnosti a jednoduchosti výroby samotných dielov. Poskladanie krídel prebiehalo pomocou insertov, ktoré boli vlepene na vrchné a spodné časti profilov, ktoré tvoria rebrinovú štruktúru. Následne po skonštruovaní sa krídlo naskenovalo kvôli odchýlkam pri výrobe, kde sa zistilo, že krídlo je skrátene o 49 mm. Toto skrátene bolo vedome urobené z dôvodu, že 3D model, ktorý bol tvorený, ráta aj s prídavkami na výrobu. Ďalšie odchýlky, ktoré vznikli, boli spôsobené zlým nalepením samotných insertov. Poslednou časťou práce bolo validovanie predného krídla. Táto validácia prebiehala vo veternom tuneli, kde bolo kvôli veľkostiam prierezu tunela nutné rozdeliť krídlo na polovicu a následne túto polovicu zmenšiť v pomere 1:2,7. Následne sa vytvorili držiaky, ktoré boli uchytené na steny tunela. Na meranie sa použila metóda pomocou záznamu PIV, ktorý pomocou laseru sleduje pohyb častíc, ktoré sa púšťajú do veterného tunela.

Meranie vo veternom tuneli ukázalo smer a rýchlosť prúdenia vzduchu pomocou vizualizácie v 2 rezoch, ktoré bolo možné porovnať s CFD simuláciami. Prvotné simulácie mali veľké odchýlky, z tohto dôvodu sa pre porovnanie CAD model predného krídla zmenšil ku pomeru 1:2,7, ako bol model do veterného tunela. Toto zmenšenie pomohlo k lepšiemu porovnaniu výsledkov CFD simulácií, a merania vo veternom tuneli mali podobný výsledok s malými odchýlkami, ktoré mohli byť spôsobené nedokonalým povrchom modelu alebo odchýlkami vo výpočtovom modeli CFD. Vytvorila sa 3D dokumentácia a výkresová dokumentácia základných častí predného krídla.

9 Použitá literatura

- [1] KATZ, Joseph. *Race Car Aerodynamics: Designing for Speed*. 2. vyd. Boston: Bentley Publishers, 1995. ISBN 0-8376-0142-8.
- [2] KATZ, Joseph. *Race Car Aerodynamics: Designing for Speed*, s. 31. Boston: Bentley Publishers, 1995. ISBN 0-8376-0142-8.
- [3] HUCHO, Wolf-Heinrich a Gino SOVRAN. *Aerodynamics of Road Vehicles*. San Mateo: Annual Reviews, 1993.
- [4] KATZ, Joseph. *Race Car Aerodynamics: Designing for Speed*, s. 31. Boston: Bentley Publishers, 1995. ISBN 0-8376-0142-8.
- [5] KATZ, Joseph. *Race Car Aerodynamics: Designing for Speed*, s. 34. Boston: Bentley Publishers, 1995. ISBN 0-8376-0142-8.
- [6] KATZ, Joseph. *Race Car Aerodynamics: Designing for Speed*, s. 7. Boston: Bentley Publishers, 1995. ISBN 0-8376-0142-8.
- [7] KATZ, Joseph. *Aerodynamics of Race Cars*. San Mateo: Annual Reviews, 2006.
- [8] KATZ, Joseph. *Race Car Aerodynamics: Designing for Speed*, s. 2. Boston: Bentley Publishers, 1995. ISBN 0-8376-0142-8.
- [9] HUCHO, Wolf-Heinrich a Gino SOVRAN. *Aerodynamics of Road Vehicles*, s. 501. San Mateo: Annual Reviews, 1993.
- [10] KATZ, Joseph. *Race Car Aerodynamics: Designing for Speed*, s. 25. Boston: Bentley Publishers, 1995. ISBN 0-8376-0142-8.
- [11] KATZ, Joseph. *Race Car Aerodynamics: Designing for Speed*, s. 8. Boston: Bentley Publishers, 1995. ISBN 0-8376-0142-8.
- [12] KATZ, Joseph. *Race Car Aerodynamics: Designing for Speed*, s. 101. Boston: Bentley Publishers, 1995. ISBN 0-8376-0142-8.
- [13] KATZ, Joseph. *Race Car Aerodynamics: Designing for Speed*, s. 102. Boston: Bentley Publishers, 1995. ISBN 0-8376-0142-8.
- [14] KATZ, Joseph. *Race Car Aerodynamics: Designing for Speed*, s. 106. Boston: Bentley Publishers, 1995. ISBN 0-8376-0142-8.

- [15] KATZ, Joseph. *Race Car Aerodynamics: Designing for Speed*, s. 107. Boston: Bentley Publishers, 1995. ISBN 0-8376-0142-8.
- [16] KATZ, Joseph. *Race Car Aerodynamics: Designing for Speed*, s. 217. Boston: Bentley Publishers, 1995. ISBN 0-8376-0142-8.
- [17] KATZ, Joseph. *Race Car Aerodynamics: Designing for Speed*, s. 3. Boston: Bentley Publishers, 1995. ISBN 0-8376-0142-8.
- [18] [Winged spyder] Porsche 550; online. In: *Winged spyder*. Dostupné z: <https://type550.com/history/special-spyders/winged-spyder/>. [citováno 2024-01-10].
- [19] [Winged spyder]. Obrázek; online. In: *Winged spyder*. Dostupné z: <https://type550.com/history/special-spyders/winged-spyder/>. [citováno 2024-01-10].
- [20] LOTUS. *Lotus type 49 - Lotus type 49?*. Online. © 2024. In: *Lotus* . . <https://media.lotuscars.com/en/heritage-race-cars/lotus-type-49.html> [citováno 2024-01-10].
- [21] [@r/F1Technical]. *Hey there fine folks. I recently noticed something on the later versions of the Lotus 49. Namely that the high wings were mounted directly to the suspension. Bar the Lotus 88, has there been any other attempts at putting the aerodynamic load on the unsprung components of the car?*. Post na Redditu. 2024-01-13T23:51. Dostupné z: https://www.reddit.com/r/F1Technical/comments/1960jsu/hey_there_fine_folks_i_recently_noticed_something/?rdt=37159. [citováno 2024-01-10].
- [22] [FERRARI]. *1975 312 T*. Online. © 2024. In: *Ferrari*. Dostupné z: <https://www.ferrari.com/en-EN/formula1/312-t>. [citováno 2024-02-24].
- [23] [1975 Ferrari 312T F1 Car 2]. Obrázek; online. In: *1975 Ferrari 312T and 1976 312T2 Are F1 Legends With Monster Rear Tires*. [2015]. Dostupné z: <https://www.car-revs-daily.com/2015/03/17/1975-ferrari-312t/>. [citováno 2024-01-27].
- [24] NEWHEY, Adrian. *Ako postavit' monopost F1*. Bratislava: TIMY PARTNERS, 2017. ISBN 978-80-8199-017-5.
- [25] [Williams FW14 1]. Obrázek; online. In: *Williams FW14 - 1992 Formula One Championship Winning Car*. [2016]. Dostupné z: https://www.snaplap.net/williams-fw14-1992-f1-champion/#google_vignette. [citováno 2024-01-29].
- [26] NEWHEY, Adrian. *Ako postavit' monopost F1*, s. 138. Bratislava: TIMY PARTNERS, 2017. ISBN 978-80-8199-017-5.

- [27] NEWHEY, Adrian. *Ako postaviť monopost F1*, s. 139. Bratislava: TIMY PARTNERS, 2017. ISBN 978-80-8199-017-5.
- [28] [BUILD YOUR OWN RACE CAR!]. Car Aerodynamics Basics and How-To Design Tips cont. Online© 2024. In: *Build Your Own Race Car!*. Dostupné z <https://www.buildyourownracecar.com/race-car-aerodynamics-basics-and-design/2/>
- [29] [mclaren mp4 20]. Obrázek; online. In: *McLaren MP4-20 - Car with Most Wins in 2005 Left Without a Trophy*. [2017]. Dostupné z: <https://www.snaplap.net/mclaren-mp4-20/>. [citováno 2024-01-30].
- [30] NEWHEY, Adrian. *Ako postaviť monopost F1*, s. 268. Bratislava: TIMY PARTNERS, 2017. ISBN 978-80-8199-017-5.
- [31] [RB8]. Obrázek; online. In: *Red Bull predstavil obhájce titulu s označením RB8*. [2012]. Dostupné z: <https://flsport.auto.cz/clanek/red-bull-predstavil-obhajce-titulu-s-oznaceni-rb8>. [citováno 2024-01-30].
- [32] NEWHEY, Adrian. *Ako postaviť monopost F1*, s. 339. Bratislava: TIMY PARTNERS, 2017. ISBN 978-80-8199-017-5.
- [33] FORMULA TU OSTRAVA. *Formula Student - Co to vlastně je?*. Online. © 2024. In: *Formula TU Ostrava*. Dostupné z: <https://formulaostrava.cz/formula-student/>. [citováno 2024-02-26].
- [34] SPRAYING SYSTEMS CO. *Analýza postreku -čo je prečo je dôležitá*. Online. © 2024. In: *Spraying Systems Co*. Dostupné z: <https://www.spray.com/sk-sk/blog/%C4%8Do-je-cfd-a-pre%C4%8Do-je-d%C3%B4le%C5%BEit%C3%A9>. [citováno 2024-02-26].
- [35] [Applying Flowviz]. Obrázek; online. In: *Tech Explained | Flow viz*. [2018]. Dostupné z: <https://www.racecar-engineering.com/tech-explained/tech-explained-flow-viz/2/>. [citováno 2024-01-30].
- [36] HLAWICZKA, Petr. *Flow-vis a PIV: O co se jedná a proč je týmy využívají?*. Online. 1. 1. 2012 [2012-01-01]. In: *F1 NEWS - technika (flnews.autoroad.cz)*. Dostupné z: <https://flnews.autoroad.cz/technika/39842-flow-vis-a-piv-o-co-se-jedna-a-proc-je-tymy-vyuzivaji-foto>. [citováno 2024-05-03].
- [37] [Red Bull floor 1]. Obrázek; online. In: *Gary Anderson's Guide to Flow-Vis In F1 Testing*. [2022]. Dostupné z: <https://www.the-race.com/formula-1/gary-andersons-guide-to-flow-vis-in-f1-testing/>. [citováno 2024-01-30].

- [38] KATZ, Joseph. *Race Car Aerodynamics: Designing for Speed*, s. 64. Boston: Bentley Publishers, 1995. ISBN 0-8376-0142-8.
- [39] KATZ, Joseph. *Race Car Aerodynamics: Designing for Speed*, s. 65. Boston: Bentley Publishers, 1995. ISBN 0-8376-0142-8.
- [40] doplnit str. 39
- [41] [Formula student]. Obrázek; online. In: *Formula Student Germany*. [2017]. Dostupné z: <https://www.simscale.com/formula-student-germany/>. [citováno 2024-01-30].
- [42] Autor práce
- [43] [Maximum dimensions and positioning of aerodynamic devices]. Obrázek; online. In: *FS Rules 2024*. [2024]. Dostupné z: https://www.formulastudent.de/fileadmin/user_upload/all/2024/rules/FS-Rules_2024_v1.1.pdf. [citováno 2024-02-12].
- [44] [Front wing tech]. Obrázek; online. In: *Tech 101: How does a Formula 1 front wing work?*. [2020]. Dostupné z: <https://www.motorsportweek.com/2020/08/24/tech-101-how-does-a-formula-1-front-wing-work/>. [citováno 2024-02-12].
- [45] [Renault's new front wing is considerably more intricate than Williams]. Obrázek; online. In: *TECH TUESDAY: A tale of two front wings*. [2018]. Dostupné z: <https://www.formula1.com/en/latest/article/tech-tuesday-a-tale-of-two-front-wings.2j78Mp1BHq2UQEUY-aucUKQ>. [citováno 2024-02-12].
- [46] [Outwash front wing after 2009 rule change & Inwash front wing after 1998 rule change]. Obrázek; online. In: *Front Wing Endplate*. Dostupné z: https://www.formula1-dictionary.net/f_w_endplate.html. [citováno 2024-02-12].
- [47] [Fibers orientation]. Obrázek; online. In: *Laminates & Sandwiches*. Dostupné z: <https://www.oxyblack.com/index.php/en/composites/laminates-sandwiches>. [citováno 2024-02-15].
- [48] *3D sken křídla zarovnaný s 3D modelem*. [2024]. Vytvořeno kolektivem katedry Fakulty strojní Technické univerzity v Liberci (FS TUL Racing) ve spolupráci s Katedrou strojírenských technologií.
- [49] *3D sken s odchylkami*. [2024]. Vytvořeno kolektivem katedry Fakulty strojní Technické univerzity v Liberci (FS TUL Racing) ve spolupráci s Katedrou strojírenských technologií Technické univerzity v Liberci.

[50] *Model křídla ve větrném tunelu*. [2024]. Poskytnuto katedrou energetických zařízení Technické univerzity v Liberci.

[51] *Záznam z měření z aerodynamického tunelu v řezu se třemi lopatkami*. [2024]. Poskytnuto katedrou energetických zařízení Technické univerzity v Liberci.

[52] *Záznam z měření z aerodynamického tunelu v řezu se dvěma lopatkami*. [2024]. Poskytnuto katedrou energetických zařízení Technické univerzity v Liberci.

[53] UHLÍŘ, Pavel. *Experimentální výzkum mezních vrstev metodou 2D PIV*. Bakalářská práce. Liberec: Technická univerzita v Liberci, Fakulta strojní, 2022. Dostupné z: <https://dspace.tul.cz/server/api/core/bitstreams/849c0f3d-487f-43f9-a9c2-133e76b45e8a/content>. [citováno 2024-04-25]

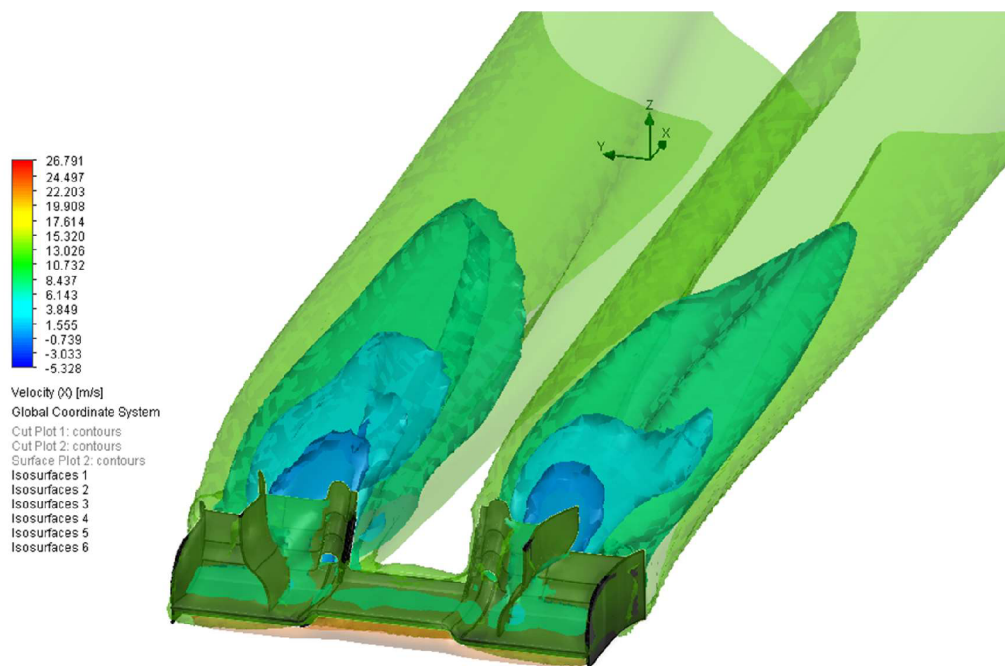
[54] KOPECKÝ, Václav. *Laserové anemometrie*. Liberec: Technická univerzita v Liberci, 2006. ISBN 80-7083-945-7.

10 Zoznám príloh

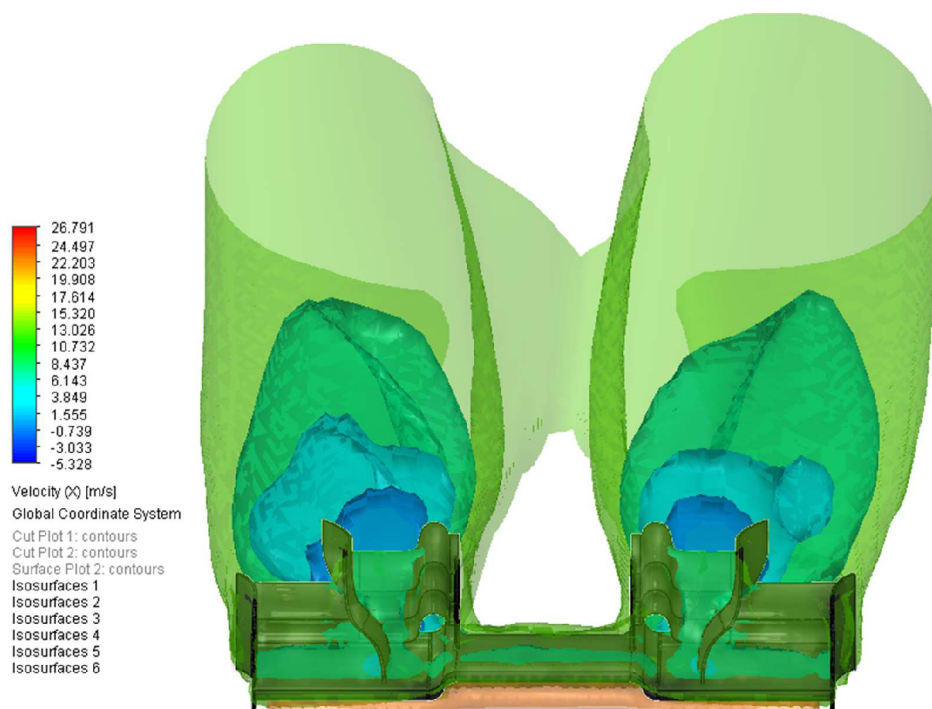
Príloha 1: Obrázok simulácie 1 varianty predného krídla - oblasti rýchlosti prúdu vzduchu pohľad zhora.....	85
Príloha 2: Obrázok simulácie 1 varianty predného krídla - oblasti rýchlosti prúdu vzduchu pohľad zhora.....	85
Príloha 3: Obrázok simulácie 1 varianty predného krídla oblasti rýchlosti prúdu vzduchu pohľad spredu.....	86
Príloha 4: Obrázok simulácie 2 varianty predného krídla oblasti rýchlosti prúdu vzduchu pohľad spredu.....	86
Príloha 5: Obrázok simulácie 2 varianty predného krídla - oblasti rýchlosti prúdu vzduchu pohľad zhora 1.....	87
Príloha 6: Obrázok simulácie 2 varianty predného krídla - oblasti rýchlosti prúdu vzduchu pohľad zhora 2.....	87
Príloha 7: Obrázok simulácie 3 varianty predného krídla - znázornené oblasti rýchlosti prúdu vzduchu pohľad spredu.....	88
Príloha 8: Obrázok simulácie 3 varianty predného krídla – znázornené oblasti rýchlosti prúdu vzduchu.....	88
Príloha 9: Obrázok simulácie 3 varianty predného krídla znázornenie tlaku na spodnej strane krídla.....	89
Príloha 10: Obrázok simulácie 3 varianty predného krídla – znázornenie tlaku na vrchnej strane krídla.....	89
Príloha 11: Inšpekcia krídla farebná mapa odchýlok.....	90
Príloha 12: Inšpekcia krídla hodnota odchýlok na spodnej strane krídla.....	90
Príloha 13: Inšpekcia krídla rez 1.....	91
Príloha 14: Inšpekcia krídla rez stredom profilu.....	91

11 Prílohy

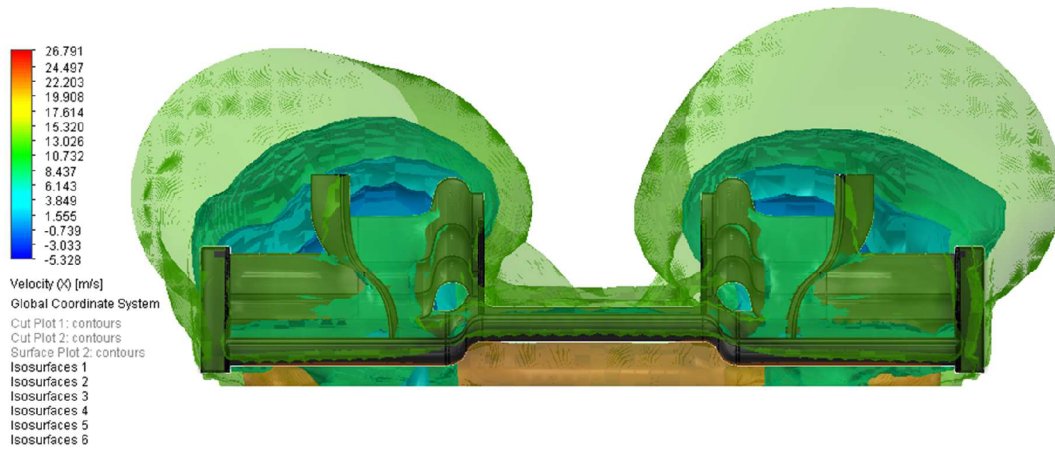
Príloha 1: Obrázok simulácie 1 varianty predného krídla - oblasti rýchlosti prúdu vzduchu pohľad zhora



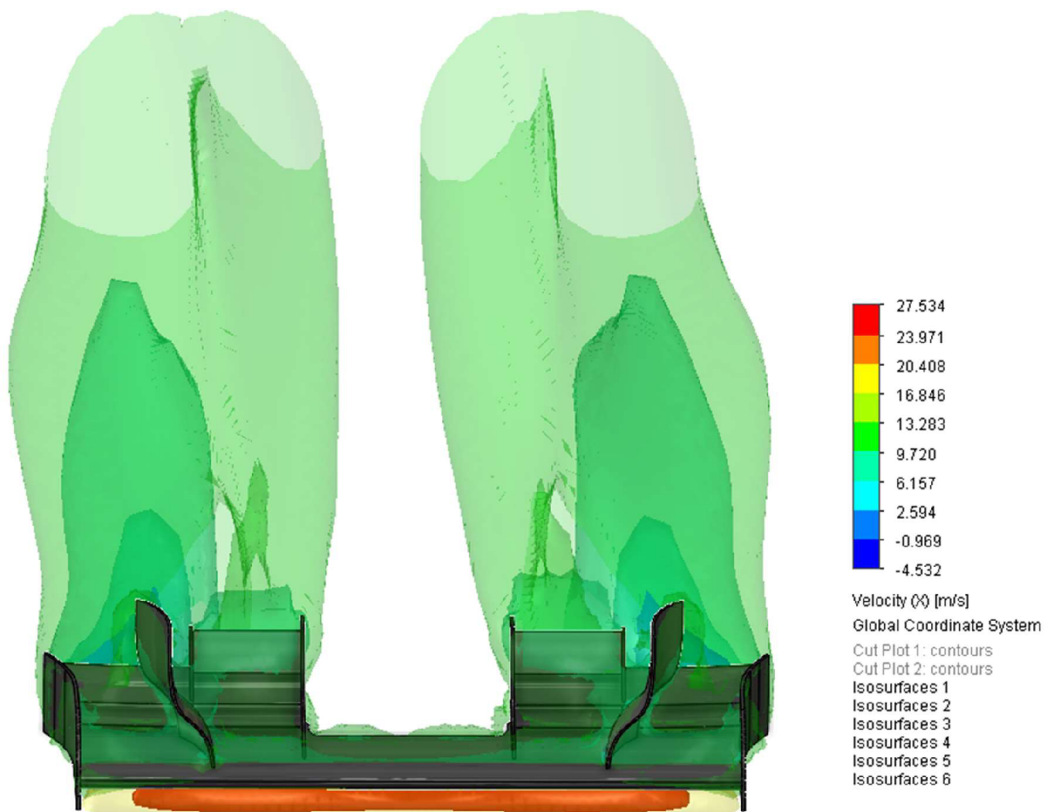
Príloha 2: Obrázok simulácie 1 varianty predného krídla - oblasti rýchlosti prúdu vzduchu pohľad zhora



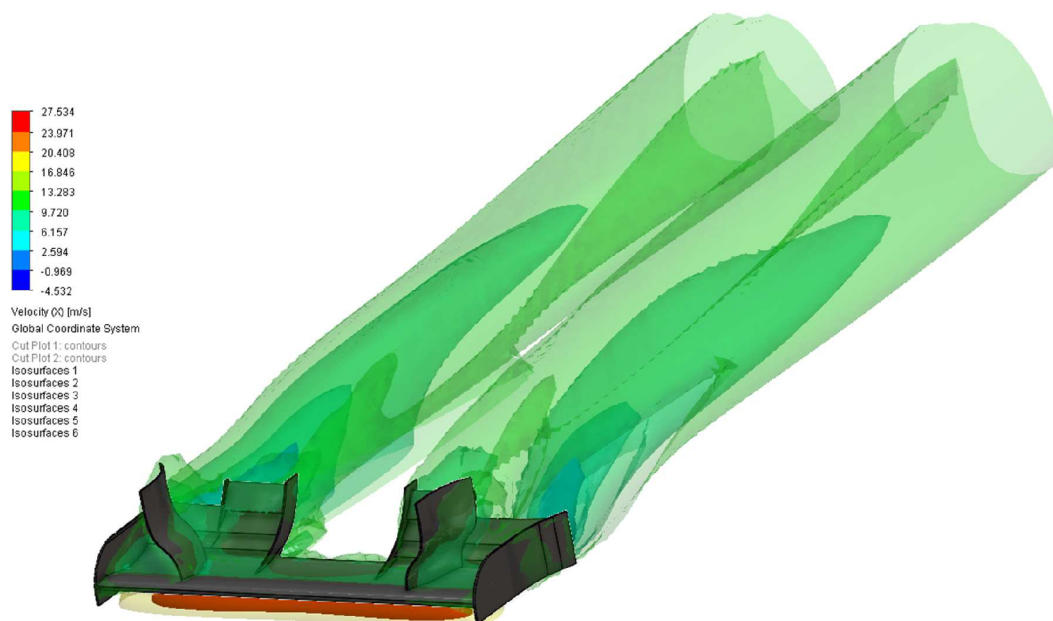
Príloha 3: Obrázok simulácie 1 varianty predného krídla oblasti rýchlosti prúdu vzduchu pohľad spredu



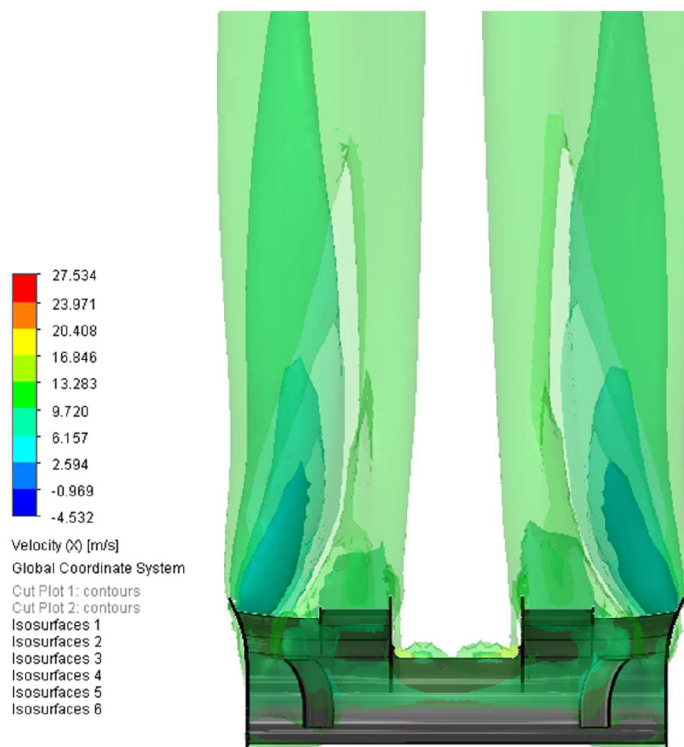
Príloha 4: Obrázok simulácie 2 varianty predného krídla oblasti rýchlosti prúdu vzduchu pohľad spredu



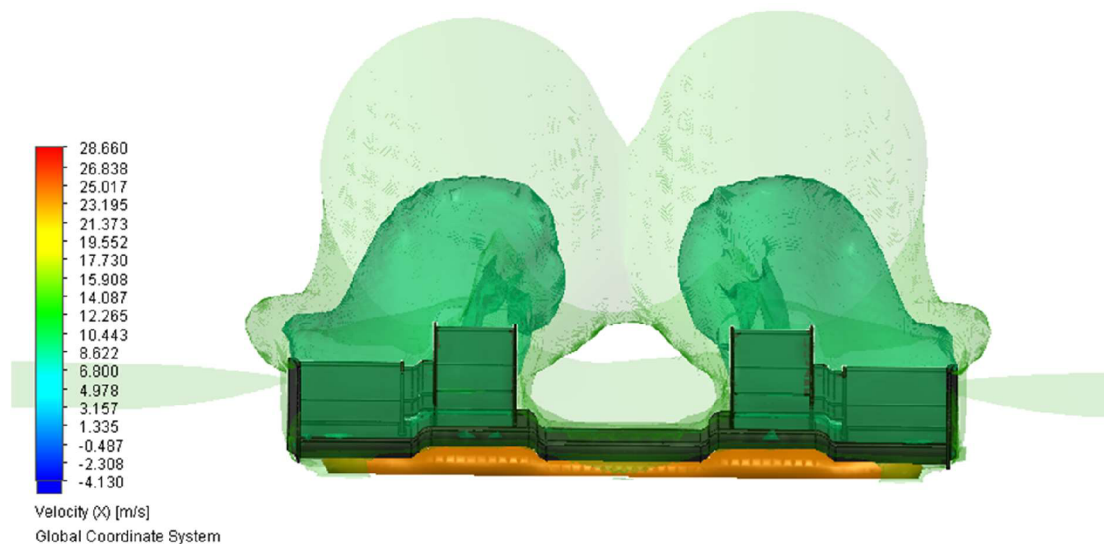
Príloha 5: Obrázok simulácie 2 varianty predného krídla - oblasti rýchlosti prúdu vzduchu pohľad zhora 1



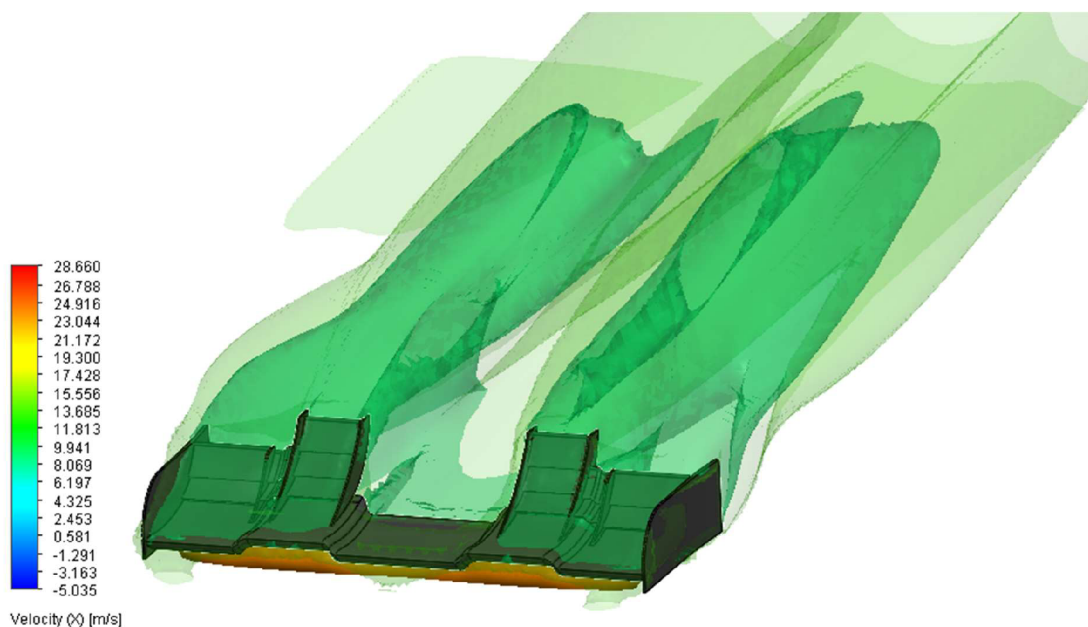
Príloha 6: Obrázok simulácie 2 varianty predného krídla - oblasti rýchlosti prúdu vzduchu pohľad zhora 2



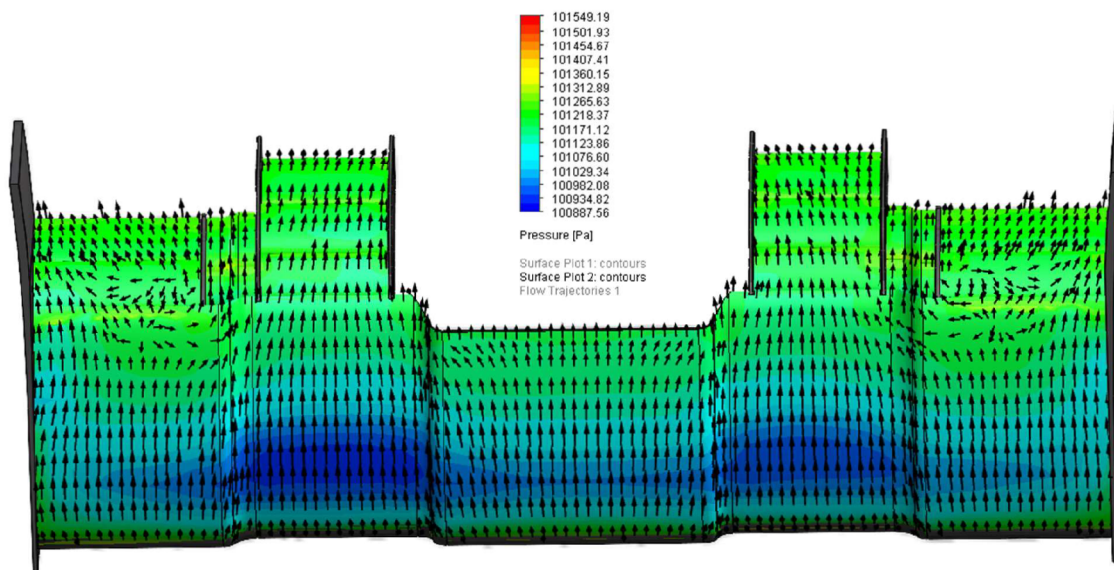
Príloha 7: Obrázok simulácie 3 varianty predného krídla - znázornené oblasti rýchlosti prúdu vzduchu pohľad spredu



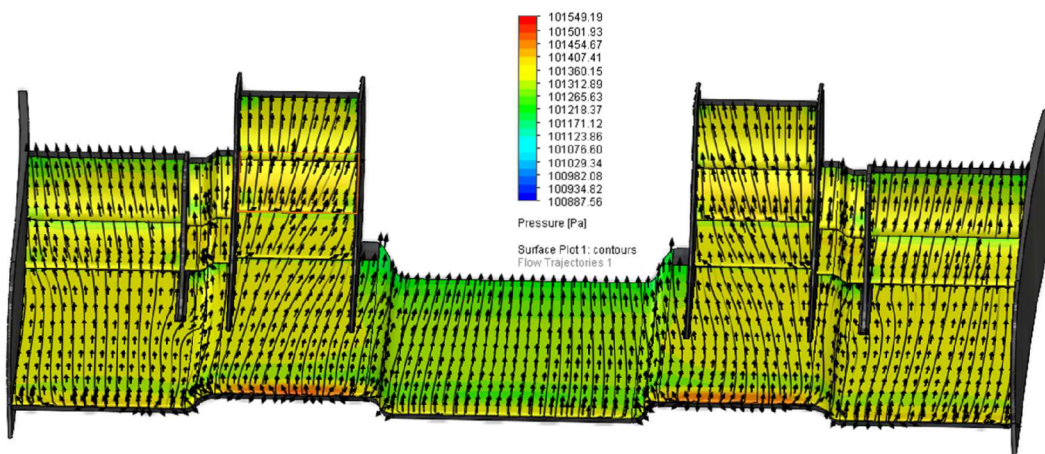
Príloha 8: Obrázok simulácie 3 varianty predného krídla – znázornené oblasti rýchlosti prúdu vzduchu



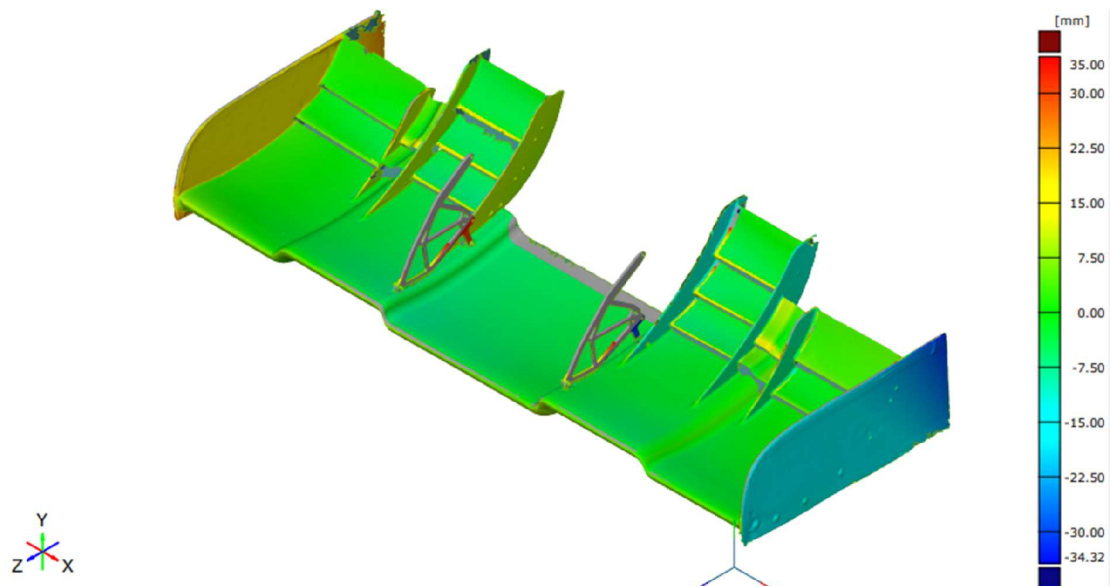
Príloha 9: Obrázok simulácie 3 varianty predného krídla znázornenie tlaku na spodnej strane krídla



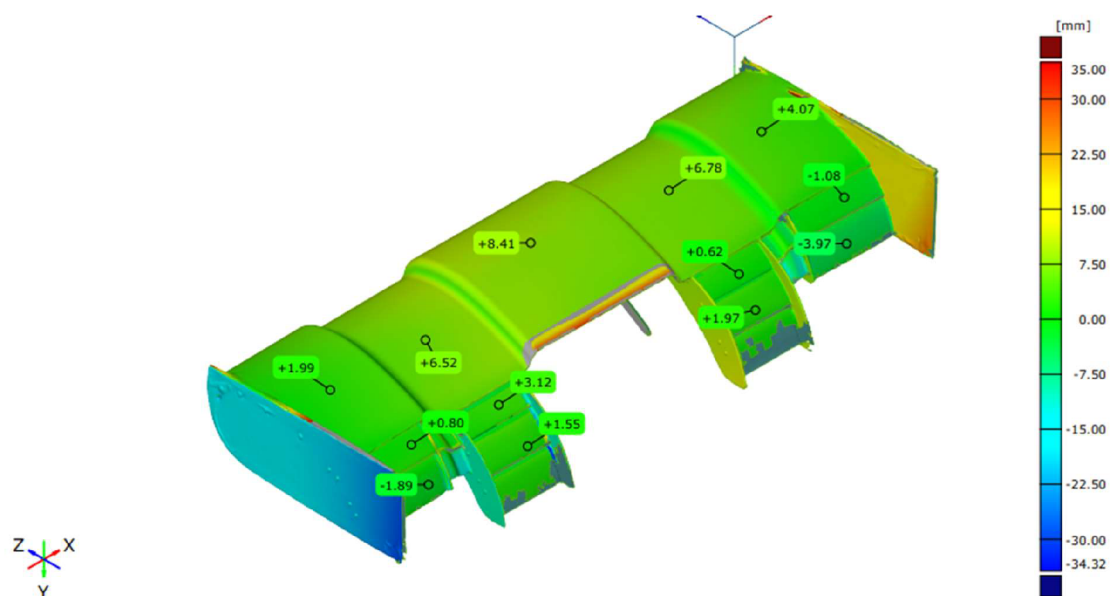
Príloha 10: Obrázok simulácie 3 varianty predného krídla – znázornenie tlaku na vrchnej strane krídla



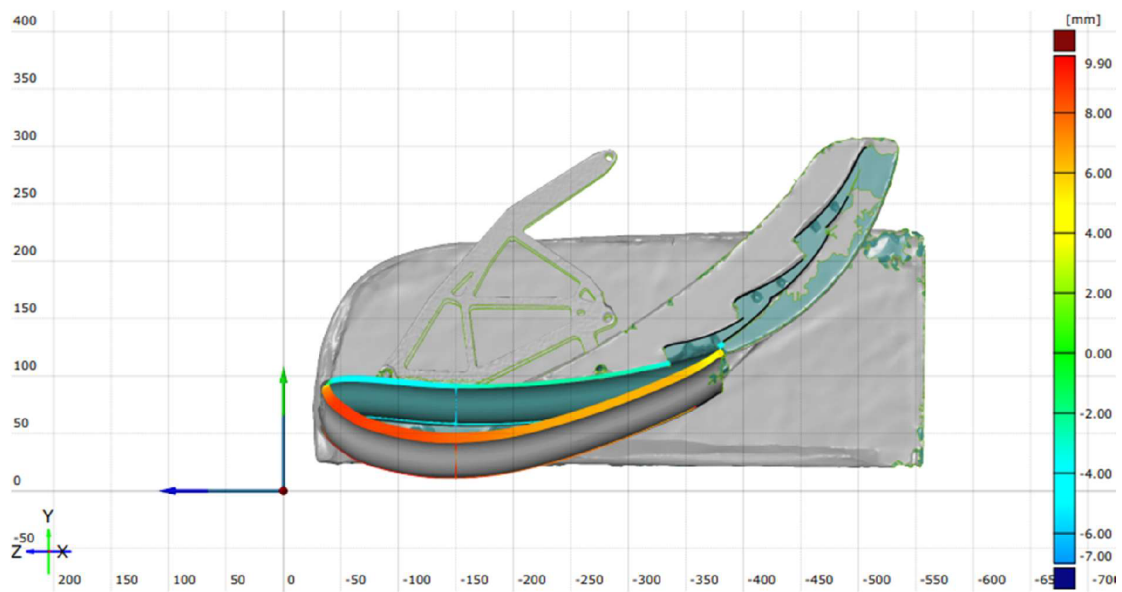
Príloha 11: Inšpekcia krídla farebná mapa odchýlok



Príloha 12: Inšpekcia krídla hodnota odchýlok na spodnej strane krídla



Príloha 13: Inšpekcia krídla rez 1



Príloha 14: Inšpekcia krídla rez stredom profilu

