FAKULTA
STROJNÍ
ČVUT V PRAZE

Ústav automobilů, spalovacích motorů a kolejových vozidel

Návrh a aerodynamika bočního krytu na vozidle Formula Student

Formula Student Sidepods – Design and Aerodynamics

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE
2019

Otakar VOLEK

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

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Volek** Jméno: **Otakar** Osobní číslo: **461818**

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 a aerodynamika bočního krytu na vozidle Formula Student

Název bakalářské práce anglicky:

Formula Student Sidepods - Design and Aerodynamics

Pokyny pro vypracování:

Zpracujte řešerši využití aerodynamických prvků na vozidlech Formule Student. V CAD systému proveďte návrh tvaru bočního aerodynického krytu (sidepod). Proveďte potřebné 2D a 3D numerické simulace za účelem vyhodnocení parametrů charakterizujících účinek navrženého aerodynamického prvku a nalezení jeho nejvhodnějšího tvaru a konstrukce.

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: **18.04.2019** Termín odevzdání bakalářské práce: **10.07.2019**

Platnost zadání bakalářské práce:

Ing. Petr Hatschbach, CSc.	doc. Ing. Oldřich Vítek, Ph.D.	prof. Ing. Michael Valášek, DrSc.
podpis vedoucí(ho) práce	podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry	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.

30. 4. 2019 — Datum převzetí zadání

Otakar Volek — Podpis studenta

CVUT-CZ-ZBP-2015.1

© ČVUT v Praze, Design: ČVUT v Praze, VIC

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci s názvem: „Návrh a aerodynamika bočního krytu na vozidle Formula Student“ vypracoval samostatně pod vedením Ing. Petra Hatschbacha, CSc., s použitím literatury, uvedené na konci mé bakalářské práce v seznamu použité literatury.

V Praze 18. 7. 2019 **Otakar Volek**

Poděkování

Rád bych poděkoval kolegům z týmu CTU CarTech, Ing. Lukáši Pacoňovi a Martinu Ševčíkovi za cenné rady v rámci vývojové i výrobní fáze a za obeznámení s ovládáním použitých softwarů. Dále Ing. Janu Čížkovi, PhD. a Ing. Janu Punčochářovi z firmy 4Jtech za zprostředkování měření tlakové ztráty chladícího výměníku a vedoucímu práce Ing. Petru Hatschbachovi, CSc. za cenné rady a připomínky při psaní práce.

Anotační list

Jméno autora:	Otakar Volek	
Název BP:	Návrh a aerodynamika bočního krytu na vozidle Formula Student	
Anglický název:	Formula Student Sidepods – Design and Aerodynamics	
Rok:	2019	
Studijní program:	B2342 Teoretický základ strojního inženýrství	
Obor studia:	2301R000 Studijní program je bezoborový	
Ústav:	Ústav automobilů, spalovacích motorů a kolejových vozidel	
Vedoucí BP:	Ing. Petr Hatschbach, CSc.	
Bibliografické údaje:	počet stran	29
	počet obrázků	29
	počet tabulek	15
Klíčová slova:	Formula Student, aerodynamika, CFD, sidepod (boční kryt),	
Keywords:	Formula Student, aerodynamics, CFD, sidepod	

Anotace:

Účelem práce bylo pomocí CFD výpočtů navrhnout a optimalizovat tvar bočního krytu pro monopost soutěže Formula Student FS.10 týmu CTU CarTech tak, aby celý vůz disponoval co nejlepší aerodynamickou efektivitou. V práci byly ozkoušeny různé koncepty a konstrukce. Na základě výsledků z CFD simulací byl poté zvolen finální tvar použitý na voze.

Abstract:

The aim of this thesis was to design and optimize shape of the sidepod for CTU CarTech's Formula Student car FS.10, using CFD simulations to achieve the best possible aerodynamic efficiency on the whole car. Throughout this thesis, different concepts were tested and based on the CFD simulations results, the final shape used on the vehicle was chosen.

Obsah

1 Úvod **1**
1.1 Formula Student 1
1.2 Základní principy aerodynamiky 1
1.3 Omezení pravidly 3
2 Různé koncepty vozů, rešerše **4**
2.1 Rozdělení chladícího a výfukového ústrojí 5
2.1.1 Tlumič hluku na boku vozidla 5
2.1.2 Dva menší chladiče po stranách 6
2.2 Koncepty samotných bočnic 6
3 Nastavení CFD simulací **9**
4 FS.10 ..... **11**
4.1 Vyhodnocení 11
4.2 Základní návrhy 12
4.2.1 Koncepty 12
4.3 Úpravy tvaru krytu 16
4.3.1 Snížení zadního zvednutí (SP_1_4) 16
4.3.2 Zúžení sidepodu vzadu (SP_1_5) 17
4.3.3 Zvednutí vstupního otvoru do výšky (SP_1_6) 17
4.4 Dodatečné aerodynamické prvky 18
4.4.1 Svislá klapka před zadním kolem (SP_1_7) 19
4.4.2 Kaskáda klapek (SP_1_8) 19
4.5 Ustavení šířky sidepodu a klapek vzadu 21
4.6 Stanovení velikosti a úhlů náběhu klapek 22
4.7 Úprava vstupu 23
4.8 Poslední kontrola 25
5 Budoucí zlepšení simulací 25
5.1 Měření tlakové ztráty chladícího výměníku 25
5.2 Zakomponování porézního média do výpočtu 26
6 Závěr 28

1 Úvod

Boční kryty u formulových vozů slouží většinou primárně k uschování chlazení. Je však důležité, aby tyto kryty, v angličtině „sidepody“, byly navrženy aerodynamicky pro zlepšení přítlaku, případně snížení odporu, za účelem zvýšení rychlosti průjezdu zatáčkou a také maximální rychlosti vozu na rovinkách, ve snaze dosáhnout co nejlepšího času. Účelem této práce bylo seznámit se s principy aerodynamiky, základy metodiky CFD výpočtů a dle výsledných hodnot simulací navrhnout a zkonstruovat řešení s co nejlepším přítlakem (za cenu rozumného aerodynamického odporu) na prototypu vozu soutěže Formula Student týmu CTU CarTech.

1.1 Formula Student

Formula Student je studentská soutěž, jejíž počátky sahají do USA roku 1981, ve které je hlavním cílem navrhnout monopost pro „víkendového“ závodníka, připravit fiktivní plán na výrobu a prodej 1 000 kusů a zkonstruovat prototyp. Na soutěžích absolvují týmy dva druhy disciplín; tzv. statické a dynamické. Ve statických disciplínách je hlavním cílem prezentovat a obhájit svá řešení. Jedná se se o disciplíny Engineering Design, Cost and Manufacturing a Bussiness Plan. V dynamických disciplínách se hodnotí skutečné jízdní vlastnosti vozu, tedy čas na technicky odlišných tratích. Jedná se o akceleraci na 75 metrů, jízda v osmičkové trati o středním průměru kola 18,25 metrů a poté dvě disciplíny na hlavní, cca 1 kilometr dlouhé technické trati, jejíž charakteristika je do značné míry omezena pravidly (délka rovinky maximálně 80 metrů, minimální vnější poloměr zatáčky 9 metrů s nejmenší povolenou šířkou tratě 3 metry, výjimkou není ani slalom s minimálním rozestupem kuželů 9 metrů). První z těchto dvou disciplín je Autocross, ve kterém se hodnotí čas na jedno kolo. Podle časů v Autocrossu se též určuje pořadí startu do druhé disciplíny na této trati, hlavního závodu Endurance, vypsaného zpravidla na 22 km s povinnou výměnou pilotů uprostřed. Každá disciplína má své, pravidly definované, bodové ohodnocení, a celkovým vítězem se stává tým s největším bodovým součtem ze všech disciplín. [1] [2]

1.2 Základní principy aerodynamiky

Aerodynamika je odvětví fyziky zabývající se obtékáním plynů okolo pevných látek. Její základní cíl na závodních vozech je minimalizovat odpor a zvýšit přítlak, příp. snížit vztlak, který na závodních autech zpravidla nabývá záporných hodnot. Aby bylo možné tyto určit, je nutné získat představu o rozložení tlaku na ploše vozidla, rychlosti obtékání v jednotlivých místech a vztah mezi těmito dvěma veličinami.

V aerodynamice je velmi důležité grafické zobrazení zkoumaného proudění. K této

vizualizaci, vycházející z CFD výpočtů, slouží například křivky nazývané proudnice. Jedná se o křivky definované tak, že směřují vždy tečně k vektoru rychlosti proudění. Proudnice, mimo jiné, umožňují posoudit, zda se jedná o odtržené nebo přilnuté proudění. V případě přilnutého proudění proudnice v blízkosti povrchu vozidla přesně následují jeho tvar. Odtržené proudění, které většinou způsobuje nežádoucí úplav, se naopak od tvaru v určitém bodě odděluje. [3]

Další důležité termíny, kterým je třeba rozumět, jsou laminární a turbulentní proudění. Vizuálně bychom proudění označili za laminární v případě, že jej lze zobrazit uspořádanými proudnicemi, vedoucími ve směru proudění jako takového, a za turbulentní, pokud se i přes zachovávání obecného směru proudění částice pohybují chaoticky všemi směry. Početně rozlišujeme laminární a turbulentní prouděním Reynoldsovým číslem, kdy od určité hodnoty, definované jako kritické, výše považujeme proudění za turbulentní, a naopak níže za laminární. Pro nás se tato hodnota pohybuje okolo $10^5 - 10^7$.

$$Re\ [-] = \frac{\rho v L}{\mu} \quad (1)$$

Re = Reynoldsovo číslo $[-]$

ρ = Hustota média (v našem případě vzduchu) $\left[\frac{kg}{m^3}\right]$

v = Rychlost proudění $\left[\frac{m}{s}\right]$

μ = Dynamická viskozita $[Pa \cdot s]$

L = Charakteristický rozměr $[m]$

Základní rozdíl mezi těmito dvěma typy proudění je to, že turbulentní proudění způsobuje výrazně větší odpor třením po povrchu (friction drag). Na druhou stranu má větší tendenci zůstat přilnuté, čímž se dá zamezit odporu vzniklému úplavem (form drag). Pořád ale zbývá zodpovědět nejzásadnější otázku: „Kde se bere přítlak?“

Na tuto otázku lze odpovědět vícero způsoby podle různých teorií. Za zmínku stojí dvě hlavní. Dle Newtonových zákonů vzniká přítlak z principu akce a reakce. Velmi zjednodušeně řečeno, je-li předmět, například profil, umístěn tak, že tlačí obtékající vzduch nahoru (tj. působí na něj silou), pak tento vzduch musí zase silou působit směrem dolů na předmět. Další možné vysvětlení přítlaku vychází z Bernoulliho rovnice. [4][5]

$$\frac{p_1}{\rho} + \frac{v_1^2}{2} = \frac{p_2}{\rho} + \frac{v_2^2}{2} \quad (2)$$

p_1 = Tlak na horní straně profilu $[Pa]$

p_2 = Tlak na spodní straně profilu $[Pa]$

v_1 = Rychlost proudění po horní straně profilu $\left[\frac{m}{s}\right]$

v_2 = Rychlost proudění po spodní straně profilu $\left[\frac{m}{s}\right]$

ρ = Hustota média (vzduch) $\left[\frac{kg}{m^3}\right]$

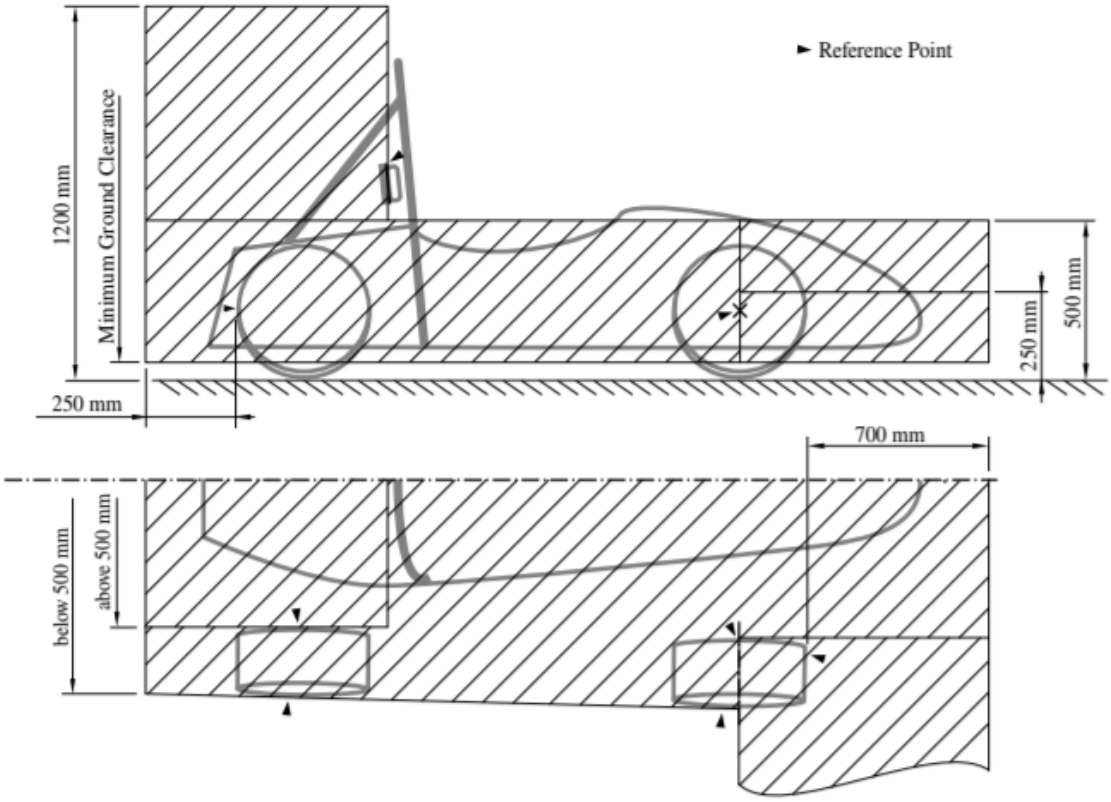
Ze vztahu vyplývá, že žádoucímu rozdílu tlaků je možné „pomoci“ také rozdílem rychlostí na horní a dolní straně profilu. Profily jsou proto konstruovány tak, aby se při náběhu na podtlakovou stranu vzduch stlačil, a tím byl dle zákona o zachování hmotnosti donucen zrychlit, čímž dochází ke snížení statického tlaku.

1.3 Omezení pravidly

Vůz týmu CTU CarTech je konstruován dle oficiálních pravidel soutěže Formula Student Germany, ve kterých nejsou, kromě ostrých hran, aerodynamické prvky nijak omezovány tvarem, nýbrž pouze obálkami vztaženými k různým prvkům vozidla. Pro bočnice jsou důležitá následující:

- Žádný aerodynamický prvek vpředu od opěrky hlavy pilota nesmí být vyšší než 500 mm od země.
- Všechny aerodynamické prvky za přední osou kol musí být užší než svislá rovina procházející vnějšími stěnami pneumatik

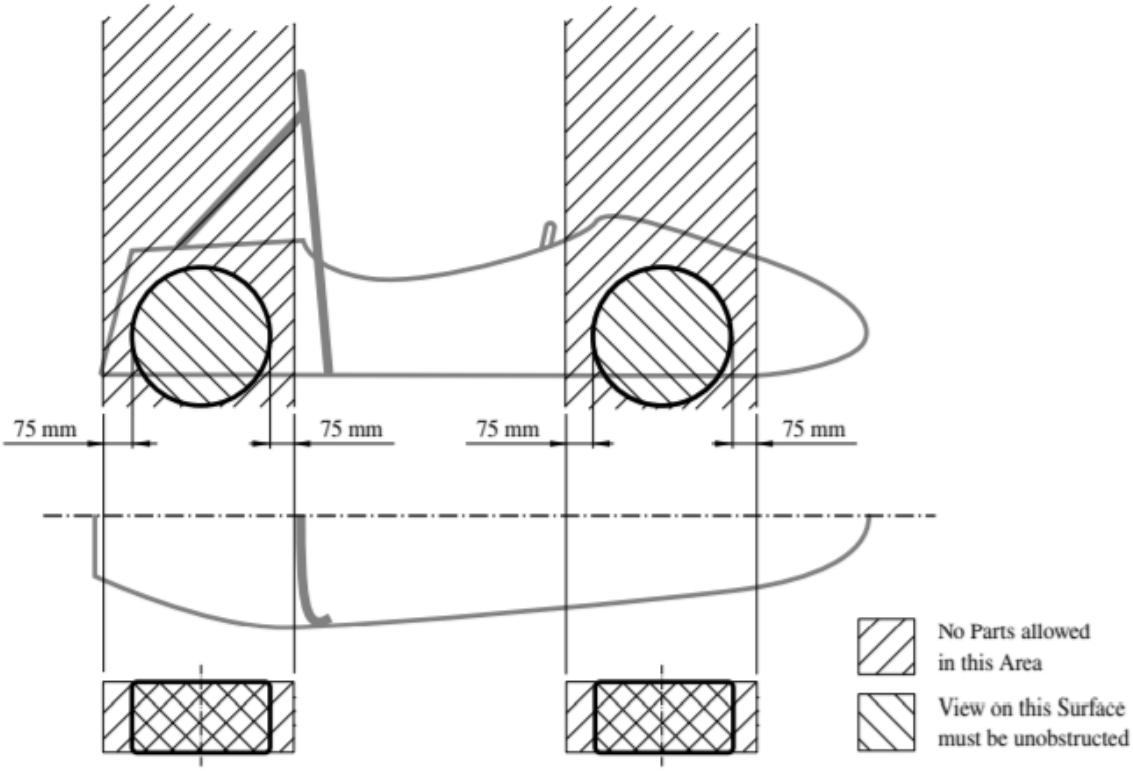
Všechna rozměrová omezení ukazuje Obrázek 1. [2]



Obrázek 1: Omezení aerodynamických prvků [2]

Kromě omezení specifikovaných přímo pro aerodynamické prvky je třeba počítat také s ochrannou obálkou okolo pneumatik, aby byla splněna podmínka nekrytých kol pro formulové

vozy. Tato „Keep-out“ zóna okolo každého kola je definována dvěma svislými čarami 75 mm před a za vnějším průměrem pneumatik, a jejich vytažením do strany od vnitřní po vnější rovinu pneumatik při nulovém natočení kol (Obrázek 2). [2]



Obrázek 2: Ochranná zóna kolem kol [2]

2 Různé koncepty vozů, rešerše

Pro nastudování aerodynamických základů pro použití na automobilech jsem čerpal většinově z knihy Race Car Aerodynamics od Josepha Katze [4], dále také z knihy Race Car Vehicle Dynamics (William F. Milliken, Douglas. L. Milliken), konkrétně z kapitoly 3, Aerodynamic Fundamentals [6]. Co se volby základních konceptů týče, vycházel jsem jednak z ověřených konceptů na minulých vozech týmu CTU CarTech ale také z často používaných řešení u vozů ostatních týmů. Zvolit však správnou variantu k inspiraci u vozidel Formula Student není snadný úkol, neboť vozy nejsou pravidly nijak omezeny, co se tvaru týče, ale pouze rozměry. Znamená to tedy, že vozy se od sebe dosti výrazně liší, a je poměrně složité najít nějaký trend, kterého se týmy při stavbě monopostů drží. V tomto případě komplikuje vyhodnocení i fakt, že, na rozdíl třeba od mechanických záležitostí, u aerodynamických prvků bývá velmi obtížné z prostého pohledu pouhým okem určit jejich účel, či jak dobře jej plní. Nicméně některé opakující se koncepty, v závislosti na rozložení chlazení a výfukového potrubí, lze pro zkoumanou část vozu u některých týmů přeci jen nalézt.

2.1 Rozložení chladícího a výfukového ústrojí

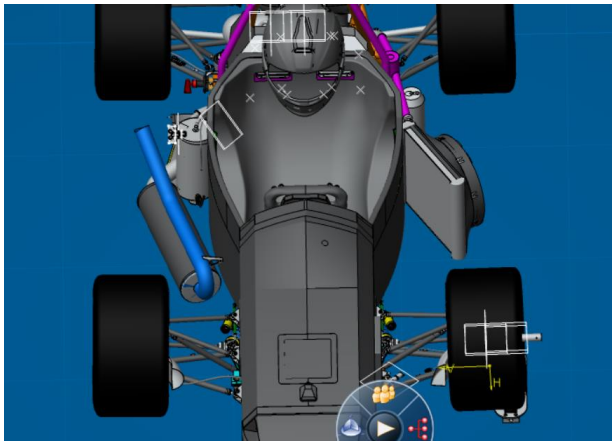
Vzhledem k variabilitě všech možných řešení u monopostů Formula Student je i styl provedení sidepodu závislý z velké části na rozložení jednoho nebo více chladících výměníků a výfukového potrubí. Přehled častých alternativ tohoto rozložení je uveden v Tabulka 1.

Tabulka 1: Zhodnocení konceptů vozu

Koncept	Jedna strana tlumič, druhá chladič	Dva chladiče po stranách, tlumič vzadu	Dva chladiče po stranách, tlumič „uprostřed“
Vůz CTU CarTech	FS.10	N/A	FS.11
Hmotnostní rozložení	-	-	+
Symetrické vlastnosti	-	+	+
Obtížnost provedení	+	0	-

2.1.1 Tlumič hluku na boku vozidla

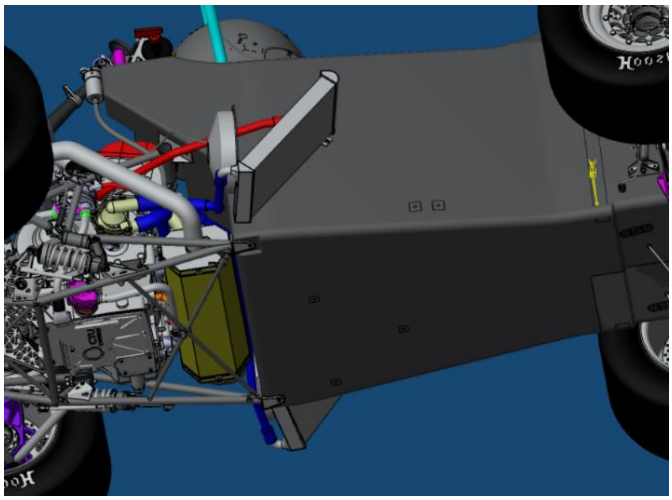
Vyvádění výfukového potrubí, zpravidla zakončeného tlumičem hluku, neboť i na ten jsou monoposty testovány, do boku, je velmi výhodné jak z hlediska jednoduchosti konstrukce, tak z hlediska momentu setrvačnosti. Tlumič, jakožto poměrně těžkou část je tak možné umístit velmi blízko k těžišti auta. Tento koncept byl také použit na voze FS.10 týmu CTU CarTech. Jeho hlavní nevýhodou jsou však jeho nesymetrické parametry hmotnostní i aerodynamické. Ty aerodynamické jsou způsobeny především tím, že logickým vyústěním této varianty, kdy jedna boční strana je obsazena tlumičem (a v případě vozu FS.10 se suchou vanou také externím rezervoárem na olej), je umístění jednoho hlavního chladiče na vodu na straně druhé, což způsobuje velmi odlišné chování proudění na obou stranách (Obrázek 3). Pro toto řešení je úkolem sidepodu vytvořit co nejsymetričtější podmínky pro externí aerodynamiku. Měl by tedy být navržen tak, aby dokázal zakrýt odlišné vnitřní ústrojí na obou stranách vozu a zároveň aby nebránil přístupu vzduchu do chlazení.



Obrázek 3: CAD model vozu FS.10 bez aerodynamických prvků. Na pravé straně vozu se nachází tlumič hluku a olejový rezervoár, na levé potom chladicí výměníku

2.1.2 Dva menší chladiče po stranách

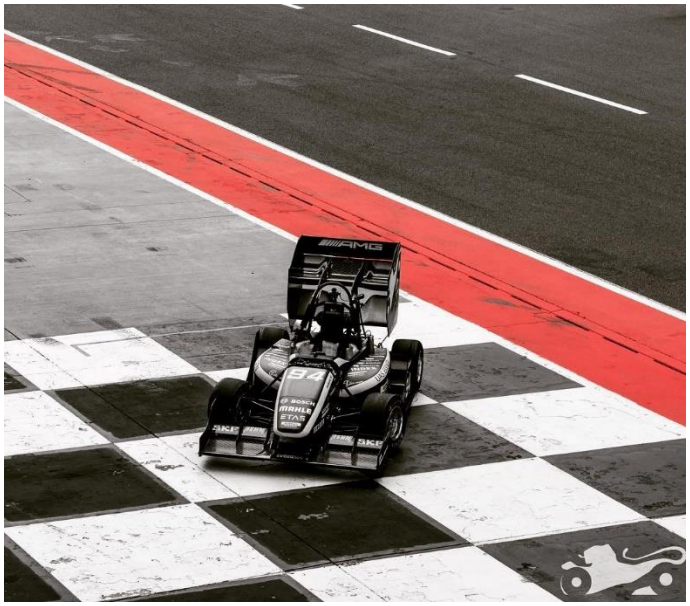
Aerodynamicky přívětivějším řešením je pak rozdělení chladícího výměníku na vodu na dva menší, a jejich umístění po stranách vozidla. V takovém případě je ovšem nutné navrhnout alternativní umístění tlumiče hluku. Konstrukčně jednodušší variantou je protažení výfukového potrubí na úplnou záď vozu, je to však velmi nepraktické z hlediska hmotnostního rozložení. Příznivější je umístit tlumič blíže k těžišti vozidla, čehož je na voze FS.11, který se drží tohoto konceptu, možné docílit „vmáčknutím“ tlumiče mezi uhlíkový monokok a motor, uchycený v trubkovém rámu. Řešení je velmi výhodné, co se jízdních vlastností vozidla týče, je ovšem velmi komplikované jednak z pohledu prostorového řešení výfukového potrubí, a jednak z teplotního působení svodů na kompozitní monokok (Obrázek 4).



Obrázek 4: CAD model vozu FS.11 se skrytými aerodynamickými prvky. Při pohledu zespodu je možné vidět pozice chladičů i tlumiče hluku

2.2 Koncepty samotných bočnic

U většiny konkurenceschopných týmů soutěže Formula Student se oblast bočnic skládá ze tří hlavních součástí. Podlahy, sidepodu a případného přidaného prvku před zadním kolem. „Podlaha“, tedy rovná nebo tvarovaná spodní deska sloužící jednak ke spodnímu uchycení krytu, ale také ke generování přítlaku. Často mívá tvar difuzoru, díky kterému se z ní stává jeden z nejdůležitějších přítlačných prvků na autě. I jako rovná však napomáhá co největšímu využití tzv. „ground effectu“, kdy nízká výška vozidla nutí vzduch na spodní straně proudit výrazně rychleji díky rovnici kontinuity, čímž dochází ke snížení tlaku. Dalším prvkem je boční kryt neboli sidepod sám o sobě. Pro první řešení, tj. tlumič hluku na jedné straně a chladící výměník na druhé, je úkolem sidepodu vytvořit co nejsymetričtější podmínky pro externí aerodynamiku. Měl by tedy být navržen tak, aby dokázal zakrýt odlišné vnitřní ústrojí na obou stranách vozu a zároveň aby nebránil přístupu vzduchu do chlazení. Dále je žádoucí jej optimalizovat pro co nejmenší hodnoty vztlaku. Toto řešení můžeme dobře vidět u vozu Stallardo 16 z esslingenské univerzity (Obrázek 5), či na voze F0711-10 týmu z německého Stuttgartu (Obrázek 6). U symetrických variant, kdy se na obou stranách nachází souměrně umístěné chlazení, je symetrie krytu víceméně automatická záležitost. U takovýchto konceptů je výrazně snadnější navrhovat kryt také na optimalizaci vnitřního proudění, neboť není potřeba tvar navrhovat s ohledem na zakrytí jiných prvků, jako např. právě zmiňovaný tlumič hluku. Posledním prvkem, který stojí za zmínku je v případě užšího zakončení krytu dodatečný element sloužící k zakrytí zadního kola. Tímto elementem může být jednak kolmá deska, která sama o sobě má menší vliv na odpor vozu než rotující zadní pneumatika, nebo například kaskáda aerodynamických profilů, kterou je též možno spatřit na obrázcích 5 a 6.



Obrázek 5: Vůz Stallardo 16 týmu Rennstall Esslingen. Na obrázku je dobře patrná právě zmiňovaná kaskáda klapek jednak k odstínění zadního kola a jednak k získání více přítlaku. [7]

Obrázek 6: Vůz F0711-10 týmu Rennteam Stuttgart. Podle koncovky výfuku lze odhadnout, že pravý sidepod ukrývá tlumič hluku, zatímco na levé straně je umístěn chladící výměník. Dále je opět možno vidět rovnou podlahu a klapky před kolem. [8]

3 Nastavení CFD simulací

Metodika CFD výpočtů pro tuto práci byla přebrána ze standardního výpočetního modelu v softwaru STAR CCM+ týmu CTU CarTech takto:

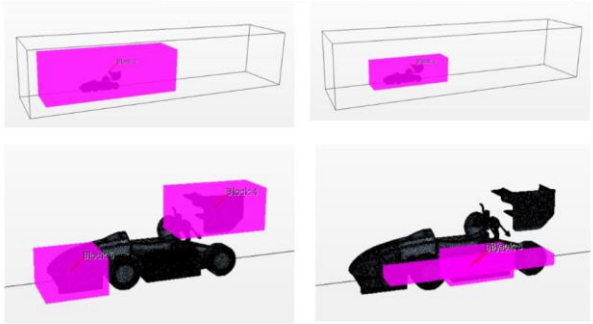
- ustálené proudění při rychlosti 15 m/s
- nestlačitelný vzduch
- ideální plyn
- chování okolo stěn y+
- RANS model (Reynolds averaged Navier – Stokes)
- Spalart – Allmaras model turbulentního proudění
- rotující kola
- pohybující se zem
- jedna polovina vozu, použita okrajová podmínka symetrie
- 400 iterací
- mnohostěnná síť (polyhedral mesh)
- zjemnění v oblastech mezní vrstvy (prism layer meshing)

Polyhedral mesh, tedy síť složená z různých mnohostěnů, dosahuje vůči standardnějším variantám, např. čtyřstěnným či šestistěnným elementům, značně vyššího počtu buněk. Výpočty s takovou sítí však konvergují výrazně rychleji. Velikost buňky byla dále značně zjemněna v oblastech kolem vozu, jak je vidět na Obrázek 7. Obrázek 8 poté ukazuje síť na povrchu monopostu. Na monokoku je na tomto obrázku také patrná hranice v blízkosti sidepodu, na které začíná další úroveň zjemnění. Další zjemnění sítě bylo též provedeno v bezprostřední blízkosti povrchu vozu pomocí šestistěnných elementů, aby bylo možné lépe zachytit vliv mezní vrstvy proudění. Tyto elementy jsou dobře patrné v řezu na Obrázek 9. Celkový počet buněk činil pro každý výpočet cca 8,5 milionu. [10]

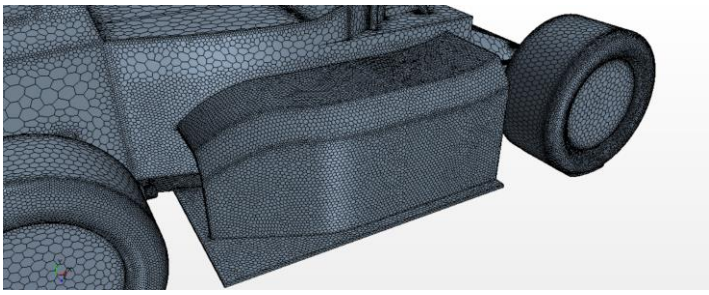
Mesh

- Polyhedral mesh
- Prism layer mesher – 6 layers
- Surface remesher
- 8,5mil cells

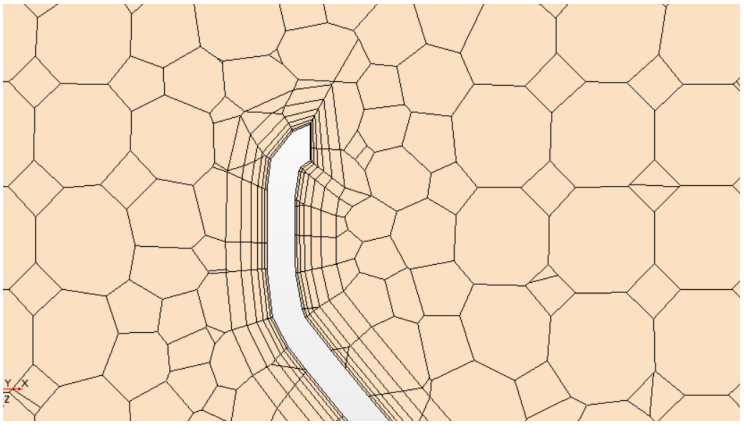
	Base size	1	2	5	6	7	8
Cell size [%]	100	40	10	2,5	2,5	2,5	2,5
Cell size [mm]	400	160	40	10	10	10	10



Obrázek 7: Oblasti zjemnění CFD sítě



Obrázek 8: Výsledná síť na povrchu vozu



Obrázek 9: Řez vstupem do sidepodu vodorovnou rovinou. Na obrázku je patrné zjemnění sítě na povrchu pro zachycení mezní vrstvy

4 FS.10

Jak již bylo výše zmíněno, vůz FS.10 byl kolegy z oddělení motoru navržen s tlumičem hluku a externí nádobou na olej na jedné (pravé) straně, a s jedním chladičem výměníkem na straně druhé. Aby byla konstrukce vozu alespoň z hlediska externí aerodynamiky co nejblíže symetrii, bylo rozhodnuto, že se boční část bude skládat z krytu, který pojme jak na jedné straně chladící výměník, tak na druhé straně tlumič hluku s olejovou nádobou (sidepod), dále z „podlahy“, z finančních důvodů pouze rovné desky na spodní straně bočního ústrojí a případných aerodynamických prvků před zadním kolem vozidla (viz dále).

4.1 Vyhodnocení

Vyhodnocení simulací při návrhu vozu FS.10 spočívalo primárně v celkovém přítlaku působícím na vozidlo, dále v přítlaku samotných bočnic a podílu přítlaku ku odporu vozidla, tj. aerodynamické efektivitě. Vzor výsledkové tabulky je uveden v Tabulka 2. Pro vizualizaci bylo použito rozložení tlaku po povrchu vozidla při jednotném rozsahu $(-650 - +190)\ Pa$. Dále zobrazení proudnic přes zkoumané oblasti vozu, případně řezy v rovinách, na kterých bylo možné zobrazit rychlost nebo tlak. V případě zobrazení rychlosti byla použita metoda „line integral convolution“ sloužící k zobrazení vektoru pomocí kombinace zobrazení absolutní hodnoty veličiny dle zadané barevné škály a krátkých úseků proudnic odstíny černé a šedé barvy [9]. Výstupy silových hodnot byly odečteny přímo z použitého výpočetního softwaru STAR CCM+, koeficienty byly poté přepočteny ze vztahů:

$$C_L = \frac{L}{\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot V_\infty^2 \cdot A_P} \quad (3)$$

$$C_D = \frac{D}{\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot V_\infty^2 \cdot A_F} \quad (4)$$

C_L = Koeficient vztlaku $[-]$

L = Vztlaková síla $[N]$

V_∞ = Rychlost proudění v neovlivněném místě $\left[\frac{m}{s}\right]$

ρ = Hustota vzduchu $\left[\frac{kg}{m^3}\right]$

A_P = Plocha průmětu zkoumané části při půdorysném pohledu $[m^2]$

C_D = Koeficient odporu $[-]$

D = Odporová síla $[N]$

A_F = Plocha průmětu objektu při čelním pohledu $[m^2]$

Další často zmiňovaná veličina, aerodynamická efektivita je poté definována jako poměr vztlakové a odporové síly, $\frac{L}{D}\,[-]$.

Tabulka 2: Vzor vyhodnocovací tabulky při návrhu FS.10

FW	Diff	Chassi	RW
Přítlak: Odpor: C_L: C_D:	Přítlak: Odpor: C_L: C_D:	Přítlak: Odpor: C_L: C_D:	Přítlak: Odpor: C_L: C_D:

Sidepod
Přítlak: Odpor: C_L: C_D:

Průtok [kg/s]
Sidepod:

Rozvážení	
Front	Rear

Car
Přítlak: Odpor: C_L: C_D:

4.2 Základní návrhy

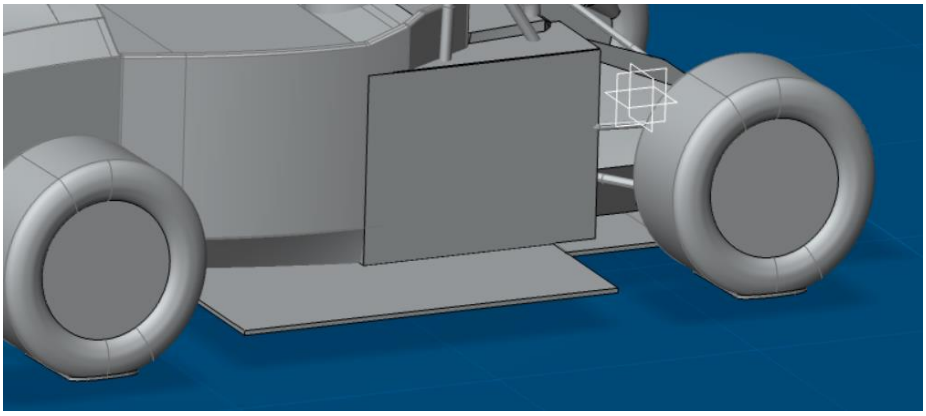
Jak již bylo zmíněno, aerodynamické prvky nejsou v soutěži tvarově omezeny, proto mohl být kryt tvarován naprosto libovolně. Na úplný začátek bylo tedy nutné stanovit základní návrh, který bylo poté možno optimalizovat.

4.2.1 Koncepty

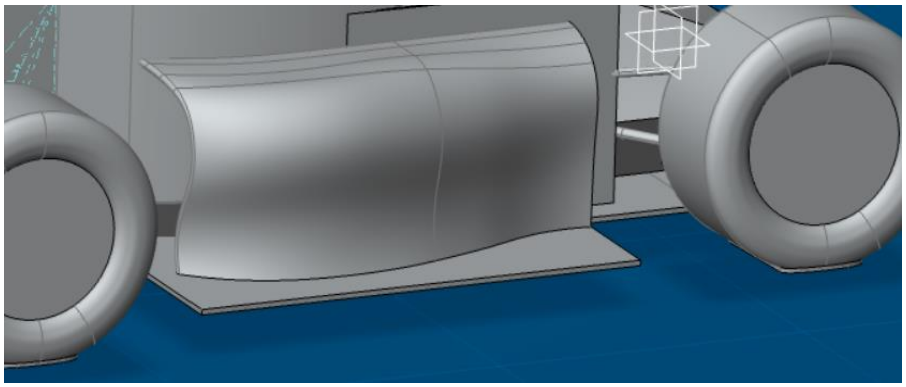
Pro vytvoření základní představy proudění vzduchu v dotyčných oblastech byla nejdříve provedena simulace vozu jen s rovnou podlahou, bez dalších prvků po jeho boku (SP_1_1, Obrázek 10), pro stanovení referenčních hodnot, a následně simulace s dvěma různými koncepty sidepodů, konkrétně s jedním ve tvaru, který bývá nazýván „Coke bottle shape“, tj. sidepod zužující se směrem dozadu, tvořený s cílem maximálně snížit odpor samotného dílu (SP_1_2, Obrázek 11), a sidepod zakrývající i zadní kolo vozidla, na konci zvednutý ve snaze získat na jeho konci nějaký dodatečný přítlak a „odstínit“ zadní kolo, jakožto jeden z největších potenciálních zdrojů aerodynamického odporu v blízkosti zkoumané oblasti (SP_1_3, Obrázek 12). Přehledně jsou varianty zapsány v Tabulka 3.

Tabulka 3: Přehled prvních konceptů

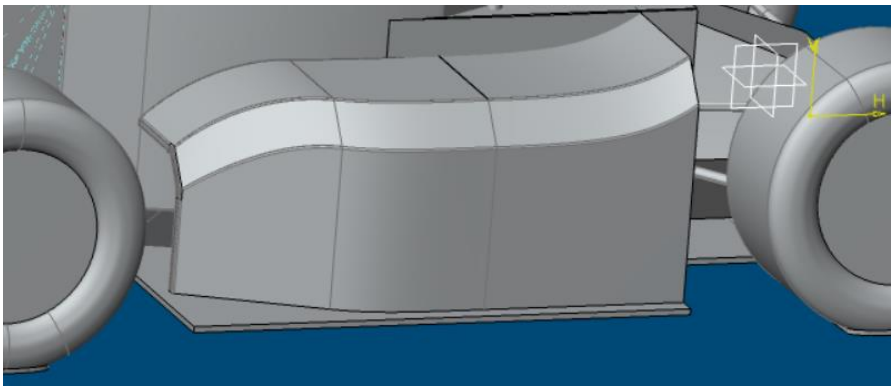
SP_1_1	SP_1_2	SP_1_3
Pouze rovná podlaha	"Coke bottle shape"	Široký sidepod se zvednutím



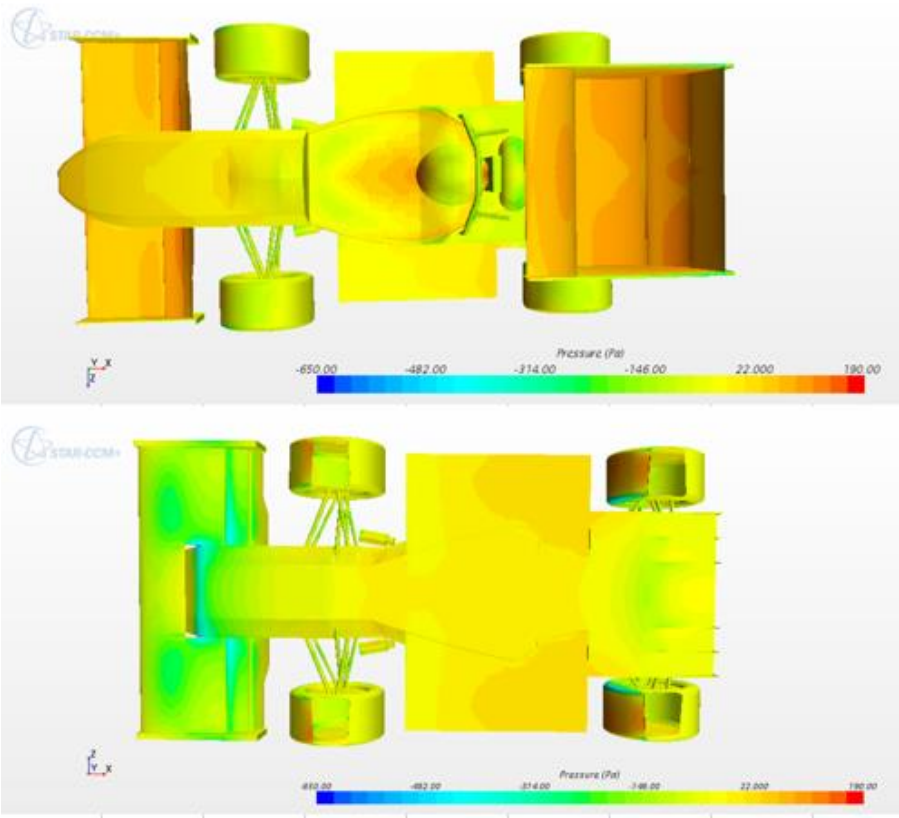
Obrázek 10: CFD model konceptu SP_1_1



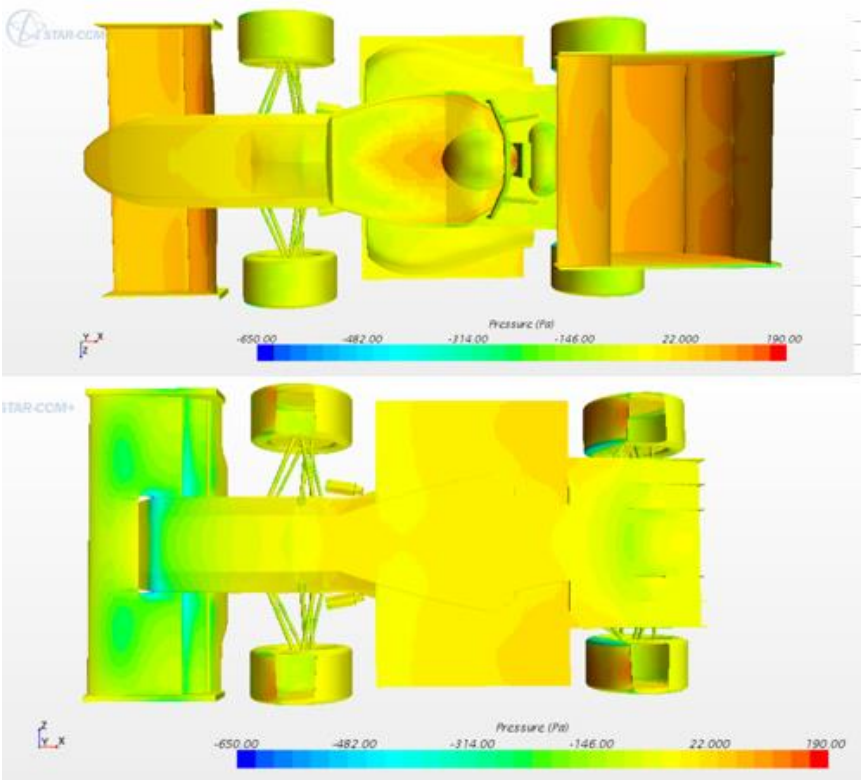
Obrázek 11: CFD model konceptu SP_1_2



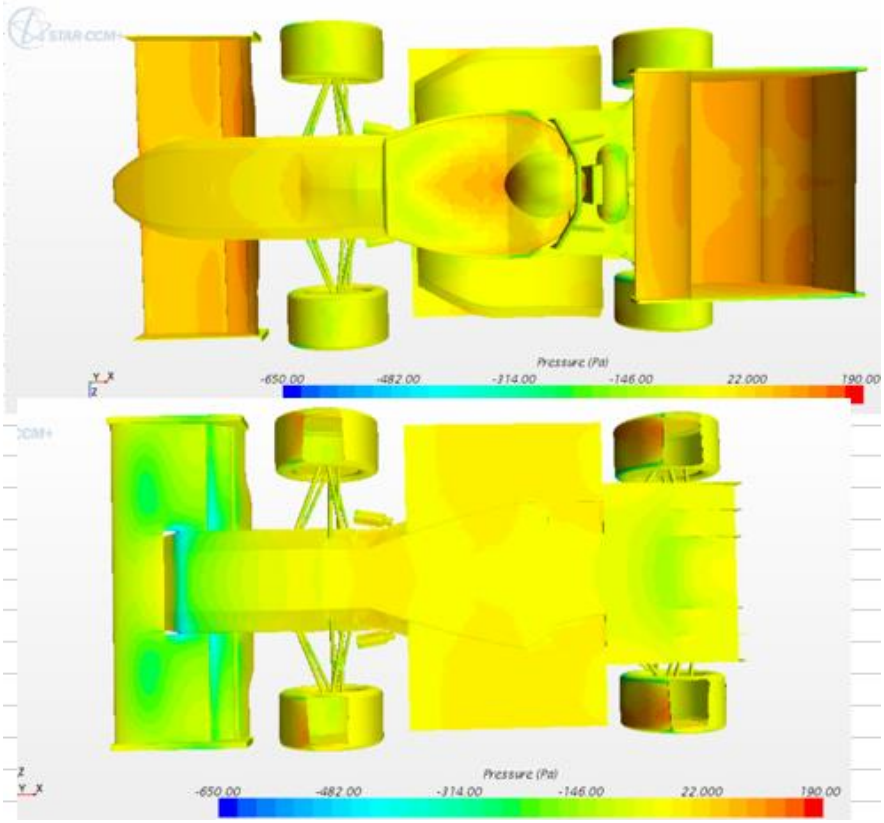
Obrázek 12: CFD model konceptu SP_1_3



Obrázek 13: Rozložení tlaků při spodním a vrchním pohledu u varianty SP_1_1



Obrázek 14: Rozložení tlaků při spodním a vrchním pohledu u varianty SP_1_2



Obrázek 15: Rozložení tlaků při spodním a vrchním pohledu varianty SP_1_3

Tabulka 4: Číselné srovnání zkoumaných hodnot na třech základních konceptech

SP_1_1		SP_1_2		SP_1_3	
Car		Car		Car	
Vztlak:	-280,1 N	Vztlak:	-271,3 N	Vztlak:	-282,4 N
Odpor:	187,5 N	Odpor:	181,5 N	Odpor:	178,2 N
L/D	-1,49	L/D	-1,49	L/D	-1,58

Výsledné rozložení tlaků pod a nad vozidlem bez bočních krytů a pouze rovnou podlahou ukazuje Obrázek 13. Tabulka 4 potom ukazuje výsledný vztlak, odpor a výslednou aerodynamickou efektivitu všech tří počítaných konceptů. U varianty SP_1_2, tedy tzv. „coke bottle shape“, jejímž cílem bylo co nejvíce snížit aerodynamický odpor oblasti, si můžeme všimnout výrazného poklesu aerodynamického odporu, ovšem za cenu poměrně výrazného vztlaku. Při pohledu na Obrázek 14, který zobrazuje rozložení tlaku na spodní i vrchní straně vozidla si můžeme všimnout, že na spodní straně vozu je pro variantu SP_1_2 tlak znatelně menší (menší obsah „oranžové plochy“). Přítlak však není generován pouze nízkým tlakem pod elementem, nýbrž je výsledkem rozdílů tlaků na spodní i vrchní straně. Při pohledu na horní stranu krytu je možné si všimnout poměrně výrazně zelené plochy značící výrazně nižší tlak než u SP_1_1, proto

výsledný rozdíl tlaků, a s ním i žádoucí přítlak vozidla vychází o 9 *N* nižší než u samotné podlahy. U varianty SP_1_3 je vztlak vzniklý krytem kompenzován jeho zvýšením na jeho konci.
Na Obrázek 15, na kterém je rozložení tlaků pro tento koncept vyobrazeno je při bližším pohledu na vrchní straně krytu poměrně dobře viditelný přetlak právě v tomto místě. Také při pohledu zespodu si můžeme všimnout znatelně nižšího tlaku, což v součtu dává podstatně příznivější hodnotu přítlaku. Zakrytí zadního kola má také velmi pozitivní vliv na odpor vozidla, takže i přes větší aerodynamický odpor krytu samotného je celková hodnota pro celé vozidlo obdobná jako u varianty SP_1_2, ovšem se znatelně vyšším přítlakem. Proto byl z těchto konceptů zvolen právě koncept SP_1_3.

4.3 Úpravy tvaru krytu

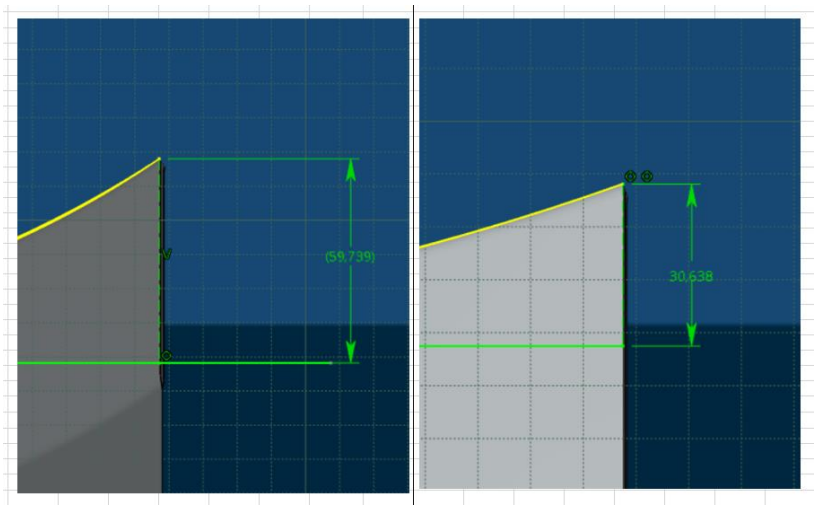
Po určení základního konceptu byly na krytu v rámci dalšího vývoje zkoušeny dále popsané změny, sepsané v Tabulka 5.

Tabulka 5: Přehled prvních úprav krytu

SP_1_4	SP_1_5	SP_1_5_b	SP_1_6
Nižší zvednutí na konci	Zúžení sidepodu vzadu	SP_1_5 s novým předním křídlem	Zvýšení vstupního otvoru

4.3.1 Snížení zadního zvednutí (SP_1_4)

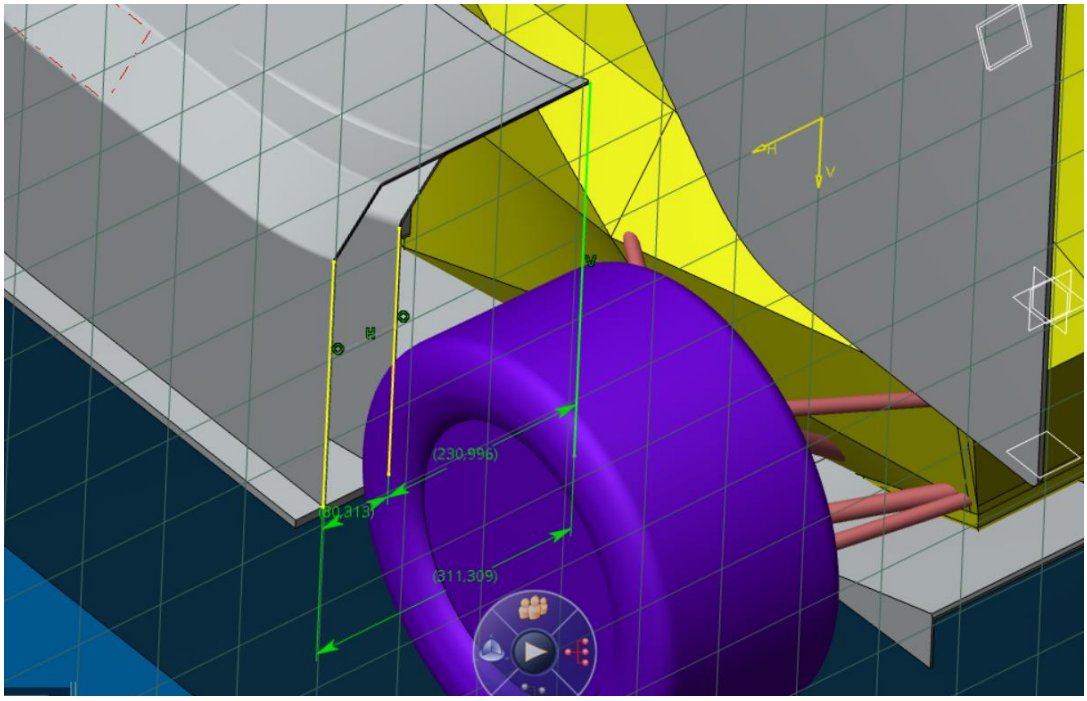
První změnou, která byla vyzkoušena, bylo snížení zvednutí dle obrázku 8, tj. přibližně o 30 mm (Obrázek 16). Tato změna byla vyzkoušena pro případ, že by zvednutí bylo již zbytečně vysoké, a bez zvýšení přítlaku na sidepodu samotném přidávalo odpor a zároveň negativně ovlivňovalo vlastnosti vzduchu proudícího pod zadní křídlo, neboť ten je potřeba co nejméně narušit předchozími překážkami.



Obrázek 16: Výška zvednutí ve variantách SP_1_3 a SP_1_4

4.3.2 Zúžení sidepodu vzadu (SP_1_5)

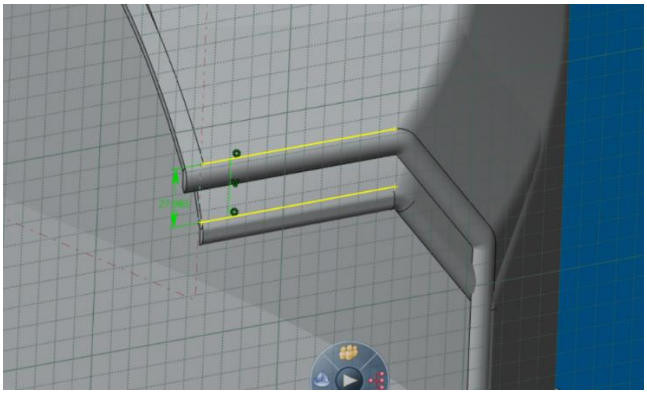
Další úpravou, zahrnující již nižší konec krytu z minulé simulace, je zúžení sidepodu vzadu přibližně o 80 mm (viz Obrázek 17) za účelem přiblížení se již dříve zmiňovanému tvaru „coke bottle shape“ a lepšímu sledování přirozeného toku vzduchu z boční strany sidepodu, ve snaze docílit ideálního kompromisu krytí zadního kola a sledování přirozeného toku vzduchu.



Obrázek 17: Rozdíl v šířce sidepodu v jeho zadní části mezi simulacemi SP_1_4 a SP_1_5

4.3.3 Zvětšení vstupního otvoru do výšky (SP_1_6)

Následující úprava měla za úkol docílit plynulejšího náběhu vzduchu na horní stranu sidepodu, a zároveň snížit odtržení z vnitřku této horní stěny, a to snížením vstupního otvoru přibližně o 28 mm, jak je patrné na Obrázek 18. Stejně tak byly v této změně již zakomponovány předchozí dvě úpravy, tj. snížení SP_1_4 a zúžení SP_1_5.



Obrázek 18: Zvýšení vstupu mezi simulacemi SP_1_5 a SP_1_6

Mezi simulacemi SP_1_5 a SP_1_6 došlo také ke změně předního přítlačného křídla. Aby bylo vyloučeno ovlivnění touto změnou, byla simulace SP_1_5 provedena v obou variantách (SP_1_5_b ukazuje výsledky se stejným tvarem sidepodu po změně předního křídla). Jak ukazuje Tabulka 6, všechny změny s výjimkou zúžení (SP_1_5) přinesly pozitivní výsledky dle zadaných kritérií. Snížení sidepodu vzadu způsobilo nárůst celkového přítlaku na voze o 7 N na 289,8 N. Jeho zúžení sice zhoršilo primárně sledované parametry, a to konkrétně přítlak z 289,8 N na 285,7 N a odpor ze 177,0 N na 180,5 N, přispělo však k výraznému zlepšení funkce zadního přítlačného křídla, což za cenu poměrně malého zhoršení celkových hodnot příznivě ovlivnilo aerodynamické rozvážení vozu (Tabulka 7). Proto byla i tato změna vyhodnocena jako přínosná a byla tedy zachována i pro následující změnu SP_1_6. Varianta SP_1_6 poté přinesla nárůst přítlaku, který po změně předního křídla činil 294,6 N na 307,5 N.

Tabulka 6: Srovnání výsledků simulací od SP_1_3 do SP_1_6

SP_1_3	SP_1_4	SP_1_5	SP_1_5_b	SP_1_6
Car	Car	Car	Car	Car
Vztlak: -282,4 N Odpor: 178,2 N L/D -1,58	Vztlak: -289,8 N Odpor: 177,0 N L/D -1,64	Vztlak: -285,7 N Odpor: 180,5 N L/D -1,58	Vztlak: -294,6 N Odpor: 183,9 N L/D -1,60	Vztlak: -307,5 N Odpor: 185,2 N L/D -1,66

SP_1_4	SP_1_5
RW	RW
Vztlak: -149,0 N Odpor: 80,2 N Rozvážení: Předek: 59 % Zadek: 41 %	Vztlak: -162,0 Odpor: 82,8 N Rozvážení: Předek: 57 % Zadek: 43 %

Tabulka 7: Srovnání funkce zadního křídla a aerodynamického rozvážení vozu před a po zúžení sidepodu

4.4 Dodatečné aerodynamické prvky

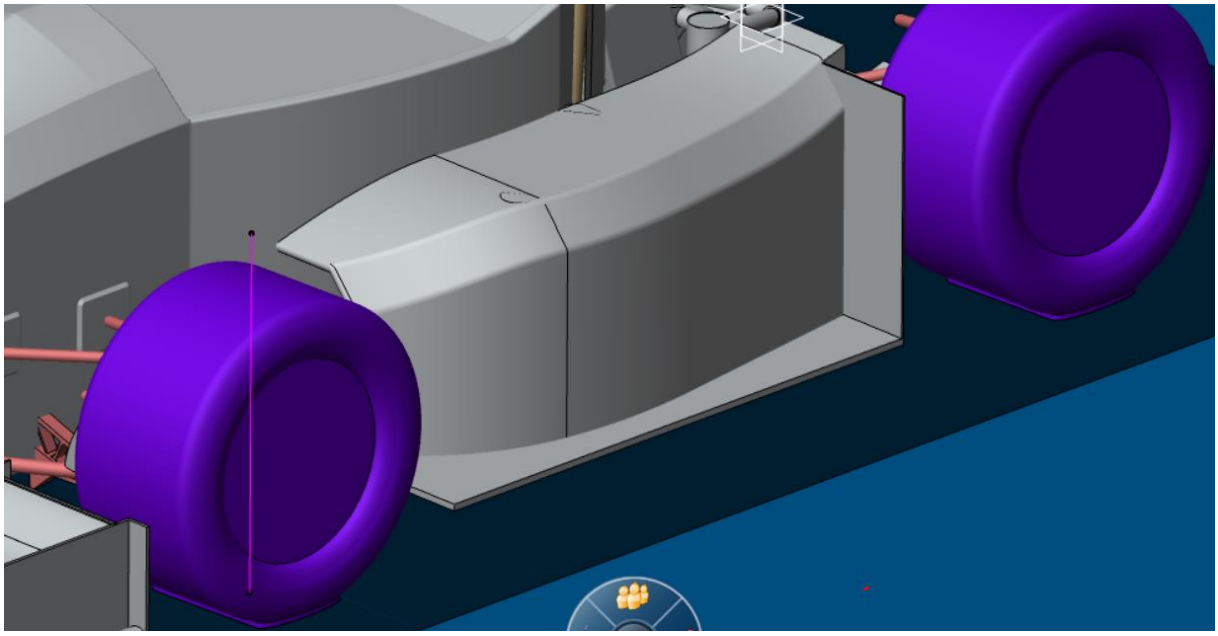
Užší konec sidepodu před zadním kolem také přinesl již zmiňovaný prostor pro zakrytí zadního kola dalším aerodynamickým prvkem. Zkoušené možnosti jsou uvedeny v Tabulka 8.

Tabulka 8: Přehled možností odstínění zadního kola

SP_1_7	SP_1_8
Kolmá deska před kolem	Kaskáda profilů

4.4.1 Svislá klapka před zadním kolem (SP_1_7)

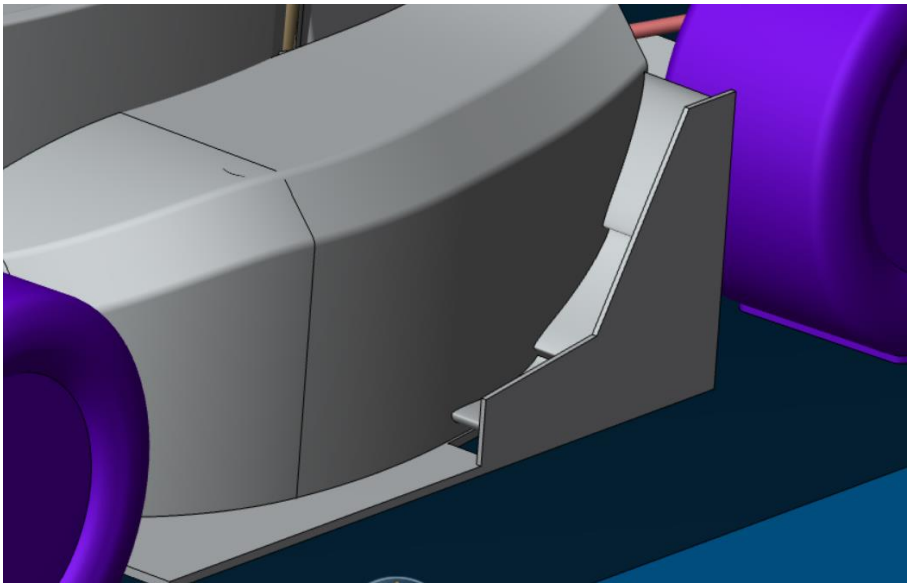
Jako jedna z možností odstínění zadního kola byla zvolena deska umístěná tak, aby bylo kolo v co největším zákrytu, jak ukazuje Obrázek 19.



Obrázek 19: Varianta SP_1_7, tj. přidaná kolmá deska před zadní kolo

4.4.2 Kaskáda klapek (SP_1_8)

Jako další alternativa byla vybrána kaskáda složená ze tří profilů tak, aby kromě odstínění zadního kola bylo možné využít ke generaci přítlaku i tento prvek samotný. Jako tvar klapek byl zvolen profil z illinoiské databáze s1223-il, vzhledem k dostupnosti forem na výrobu těchto dílů. V první simulaci s těmito klapkami byly použity všechny klapy stejně velké, o délce tětivy 160 mm (rozměry též voleny dle dostupných forem). CFD model varianty se nachází na Obrázek 20.



Obrázek 20: Varianta SP_1_8, kaskáda před zadním kolem, pod klapkami vyříznutá díra v podlaze, díky které klapky fungují jako difuzor.

Z porovnání výsledků v Tabulka 9 je patrné, že obě úpravy výrazně snížily hodnoty vztlaku (zvýšily přítlak) v oblasti bočnic, a odpovídajícím způsobem také na celém voze. Hodnoty odporu sice v rámci bočnic značně stouply, ale z tabulky lze též vyčíst, že došlo k jeho snížení v oblasti zadního kola, a že na celém voze došlo jen k nepatrným změnám. Dle sledovaných parametrů byla tedy zvolena varianta SP_1_8, u které oproti původnímu stavu (SP_1_6) došlo, též za snížení odporu, byť zanedbatelného, ke snížení vztlaku na sidepodu o 26,1 N, na celém voze pak došlo ke změně přítlaku z 307,4 na 339,1, tj. o 31,7 N při rychlosti 15 m/s, což mělo za následek zlepšení aerodynamické efektivity z -1,66 na -1,84.

Tabulka 9: Srovnání výsledků bočnic s přidanými prvky. Za zmínku stojí odpor zadního kola, který se po přidání prvků výrazně snížil

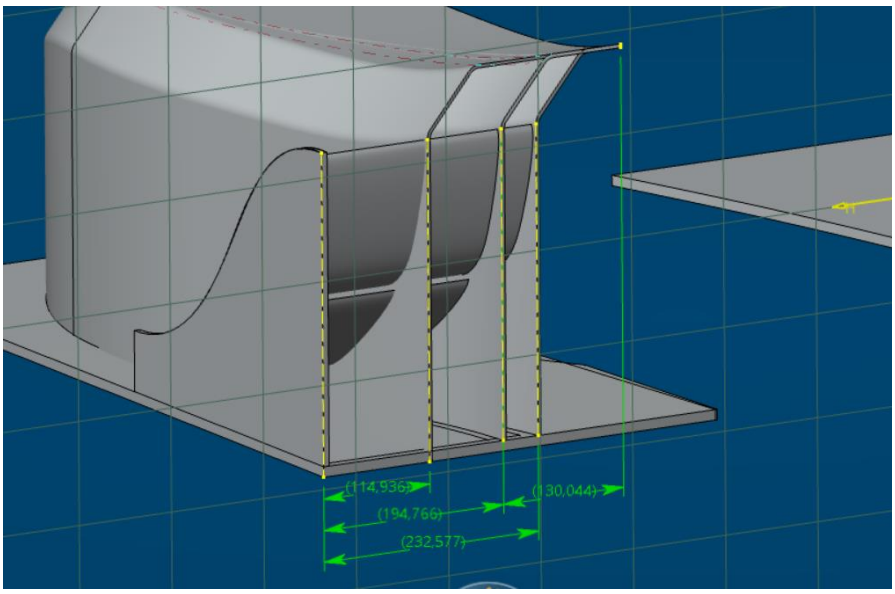
SP_1_6		SP_1_7		SP_1_8	
Sidepod:		Sidepod:		Sidepod:	
Vztlak:	12,1 N	Vztlak:	4,8 N	Vztlak:	-14,0 N
Odpor:	2,3 N	Odpor:	14,3 N	Odpor:	13,1 N
Odpor kola:	14,0 N	Odpor kola:	5,6 N	Odpor kola:	7,9 N
Car		Car		Car	
Vztlak:	-307,4 N	Vztlak:	-319,5 N	Vztlak:	-339,1 N
Odpor:	185,2 N	Odpor:	181,7 N	Odpor:	184,5 N
L/D	-1,66	L/D	-1,76	L/D	-1,84

4.5 Ustavení šířky sidepodu a klapek vzadu

Dalším postupem bylo vyzkoušet různé varianty šířky sidepodu vzadu, a zvolit optimální poměr této šířky ku šířce klapek. Pro ilustraci je uvedena původní, příliš široká varianta SP_1_8, příliš úzká varianta SP_1_9 a z této série změn finální verze SP_1_10. (Tabulka 10, Obrázek 21)

Tabulka 10: Přehled variant různé šířky krytu vzadu

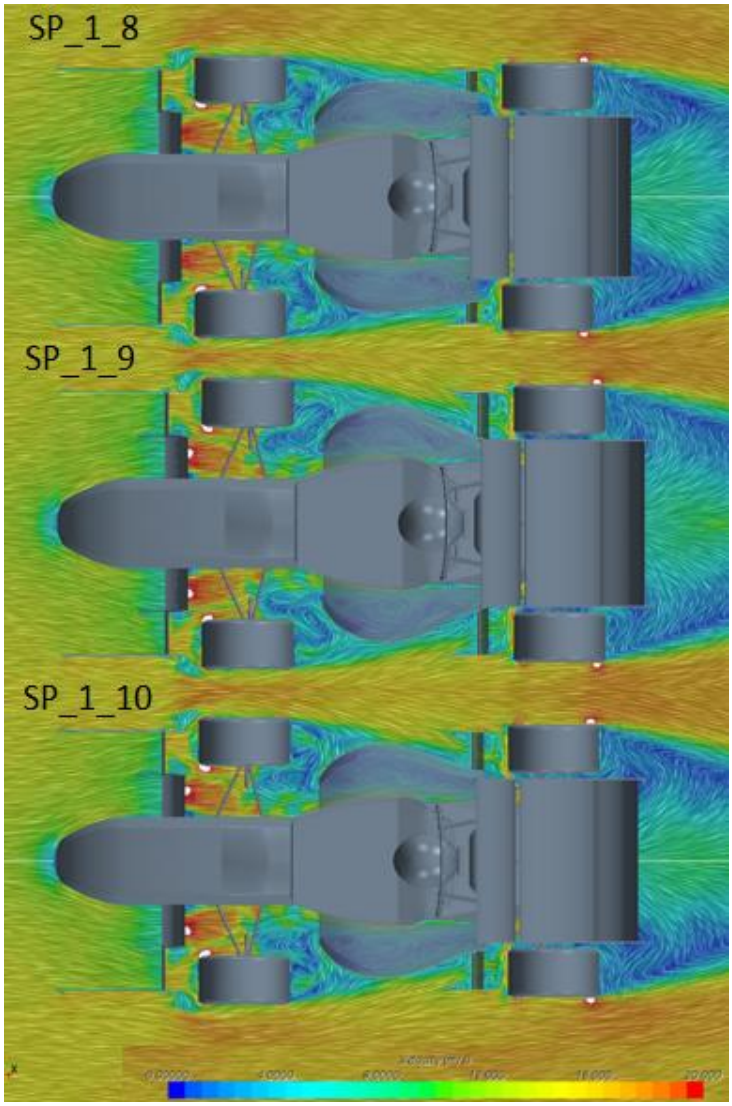
SP_1_8	SP_1_9	SP_1_10
Šířka sidepodu 210 mm	Šířka sidepodu 93 mm	Šířka sidepodu 130 mm



Obrázek 21: Zkoušení různého poměru šířek "klapky/sidepod" v zadní části. Rozměry variant SP_1_8, ...9, ...10

Tabulka 11: Srovnání výsledků různých šířek dle variant SP_1_8 až SP_1_10

SP_1_8		SP_1_9		SP_1_10	
Sidepod:		Sidepod:		Sidepod:	
Vztlak:	-14,0 N	Vztlak:	-23,9 N	Vztlak:	-25,6 N
Odpor:	13,1 N	Odpor:	13,2 N	Odpor:	15,1 N
Car		Car		Car	
Vztlak:	-339,1 N	Vztlak:	-346,6 N	Vztlak:	-353,0 N
Odpor:	184,5 N	Odpor:	184,6 N	Odpor:	188,1 N
L/D	-1,84	L/D	-1,88	L/D	-1,88



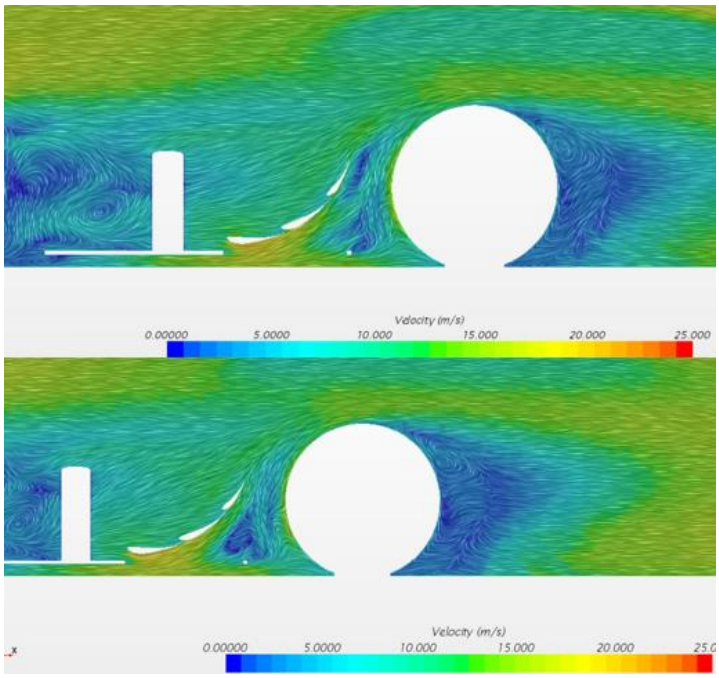
Obrázek 22: Vektorové zobrazení rychlosti proudění okolo zmiňovaných variací sidepodu. Okolo tvarů SP_1_9 a SP_1_10 je patrné začínající odtrhávání proudění od jeho strany.

Jak lze odhadnout z Tabulka 11, byla tedy zvolena varianta SP_1_10, neboť bez dramatického zvýšení odporu nabízí největší hodnotu přítlaku, a to konkrétně z 339,0 N na 353,0 N na celém autě, a ze 14,0 N na 25,6 N na boční části samotné. Na Obrázek 22 je možné všimnout si odtrženého proudění po boku sidepodu u varianty SP_1_9. Varianta SP_1_8 pro změnu přes široký sidepod nechávala zbytečně málo prostoru pro klapky, které jsou zásadním zdrojem přítlaku v boční oblasti.

4.6 Stanovení velikosti a úhlů náběhu klapek

Další postupy vedly k ustanovení nejvýhodnějšího úhlu a velikosti jednotlivých klapek kaskády před kolem. Všechny zkoušené alternativy byly voleny dle dostupných forem, tj. profil s1223-il, délka tětivy 116, 160, případně 200 mm. Mezi sledované parametry u výsledků

jednotlivých simulací patřilo kromě přítlaku a odporu také grafické zhodnocení proudění po spodní straně profilů. Porovnání odtrženého a neodtrženého proudění je patrné na Obrázek 23.



Obrázek 23: Odtržené proudění pod poslední klapkou před zadním kolem (nahoře). Po snížení úhlu náběhu bylo již proudění v pořádku (dole)

Jako finální varianta byla po evaluaci jak číselných, tak grafických výsledků zvolena konfigurace 160-160-116 mm pro úhly náběhu 5°, 29°, 54° (vůči zemi). Tato varianta byla definována jako SP_1_11.

4.7 Úprava vstupu

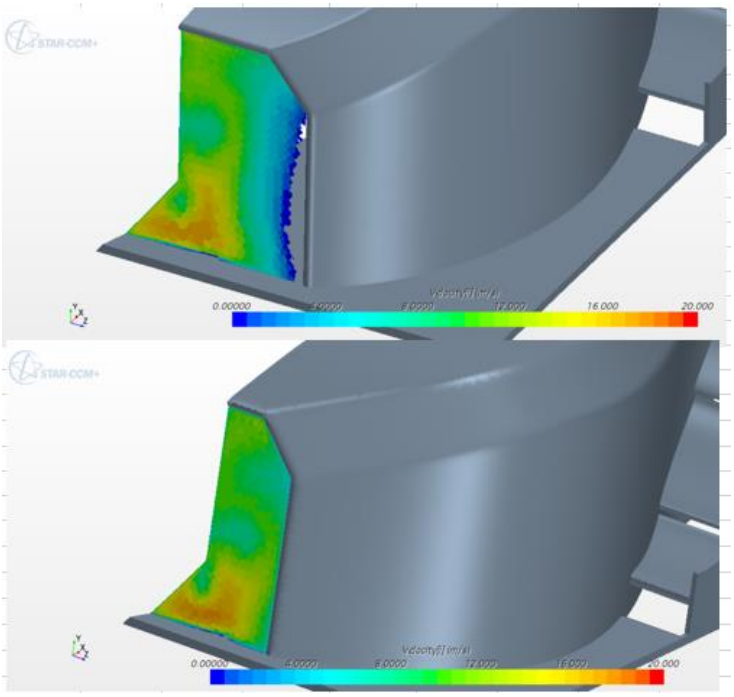
Aby do chladícího výměníku, ukrytého pod sidepodem, přicházel co „nejkvalitnější“ vzduch, je potřeba dát primárně pozor, aby se část vstupu nenacházela v úplavu od předního kola. Bylo tedy provedeno zúžení (Tabulka 12).

Tabulka 12: Přehled variant vstupního otvoru

SP_1_11	SP_1_12
První návrh vstupu	Zúžení dle grafických výsledků

Na Obrázek 24 je ve zmiňovaných dvou případech šířky vstupního otvoru zobrazena rychlost ve směru osy x, tj. proti směru jízdy vozu. Barevná škála je nastavena na rozmezí $(0 - 25)\frac{m}{s}$. Na horní části obrázku (SP_1_11) si můžeme všimnout oblasti na vnější straně otvoru, jejíž

hodnoty jsou dokonce mimo škálu, tedy že vzduch proudí ve směru jízdy vozu, ven ze sidepodu. Takové chování je připisováno ovlivnění proudění předním kolem. U verze SP_1_12, která je na obrázku zobrazena dole, byl vstup zmenšen tak, aby vzduch proudící do chlazení nebyl tímto úplavem zasažen.



Obrázek 24: Srovnání různých šířek vstupních otvorů. Na barevné škále je znázorněna rychlost ve směru osy x.

Kromě interní aerodynamiky krytu bylo touto změnou příznivě ovlivněno také proudění okolo sidepodu, díky čemuž došlo k velkému zvýšení přítlaku na celém voze, jak je vidno v Tabulka 13. Přítlak celého vozu však není možné srovnávat s předešlými variantami, neboť kvůli aerodynamickému rozvážení vozu bylo mezi změnami změněno přední křídlo, které v této fázi vývoje poskytovalo výrazně nižší přítlak.

Tabulka 13: Srovnání variant s různou velikostí vstupního otvoru

SP_1_11		SP_1_12	
Car		Car	
Přítlak:	324,1	Přítlak:	337,5
Odpor:	176,8	Odpor:	175,4
L/D	-1,83	L/D	-1,92

4.8 Poslední kontrola

Vzhledem k počtu změn na ostatních částech vozu v průběhu vývoje byla na závěr provedena ještě poslední zkouška zadní části krytu, která obsahovala sníženou, zvýšenou, rozšířenou a zúženou variantu (Tabulka 14).

Tabulka 14: Přehled změn při poslední kontrole

SP_1_13	SP_1_14	SP_1_15	SP_1_16
Zvýšení vzadu	Snížení vzadu	Rozšíření vzadu	Zúžení vzadu

Jako výchozí kritérium pro finální verzi byla vybrána aerodynamická efektivita vozu, viz. Tabulka 15, podle které byla varianta SP_1_13 zachována jako finální.

Tabulka 15: Přehled výsledků kontrolních výpočtů

SP_1_12		SP_1_13		SP_1_14		SP_1_15		SP_1_16	
Car		Car		Car		Car		Car	
Přítlak:	337,5	Přítlak:	332,1	Přítlak:	332,1	Přítlak:	342,6	Přítlak:	334,2
Odpor:	175,4	Odpor:	184,5	Odpor:	181,2	Odpor:	184,6	Odpor:	184,8
L/D	-1,92	L/D	-1,80	L/D	-1,83	L/D	-1,86	L/D	-1,81

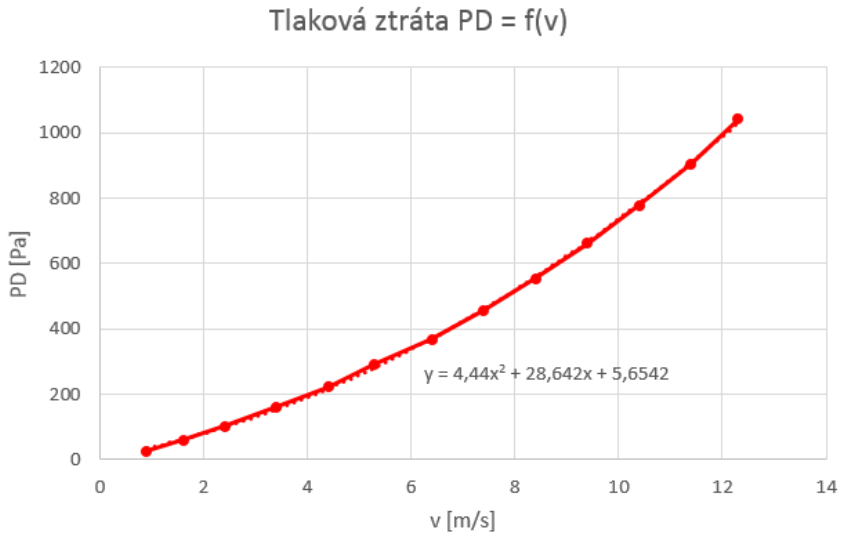
5 Budoucí zlepšení simulací

Tuto kapitolu práce bych chtěl věnovat jednomu z největších zjednodušení, které se momentálně ve výpočetní metodice v týmu CTU CarTech nachází, a to je zanedbání chladícího výměníku a jím způsobené tlakové ztráty uvnitř bočního krytu. Aby bylo možné provádět simulace se zakomponováním výměníku, bylo ve spolupráci s firmou 4Jtech provedeno měření tlakové ztráty v závislosti na rychlosti proudění.

5.1 Měření tlakové ztráty chladícího výměníku

Měření bylo provedeno v areálu firmy, kde byla postavena trať uvnitř zatěsněného nákladového kontejneru (Obrázek 25). Před výměník byly umístěny polystyrenové náfuky, ve kterých byly bezprostředně před výměníkem umístěny hadice pro snímání statického tlaku. Obdobným způsobem byl statický tlak měřen i za výměníkem a výsledkem měření byla přímo tlaková ztráta pro dostatečný rozsah rychlostí proudění. Výslednou závislost tlakové ztráty na rychlosti ukazuje graf na Obrázek 26.

Obrázek 25: Měření tlakové ztráty výměníku



Obrázek 26: Graf změřené tlakové ztráty (absolutní člen v polynomu vznikl chybou měření)

5.2 Zakomponování porézního média do výpočtu

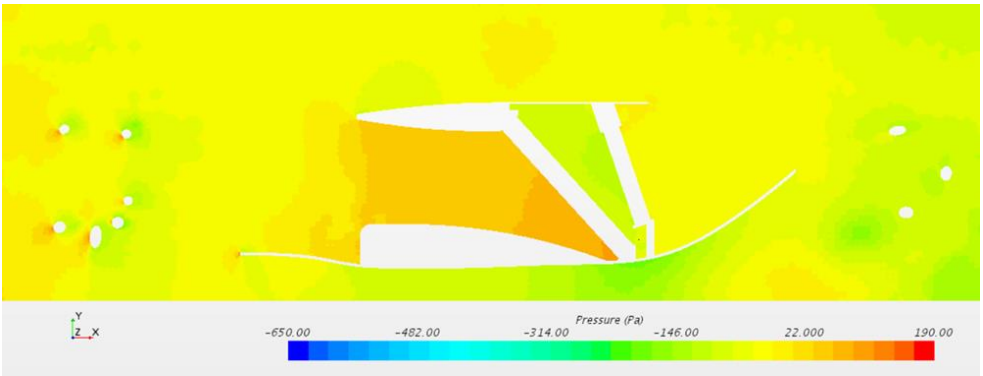
Pro nastavení porézního média bylo nutné pomocí regrese získat polynomickou křivku druhého stupně, znázorňující tlakovou ztrátu v závislosti na rychlosti proudění.

$$\Delta P = av^2 + bv \quad (5)$$

ΔP = Tlaková ztráta

v = Rychlost proudění

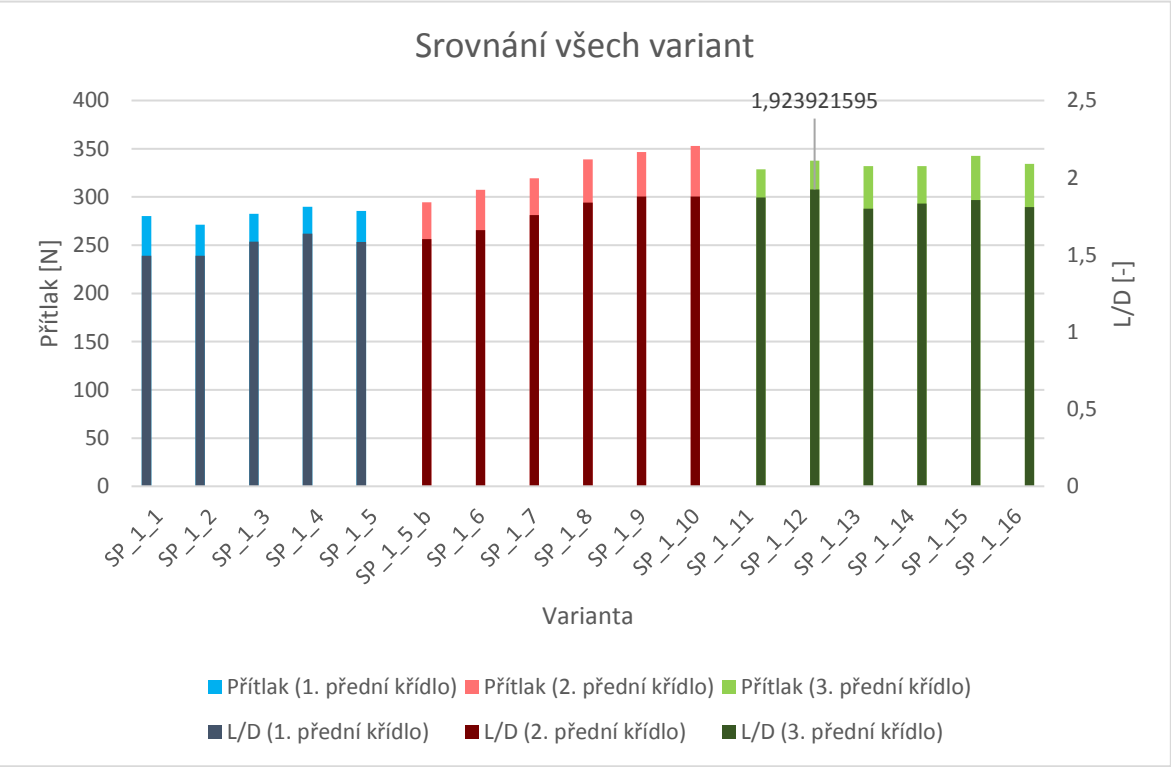
Získané koeficienty a a b byly dále využity pro výpočet viskózního odporu (porous viscous resistence) $P_v = \frac{b}{L}$ a setrvačného odporu (porous inertial resistence) $P_i = \frac{a}{L}$. Tyto hodnoty byly použity jako vstupní hodnoty pro nastavení porézního média v programu STAR CCM+. Toto nastavení provedl kolega Martin Ševčík. Výsledek simulace s výměníkem i větrákem v chladícím ústrojí, již na voze FS.11, ukazuje Obrázek 27.



Obrázek 27: Rozložení tlaků v řezu na voze FS.11 v simulaci s již nastaveným porézním médiem a větrákem

6 Závěr

V souladu se zadáním byly provedeny potřebné CFD simulace k návrhu a následné optimalizaci bočního krytu a přilehlých aerodynamických prvků. Výsledný přítlak vozu při rychlosti 54 $\frac{km}{h}$ ve spolupráci s vývojem ostatních součástí vozu vzrostl z 271 N na 337 N. Pokrok samotného sidepodu pro jednotlivé varianty předního křídla zobrazuje graf na Obrázek 28.



Obrázek 28: Graf přítlaku a aerodynamické efektivity všech uvedených variant (aerodynamická efektivita, až záporná, byla vynesena do kladných hodnot pro lepší ilustraci)

Podle hlavního kritéria, teda aerodynamické efektivity byl zvolen tvar SP_1_12, jehož verze, doplněná na straně výměníku o výdechy z chlazení (Obrázek 29) byla použita na voze týmu CTU CarTech FS.10.

Obrázek 29: Aplikace výsledného tvaru na soutěžním prototypu FS.10

Seznam použité literatury

[1] Formula SAE. *FSAE History* [online]. FSAE, cit. [19. 5. 2019]. Dostupné z https://www.fsaeonline.com/page.aspx?pageid=c4c5195a-60c0-46aa-acbf-2958ef545b72

[2] Formula Student Germany. *FSG Rules & Important Documents* [online]. FSG, cit. [27. 5. 2019]. Dostupné z https://www.formulastudent.de/fsg/rules/

[3] Wikipedia, The Free Encyclopedia. *Streamlines, Streaklines and Pathlines* [online]. Wikipedia. Poslední změna 23. 2. 2019, cit. [19. 4. 2019]. Dostupné z https://en.wikipedia.org/wiki/Streamlines,_streaklines,_and_pathlines

[4] KATZ, Joseph. *Race car aerodynamics: designing for speed*. Cambridge, MA, USA: R. Bentley, c1995. ISBN 0837601428.

[5] Wikipedia, The Free Encyclopedia, *Lift (force)* [online]. Wikipedia, Poslední změna 15. 7. 2019 cit. [17. 7. 2019]. Dostupné z https://en.wikipedia.org/wiki/Lift_(force)

[6] MILLIKEN, William F. a Douglas L. MILLIKEN. *Race car vehicle dynamics*. Warrendale, PA, U.S.A.: SAE International, c1995. ISBN 1560915269.

[7] Rennstall Esslingen. *Stallardo 16*. In: Instagram.com [online]. 14. 11. 2016 cit. [14. 7. 2019]. Dostupné z https://www.imgrum.pw/media/1383295278962897625

[8] Rennteam Uni Stuttgart e.V., *F0711-10*. In: facebook.com [online]. 25. 4. 2015 cit. [14. 7. 2019]. Dostupné z https://www.facebook.com/RennteamUniStuttgart/photos/a.310738565765/10152723768670766/?type=3&theater

[9] Wikipedia, The Free Encyclopedia, *Line Integral Convolution* [online]. Wikipedia. Poslední změna 24. 2. 2019, cit. [13. 7. 2019]. Dostupné z https://en.wikipedia.org/wiki/Line_integral_convolution

[10] Symscape. *Polyhedral, Tetrahedral, and Hexahedral Mesh Comparison* [online]. © 2006-2019 Symscape. 25. 2. 2013, cit. [17. 7. 2019] Dostupné z https://www.symscape.com/polyhedral-tetrahedral-hexahedral-mesh-comparison