



**FAKULTA
STROJNÍ
ČVUT V PRAZE**

Ústav automobilů, spalovacích motorů
a kolejových vozidel

Návrh difuzoru s využitím aktivní
aerodynamiky pro studentskou formuli

Diffuser design using active aerodynamic
for student formula

**BAKALÁŘSKÁ PRÁCE
2022**

Matěj CHALUPKA

Studijní program: B2342 TEORETICKÝ ZÁKLAD STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
Studijní obor: 2301R000 Studijní program je bezoborový
Vedoucí práce: Ing. Petr Hatschbach, CSc.

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Chalupka** Jméno: **Matěj** Osobní číslo: **492683**
Fakulta/ústav: **Fakulta strojní**
Zadávající katedra/ústav: **Ústav automobilů, spalovacích motorů a kolejových vozidel**
Studijní program: **Teoretický základ strojního inženýrství**
Studijní obor: **bez oboru**

II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce:

Návrh difuzoru s využitím aktivní aerodynamiky pro studentskou formuli

Název bakalářské práce anglicky:

Diffuser design using active aerodynamics for student formula

Pokyny pro vypracování:

Seznamte se s možnostmi využití aktivních aerodynamických prvků při konstrukci vozu Formule Student. Zaměřte se na návrh difuzoru v zadní části vozu. Simulací v CFD softwaru ověřte přínosy zvolených řešení aktivní aerodynamiky, zhodnoťte souhrnně výhody a nevýhody.

Seznam doporučené literatury:

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) bakalářské práce:

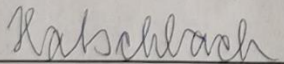
Ing. Petr Hatschbach, CSc. ústav automobilů, spalovacích motorů a kolejových vozidel FS

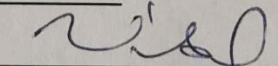
Jméno a pracoviště druhé(ho) vedoucí(ho) nebo konzultanta(ky) bakalářské práce:

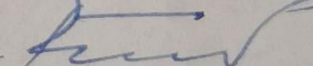
Datum zadání bakalářské práce: **20.04.2022**

Termín odevzdání bakalářské práce: **06.06.2022**

Platnost zadání bakalářské práce:


Ing. Petr Hatschbach, CSc.
podpis vedoucí(ho) práce

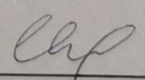

doc. Ing. Oldřich Vítek, Ph.D.
podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry


doc. Ing. Miroslav Španiel, CSc.
podpis děkana(ky)

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Student bere na vědomí, že je povinen vypracovat bakalářskou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je třeba uvést v bakalářské práci.

22.4.2022
Datum převzetí zadání


Podpis studenta



Anotační záznam

Jméno autora: Matěj Chalupka
Název práce: Návrh difuzoru s využitím aktivní aerodynamiky pro studentskou formuli
Anglický název: Diffuser design using active aerodynamicity for student formula

Rozsah práce:

50 stran
50 obrázků
16 tabulek
1 grafů

Akademický rok: 2021/2022
Ústav: 12 120 Ústav automobilů, spalovacích motorů a kolejových vozidel
Studijní program: B2342 TEORETICKÝ ZÁKLAD STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
Vedoucí práce: Ing. Petr Hatschbach, CSc.

Klíčová slova: Formula Student, aerodynamika, CFD, MRF
Key words: Formula Student, aerodynamics, CFD, MRF



Abstrakt

Bakalářská práce pojednává o využití aktivní aerodynamiky na voze Formula Student. CFD návrh je realizován pomocí výpočetního programu Star CCM+. Celkové výsledky ukazují pozitivní přínos a zároveň bude sloužit jako podklady pro budoucí vývoj.

Abstract

The bachelor's thesis discusses the use of active aerodynamics on a Formula Student car. The CFD design is using the Star CCM calculation program. The overall results show a positive benefit and will serve as a basis for future development.



Čestné prohlášení

Prohlašuji, že jsem bakalářskou na téma: “ Návrh difuzoru s využitím aktivní aerodynamiky pro studentskou formuli” vypracoval samostatně s použitím odborné literatury a pramenů, uvedených v seznamu zdrojů, jenž tvoří poslední kapitolu této práce.

V Praze dne: 13. 7. 2022


.....
(podpis autora)



Poděkování

Rád bych zde poděkoval vedoucímu své bakalářské práce panu Ing. Petrovi Hatschbachovi, CSc. za rady, připomínky a konzultace. Dále bych rád poděkoval svým kolegům z aerodynamické skupiny týmu CTU CarTech za cenné rady ohledně vývoje a orientace ve výpočetních programech.



Obsah

1 Úvod.....	11
1.1 Motivace a cíle.....	11
1.2 Formule Student.....	11
1.3 Tým CTU CarTech.....	12
2 Aerodynamika.....	13
3 Historie aktivní aerodynamiky v motorsportu	17
3.1 Chaparral 2J	17
3.2 Brabham BT46B	17
3.3 Rennstall Esllingen	18
3.4 Rennteam UNI Stuttgart.....	19
3.5 CTU Cartech	19
4 Koncept difuzoru FS14.....	21
4.1 Základní body.....	21
4.2 Problémy původního difuzoru	21
4.3 Správný aktivní prvek	21
4.4 Výběr umístění.....	21
4.5 Způsob pohonu.....	22
5 Konkrétní řešení.....	23
6 Metoda Simulace.....	24
6.1 CFD Simulace	24
6.2 Simulace pomocí tlakového skoku	24
6.3 MRF Simulace	26
7 Orientace v bakalářské práci	27
7.1 Značení konstrukčních verzí	27
7.2 Grafické výsledky simulací.....	27
8 Vytvoření kontrolního difuzoru (FS14_10_00_00).....	28
9 FS14_10_01_00	30
10 FS14_10_02_00	32
10.1 FS14_10_02_01	33
11 FS14_10_03_00	35
11.1 FS14_10_03_01	36



11.2 FS14_10_03_02	37
11.3 FS14_10_03_03	38
11.4 FS14_10_03_04	39
11.5 FS14_10_03_05	40
11.6 Zhodnocení konceptu FS14_10_03	41
12 FS14_10_04_00	42
12.1 FS14_10_04_01	43
12.2 FS14_10_04_02	44
12.3 FS14_10_04_03	45
12.4 FS14_10_04_04	46
13 Testování ostatních jízdních stavů.....	47
14 Závěr	49
15 Použitá literatura a zdroje	50



Seznam obrázků

Obr. 1: Systém bodování závodů Formule Student [3].....	12
Obr. 2: Tým CTU CarTech.....	12
Obr. 3: Reklama na vozidlo Tatra 77 [4]	13
Obr. 4: Hodnoty koeficientů odporu pro různé geometrické tvary [5]	14
Obr. 5: Rozložení tlaků na zadním křídle vozidla FS14	15
Obr. 6: Rozdíl mezi laminárním a turbulentním prouděním [6]	16
Obr. 7: Vozidlo Chaparral 2J ze závodní série Can-Am [7].....	17
Obr. 8: Brabham BT46B „Fan car“ [8].....	18
Obr. 9: Rozložení tlaku na voze týmu Rennstall Eslingen [9].....	18
Obr. 10: Rennteam UNI Stuttgart s větráky v difuzoru [10]	19
Obr. 11: Difuzor s využitím aktivní aerodynamiky na voze FS13	19
Obr. 12: Dmychadlo JETFAN 60	23
Obr. 13: Motor Typhoon.....	23
Obr. 14: CFD CAD model vozidla.....	24
Obr. 15: Rychlost vzduchu v okolí vrtule pomocí metody MRF.....	25
Obr. 16: Rychlost vzduchu v okolí vrtule pomocí metody tlakového skoku	25
Obr. 17: Vůz FS13.....	25
Obr. 18: CAD model	26
Obr. 19: MRF region	26
Obr. 20: Numerická síť.....	26
Obr. 21: Rovina YZ	27
Obr. 22: Rovina XZ	27
Obr. 23: Rovina XY	27
Obr. 24: Vertikální sloty	28
Obr. 25: Pohled zezadu.....	28
Obr. 26: Rychlost proudícího vzduchu u kontrolního difuzoru v rovině XZ	29
Obr. 27: Vír (jetting) od zadních kol monopostu v rovině YZ.....	29
Obr. 28: Geometrie FS14_10_01_00 pohled zezadu	30
Obr. 29: Rychlost proudění pro FS14_10_01_00 v rovině XZ	31
Obr. 30: Detail odtržení vzduchu	31
Obr. 31: Geometrie kanálu FS14_10_02_00	32
Obr. 32: Zvířený vzduch vytékající z kanálu směrem k zadnímu kolu, rovina XY.....	32
Obr. 33: Geometrie FS14_10_02_01	33
Obr. 34: Vířivost difuzoru FS14_10_02_01, rovina XY	34
Obr. 35: Geometrie výstupní trysky.....	35
Obr. 36: Rychlost proudění vzduchu v rovině XY, ukázka zle zvolené pozice	36
Obr. 37: Změna pozice	36
Obr. 38: Změna velikosti výstupního otvoru	37
Obr. 39: Změna tvaru výstupní plochy	38
Obr. 40: Změna geometrie FS14_10_03_04.....	39
Obr. 41: Změna geometrie FS14_10_03_05.....	40
Obr. 42: Tlakové ztráty v rovině XZ.....	40
Obr. 43: Expanze přídavného tunelu	42
Obr. 44: Geometrie difuzoru FS14_10_04_00.....	42
Obr. 45: Změna křivosti FS14_10_04_01.....	43
Obr. 46: Snížení energie víru v rovině XZ.....	43
Obr. 47: Naklonění dmychadla u FS14_10_04_02.....	44
Obr. 48: Změna křivosti u FS14_10_04_03.....	45
Obr. 49: Vířivost při větší křivosti v rovině XZ.....	45
Obr. 50: Geometrie tunelu pro FS14_10_04_04	46



Seznam tabulek

Tabulka 1: Hodnoty c_d , c_l pro kontrolní difuzor FS14_10_00_00	28
Tabulka 2: Hodnoty c_d , c_l pro FS14_10_01_00	30
Tabulka 3: Hodnoty c_d , c_l pro FS14_10_02_00	32
Tabulka 4: Hodnoty c_d , c_l pro FS14_10_02_01	33
Tabulka 5: Hodnoty c_d , c_l pro FS14_10_03_00	35
Tabulka 6: Hodnoty c_d , c_l pro FS14_10_03_01	36
Tabulka 7: Hodnot c_d , c_l pro FS14_10_03_02	37
Tabulka 8: Hodnoty c_d , c_l pro FS14_10_03_03	38
Tabulka 9: Hodnoty c_d , c_l pro FS14_10_03_04	39
Tabulka 10: Hodnoty c_d , c_l pro FS14_10_03_05	40
Tabulka 11: Hodnoty c_d , c_l pro FS14_10_04_00	42
Tabulka 12: Hodnoty c_d , c_l pro FS14_10_04_01	43
Tabulka 13: Hodnoty c_d , c_l pro FS14_10_04_02	44
Tabulka 14: Hodnoty c_d , c_l pro FS14_10_04_03	45
Tabulka 15: Hodnoty c_d , c_l pro FS14_10_04_04	46
Tabulka 16: Výsledky v různých rychlostech	47

Seznam grafů

Graf 1: Závislost koeficientů c_d , c_l na rychlosti.....	47
---	----



1 Úvod

1.1 Motivace a cíle

Difuzor je nedílnou součástí každého závodního/sportovního vozidla. Jeho hlavní účel je pomocí expanze urychlovat vzduch proudící pod podlahou vozu, který následně začne generovat v zadní části přitlačnou sílu.

Hlavním problémem samotných difuzorů u formulových vozů je, že se do něj, od rotujících kol, dostává zviřený vzduch od zadních kol tzv. jetting (vír tvořený na místě dotyku kola s vozovkou). Toto proudění následně z části zahltí difuzor, tato část přestane fungovat svému původnímu účelu a sníží se tím celková účinnost samotného difuzoru.

Pro sezónu 2020 Formule Student došlo ke změně pravidel. Tato změna pravidel odstranila zákaz využívání externích mechanismů pro úpravu proudění nebo pro samotnou generaci aerodynamických sil. Mnoho týmů v tomto spatřilo možnosti, jak vylepšit vlastnosti vlastního vozu a dosáhnout lepších výsledků v soutěži.

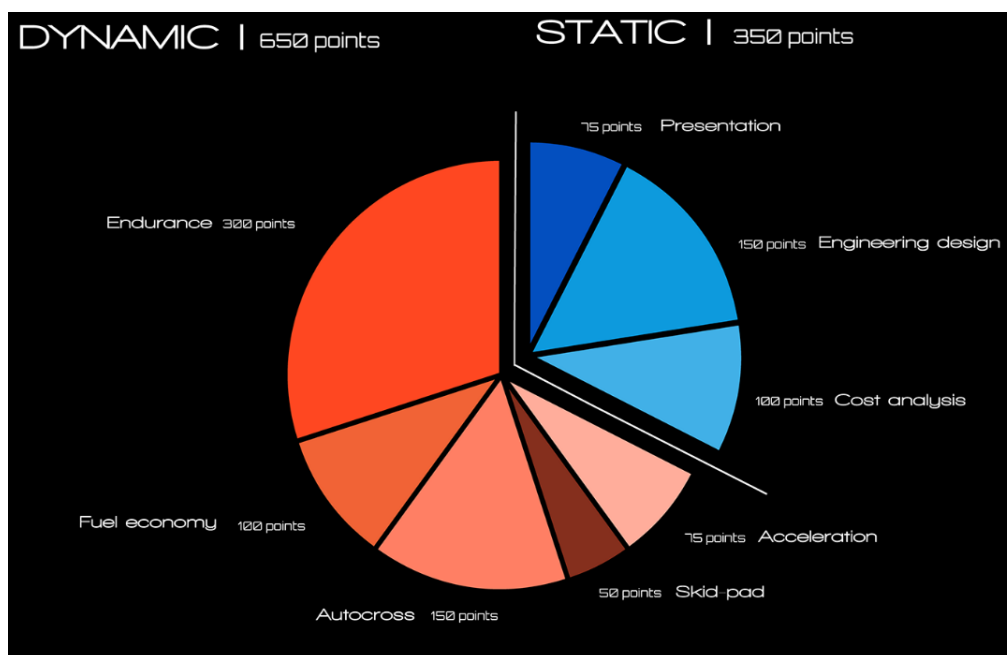
I tým CTU CartTech v tomto spatřil možný potenciál a pokusil se u návrhu nového vozu využít právě onu aktivní aerodynamiku. Ovšem onen dvouletý vývoj se ukázal jako „slepá ulička“, a proto jsem se rozhodl, že se pro sezónu 2022 pokusím vyvinout difuzor s použitím aktivní aerodynamiky, jenž bude mít pozitivní přínos na fungování samotné formule.

1.2 Formule Student

Formule Student, jak již název vypovídá, je mezinárodní soutěž, ve které proti sobě soupeří týmy Studentů vysokých škol z celého světa.

Samotná soutěž vznikla v roce 1981 ve Spojených státech amerických jako odpověď na vysokou poptávku firem po Studentech nejen s teoretickými, ale i s praktickými zkušenostmi, které by mohly být využity v následném zaměstnání.

Na každých závodech se soutěží celkem v sedmi disciplínách, třech statických a čtyřech dynamických. Při statických se posuzuje celkový návrh formule, jeho provedení, hospodaření týmu s financemi. U dynamických zase zrychlení vozu, průjezd vozu „osmičkou“, rychlost vozu na jedno kolo a následně vytrvalostní závod na 22 km.



Obr. 1: Systém bodování závodů Formule Student [3]

1.3 Tým CTU CarTech

Tým CTU CarTech byl založen v roce 2008 na Fakultě strojní ČVUT jako první tým Formule Student v České republice. Následně se v roce 2009 zúčastnil svých prvních závodů v Německu.

V současné době se tým řadí mezi světovou špičku. V roce 2021 zaznamenal zatím svou nejlepší sezónu, když vyhrál závody v České republice, byl třetí na závodech v Maďarsku a obsadil páté a šesté místo v Chorvatsku a následně v Itálii.

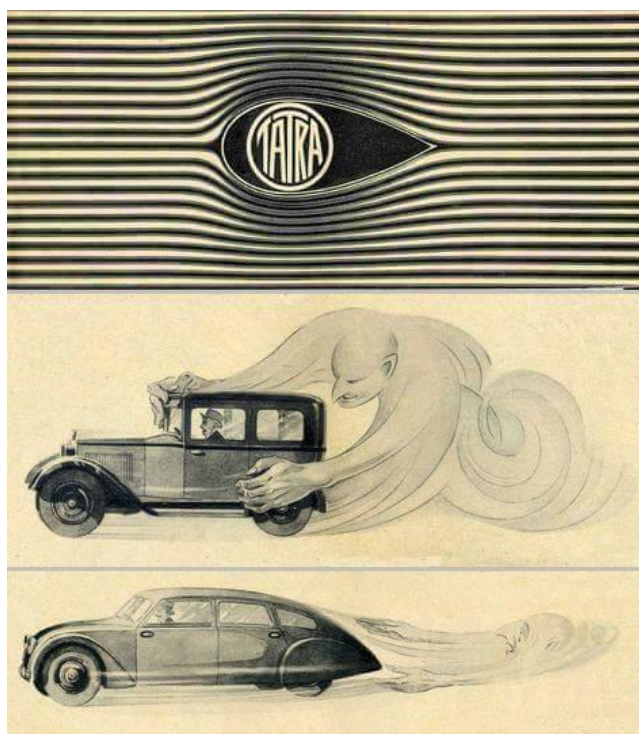


Obr. 2: Tým CTU CarTech



2 Aerodynamika

Aerodynamika je obor fyziky, speciálně mechanik tekutin, zabývající se studiem pohybu plynů (ideálně vzduchu) a jejich interakcí s pevnými objekty. Rozvoj aerodynamiky v moderním pojetí začal v 18. století, přestože již dříve byly známy základní principy jako například aerodynamický odpor. V počátcích bylo v aerodynamice úsilí, aby letu dosáhlo těleso těžší než vzduch, což bylo poprvé demonstrováno bratry Wrighty v roce 1903. Rozvoj v automobilovém průmyslu začal ve 30. letech 20. století. Hlavním přínosem v té době byla možnost dosahování vyšších rychlostí i s využitím menšího výkonu pohonné jednotky. Jedním z vozů je například Tatra 77. Jedná se o vůz klínového tvaru, který byl schopen dosáhnout rychlosti přes 150 km/h. Následně až v průběhu 60. let se uchytila myšlenka převrátit profily leteckých křidel na závodní vozy, což předznamenalo započetí nové etapy motorsportu.



Obr. 3: Reklama na vozidlo Tatra 77 [4]

Pro základní porovnání aerodynamických účinků na jednotlivé profily se používá dvojice koeficientů. Jedná se o koeficient vztlaku/přítlaku a odporu. Tyto koeficienty se následně využívají pro výpočty odporových a přítláčných/vztlakových sil, díky nimž můžeme následně určovat různá specifikace vozidel např: výkon motoru, maximální rychlost nebo třeba nastavení odpružení.

$$F_x = \frac{1}{2} \rho c_x A v^2$$

$$F_y = \frac{1}{2} \rho c_y A v^2$$



F_x – odporová síla [N]

F_y – vztlková/přítlačná síla [N]

ρ – hustota prostředí (vzduchu) [$\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$]

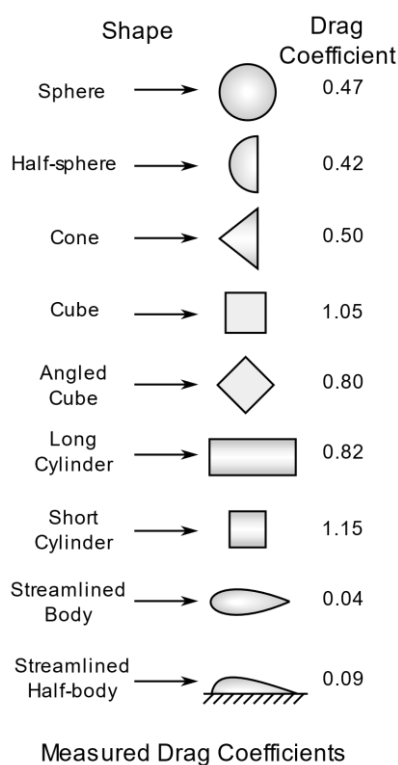
c_x – koeficient odporu [-]

c_y – koeficient vztlaku/přítlaku [-]

A – normálová plocha ke směru síly [m^2]

v – rychlost [$\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$]

Koeficient odporu vzduchu c_x dosahuje u osobních vozidel hodnot okolo 0,3, u závodních vozů se pohybuje okolo čísla 0,7. Koeficient vztlaku c_y se řeší primárně u závodních speciálů. Zde nabývá hodnoty až -5. U silničních vozidel není tento koeficient až tak důležitý, protože se u nich nesoustředíme na dosažení co nejvyšší rychlosti, potažmo co nejrychlejšího průjezdu zatáčkou. Zde nás více zajímá celková spotřeba daného vozu, kterou právě více ovlivňuje koeficient odporu



Obr. 4: Hodnoty koeficientů odporu pro různé geometrické tvary [5]

Skutečnost, že kde vzniká přítlak, vzniká i odpor, vychází z Newtonova třetího pohybového zákona, zákona akce a reakce. Ten říká: „Působíme-li na těleso určitou silou, působí na nás těleso silou o stejné velikosti opačné orientace.“ Tedy vzduch a vozidlo na sebe vzájemně působí, v důsledku čehož vznikají síly působící na oba činitele a podle jejich rozkladu do směru os „x“ a „y“ je následně nazýváme odporem a přítlakem.



Další důležitou rovnicí využívající v aerodynamice je upravená Bernoulliho rovnice.

$$\frac{p}{\rho} + \frac{v^2}{2} = konst.$$

p – tlak [Pa]

ρ – hustota prostředí (vzduchu) [$\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$]

v – rychlost [$\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$]

S rostoucí hustotou prostředí, s rostoucí plochou a s rostoucí rychlostí nám roste přitlačná a odporová síla. Obě síly můžeme rozdělit na smykové a normálové. Smykové síly vznikají vzájemným třením mezi pohybujícím se objektem a prostředím, ve kterém se toto těleso pohybuje. Naopak normálové síly vznikají působením tlaku v normálovém směru k povrchu tělesa. Vzájemnou integrací smykového napětí a tlaku přes povrch obtékaného tělesa dostáváme výslednou aerodynamickou sílu a moment.

Rozmístění tlaku na profilu generující přitlak je následující. Na horní straně vzrůstá tlak, čímž zde klesá rychlost proudícího vzduchu. Na spodní straně vzniká naopak podtlak a rychlost zde vzrůstá. Celková výslednice tlaků je orientována směrem dolů, což způsobuje, že je vůz přitlačován k zemi.

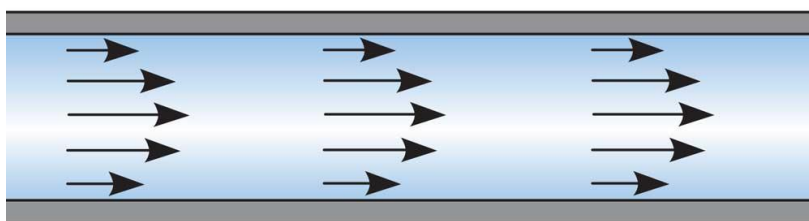


Obr. 5: Rozložení tlaků na zadním křídle vozidla FS14

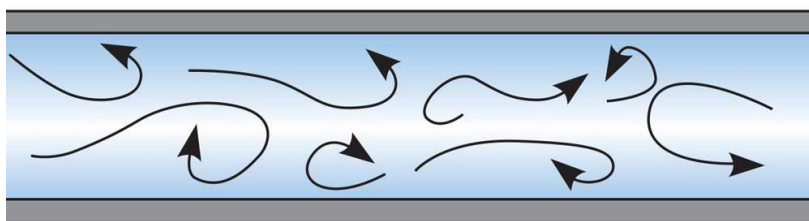


Proudění vzduchu se dále dělí na laminární a turbulentní. Charakteristickou vlastností laminárního proudění je nízký odpor způsobený třením a malý výskyt víření, naopak u turbulentního je vysoký odpor a větší počet vírů. Této skutečnosti se hojně využívá pro zmírnění úplavu za vozidlem nebo pro posunutí místa na daném profilu, kde došlo k odtržení. Samotný rozdíl mezi těmito druhy proudění vystihuje Reynoldsovo číslo. Toto číslo značí poměr setrvačných a vazkých sil v kapalině. Hodnota, která definuje rozdíl mezi laminárním a turbulentním prouděním určuje kritická hodnota Reynoldsova čísla (Re_{krit}). Samotná hodnota závisí na podmínkách, ve kterých provádí měření. V kruhových trubkách se hodnota pohybuje okolo $Re_{krit} = 2300$. Ono číslo je definováno vztahem.

Laminar Flow



Turbulent Flow



Obr. 6: Rozdíl mezi laminárním a turbulentním prouděním [6]

$$Re = \frac{\rho v L}{\eta} = \frac{v L}{\mu}$$

Re – Reynoldsovo číslo [-]

ρ – hustota prostředí (vzduch) [$\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$]

v – rychlost [$\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$]

L – charakteristický rozměr [m]

η – dynamická viskozita [$\text{Pa} \cdot \text{s}$]

μ – kinematická viskozita [$\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$]



3 Historie aktivní aerodynamiky v motorsportu

Princip aktivní aerodynamiky spočívá v tom, že pro generování aerodynamických sil nevyužíváme pouze různá zakřivení a tvary jednotlivých profilů. Pro generaci těchto sil jsou využívány různé mechanismy, které umožňují například odsávat vzduch ze spodní části auta, čímž se vozidlo přisaje více k vozovce a bude moci dosahovat vyšších rychlostí při průjezdu zatáčkami. Dále se tyto mechanismy mohou využívat k umělému urychlení vzduchu proudícího na aerodynamický profil atd.

3.1 Chaparral 2J

Vozidlo bylo navrženo v roce 1970 pro závodní sérii Can-Am ve Spojených státech amerických. O pohon se staraly dva motory. První, motor Chevrolet, sloužil pro pohon vozidla, druhý, motor ze sněžného skútru, byl využit pro pohon dvojice dmychadel v zadní části. Dmychadla měla za úkol odsávat vzduch ze spodní strany auta, a tím generovat velké množství přítláčivé síly bez velkého odporu, který měla klasická závodní vozidla s velkými přítláčnými křídly. Tato skutečnost dávala tomuto vozidlu na závodní trati oproti ostatním velikou výhodu, což ovšem znamenalo jeho konec, protože mnoho týmů podalo protest ohledně legality vozu. Na konci roku FIA toto vozidlo zakázala z důvodu použití pohyblivých částí aerodynamiky, což bylo v rozporu s pravidly.



Obr. 7: Vozidlo Chaparral 2J ze závodní série Can-Am [7]

3.2 Brabham BT46B

Pro všechny fanoušky Formule 1 je známo jako „fan car“ (auto s větrákem). V sezóně 1978 se vše točilo okolo přísavného efektu. Hlavní konstruktér stáje Brabham Gordon Murray musel přijít s návrhem vozu, který by toho efektu dokázal využít i při použití rozměrného motoru Alfa Romeo v zadní části vozu. Inspirace přišla z vozu Chaparral 2J. Do zadní části vozu byl tedy umístěn větrák. Na rozdíl od vozu 2J musel být ovšem poháněn stejným motorem jako zbytek auta (z důvodu pravidel Formule 1) a dále musel tým dokázat, že více jak 50 % výkonu samotného větráku slouží pro chlazení samotné formule.



Vůz se zúčastnil pouze jednoho závodu, Velké ceny Švédska 1978. V samotném závodě vozidlo dominovalo a jezdec Niki Lauda vyhrál. Po tomto závodě bylo vozidlo zakázáno z bezpečnostních důvodů. Hlavním podnětem k vyloučení byly obavy samotných jezdců jedoucích za tímto vozem.



Obr. 8: Brabham BT46B „Fan car“ [8]

3.3 Rennstall Esslingen

Po uvolnění pravidel Formule Student v roce 2020 se týmům naskytla příležitost využít různá zařízení pro generaci přítlaku v okolí auta. Nejdále ze všech týmů to dotáhl německý tým z Esslingenu. Řešení tohoto týmu spočívá v umístění dmychadel určených k pohonu modelů letadel do podlah své formule. Jedná se o dmychadla o průměru 250 milimetrů a každá z nich disponuje výkonem okolo 94 N.

Řešení se navíc nevztahuje pouze na odsávání vzduchu zpod auta, ale onen odsátý vzduch je dále směřován na zadní křídlo, kde generuje další množství přítlaku. I díky tomuto řešení tým dominoval po celou sezónu a stal celkovým vítězem pro rok 2021.



Obr. 9: Rozložení tlaku na voze týmu Rennstall Esslingen [9]



3.4 Rennteam UNI Stuttgart

Studentský tým ze Stuttgartu se také rozhodl pro využití dmychadel určených pro modely letadel. Naopak od týmu z Esllingenu se je rozhodl umístit do zadní části do oblasti difuzoru. Samotná dmychadla nejsou primárně pro generaci přitlačné síly, ale slouží pro usměrnění zviřeného vzduchu od zadních kol. Nespornou výhodou toto řešení skýtá ve skutečnosti, že při poruše nedojde k zásadnímu ovlivnění zbytku aerodynamiky vozu, jako u týmu Rennstall Esllingen.



Obr. 10: Rennteam UNI Stuttgart s větráky v difuzoru [10]

3.5 CTU Cartech

I tým CTU CarTech se po uvolnění pravidel rozhodl této možnosti využít. Proto pro sezónu 2020 navrhl difuzor po vzoru již zmíněného Brabhamu BT46B. Princip spočíval ve tvaru, který se sbíhal do kulového otvoru, v němž rotovala vrtule. Ta měla odsávat vzduch zespodu vozu, a tím zde vytvořit podtlak.



Obr. 11: Difuzor s využitím aktivní aerodynamiky na voze FS13



Tento koncept ovšem skýtal pár zásadních vad. Samotná dvoulistá vrtule nebyla příliš účinná z těchto důvodů. Prvním je způsob fungování samotné vrtule. Druhým zásadnějším problémem se jevílo nasávání nečistot z trati, které byly následně vystřeleny za auto. Při jejich nasátí také často docházelo k destrukci samotné vrtule.

Tento typ difuzoru nebyl nakonec nikdy použit na žádném závodě právě z obav ohledně bezpečnosti a spolehlivosti. Nejblíže k využití byl na závodech v České republice v roce 2021, ale nakonec se v průběhu předzávodních přejímek tým rozhodl aktivní část z vozu odstranit.



4 Koncept difuzoru FS14

4.1 Základní body

V rámci koncepční části návrhu nového difuzoru bylo nejdůležitější stanovit si základní body a následně přijít s nejlepším řešením, které by bylo funkční a mělo pozitivní přínos pro závodní vůz.

- Zhodnocení problémů předchozího řešení
- Co využít jako aktivní prvek
- Výběr umístění aktivního prvku
- Způsob pohonu

4.2 Problémy původního difuzoru

Původní difuzor na voze FS13 měl značné množství vad. Základním problémem byla samotná koncepce. Plán počítal s použitím listové vrtule, která bude díky své rotaci odsávat vzduch ze zadní části vozu. V době vývoje ovšem nebylo k dispozici správné nastavení CFD simulace, která by dokázala v simulaci používat rotační díly. V té době se pro simulování těchto dílů používala metoda tlakového skoku. Z informací od výrobce se nastavil na místě vrtule požadovaný vstupní a výstupní tlak. Tato metoda však nepočítala se skutečností, která se povedla odhalit až po zprovoznění simulace právě těchto rotačních součástí. Ukázal se onen problém, že vrtule ve skutečnosti nevykazuje požadované vlastnosti. Odsávání fungovalo pouze na obvodové kružnici vrtulových listů, spíše tedy generovala posouvající sílu stejně jako u letadel.

Tato vada se navíc spojila s problémem častého lámání vrtulí díky nasátí drobných předmětů, další část těchto předmětů byla vystřelena za auto, kde ohrožovala lidi a další formule.

4.3 Správný aktivní prvek

Jak jsem zmínil už v předchozím bodě, letecké vrtule nejsou pro takovéto funkce k využití na závodním autě správným řešením.

Jako inspirace posloužila ukázka jiných řešení od ostatních týmu Formule Student. Všechny tyto týmy využívaly dmychadla určené pro pohon leteckých RC modelů. Tato dmychadla disponují schopností odsávat velké množství vzduchu a také tento vzduch dokáží dostatečně urychlit, aby mohl být následně využit pro další účely.

4.4 Výběr umístění

Možnosti umístění takových dmychadel jsou na formulovém voze defacto neomezené. Ovšem zde připadaly v úvahu dvě možnosti.



První možnost byla umístit dmychadlo o větším průměru do podlah formule. Nespornou výhodou je vysoký nárůst přitlaku v centrální části vozu, kde by tento nárůst nepředstavoval zásadní problém se změnou rozložení přitlačné síly podél vozidla. Navíc by se odsátý vzduch mohl využít k dalšímu využití na autě. Volba tohoto řešení by ale znamenala také mnoho komplikací. Takový systém využívající výkonné motory je velice energeticky náročný. Případná porucha jednoho z dmychadel by znamenala zásadní ovlivnění celé aerodynamiky vozu. Dalším problémem je nutná změna celé kinematiky vozu.

Druhá možnost počítala s umístěním menších dmychadel do zadní části vozu, kde by mohly pomoci například v oblasti difuzoru. Zde bylo k dispozici více možností samotného provedení. Jedna z možností se ukázala jako jejich využití pro generaci přitlačné síly, druhá spočívala ve využití pro úpravu proudění v okolí difuzoru (možná redukce zviřeného vzduchu od zadních kol vozu). Samozřejmě připadala možnost i kombinace obou řešení. Všechna tato řešení představovala jeden zásadní problém, a to skutečnost, že by se střed přitlaku na voze přesunul směrem k zadní části vozu, což by muselo být kompenzováno například větším předním přitlačným křídlem na vyrovnání rozdílu. Při možné poruše by nastal opačný problém, centrum přitlaku by se přesunulo do přední části, což by vedlo ke zhoršenému ovládní samotné formule.

4.5 Způsob pohonu

První spočívá v konstantní dodávce z alternátoru motoru formule. Tato možnost ovšem zcela neumožňuje využití dmychadel větších rozměrů z důvodu velké spotřeby energie.

Druhým způsobem je vytvořit samostatný zdroj elektrické energie, který bude sloužit pouze pro pohon motorů dmychadel. Toto řešení umožňuje široké škály využití. Její hlavní nevýhodou je hmotnost samotné baterie a následné vytvoření její ochrany dle pravidel Formula Student.

Třetí možností je napojení dmychadel pomocí převodů na samotný motor formule. Co do náročnosti se jedná o nejnáročnější řešení, a to z několika důvodů:

- Výroba mechanických převodů
- Ochrana celého systému před vniknutím nežádaného objektu
- Častá údržba a servis
- Odebrání části výkonu určenému pro pohon samotného vozidla



5 Konkrétní řešení

Po důkladném zvážení všech koncepčních možností a po poradě se zástupci týmu CTU CarTech jsem vyhodnotil jako nejvhodnější řešení, jak z hlediska celkového návrhu celého monopostu, tak z hlediska financí, umístění dvou dmychadel o menším průměru, a tudíž i o menším výkonu v zadní části vozu, konkrétně v difuzoru. Nebudou zde sloužit pro generaci samotné přitlačné síly, ale jimi generovaný proud vzduchu bude využit pro usměrnění proudění. Zároveň s tímto bylo rozhodnuto o využití elektrické energie pouze z alternátoru motoru.

Jako nevhodnější model samotných dmychadel i vzhledem k omezenému množství dodávané energie byl JETFAN 60 V1. Jedná se o dmychadla s vnějším průměrem lopatek rotoru o velikosti 60 mm. O pohon se starají motory HET Typhoon 350, z nichž každý má příkon 0,8 kW elektrické energie. S jejich využitím disponuje každé dmychadlo jmenovitého tahu 1,6 kg, což odpovídá necelým 16 N.



Obr. 12: Dmychadlo JETFAN 60



Obr. 13: Motor Typhoon

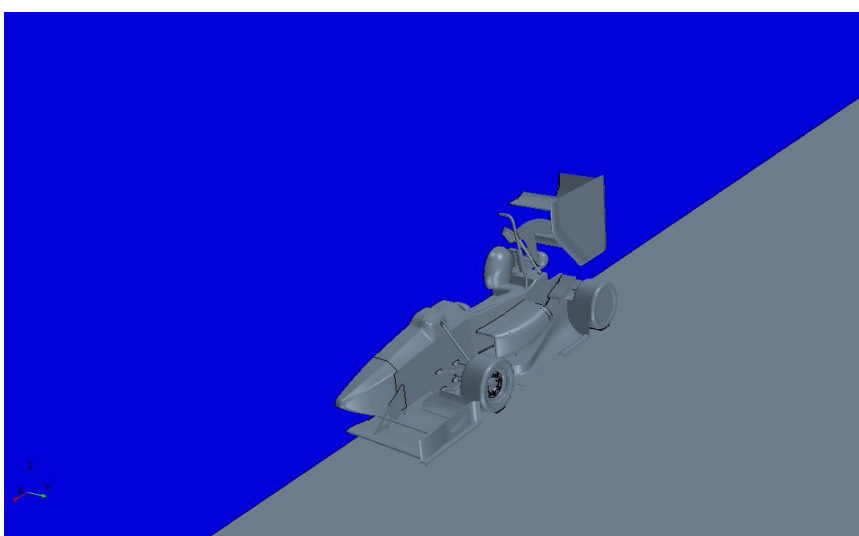


6 Metoda Simulace

6.1 CFD Simulace

Pro CFD (Computational Fluid Dynamics) bylo využito programu STAR-CCM+ od společnosti Siemens.

Princip takovéto simulace spočívá ve vytvoření zjednodušeného CAD modelu (model, který neobsahuje příliš ostré hrany, malé mezery a přílišné detaily). Model je následně umístěn do prostředí simulace. Zde je simulováno samotné proudění v okolí vozu, které využívá numerickou analýzu řešení rovnic s parciálními derivacemi. Pro získání přibližného řešení je nutné rozdělit vloženou geometrii, vznikne nám numerická síť. Aproximací rovnic následně dostaneme řešení v jednotlivých bodech. Samotný výpočet



Obr. 14: CFD CAD model vozidla

probíhá ve výpočetním tunelu. Rozměry tunelu musí být dostatečně velké, aby nedocházelo k ovlivnění výsledků proudění. Dále je možné vzhledem k symetrii vozidla simulovat pouze jeho polovinu. Tato skutečnost má za následek jednodušejší a rychlejší získatelný výsledek. Jako médium je zvolený ideální plyn. Okrajová podmínka na vstupu vzduchu do tunelu je stanovena tak, že rychlost vzduchu na vstupu má 15 m/s, jedná se o nejčastější rychlost, kterou se vozidlo při závodech pohybuje. Na výstupu je okrajová podmínka definována nulovým tlakem. Dále se zde vyskytuje pohybující se vozovka. Její rychlost činí 15 m/s ve směru osy x.

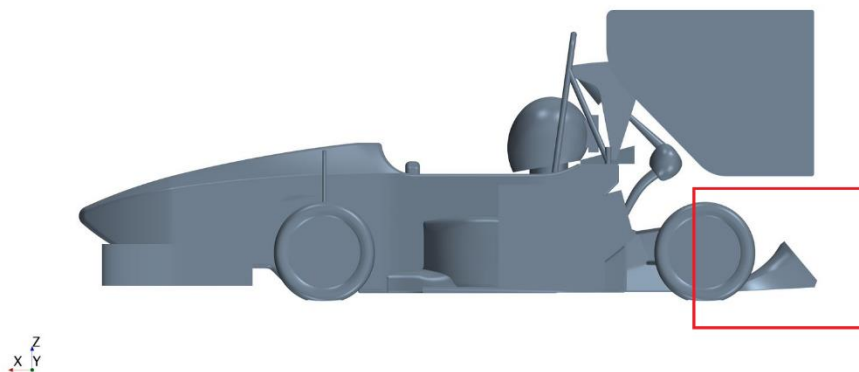
6.2 Simulace pomocí tlakového skoku

Jedná se o zjednodušenou metodu CFD simulace průtoku skrze rotační tělesa. Základem metody je vytvoření kontrolní plochy. Této ploše je následně nastaven požadovaný průtok vzduchu v závislosti na rychlosti proudění. Vzhledem ke zjednodušené mechanice může ovšem u takovéto simulace docházet ke zkresleným výsledkům. Hlavním problémem je skutečnost, že průtok vzduchu je realizován přes celou naši kontrolní plochu,

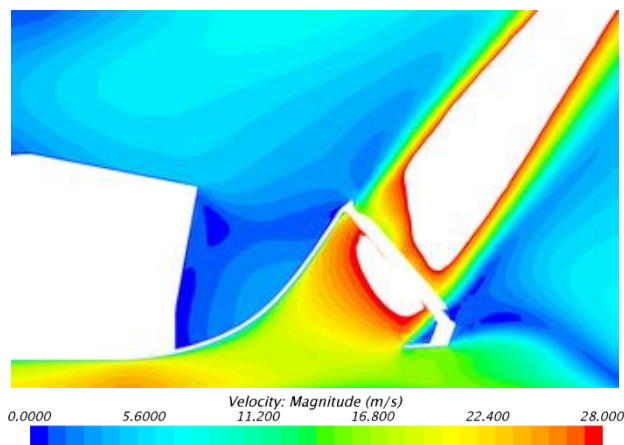


tudíž zde nebereme v potaz skutečnou geometrii rotačního tělesa, např. rotor nebo listy vrtule.

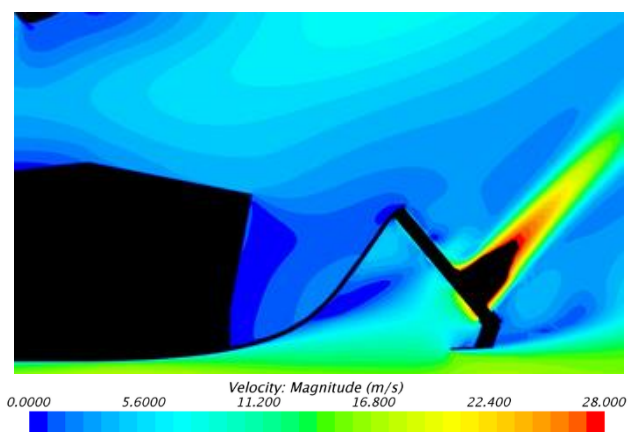
Pro ilustraci se níže nachází ukázky rychlosti proudění pro difuzor vozu FS13 z roku 2021.



Obr. 17: Vůz FS13



Obr. 16: Rychlost vzduchu v okolí vrtule pomocí metody tlakového skoku



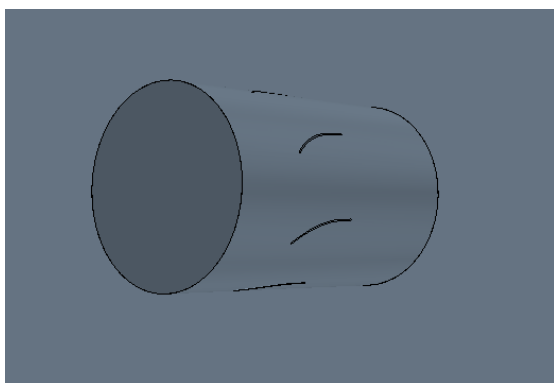
Obr. 15: Rychlost vzduchu v okolí vrtule pomocí metody MRF



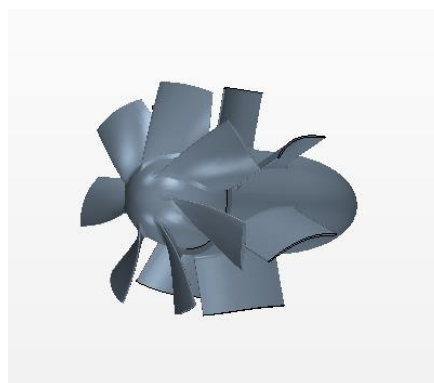
6.3 MRF Simulace

MRF (Moving Reference Frame) je pokročilá metoda určená pro simulace rotačních prvků, kdy její výsledky na rozdíl od simulace pomocí tlakového skoku více odpovídají reálnému modelu.

Samotná simulace spočívá ve vytvoření vlastního regionu v rámci celé CFD simulace. Tato oblast by měla rozměrově odpovídat reálnému modelu (dmychadlo, vrtule, ...), jenž chceme simulovat. Vstup do této oblasti musí být tvořen samostatnou plochou, které jsou následně přiřazeny specifické vlastnosti. Stejně je to s plochou výstupní.

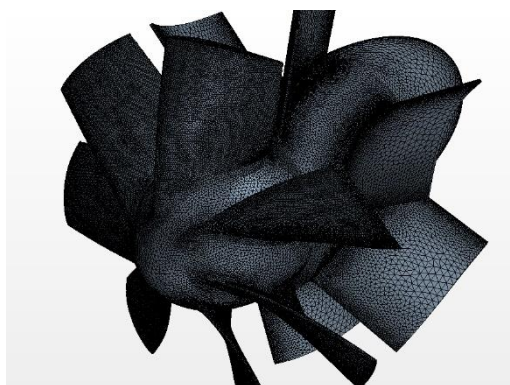


Obr. 19: MRF region



Obr. 18: CAD model

Uvnitř tohoto regionu je umístěn CAD model našeho rotujícího tělesa. V našem případě se jedná o dmychadlo, jehož části jsou rozděleny na rotující a nepohyblivou část, i zde je vytvořena speciální numerická síť pro rovnice. Následně je ještě zvolena osa rotace rotačních částí a poté jsou nastaveny otáčky, které uvádí výrobce.



Obr. 20: Numerická síť



7 Orientace v bakalářské práci

7.1 Značení konstrukčních verzí

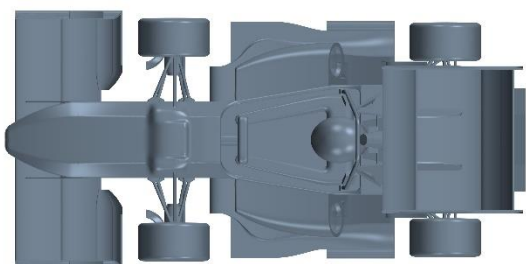
V aerodynamické skupině týmu CTU CarTech se již po řadu let používá speciální značení pro různé simulace CFD. Proto bych zde pro následnou lepší orientaci v celé bakalářské práci uvedl příklad, na kterém je toto značení vysvětleno.

FS14_XX_YY_ZZ

- FS14 – generace vozidla
- XX – číslo specifické části automobilu (difuzor má číslo 10)
- YY – konstrukční stav
- ZZ – úprava v rámci jednoho konstrukčního stavu

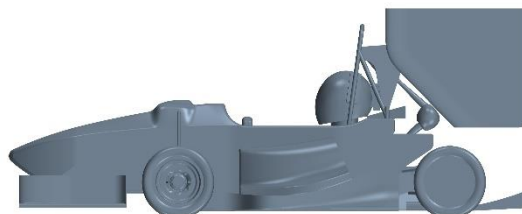
7.2 Grafické výsledky simulací

Pro co nejlepší grafické výsledky CFD simulací jsou obrázky generovány ve třech rovinách. Rovina XY (pohled z vrchu), XZ (pohled ze strany) a YZ (pohled zepředu).



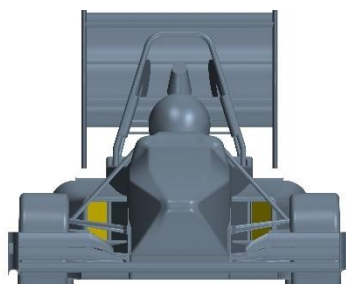
X
Z
Y

Obr. 23: Rovina XY



Z
X
Y

Obr. 22: Rovina XZ



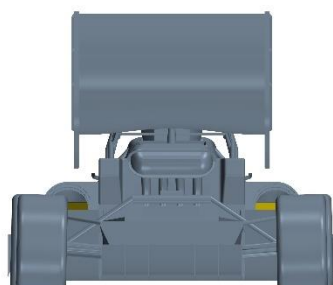
Z
X
Y

Obr. 21: Rovina YZ

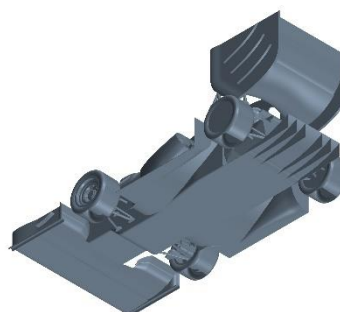


8 Vytvoření kontrolního difuzoru (FS14_10_00_00)

Prvním krokem pro vytváření modelů difuzorů s využitím aktivní aerodynamiky bylo potřeba vytvořit difuzor bez aktivního prvku. Ten bude následně sloužit jako srovnávací prvek pro ostatní návrhy. Konstrukce tohoto difuzoru byla tvořena pouze expanzí do výšky 130 mm na povrch vozovky. Dále byly ve střední části umístěny vertikální sloty pro zlepšení proudění.



Obr. 25: Pohled zezadu

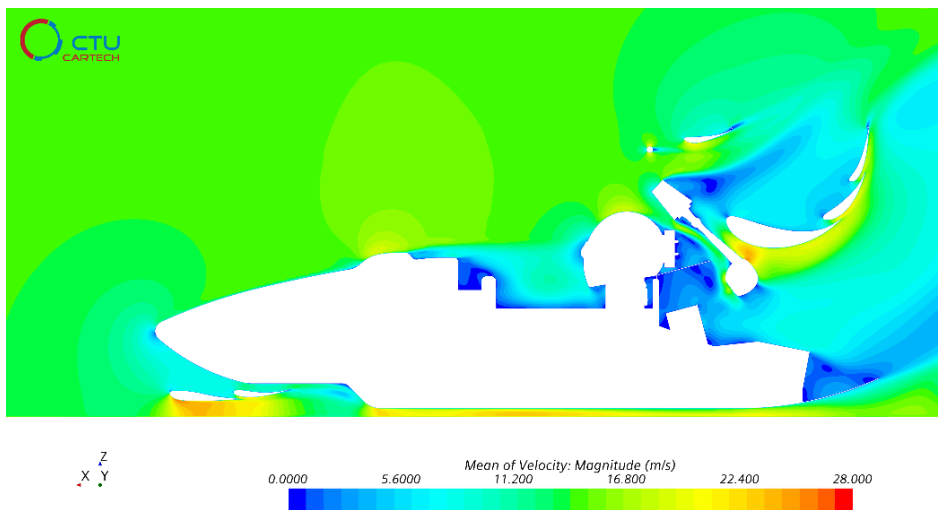


Obr. 24: Vertikální sloty

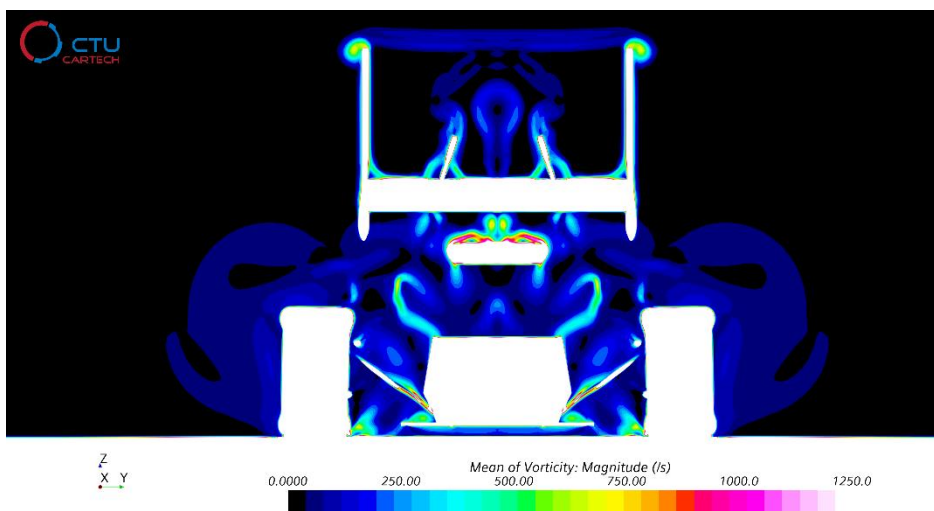
Z výsledků CFD simulace bylo zjištěno, že v centrální části nedochází k odtržení proudění vzduchu a zároveň je vidět negativní vliv zvrženého vzduchu proudícího od zadních kol. Tento vzduch postupuje směrem ke středu vozidla, a tím dochází ke snižování efektivity proudění v difuzoru, čímž dochází k nižší generaci přitlačné síly.

g0_cd (chassi)	0,238
g0_cl (chassi)	-0,351
g10_cd (diffuser)	0,015
g10_cl (diffuser)	-0,271

Tabulka 1: Hodnoty c_d , c_l pro kontrolní difuzor FS14_10_00_00



Obr. 26: Rychlost proudícího vzduchu u kontrolního difuzoru v rovině XZ

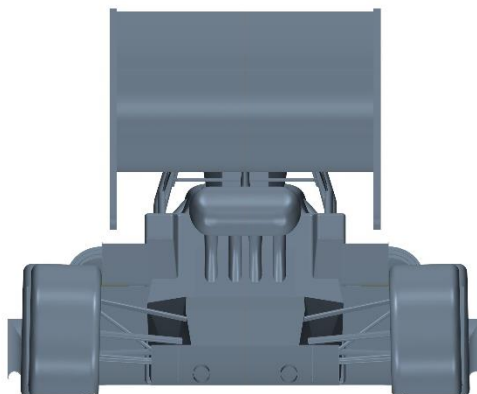


Obr. 27: Vír (jetting) od zadních kol monopostu v rovině YZ



9 FS14_10_01_00

Základní koncept vychází z velké části od vývoje z předešlé sezóny. V centrální části jsou umístěna paralelně vedle sebe dvě dmychadla. Jejich hlavním úkolem je odsávat vzduch zpod auta a následně urychlit tento proud vzduchu pro vyšší rychlost ke konci expanze samotného difuzoru.

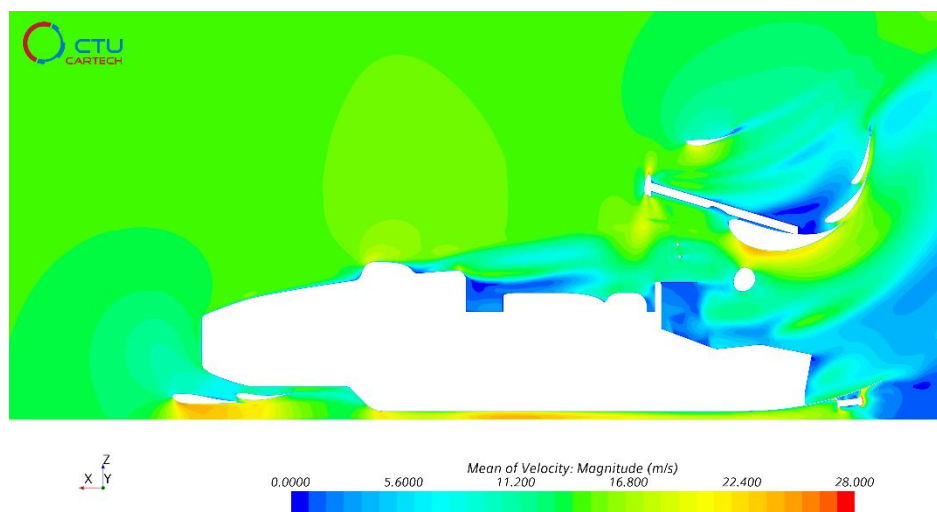


Obr. 28: Geometrie FS14_10_01_00 pohled zezadu

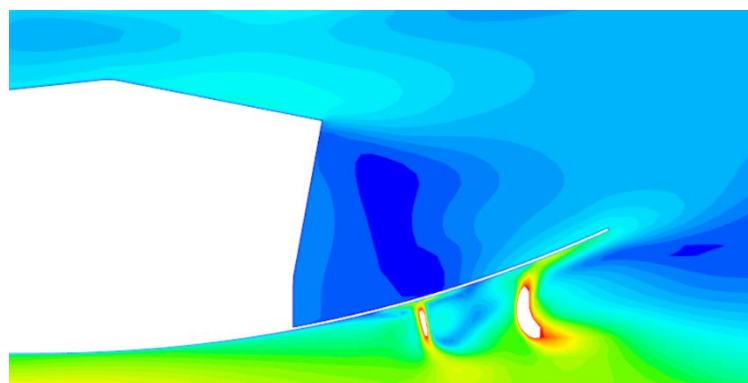
Ovšem z výsledků můžeme vidět, že tento design s využitím takovýchto dmychadel je naprosto nevyhovující. Vzhledem k jejich velikosti zde nedochází k téměř žádnému zvýšení přísavného efektu. Naopak zde na rozdíl od kontrolního difuzoru dochází k odtrhávání vzduchu (Obr. 27), což snižuje celkovou efektivitu proudění.

g0_cd (chassi)	0,241
g0_cl (chassi)	-0,341
g10_cd (diffuser)	-0,037
g10_cl (diffuser)	-0,231

Tabulka 2: Hodnoty c_d , c_l pro FS14_10_01_00



Obr. 29: Rychlost proudění pro FS14_10_01_00 v rovině XZ

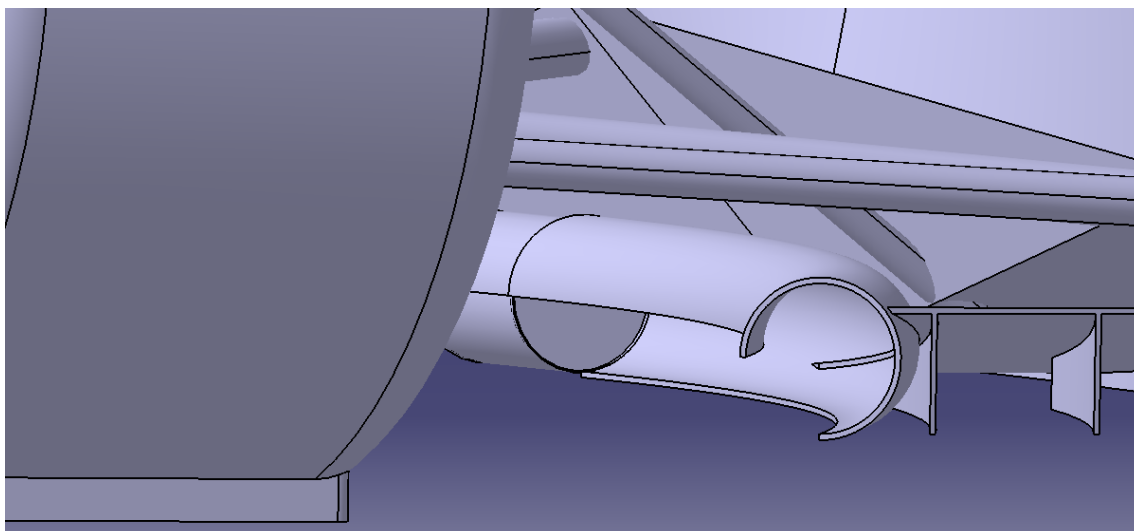


Obr. 30: Detail odtržení vzduchu

Vzhledem k nevyhovujícím výsledkům jsem se rozhodl tento koncept dále neupravovat, a proto jsem přešel k dalšímu designu.

10 FS14_10_02_00

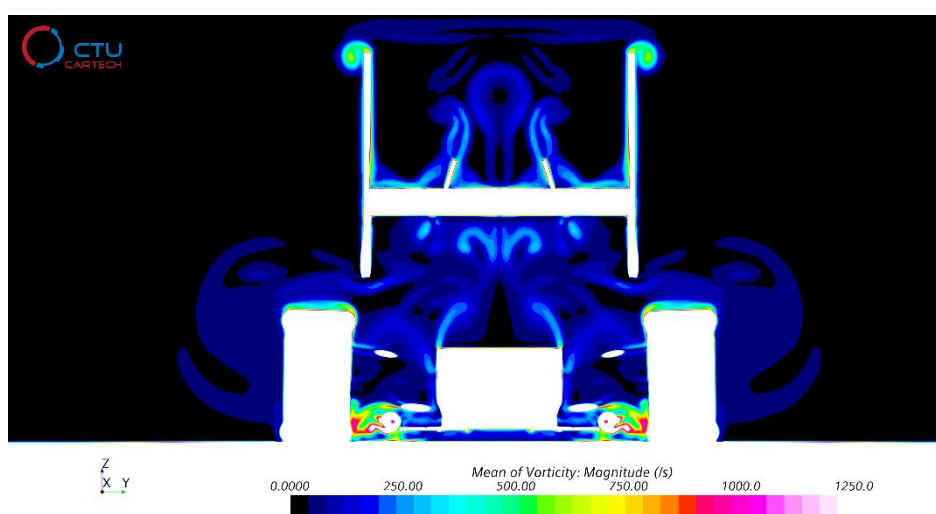
Hlavní konstrukční rozdíl spočívá v přesunutí dmychadel ze středu na vnější okraj. Vlastní řešení spočívá ve využití vzduchu, který po průchodu dmychadlem rotuje. Jeho rotace je pomocí kanálu usměrněna směrem k zadnímu kolu. Pro vyplnění volného místa mezi difuzorem a kanálem došlo k rozšíření expanze.



Obr. 31: Geometrie kanálu FS14_10_02_00

g0_cd (chassi)	0,232
g0_cl (chassi)	-0,362
g10_cd (diffuser)	0,044
g10_cl (diffuser)	-0,264

Tabulka 3: Hodnoty cd, cl pro FS14_10_02_00



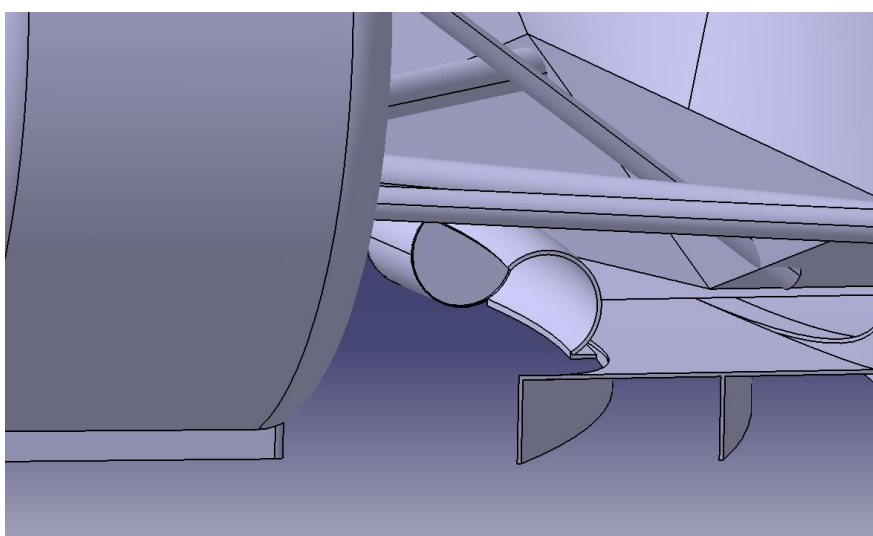
Obr. 32: Zvířený vzduch vytékající z kanálu směrem k zadnímu kolu, rovina XY



Hlavní nevýhodou této verze je skutečnost, že je potřeba, aby se jedno dmychadlo točilo v opačném směru než druhé. V opačném případě by vzduch na jedné straně stoupal pomocí zakřiveného kanálu vzhůru. To znamená nutnost výroby speciálního modelu rotoru, což by tedy vyžadovalo využití externí firmy.

10.1 FS14_10_02_01

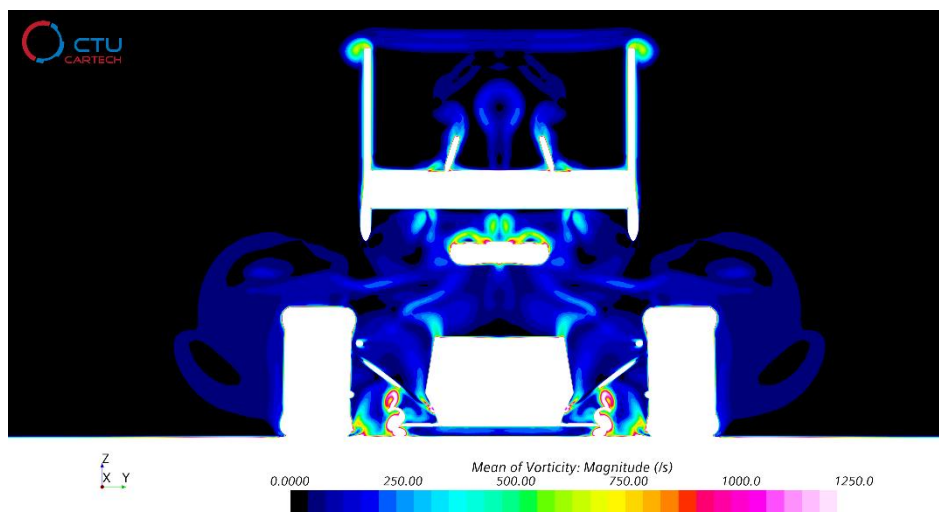
Hlavní změnou tohoto konstrukčního stavu bylo zkrácení kanálů na výstupu dmychadel. V předešlé verzi byly příliš dlouhé, a tím pádem byla jejich část zcela nevyužita. Zde proto došlo ke zkrácení o 200 mm. Následně ještě došlo k částečné úpravě tvaru kanálu.



Obr. 33: Geometrie FS14_10_02_01

g0_cd (chassi)	0,233
g0_cl (chassi)	-0,363
g10_cd (diffuser)	0,049
g10_cl (diffuser)	-0,257

Tabulka 4: Hodnoty cd, cl pro FS14_10_02_01



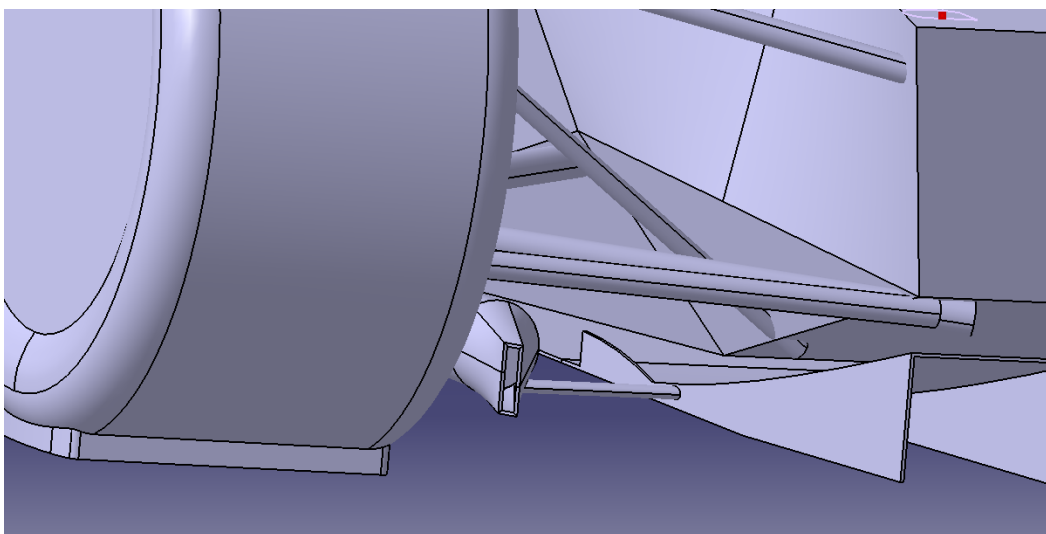
Obr. 34: Vířivost difuzoru FS14_10_02_01, rovina XY



11 FS14_10_03_00

Jako třetí možné řešení jsem zvolil možnost přesunutí samotných dmychadel co nejbližší ke kolům, kde by jimi produkovaný vysoce zviřený vzduch pomáhal odklonit zviřený vzduch od kol.

Pro lepší možnost usměrnění vzduchu z dmychadel byly vytvořeny usměrňovací kanály. Tyto kanály byly nasazeny na samotná dmychadla. Pro urychlení prodění byl jejich výstupní otvor zmenšen oproti vstupnímu otvoru (poměr 1:4). Výstupní otvor byl následně vymodelován do tvaru obdélníku

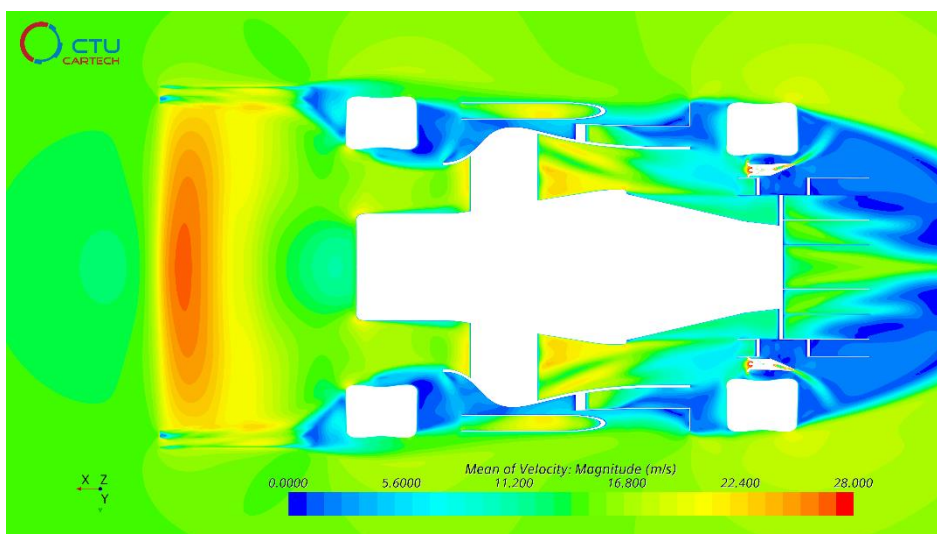


Obr. 35: Geometrie výstupní trysky

g0_cd (chassi)	0,233
g0_cl (chassi)	-0,339
g10_cd (diffuser)	0,056
g10_cl (diffuser)	-0,251

Tabulka 5: Hodnoty c_d , c_l pro FS14_10_03_00

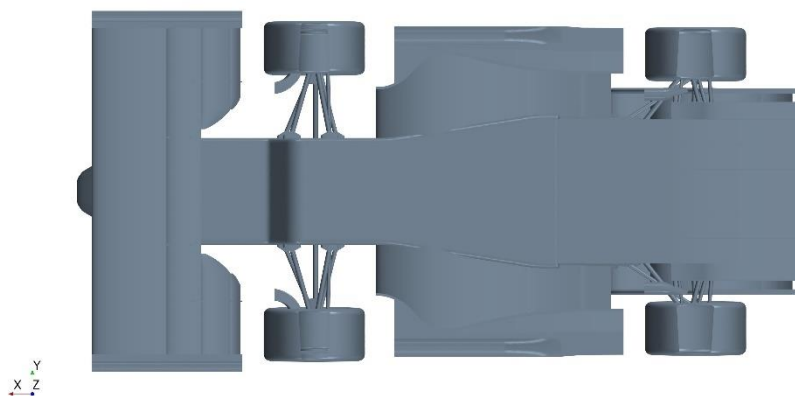
Z numerických a zejména grafických výsledků můžeme vidět, z jakého důvodu nedošlo k téměř žádnému zlepšení. Hlavní příčinou je umístění samotných dmychadel s přidavnými tryskami. Jsou umístěny v pozici, kde je hlavní proud vzduchu směřován až za zadní část kola.



Obr. 36: Rychlost proudění vzduchu v rovině XY, ukázka zle zvolené pozice

11.1 FS14_10_03_01

Vzhledem ke zle zvolené geometrii bylo nutné provést nutné úpravy. Tvar a velikost přídatné trysky zůstala stejná, ovšem celý systém se posunul na místo, kde bude hlavní proud zvířeného vzduchu směřován na přední část kola.



Obr. 37: Změna pozice

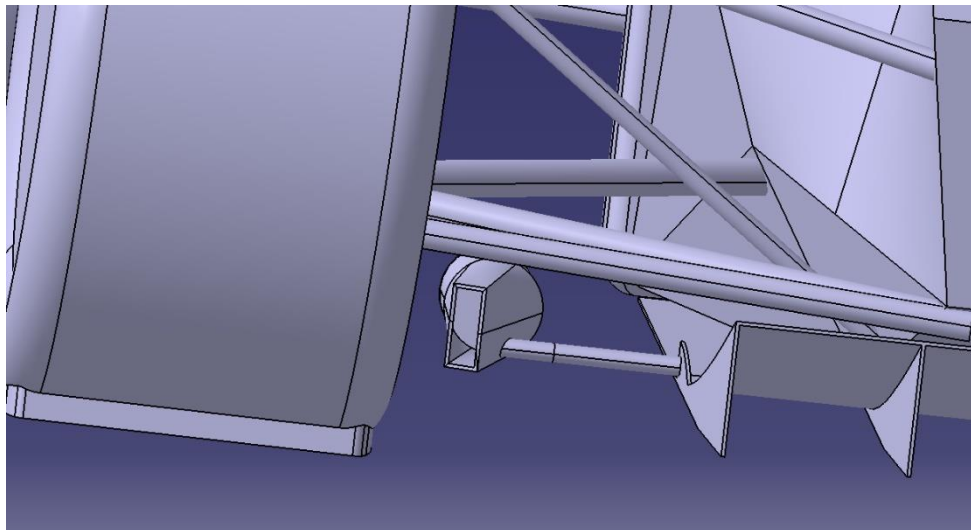
g0_cd (chassi)	0,232
g0_cl (chassi)	-0,357
g10_cd (diffuser)	0,052
g10_cl (diffuser)	-0,269

Tabulka 6: Hodnoty cd, cl pro FS14_10_03_01



11.2 FS14_10_03_02

Hlavní změnou vůči předchozí verzi je zvětšení výstupního otvoru přídavné trysky. Nový poměr velikosti vstupní a výstupní plochy je 2:1. Samotné umístění zůstalo zachováno.



Obr. 38: Změna velikosti výstupního otvoru

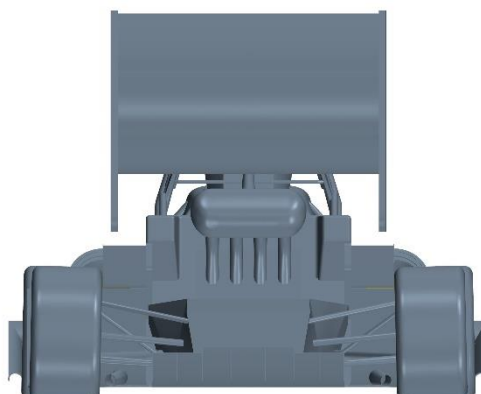
g0_cd (chassi)	0,230
g0_cl (chassi)	-0,354
g10_cd (diffuser)	0,053
g10_cl (diffuser)	-0,275

Tabulka 7: Hodnot c_d , c_l pro FS14_10_03_02



11.3 FS14_10_03_03

Další změnou v geometrii výstupní plochy trysky byl přechod na výstupní plochu kruhového tvaru. Pozice i poměr velikosti vstupní a výstupní plochy zůstal stejný jako v předchozí verzi FS14_10_03_02.



z

Obr. 39: Změna tvaru výstupní plochy

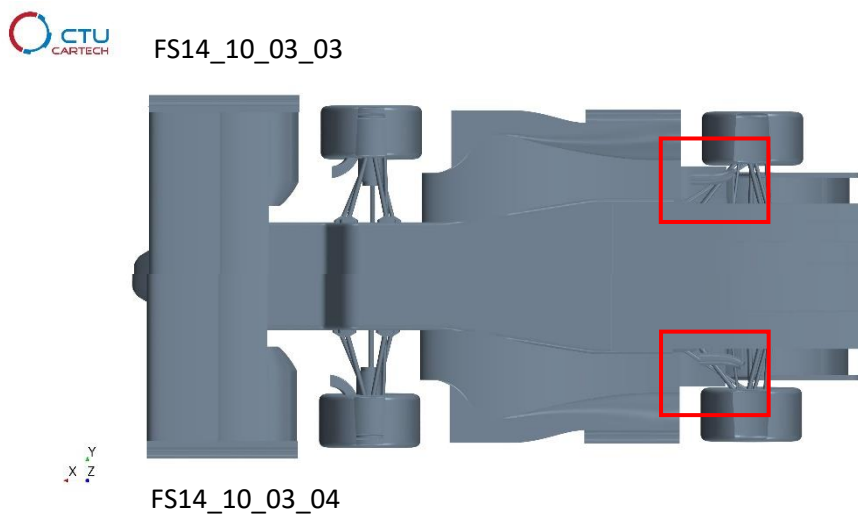
g0_cd (chassi)	0,238
g0_cl (chassi)	-0,353
g10_cd (diffuser)	0,025
g10_cl (diffuser)	-0,282

Tabulka 8: Hodnoty c_d , c_l pro FS14_10_03_03



11.4 FS14_10_03_04

Změna v této verzi ukazuje na skutečnost, v níž došlo k posunutí dmychadel blíže k samotnému difuzoru. Cílem bylo zjistit ideální umístění aktivního prvku pro maximalizaci



Obr. 40: Změna geometrie FS14_10_03_04

přítláčné síly.

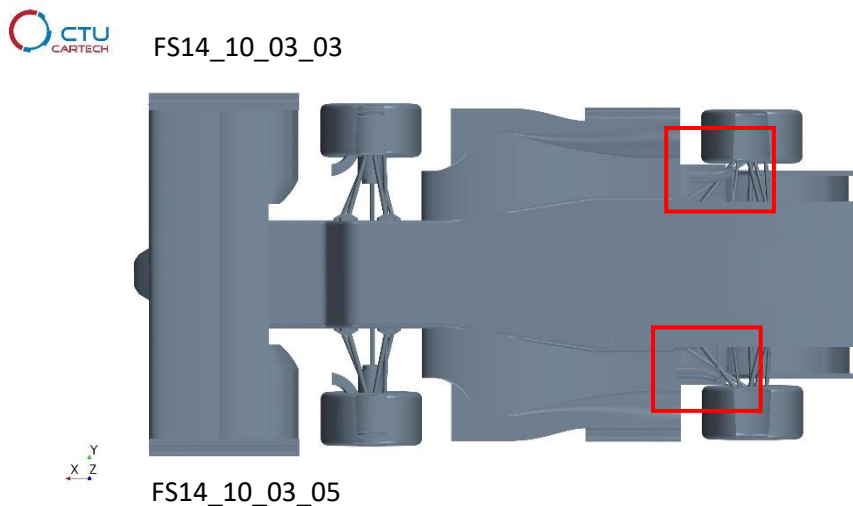
g0_cd (chassi)	0,237
g0_cl (chassi)	-0,355
g10_cd (diffuser)	0,021
g10_cl (diffuser)	-0,249

Tabulka 9: Hodnoty cd, cl pro FS14_10_03_04



11.5 FS14_10_03_05

Další změnou pozice byl posun vpřed o 50 mm, vzdálenost od difuzoru zůstala stejná jako u verze FS14_10_03_03.

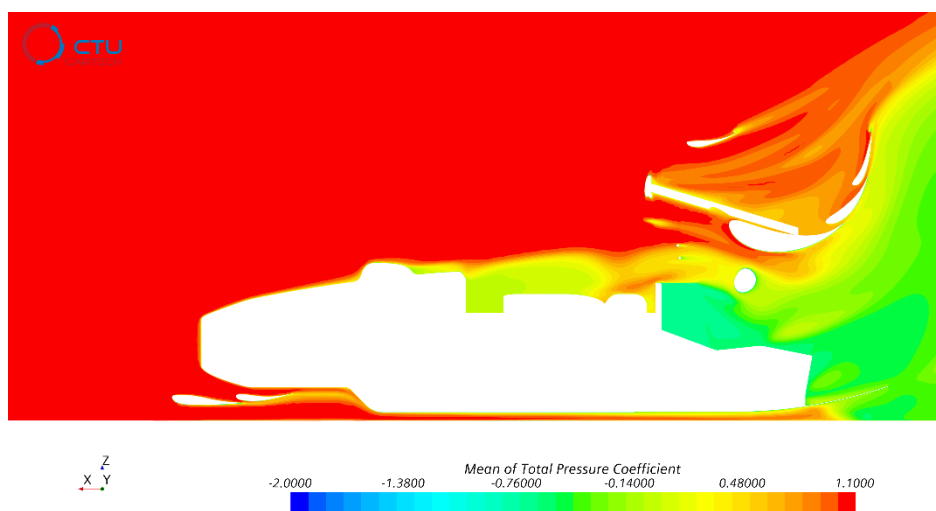


Obr. 41: Změna geometrie FS14_10_03_05

g0_cd (chassi)	0,232
g0_cl (chassi)	-0,353
g10_cd (diffuser)	0,027
g10_cl (diffuser)	-0,235

Tabulka 10: Hodnoty cd, cl pro FS14_10_03_05

Samotný posun ovšem způsobil, že dmychadlo odebíralo vzduch z části podlah, čímž zde došlo k odtržení vzduchu.



Obr. 42: Tlakové ztráty v rovině XZ



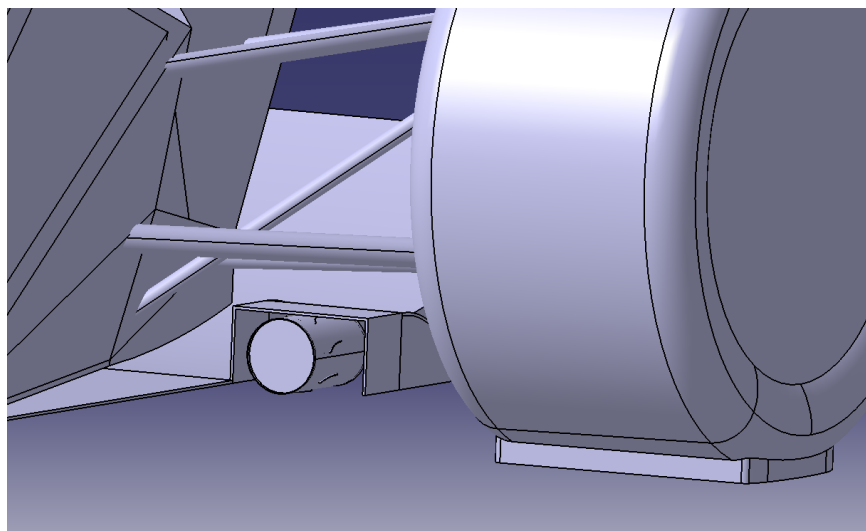
11.6 Zhodnocení konceptu FS14_10_03

Na rozdíl od předchozích řešení došlo ke kladnému přínosu díky využití aktivní aerodynamiky. Celkový přínos se pohyboval v okolí pěti procent.

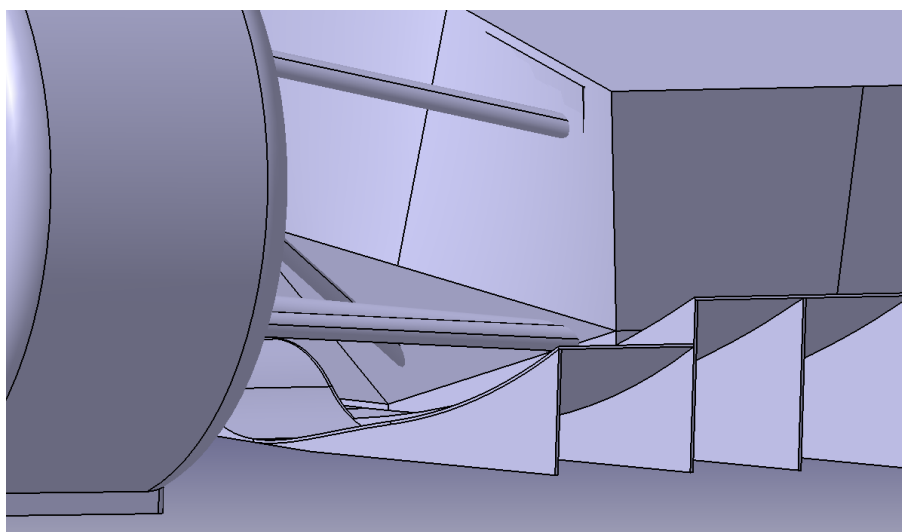


12 FS14_10_04_00

Čtvrtá velká konstrukční změna spočívala v umístění přídavného tunelu s vlastní kompresní a expanzní částí. Do vstupní části bylo umístěno dmychadlo. Jím urychlený vzduch je zde využit pro samotnou generaci aerodynamického přítlaku. Jeho zviřená část zde slouží pro vytvoření pomyslné bariéry, která brání vstupu víru od zadního kola.



Obr. 44: Geometrie difuzoru FS14_10_04_00



Obr. 43: Expanze přídavného tunelu

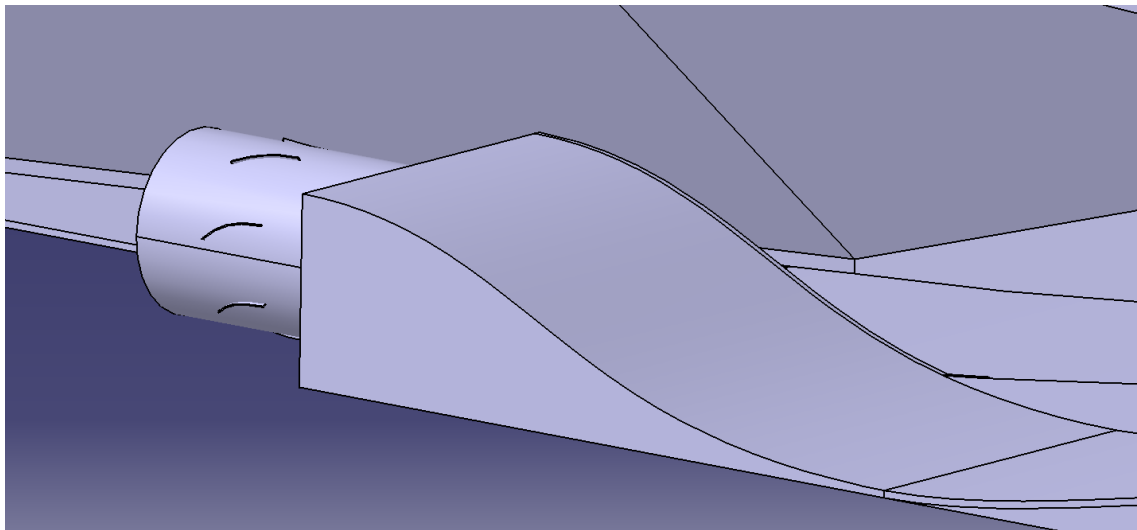
g0_cd (chassi)	0,236
g0_cl (chassi)	-0,320
g10_cd (diffuser)	0,019
g10_cl (diffuser)	-0,273

Tabulka 11: Hodnoty cd, cl pro FS14_10_04_00



12.1 FS14_10_04_01

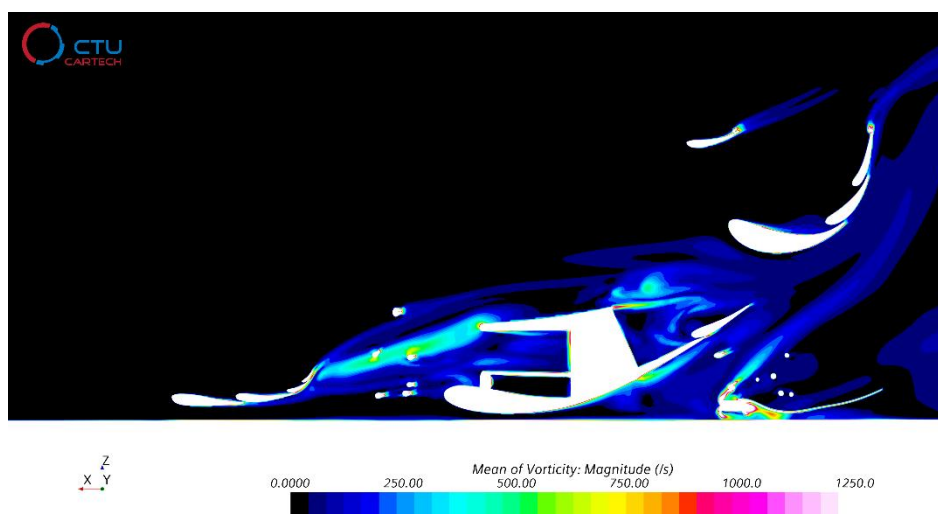
Jedná se o úpravu původní geometrie. Došlo ke zmírnění zakřivení tunelu v oblasti za umístěním dmychadla. Tato změna ovšem přinesla spíše zhoršení. Do spodní části se dostával vzduch s nižší energií a míra ovlivnění od zadních kol se zvýšila.



Obr. 45: Změna křivosti FS14_10_04_01

g0_cd (chassi)	0,238
g0_cl (chassi)	-0,321
g10_cd (diffuser)	0,015
g10_cl (diffuser)	-0,268

Tabulka 12: Hodnoty cd, cl pro FS14_10_04_01

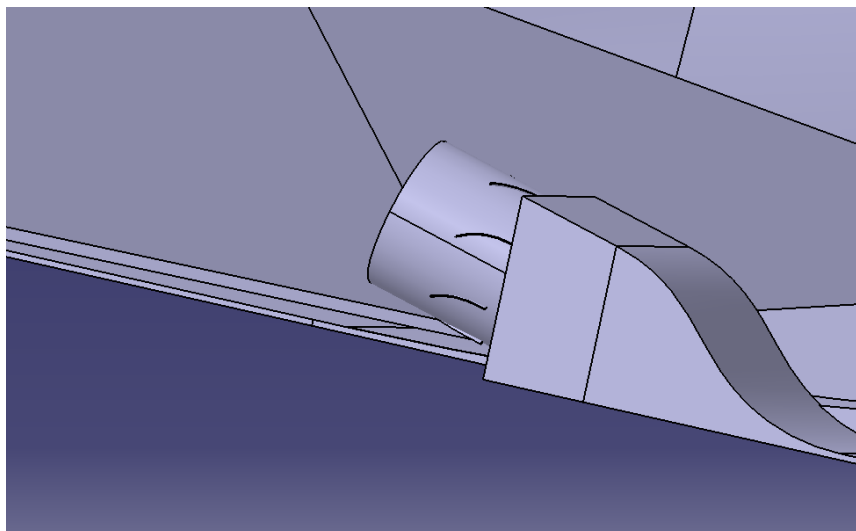


Obr. 46: Snížení energie víru v rovině XZ



12.2 FS14_10_04_02

Vzhledem k nevyhovujícím výsledkům předchozí verze FS14_10_04_01 zde došlo k úpravě pozice samotného dmychadla. Nově je nakloněno o 5°. Hlavním cílem bylo zachování energie zvířeného vzduchu.



Obr. 47: Naklonění dmychadla u FS14_10_04_02

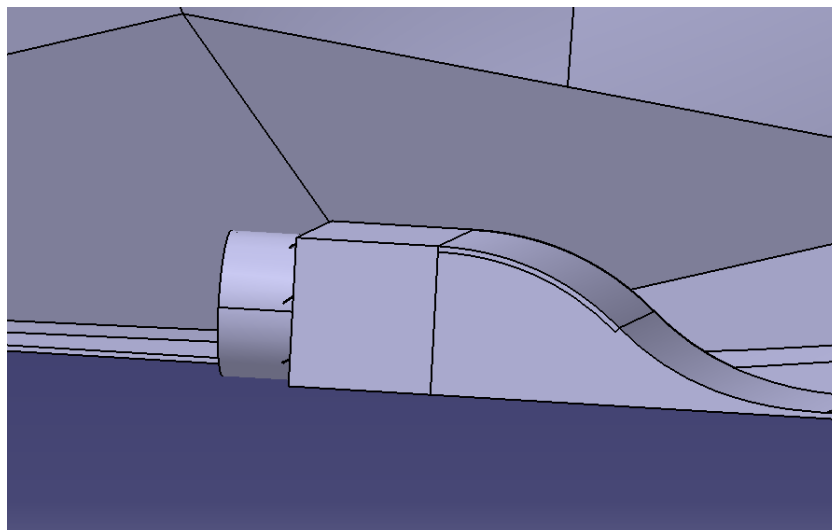
g0_cd (chassi)	0,238
g0_cl (chassi)	-0,319
g10_cd (diffuser)	0,027
g10_cl (diffuser)	-0,235

Tabulka 13: Hodnoty cd, cl pro FS14_10_04_02



12.3 FS14_10_04_03

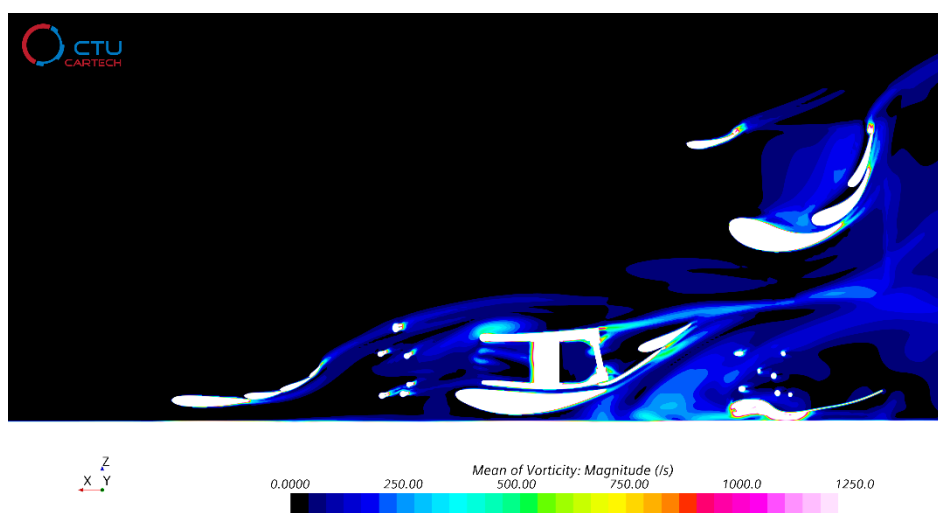
Díky většímu zakřivení na vstupu došlo k zachování energie zvířeného vzduchu. Ten následně lépe plní svou funkci a brání vstupu víru od zadního kola. Avšak neslouží pro generaci přitlaku z důvodu nedostatečné síly samotného dmychadla.



Obr. 48: Změna křivosti u FS14_10_04_03

g0_cd (chassi)	0,236
g0_cl (chassi)	-0,322
g10_cd (diffuser)	0,059
g10_cl (diffuser)	-0,285

Tabulka 14: Hodnoty cd, cl pro FS14_10_04_03

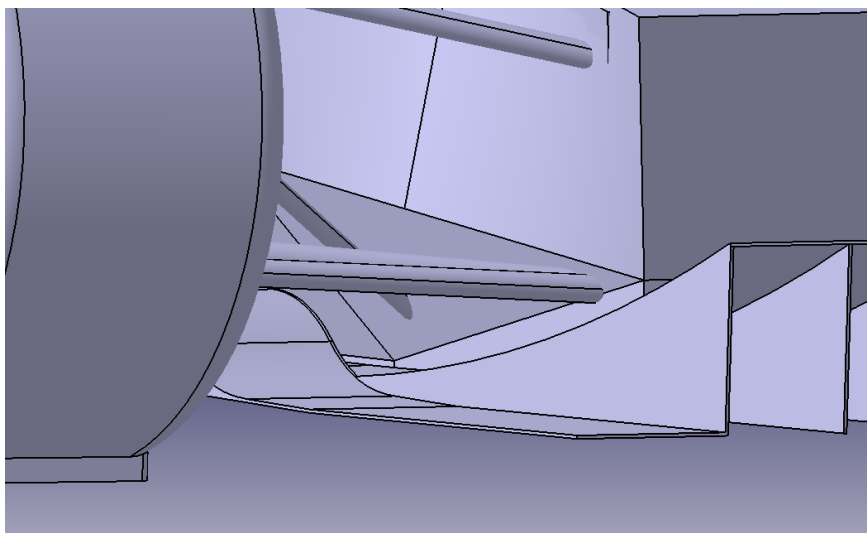


Obr. 49: Vířivost při větší křivosti v rovině XZ



12.4 FS14_10_04_04

Z poznatků předchozích verzí došlo k úpravě postranního tunelu, nyní zde už nedochází k expanzi v zadní části. Namísto toho se zde nachází pouze rovná deska. Ta kopíruje spodní hranu difuzoru.



Obr. 50: Geometrie tunelu pro FS14_10_04_04

g0_cd (chassi)	0,237
g0_cl (chassi)	-0,327
g10_cd (diffuser)	0,070
g10_cl (diffuser)	-0,298

Tabulka 15: Hodnoty cd, cl pro FS14_10_04_04

Po numerickém i grafickém zhodnocení všech testovaných verzí jsem jako finální design zvolil právě tento (FS14_10_04_04). Následně bylo nutno tento koncept otestovat i v jiných jízdních stavech a rychlostech.



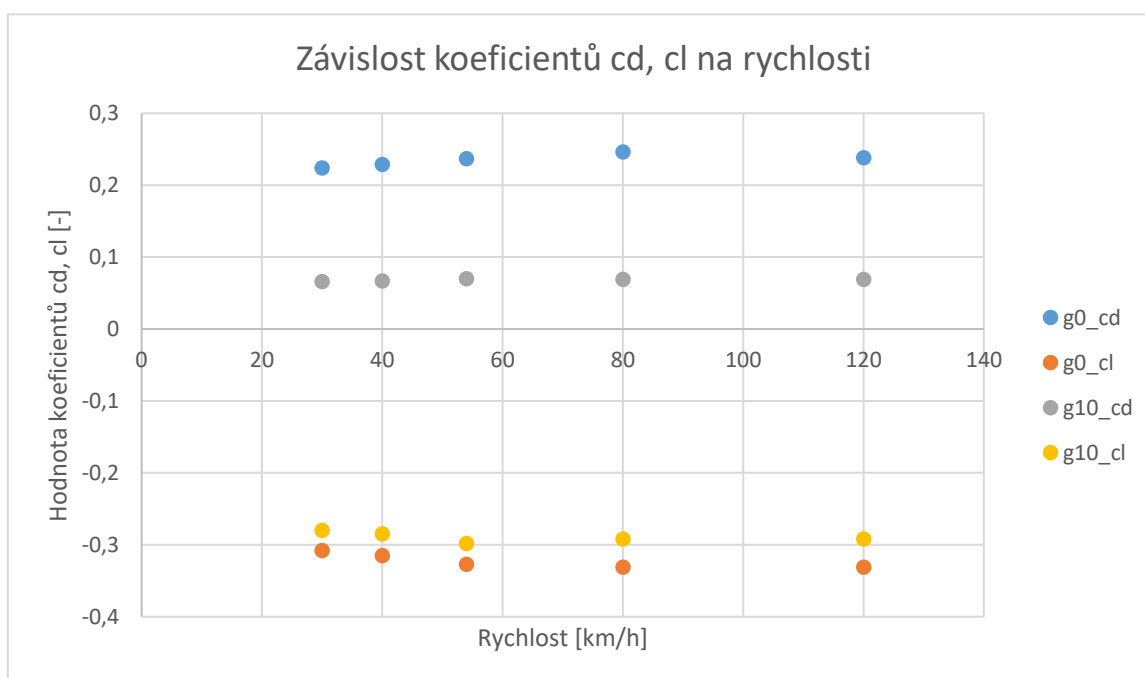
13 Testování ostatních jízdních stavů

Vzhledem ke skutečnosti, že všechny CFD modely byly testovány při rychlosti 54 km/h (15 m/s), bylo nutné verzi s nejlepšími výsledky otestovat i při jiných rychlostech. Nejvíce nás zajímají nižší rychlosti, tj. rychlosti vozu při průjezdu zatáčkami, kdy je potřeba dosáhnou co nejvyšší hodnoty aerodynamického přitlaku.

	30 km/h	40 km/h	54 km/h	80 km/h	120 km/h
g0_cd (chassi)	0,224	0,229	0,237	0,246	0,238
g0_cl (chassi)	-0,308	-0,315	-0,327	-0,335	-0,331
g10_cd (diffuser)	0,066	0,067	0,070	0,078	0,069
g10_cl (diffuser)	-0,280	-0,285	-0,298	-0,311	-0,292

Tabulka 16: Výsledky v různých rychlostech

Výsledky byly následně zaneseny do grafu, ze kterého lze vyčíst průběh koeficientů c_l , c_d pro každou rychlost formule.



Graf 1: Závislost koeficientů c_d , c_l na rychlosti

Z výsledků můžeme pozorovat, že při nižších rychlostech dochází k mírnému poklesu koeficientů c_d , c_l , ovšem tento pokles není příliš dramatický.

Dále můžeme sledovat také pokles při vyšší rychlosti. Ten je způsoben přehlcením samotných dmychadel, která nebyla pro takovou rychlost konstruována. Těchto rychlostí se ovšem na závodech Formula Student dosahuje pouze při soutěži v akceleraci, při níž by



navíc tento systém mohl být vypnutý, protože zde vozidlo žádný přidaný přitlak nepotřebuje.



14 Závěr

Cílem této práce bylo vytvořit návrh difuzoru s využitím aktivní aerodynamiky pro Studentskou formuli.

Z konečných výsledků lze pozorovat, že takovéto využití aktivní aerodynamiky má pozitivní vliv na výkon závodního vozu. Celkový přínos přítláčné síly generované difuzorem činí 10 %, což mi při využití takto malých dmychadel připadá jako dostatečné. Současné hodnoty koeficientů jsou $c_l = -0,298$ a $c_d = 0,070$. Pro zvýšení účinku by bylo nutné přejít na větší dmychadla s výkonnějšími motory. To by však znamenalo podstatnou změnu celé konstrukce.

Celá práce také poslouží jako cenné podklady pro vývoj formule v následujících sezónách, za předpokladu nedojde-li k opětovné změně pravidel.



15 Použitá literatura a zdroje

- [1] KATZ, Joseph. Race car aerodynamics: designing for speed. Cambridge, MA, USA: R. Bentley, c1995. ISBN 0837601428
- [2] Formula Student Germany. FSG Rules & Important Documents [Online]. FSG, cit. Dostupné z <https://www.formulaStudent.de/fsg/rules/>
- [3] ION Racing: Competition [online]. [cit. 2022-02-03]. Dostupné z: <https://www.ionracing.no/competition/>
- [4] 9GAG: Tatra aerodynamics advertisement cirka 1930 [online]. [cit. 2022-02-03]. Dostupné z: <https://9gag.com/gag/am5Nrqy>
- [5] Drag coefficient. *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2022-02-03]. Dostupné z: https://en.wikipedia.org/wiki/Drag_coefficient
- [6] PETROBLOGWEB: Turbulent flow/Non-Darcy flow [online]. [cit. 2022-02-03]. Dostupné z: <https://petroblogweb.wordpress.com/>
- [7] HOTCARS: Chaparral 2j: Here's How It Worked And What Happened When It Raced [online]. [cit. 2022-02-03]. Dostupné z: <https://www.hotcars.com/chaparral-2j-see-how-it-worked-and-what-happened-when-it-raced/>
- [8] AUTOSPORT: How Brabham's one-hit wonder was boxed into a corner [online]. [cit. 2022-02-03]. Dostupné z: <https://www.autosport.com/f1/news/brabhams-one-hit-wonder-f1/6506138/>
- [9] INSTAGRAM: Rennstall Esllingen [online]. [cit. 2022-02-03]. Dostupné z: <https://www.instagram.com/p/CZAWvUJL335/>
- [10] INSTAGRAM: Rennteam UNI Stuttgart [online]. [cit. 2022-02-03]. Dostupné z: https://www.instagram.com/p/CZe_DU2rSIN/