

České vysoké učení technické v Praze

Fakulta strojní – Ústav automobilů, spalovacích motorů a kolejových vozidel



DIPLOMOVÁ PRÁCE

METODIKA AERODYNAMICKÉHO ŘEŠENÍ VOZIDLA METODOLOGY OF AERODYNAMICAL DESIGN OF VEHICLE

Autor práce: Bc. Jan Vorlík

Vedoucí práce: Ing. Jan Baněček, Ph.D.

Rok: 2021

Prohlašuji, že jsem tuto práci vypracoval samostatně s použitím literárních pramenů a informací, které cituji a uvádím v seznamu použité literatury a zdrojů informací.

Datum:.....

.....

Podpis

Poděkování

Rád bych zde poděkoval za odborné vedení mé diplomové práce panu Ing. Janu Baněčkovi Ph.D. Děkuji za veškeré rady, podněty ke zlepšení mé práce, vymezení směru, jakým se má práce ubírat a trpělivost, která byla třeba. Dále bych rád poděkoval panu Ing. Petru Pečenému a panu Ing. Jiřímu Teichmanovi ze společnosti TechSoft Engineering, spol. s.r.o. za velikou vstřícnost, trpělivost a obětavost. Jejich cenné rady a tipy mi pomohly jak k dokončení praktické části diplomové práce, tak k její vyšší úrovni díky přesnějším výsledkům ze simulací a lepšímu zpracování dat. Dále bych rád poděkoval rodičům a celé rodině za velikou podporu a obětavost během celého studia. Jako posledním bych chtěl poděkovat firmě Praga cars s.r.o., která mi poskytla data k praktické části diplomové práci a díky této firmě byla pro mě tato práce velikým přínosem.

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Vorlík** Jméno: **Jan** Osobní číslo: **459989**
Fakulta/ústav: **Fakulta strojní**
Zadávající katedra/ústav: **Ústav automobilů, spalovacích motorů a kolejových vozidel**
Studijní program: **Dopravní a transportní technika**
Specializace: **Motorová vozidla**

II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce:

Metodika aerodynamického řešení vozidla

Název diplomové práce anglicky:

Methodology of aerodynamical desig of vehicle

Pokyny pro vypracování:

Zpracujte postup posuzování aerodynamického návrhu vozidla pro závody na okruzích, s ohledem na ovlivnění jeho vlastností.

1. Zpracujte rešerši současného stavu problematiky aerodynamického provedení závodních vozů, používaných tvarových řešení a jejich funkce.
2. Ukažte možnosti ověření aerodynamického řešení vozu pomocí CFD programů. Použijte k tomu data vozidla Praga R1.
3. Navrhněte rámcový postup základního návrhu aerodynamiky vozu s ohledem na požadované vlastnosti.

Seznam doporučené literatury:

Katz J.: Racing Car Aerodynamics, Design for Speed, Bentley Publishers 1995, ISBN 0-8376-0142-8
Hucho W.: Aerodynamics of Road Vehicles, From Fluid Mechanics to Vehicle Engineering, Butterworth-Heinemann 1990, ISBN 0-408-01422-9

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) diplomové práce:

Ing. Jan Baněček, Ph.D., ústav automobilů, spalovacích motorů a kolejových vozidel FS

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

Datum zadání diplomové práce: **14.04.2021**

Termín odevzdání diplomové práce: **14.07.2021**

Platnost zadání diplomové práce: **19.09.2021**

Ing. Jan Baněček, Ph.D.
podpis vedoucí(ho) práce

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

prof. Ing. Michael Valášek, DrSc.
podpis děkana(ky)

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

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

Datum převzetí zadání

Podpis studenta

ABSTRAKT

Aerodynamika je v závodních vozech stěžejním oborem. V mé práci se na začátku věnuji obecnému popisu základních aerodynamických prvků na závodních vozidlech. Dále jsem se v teoretické části věnoval popisu CFD výpočtů a jejich využití v praxi. V následné praktické části je popsán vůz Praga R1, na kterém je ukázána metodika aerodynamické analýzy s popisem výsledků jednotlivých CFD simulací. Z CFD simulací vyšlo najevo, jak aerodynamické komponenty na voze Praga R1 spolupracují, a které se nejvíce podílí na výsledném přítlaku a odporu. Následně je sestavena metodika návrhu základních aerodynamických komponent, kde jsou popsány typy na konstrukci základních aerodynamických komponent. Dle těchto typů jsou následně navrženy změny na voze Praga R1, které by mohly zlepšit aerodynamické vlastnosti vozu.

Klíčová slova

Aerodynamika; závodní vozy; CFD simulace; analýza; Praga; aerodynamika závodních vozidel

ABSTRACT

Aerodynamics is a one of main discipline on race cars. In my thesis at the beginning I devote of general description of the basic aerodynamic components on race car. Furthermore in theoretical part of my thesis I focus on the description of CFD simulations and their use in practise. In practical part of my thesis I describe race car Praga R1, on which describe the methodology of aerodynamic analysis with description of the results of each CFD simulations. From these CFD simulations I show how aerodynamic components on the Praga R1 car cooperate and which most contribute on negative lift and drag. Like next I suggest methodology of aerodynamic design basic aerodynamic components, where are describe types for the design of basic aerodynamic components. According to these types, I subsequently proposed changes to the Praga R1 race car that could improve the aerodynamic characteristics of this race car.

Keywords

Aerodynamics; race cars; CFD simulations; analysis; Praga; aerodynamic of race cars

Obsah

1	Úvod	10
2	Úvod do aerodynamiky závodních okruhových vozidel.....	11
2.1	Aerodynamické síly	12
2.1.1	Aerodynamická odporová síla	13
2.1.2	Aerodynamická přítláčná síla	14
2.1.3	Aerodynamická boční síla.....	15
2.2	Bernoulliho rovnice.....	16
3	Aerodynamické komponenty na závodních vozidlech	17
3.1	Hlavní aerodynamické tvarové komponenty generující přítlak	18
3.1.1	Splitter	18
3.1.2	Zadní difuzor a podlaha.....	20
3.1.3	Zadní křídlo.....	22
3.2	Tvarové aerodynamické komponenty podporující generování přítlaku a proudění okolo vozu	24
3.2.1	Vírové generátory.....	24
3.2.2	Přítláčná křídélka.....	26
3.2.3	Boční prahy (side skirt).....	27
3.2.4	Koncové desky křídla.....	28
3.3	Hlavní aerodynamické tvarové komponenty upravující proudění.....	30
3.3.1	Boční průduchy.....	30
3.3.2	NACA otvory	30
3.4	Nastavitelné aerodynamické parametry vozidla.....	32
3.4.1	Světlná výška vozu	33
3.4.2	Sklon podlahy vozu – rake	33
3.4.3	Úhel náběhu křídla	35

4	CFD	36
4.1	Metoda konečných objemů	37
4.2	Modelování turbulentního proudění	38
4.2.1	Metoda přímé numerické simulace (DNS)	39
4.2.2	Metoda velkých vírů (LES)	39
4.2.3	Metody časového středování (RANS).....	40
5	Testování v aerodynamických tunelech	43
5.1	Typy aerodynamických tunelů	43
5.1.1	Aerodynamický tunel s otevřeným okruhem.....	43
5.1.2	Aerodynamický tunel s uzavřeným okruhem.....	44
5.2	Simulace pohyblivé vozovky a rotujících kol	45
5.2.1	Simulace pohyblivé vozovky	45
5.2.2	Simulace rotujících kol.....	49
6	Popis Praga R1.....	51
7	Metodika postupu aerodynamické analýzy	53
7.1	Studium zkoumaného modelu.....	53
7.2	Vytipování důležitých komponent	53
7.3	Vytváření dílčích variant modelu	53
7.4	Simulace a vyhodnocení dílčích variant.....	54
8	Použitý software a turbulentní model	55
9	Rozdělení Pragy R1 do jednotlivých variant.....	56
9.1	Varianta 8	56
9.2	Varianta 7	57
9.3	Varianta 6	58
9.4	Varianta 5	58
9.5	Varianta 4 + 4a	59

9.6	Varianta 3	60
9.7	Varianta 2	60
9.8	Varianta 1 – základní těleso	61
10	Realizace simulací.....	62
10.1	Souřadnicový systém výpočetní oblasti	63
10.2	Příprava geometrie vozu a výpočetní oblasti.....	64
10.3	Vytvoření povrchové sítě	66
10.3.1	Opravení modelu.....	66
10.3.2	Nastavení velikosti buněk	68
10.4	Vytvoření objemové sítě	70
10.4.1	Prismatické vrstvy.....	71
10.5	Nastavení výpočtu.....	72
10.6	Ukončení výpočtu	73
11	Vyhodnocení výsledků jednotlivých výpočtů.....	74
11.1	Vysvětlení značení vizualizací výsledků.....	75
11.2	Vyhodnocení varianty 1 – základní těleso	76
11.3	Vyhodnocení varianty 2	77
11.4	Vyhodnocení varianty 3	77
11.5	Vyhodnocení varianty 4	79
11.6	Vyhodnocení varianty 4a	82
11.7	Vyhodnocení varianty 5	83
11.8	Vyhodnocení varianty 6	85
11.9	Vyhodnocení varianty 7	86
11.10	Vyhodnocení varianty 8	88
12	Navrhované úpravy vozu Praga R1	91
12.1	Úpravy provedené odebráním komponent	91

12.1.1	Odebrání krytu za předními koly – varianta 9	91
12.1.2	Odebrání předního křídla – varianta 10	92
12.2	Teoretické změny tvarování komponent.....	93
12.2.1	Tvarování přední části předního blatníku	93
12.2.2	Tvarování chladícího kanálu.....	93
12.3	Výpočet se zahrnutím teplot – varianta 11	95
13	Vyhodnocení výsledků upravených variant.....	96
13.1	Vyhodnocení varianty 9 - odebrání krytu za předními koly	97
13.2	Vyhodnocení varianty 10 – odebrání předního křídla.....	97
13.3	Vyhodnocení varianty 11 – zahrnutí rozdílných teplot	98
14	Statistiky provedených simulací	101
15	Metodika návrhu základních aerodynamických prvků závodního vozu.....	103
15.1	Splitter	104
15.2	Zadní křídlo	105
15.3	Podlaha s difuzorem.....	106
15.3.1	Podlaha.....	106
15.3.2	Difuzor	107
15.4	Chladiče + chladící kanály	107
15.5	Blatníky kol	108
15.6	Monokok	108
16	Simulace komponent upravující proudění do chladících kanálů	109
16.1	Vyhodnocení proudění s komponentou VG1	109
16.2	Vyhodnocení proudění s komponentou VG2.....	111
16.3	Vyhodnocení proudění s komponentou VG3.....	112
17	Závěr.....	113
18	Zdroje	116

1 ÚVOD

Zájem o aerodynamiku, rozšíření znalostí ohledně aerodynamiky závodních okruhových vozů a možnost tvůrčí činnosti jsou důvodem, proč jsem si dané téma vybral. Myslím si, že aerodynamika je stěžejním oborem, který se výrazně podílí na rychlosti závodních okruhových vozů. Na rychlosti závodního okruhového vozu se samozřejmě podílí i další aspekty, které jsou spojeny s dalšími obory. Jedná se například o výkon motoru, celkové rozložení zatížení náprav vozu, hmotnost vozu a další. Rád bych se věnoval aerodynamice závodních okruhových vozidel i v budoucnu po ukončení studií.

Aerodynamika je v závodních okruhových vozech stěžejním oborem a bez jejího správného využití by vozidla nejspíše nedosahovala tak rychlých časů na kolo, jak dnes známe. Inženýři se u závodních okruhových vozidel snaží docílit vysoké hodnoty přítláčné síly, která pomáhá maximalizovat rychlosti v zatáčkách a zároveň se snaží minimalizovat odporovou sílu, která vozidlo zpomaluje. Jedná se o komplexní problematiku, která je vždycky kompromisem mezi požadovanými vlastnostmi. Většinou se jedná o kompromis mezi přítláčnou silou, odporovou silou a rozložením sil na nápravy. V dnešní době je aerodynamika závodních okruhových vozidel na vysoké úrovni dotažena do sebemenších detailů. Tyto detaily znamenají rozdíly v setinách a tisícinách vteřiny, které pak mohou rozhodnout o vítězství.

Tato diplomová práce je rozdělena do dvou částí. První z nich je teoretická a popisuje zde obecně síly, které na vozidlo působí, různé aerodynamické komponenty, které se hojně využívají, možné způsoby simulování pomocí CFD programů a problematiku testování ve větrných tunelech. Druhá část je praktická, v ní je proveden aerodynamický rozbor závodního vozu Praga R1, popisuje proces CFD simulování, navrhuje postup aerodynamického řešení nového závodního vozidla, a nakonec navrhuje úpravy vozidla Praga R1.

2 ÚVOD DO AERODYNAMIKY ZÁVODNÍCH OKRUHOVÝ VOZIDEL

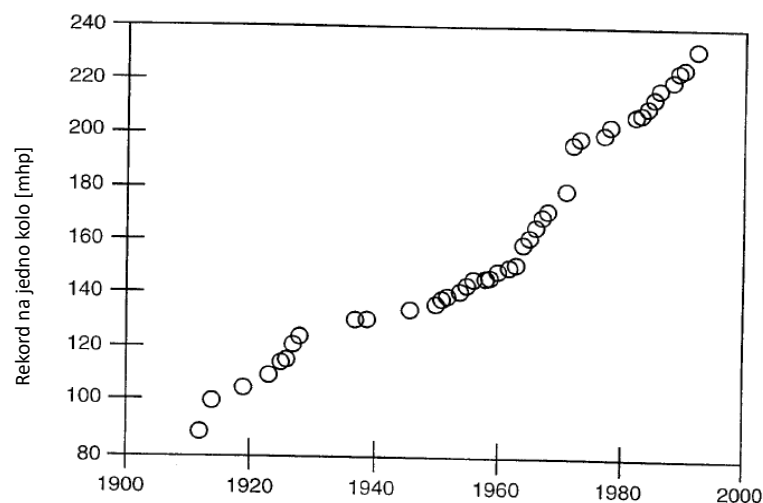
Aerodynamika je obor fyziky, kde se zkoumají síly působící na těleso, které je obtékáno proudem vzduchu. Při tomto obtékání vzniká 6 složek sil a momentů. Jedná se o 3 silové složky a 3 momentové složky. U závodních okruhových vozů je kladen důraz hlavně na dvě silové složky, vznikající obtékáním vozu. Je to aerodynamická přitlačná síla a aerodynamická odporová síla. První závodní vozy na okruhy kladly důraz hlavně na maximální rychlost pomocí minimalizace aerodynamické odporové síly. Ve vysoké rychlosti ale tyto vozy často vytvářely vztlak. Na mírnou nestabilitu prvních závodních vozů měl tento vztlak negativní vliv. Z toho plynul vývoj aerodynamických komponent na zvýšení aerodynamických přitlačných sil, které známe dnes. Jedná se o zadní přitlačné křídlo, tvarování podlahy vozu, celkové tvarování karoserie vozu a další. Největší pokroky ve vývoji těchto komponent u závodních okruhových vozidel nastaly roku 1960. Na obrázku 1 je vidět vůz Chaparral 2E z roku 1966. V té době se začala využívat přitlačná křídla, která podstatně zvyšovala přitlačnou sílu. Díky tomu bylo možno dosahovat vyšších rychlostí v zatáčkách. Přitlačná síla zvyšuje normálové zatížení pneumatik a s tím se zvyšují síly v rovině vozovky, a tudíž je lepší adheze směrem k akceleraci, deceleraci a i k bočním silám. V podstatě se jednalo o letecký profil otočený o 180°. Vývoj aerodynamický komponent dokládají i rychlostní rekordy na jedno kolo na okruhu v Indianapolis. Na obrázku 2 je vidět, že od roku 1960 se maximální rychlost na okruhu v Indianapolis zvyšovala velmi rychle. Od té doby prošla aerodynamika závodních vozů rozsáhlou evolucí, ať už konstrukcí vozů, pomocných výpočetních



Obrázek 1 Vůz Chaparral 2E z roku 1966 [2]

nástrojů, testováním vozů a mnohými dalšími odvětvími, které zlepšují aerodynamické vlastnosti vozu.

V dnešní době najdeme na závodních autech spousty komponent ovlivňujících aerodynamiku vozu. Ať už se jedná o křídla, vírové generátory, pomocné chladicí kanály a další. U moderních závodních vozů se klade důraz na to, aby aerodynamické komponenty fungovaly společně. Jejich společné fungování je dnes možné nasimulovat a odzkoušet ve větrných tunelech s velice přesnými výsledky. U závodních vozidel se snažíme docílit co nejrychlejšího času na kolo, z toho plyne potřeba jet rychle po rovinkách, ale i v zatáčkách. V zatáčkách je vůz na trati držen pomocí třecí síly, která vzniká mezi pneumatikou a vozovkou. Třecí síla na pneumatice je přímo úměrná normálové síle na pneumatice. Z toho důvodu je u závodních vozidel snaha docílit přitížení náprav pomocí aerodynamických komponent generujících aerodynamickou přitlačnou sílu. [1]

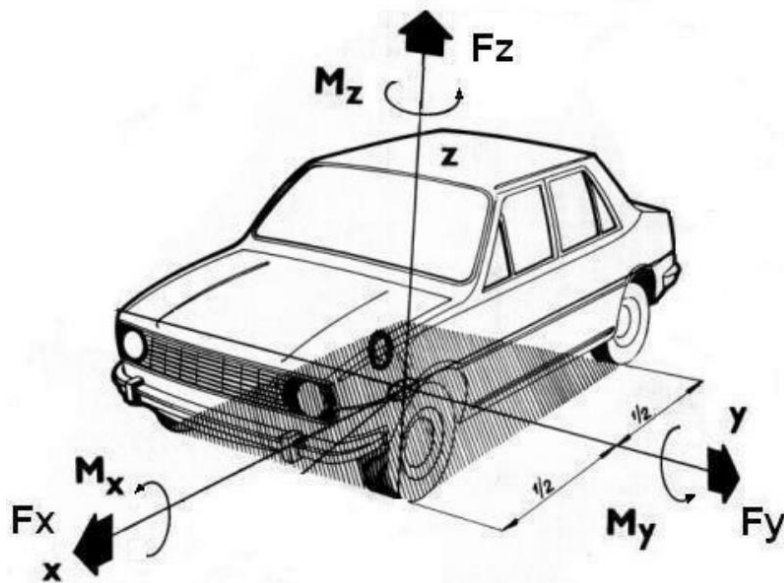


Obrázek 2 Historický vývoj rychlostních rekordů na jedno kolo na okruhu Indianapolis [1]

2.1 Aerodynamické síly

Při rozboru aerodynamiky vozidel vzniká výsledná aerodynamická síla, která má obecný směr i velikost. Z toho důvodu se rozkládá do tří směrů dle základního

souřadnicového systému. V těchto třech směrech vznikají 3 složky sil a 3 složky momentů. [3]



Obrázek 3 Soustava aerodynamických sil a momentů dle obecných pravidel [3]

2.1.1 Aerodynamická odporová síla

Vzorec pro výpočet aerodynamické odporové síly: $F_x = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot C_x \cdot v^2 \cdot A$ rovnice 1.

Aerodynamická odporová síla je závislá na těchto parametrech:

ρ – hustota vzduchu [kg/m^3]

C_x – součinitel odporu [-]

v – rychlost vozidla [m/s]

A – čelní plocha vozu [m^2]

Ze vzorce je vidět, že odporová síla závisí na druhé mocnině rychlosti. Tudíž můžeme říci, že čím vyšší rychlosti dosahujeme, tím vyšší máme odporovou sílu. Koeficient C_x spolu s čelní plochou A je možné brát jako měřítka odporové síly. Koeficient C_x je dán tvarováním vozidla spolu s indukovanými odpory.

Z hlediska jízdních odporů tvoří aerodynamická odporová síla značnou část. Aerodynamický odpor je způsoben tvarováním karoserie, rotujícími koly, proudění vzduchu skrze chladiče atd...

U osobních vozů hraje aerodynamická odporová síla značnou roli, jelikož je na ní závislá ekonomika a ekologie provozu (spotřeba pohonných látek, zatěžování motoru...).

Závodní okruhové vozy mají zpravidla vyšší hodnoty odporových sil, než je tomu u aut osobních. Je to z toho důvodu, že závodní vozy mají aerodynamické komponenty, které způsobují nárůst odporové síly kvůli indukovanému odporu. Indukovaný odpor vzniká díky generování vírů, které aerodynamické komponenty vytvářejí. [1][3]

2.1.2 Aerodynamická přítlačná síla

Vzorec pro výpočet aerodynamické přítlačné síly: $F_y = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot C_y \cdot v^2 \cdot A$ rovnice 2.

Aerodynamická přítlačná síla je závislá na těchto parametrech:

ρ – hustota vzduchu v okolí vozu [kg/m^3]

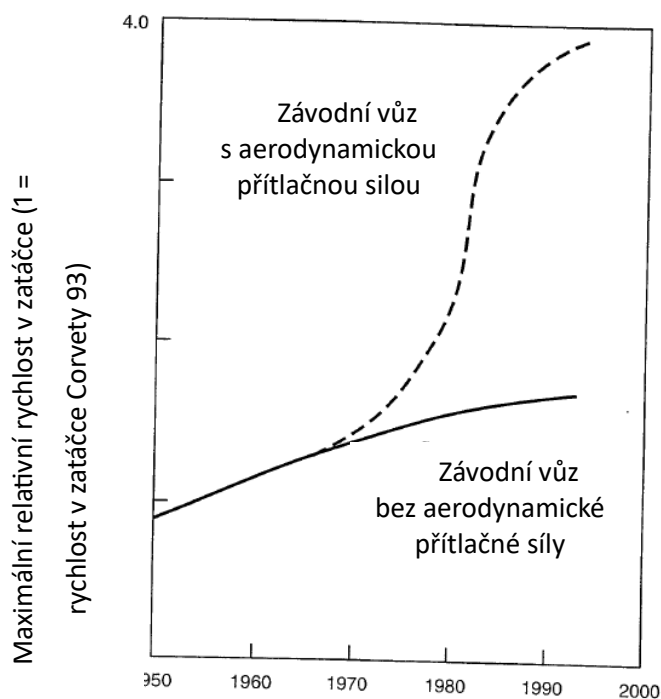
C_y – součinitel vztlaku [-]

v – rychlost vozidla [m/s]

A – čelní plocha vozu [m^2]

Aerodynamická přítlačná síla je v závodních okruhových vozidlech jednou z hlavních složek sil, kterou se konstruktéři zabývají. Je to z toho důvodu, že přítlačná síla je propagována na kola, která drží vozidlo na trati díky tření mezi pneumatikou a vozovkou. Čím vyšší je normálová síla na kolo, tím jsou generovány vyšší síly v rovině vozovky a z toho plyne lepší adheze mezi pneumatikou a vozovkou. Aerodynamická přítlačná síla dokáže zvýšit normálovou sílu na pneumatikách bez zvýšení hmotnosti vozu! Výsledkem zvýšení aerodynamické přítlačné síly je rychlejší průjezd zatáčkami, lepší schopnost akcelerace a decelerace vozu. Aerodynamickou přítlačnou sílu je možné vytvořit nebo ovlivnit například zadním křídlem, splitterem, tvarováním podvozkové části, difuzorem a dalšími prvky, které jsou popsány v následujících kapitolách. [1] [4]

Na obrázku 4 je vidět trend zvýšení relativní rychlosti při průjezdu zatáčkou vozidlem s aerodynamickou přitlačnou silou a bez ní. Dále je na obrázku vidět vývoj aerodynamických komponent od roku 1960.



Obrázek 4 Trend ukazující zvýšení maximální rychlosti v zatáčkách v průběhu let závodních vozidel s aerodynamickou přitlačnou silou a bez ní

2.1.3 Aerodynamická boční síla

Vzorec pro výpočet aerodynamické boční síly: $F_z = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot C_z \cdot v^2 \cdot A$ rovnice 3.

Aerodynamická přitlačná síla je závislá na těchto parametrech:

ρ – hustota vzduchu v okolí vozu [kg/m^3]

C_z – součinitel boční síly [-]

v – relativní rychlost vzduchu vůči vozu [m/s]

A – čelní plocha vozu [m^2]

Aerodynamická boční síla je způsobena větrem, který směřuje na vozidlo pod určitým úhlem, anebo když vůz projíždí zatáčkou. Při průjezdu zatáčkou je vůz v určitém úhlu oproti přímému obtékání vzduchem. Tento úhel zapříčiňuje rozdílné obtékání vozu a způsobuje ovlivnění přitlačné a odporové síly vozu. Aerodynamická boční síla ovlivňuje směrovou stabilitu vozidla. Při průjezdu zatáčkou způsobuje šikmé proudění vzduchu snížení efektivity aerodynamických komponent (hlavně na podvozkové části vozu). [1] [4]

2.2 Bernoulliho rovnice

Bernoulliho rovnice vychází ze zákona zachování energie a je důležitá z hlediska pochopení vztahu mezi rychlostí a tlakem proudícího média. V případě řešení aerodynamiky závodních vozidel je tímto médiem vzduch. Závodní okruhové vozy se pohybují rychlostí, kde Machovo číslo je menší než 0,3, tudíž je možné považovat vzduch za nestačitelný a Bernoulliho rovnici je možné napsat v tomto tvaru:

$$p + \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v^2 = konst. \quad \text{rovnice 4.}$$

p – tlak vzduchu

ρ – hustota vzduchu

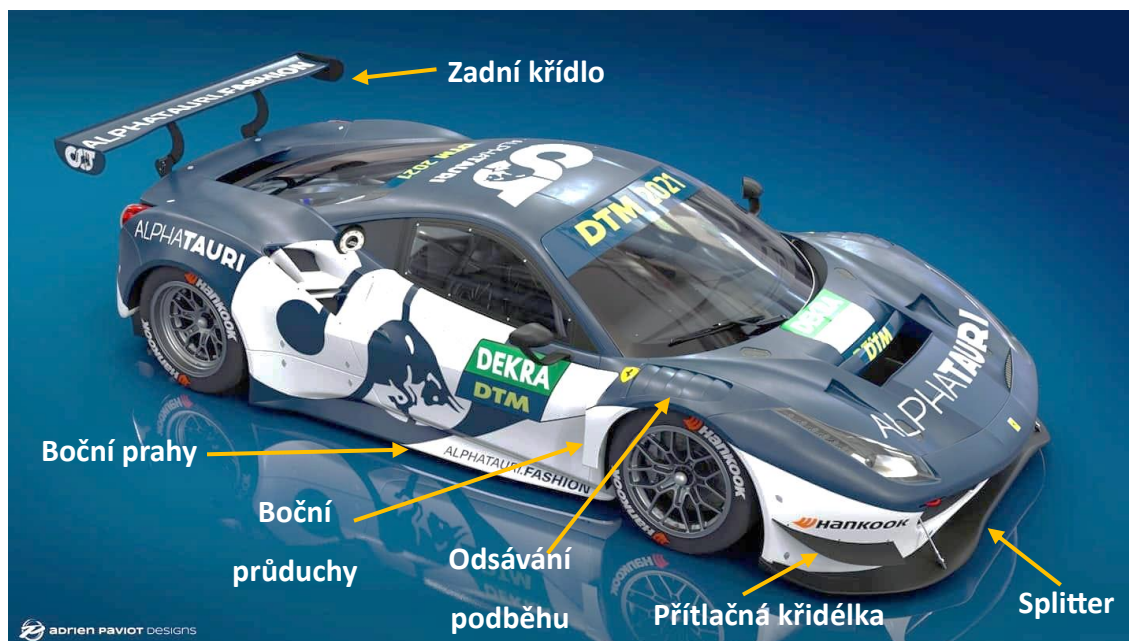
v – rychlost vzduchu

Z této rovnice vyplývá, že pokud rychlost vzduchu naroste, tlak vzduchu se sníží a naopak. Tedy pokud se rychlost vzduchu sníží, tlak narůstá. Díky tomuto principu je možné vytvářet na závodním okruhovém vozidle přitlak. Přitlak (nebo vztlak) je tvořen rozdílem tlaků, tudíž rozdílnými rychlostmi proudění.

3 AERODYNAMICKÉ KOMPONENTY NA ZÁVODNÍCH VOZIDLECH

Na závodních vozidlech, určených na okruhové závody všech tříd, najdeme mnoho aerodynamických komponent. Tyto aerodynamické komponenty pomáhají závodním vozům ve vysokých rychlostech udržet vůz na trati, a to hlavně při jízdě v zatáčkách, kde působí boční síly. Část z nich je vidět, aniž by bylo třeba vůz detailněji prohlížet. Na první pohled si u závodních vozidel můžeme všimnout zadního přitlačného křídla, zadního difuzoru a splitteru. Tyto komponenty jsou popsány v následujících kapitolách. Důležité u závodního auta je, aby aerodynamické komponenty fungovaly správně dohromady. Může se stát, že komponenty, co fungují na jednom určitém vozidle, nebudou správně fungovat na druhém vozidle. Proto je třeba dbát na precizní vývoj těchto aerodynamických komponent a vědět, jak se tyto komponenty navzájem ovlivňují, a jak fungují na daném vozidle. Aerodynamické komponenty ovlivňují stabilitu vozu, maximální rychlost v zatáčkách, brzdnou dráhu, přetáčivost či nedotáčivost vozu a z toho plynoucí konkurenceschopnost. [1]

Aerodynamické komponenty jsou v dalších kapitolách rozděleny do 3 kategorií. V první kategorii jsou hlavní aerodynamické komponenty generující přitlak. V této kategorii je popsán splitter, difuzor spolu s podlahou a zadní přitlačné křídlo. Tyto komponenty se nejvíce podílí na aerodynamickém vyvážení vozu. Aerodynamické vyvážení je parametr rozložení aerodynamických sil mezi jednotlivé nápravy. Tím, že je v dnešní době technika závodních okruhových vozidel na vysoké úrovni a rychlosti vozidel se stále zvyšují, je třeba zvyšovat i velikost přitlaku. Proto jsou v další kapitole popsány komponenty, které podporují generování přitlaku a zároveň napomáhají směřování proudění okolo vozu. V této kapitole jsou popsány vírové generátory, přitlačná křídélka, boční prahy a bočnice křídla. Se zvyšující se rychlostí dnešních závodních vozů stoupá také jejich odporová síla, jak je uvedeno v 2.1.1. Z toho důvodu je třeba řešit i směřování proudění a odvětrávání daných prostor právě kvůli minimalizaci odporové síly. Tyto komponenty jsou řešeny v poslední kategorii následující kapitoly. Popsány jsou zde konkrétně boční průduchy a NACA otvory.



Obrázek 5 Popis viditelných aerodynamických komponent na závodním voze [5]

3.1 Hlavní aerodynamické tvarové komponenty generující přítlak

3.1.1 Splitter

Splitter je komponenta nacházející se na přední části vozu na úrovni podlahy vozu. Typicky je to deska přesahující před vozidlo, která je rovnoběžná s vozovkou. Tuto komponentu můžeme vidět i v poloprofesionálních vozidlech.

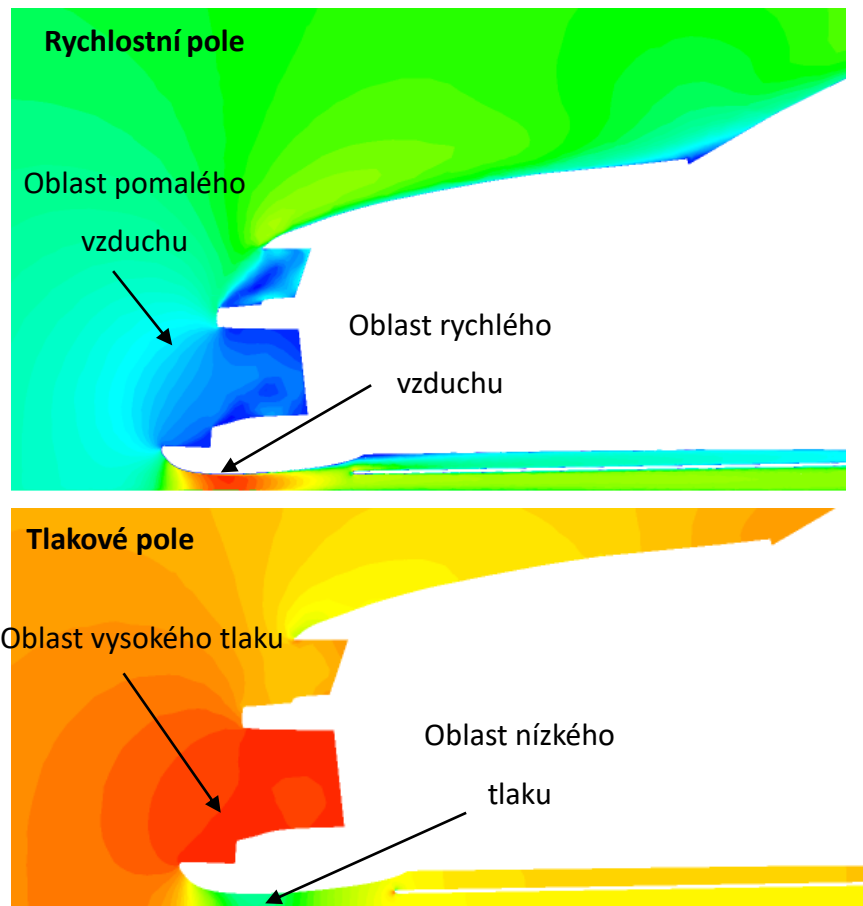
Splitter slouží k vytvoření přítlačné síly na přední části vozidla a velkou měrou se podílí na vyvážení aerodynamického přítlaku mezi přední a zadní nápravou. Přítlačná síla splitteru je dána pomocí rozdílu tlaků nad a pod splitterem. Vzduch, který obtéká vozidlo je před autem zpomalován kvůli tvaru vozidla, a tudíž vzniká oblast s vysokým tlakem. Tato oblast působí na přesahující část splitteru a rozdíl tlaků nad a pod splitterem vytváří přítlak. Rozdíl tlaků může být navýšen ještě díky světlé výšce mezi splitterem a vozovkou. V případě, že bude světlá výška dostatečně malá (ale ne zase tak malá, aby způsobila aerodynamické ucpání), se vzduch proudící pod splitterem výrazně zrychlí, což způsobí vytvoření oblasti s nízkým tlakem, což ještě zvýší rozdíl mezi vysokotlakou oblastí nad splitterem a nízkotlakovou oblastí pod splitterem a výsledná přítlačná síla se zvýší. Možností, jak vzduch pod splitterem urychlit je více. Nejčastěji se využívá nastavení

správné světlé výšky mezi splitterem a vozovkou, dále je možné přizpůsobit tvar splitteru do podoby křídlového profilu, pro ještě větší zrychlení vzduchu.

Kromě vytváření přítlaku je možné využít splitter společně s předními difuzory na navádění vzduchu například na brzdy a pomoci tak k jejich chlazení. [6][7]



Obrázek 6 Ukázka předního splitteru [8]



Obrázek 7 Zobrazení rozložení rychlosti (nahore) a tlaku (dole) na přední části vozu s tvarovaným splitterem

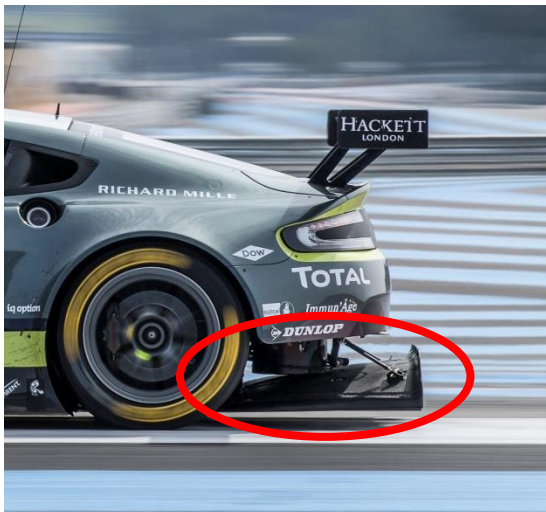
3.1.2 Zadní difuzor a podlaha

Zadní difuzor je jedna z aerodynamických součástí, které jsou vidět na první pohled. Difuzor funguje na principu Venturiho efektu. Venturiho efekt patří k tzv. aerodynamickým paradoxům. To znamená, že rychlost proudění kapaliny je nepřímo úměrná tlaku v proudící kapalině. Tento efekt je vidět na Venturiho trubici, kde se postupně trubice zužuje, poté zúžení chvíli pokračuje a poté se trubice plynule rozšiřuje do původního průměru. V zúžené části trubice kapalina zrychluje a snižuje se její tlak, a následně v rozšířené části (difuzoru) kapalina postupně zpomaluje a tlak se vrací na původní hodnotu na úplném počátku trubice. [1][6][9][11]

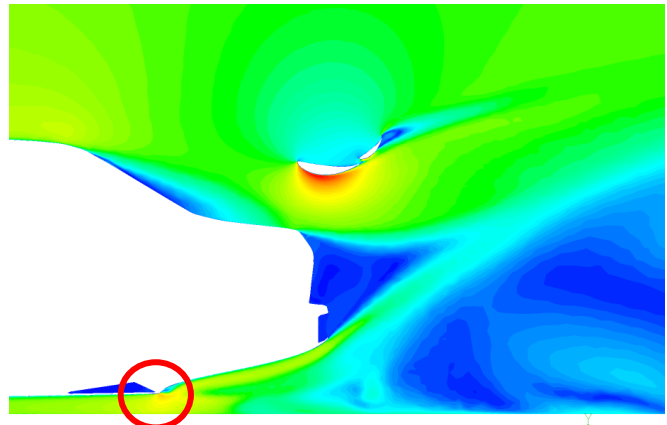
Zadní difuzor zvyšuje po své délce objem prostoru mezi vozovkou a vozidlem. Vzduch tento objem musí postupně zaplňovat. Tudíž vzduch v rozšiřující se části expanduje a vytváří podtlak. Tento podtlak generuje sací efekt, který je vidět na vstupní hraně difuzoru, kde vzduch oproti okolí zrychluje směrem k zádi vozu (viz. obr. 8).

Tento zrychlený vzduch způsobuje podtlak (dle Bernoulliho rovnice v kapitole 2.2), který generuje přítlačnou sílu. V praxi je důležité, aby difuzor vysával v co nejvyšší míře vzduch, který je mezi vozidlem a vozovkou kvůli podpoře urychlení vzduchu pod podlahou vozu a tím přispíval k dosažení vyšší přítlačné síly. Bohužel se stává, že je nasáván i okolní vzduch o vyšším tlaku, než je vzduch pod podlahou vozu, který nízkotlakou oblast pod vozidlem značně ovlivňuje a zapříčiňuje snížení přítlačné síly. [1][4][6]

Často si v difuzoru můžeme všimnout vertikálních žeber. Tato žebra tam jsou z toho důvodu, aby proud vzduchu zůstal připojený na difuzoru a neodtrhl se. Vzduch se od difuzoru neodtrhne díky tomu, že vertikální žebra fungují jako vírové generátory (viz kapitola 3.2.1) a způsobené víry pomáhají udržet vzduch připojený na difuzoru. [1][6]



Obrázek 9 Ukázka zadního difuzoru [15]



Obrázek 8 Rychlostní pole z CFD simulace (červeně označená nejvyšší rychlost – nejnižší tlak)

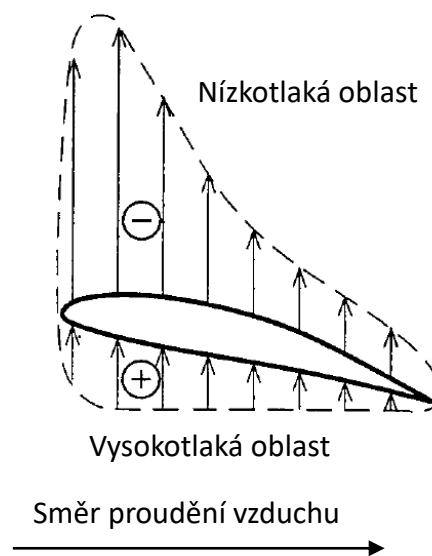
V dnešní době je tvarování podlahy vozu striktně předepsáno pravidly dané kategorie. V podstatě můžeme říct, že je povolena ve většině kategorií pouze rovná podlaha vozu. Díky rovné podlaze vozu je proudění mezi vozidlem a vozovkou laminární. Což má za následek 2 věci. Zprv je snížen odpor vzduchu vozu z důvodu eliminace nežádoucích vírů a odstranění překážek proudícímu vzduchu a zadruhé je generována vyšší přítlačná síla, jelikož rychlost proudícího vzduchu není narušena víry a nežádoucími překážkami, což má za následek vytvoření nízkotlaké oblasti pod vozidlem. [1][4][6]

Rovná podlaha je klíčovým komponentem závodního vozu, zajišťující správnou funkci zadního difuzoru. Díky laminárnímu proudění mezi vozovkou a podlahou je možné, aby difuzor správně ovlivnil zrychlení vzduchu pod podlahou vozu a tím pod ní snížil tlak. Což má za následek enormní nárůst přítláčné síly. I malé snížení tlaku na tak velké ploše jako je podlaha vozu způsobí vytvoření velké přítláčné síly. Toto plyne z rovnice 2. pro výpočet tlaku, kde p je tlak, F je síla v tomto případě přítláčná a A je plocha, v tomto případě plocha podlahy vozu. [1][4][6]

$$p = \frac{F}{A} \rightarrow F = p \cdot A \quad \text{rovnice 5.}$$

3.1.3 Zadní křídlo

Zadní křídlo má spolu se splitterem, difuzorem a podlahou vozu největší podíl na tvorbě přítláčné aerodynamické síly. Dle teorie křídel z oblasti letectví je vzlaková síla generována pomocí rozdílu tlaku mezi horní a spodní částí křídla. Vzduch, který dopadá na křídlo je rozdělen na náběžné hraně na dva proudy, které proudí na horní podtlakovou stranu křídla a na spodní přetlakovou stranu křídla. Na horní straně křídla je vzduch urychlen, a tudíž tam vzniká nižší tlak. Naopak na spodní straně křídla je vzduch zpomalen a tlak se na tomto místě zvyšuje. U závodních vozidel se profily křídla používají otočené o 180° a tudíž negenerují vzlak, ale přítlak. Zadní přítláčné křídlo je základním prvkem aerodynamického vyvážení závodního vozu. Jeho polohou, volbou profilu a rozpětím je



Obrázek 10 Rozložení tlaku na profilu křídla [1]

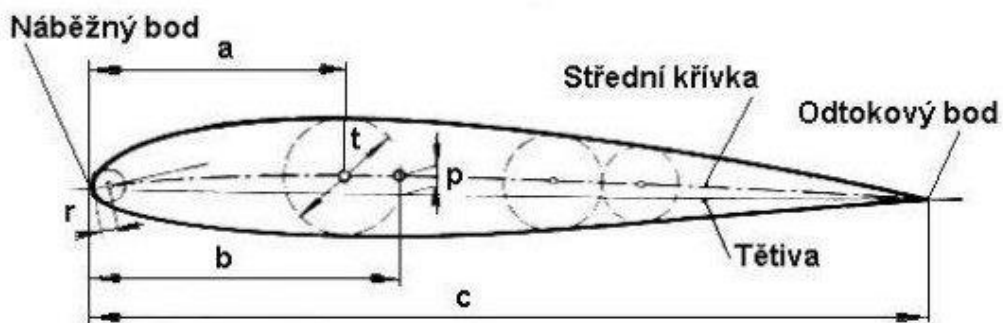
možné ovlivnit míru vygenerované přitlačné síly a tím ovlivnit zatížení náprav vozu. [1]
[4] [6]

Konstrukce křídla je ovlivněna pravidly dané závodní kategorií. Pravidla udávají například zda je možné složit kompletní zadní křídlo z více křídlových elementů, zda je možné použít nějaké ovládací prvky na křídlech (např. systém DRS), šířku zadního křídla atd... Z toho důvodu je konstrukce křídla na každou závodní kategorii specifická. Většinou můžeme vidět zadní křídla o stejném profilu po celé jeho délce. U jednoelementových křídlech je v některých případech možné vidět aerodynamické zkroucení, kdy je tětíva v jedné linii, ale mění se profil křídla, nebo geometrické zkroucení, kdy je profil křídla stejný, ale tětíva se s rozpětím křídla natáčí. [4]



Obrázek 11 Ukázka konstrukce zadních křidel (vlevo jednoelementové, vpravo dvouelementové)

Zadní křídlo, které je vytvořeno leteckým profilem má geometrické a aerodynamické charakteristiky. Mezi základní geometrické charakteristiky patří například náběžný bod/hrana, střední křivka, tětíva, tloušťka profilu a prohnutí profilu. Náběžný bod nebo hrana, pokud bereme křídlo ve 3D je hrana, kde se okolní vzduch prvně dotýká profilu a je zakončena kružnicí o poloměru r . Střední křivka je spojnice středů vepsaných kružnic v profilu křídla. Tětíva křídla reprezentuje nejkratší spojnicí náběžného bodu/hrany s odtokovým bodem/hranou. Tloušťka profilu je největší vzdálenost mezi spodní a horní hranou křídla. Prohnutí profilu reprezentuje maximální vzdálenost mezi střední křivkou a tětívou. Tyto charakteristiky jsou vidět na obrázku 12. [10] [12]



Obrázek 12 Ukázka geometrických charakteristik profilu křídla [10]

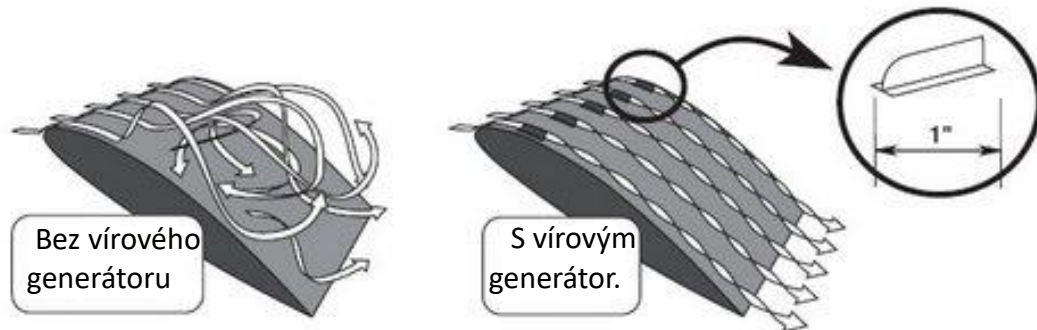
Mezi aerodynamické charakteristiky patří například polára, vztlaková čára, momentová čára a odporová čára. Polára nám udává závislost součinitele vztlaku na součiniteli odporu. Vztlaková čára udává závislost součinitele vztlaku na úhlu náběhu. Úhel náběhu křídla je úhel, který svírá tětiva křídla se směrem proudění vzduchu. Momentová čára definuje závislost součinitele momentu na úhlu náběhu a podobně je tomu u odporové čáry, která udává závislost součinitele odporu na úhlu náběhu. Tyto aerodynamické charakteristiky jsou dány pro každý známý profil křídla dle požadovaného Reynoldsova čísla. Například na stránce airfoiltools.com jsou ke každému profilu křídla tyto údaje dostupné. [10] [12]

3.2 Tvarové aerodynamické komponenty podporující generování přitlaku a proudění okolo vozu

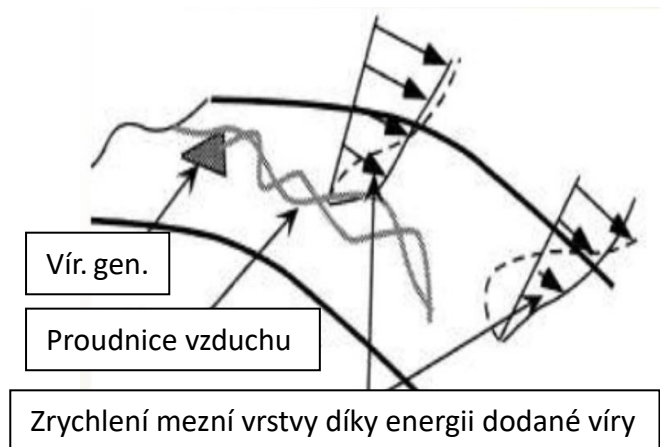
3.2.1 Vírové generátory

Vír se na vírovém generátoru vytvoří díky rozdílu tlaků na stranách vírového generátoru. Na jedné straně vzniká vyšší tlak než na straně druhé. Tím, že se tlaky snaží vyrovnat atmosférickému tlaku, tak jejich mísením vzniká požadovaný vír. Vírové generátory mísí volný proud vzduchu s mezní vrstvou a tím dodávají do mezní vrstvy rychlost a hybnost. Díky tomu má mezní vrstva dost energie a zůstává stále přichycena na povrchu a nedochází k odtržení vzduchu od povrchu. Vytvořením vírů z vírových generátorů se sice vytvoří aerodynamická odporová síla, ale ta je ve srovnání s odporovou silou, která by vznikla odtržením proudu vzduchu od povrchu menší. Další výhodou vytvořením vírů a udržením proudu vzduchu na povrchu je taková,

že aerodynamické komponenty fungují s větší účinností (například na zadní křídlo proudí laminární proud vzduchu, na křídle nedochází k odtržení, a tudíž je zvýšena přitlačná síla...). [20]



Obrázek 14 Ukázka proudění s vírovými generátory [23]



Obrázek 13 Ukázka dodání hybnosti vírem z vírového generátoru (čárkovaná čára – rychlostní profil proudění bez vírového generátoru) [31]

Další využití vírových generátorů může být k vytvoření vírů, které se využívají k utěsnění prostoru mezi podvozkem vozidla a vozovkou. Díky tomu nedochází k mísení vzduchu o nízkém tlaku, který je pod vozem, se vzduchem o vysokém tlaku, který se nachází v okolí vozu. Tím se zvyšuje aerodynamická účinnost podlahy. Například na vozidlech formule 1 najdeme spousty vírových generátorů, které se využívají právě k utěsnění nějakých prostor či podpoře jednotlivých aerodynamických komponent. [15]

3.2.2 Příkladná křídélka

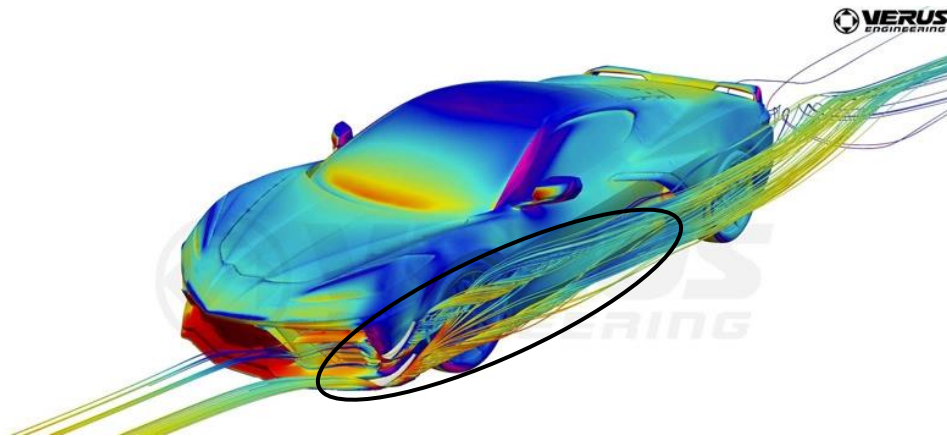
Příkladná křídélka jsou malá trojúhelníková křídélka, která jsou umístěna na krajích přední masky vozu. Tato komponenta pomáhá generovat přítlakovou sílu dvěma cestami.

První z cest lze nazvat „přímou“ a generuje přítlak pomocí polohy a tvaru křidélek. Tato přítlaková síla je způsobena proudícím vzduchem okolo vozu, který při obtékání křidélek změnil směr proudění směrem vzhůru a tím vyvolaná reakce je přítlaková síla. Je zřejmé, že kvůli malé ploše křidélek a faktu, že proudící vzduch je v blízkosti vozu pomalejší, není přítlaková síla velká.

Druhou cestu lze nazvat jako „nepřímou“. Tato cesta pomáhá zvyšovat přítlak pomocí oddělení vysokotlaké oblasti vzduchu nad vozem a nízkotlaké oblasti vzduchu pod vozem. Oddělení je uskutečněno pomocí vírů, které křídélka generují. Víry fungují v podstatě jako „virtuální“ bariéry. V případě, že by tyto víry nebyly vytvořeny, vysokotlaká a nízkotlaká oblast by měly tendenci se spojit a snížilo by to výsledný přítlak. U přítlakových křidélek je důležitá interakce mezi vysokotlakou oblastí nad splitterem a nízkotlakou oblastí pod přítlakovými křídélky. Tyto dvě oblasti spolu reagují a posilují tvorbu vírů za křídélky. Z toho důvodu je důležité zkonstruovat správný tvar křidélek a umístit je vhodně nad splitter, aby došlo k interakci vysokotlaké a nízkotlaké oblasti.
[13]

Příkladná křídélka se využívají i pro doladění aerodynamického rozložení sil na přední a zadní nápravu.

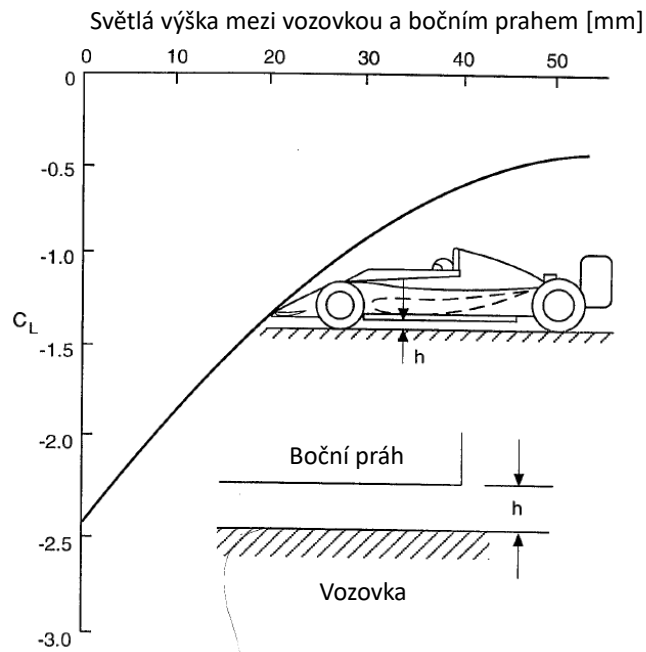
Dále tato křídélka snižují odpor vzduchu, jelikož pomocí vytvořených vírů udrží proudění vzduchu přilepené na boku vozu a nevzniká nežádoucí odtržení ihned za předními koly. [1][4][6]



Obrázek 15 Ukázka funkce přitlačných křidélek na CFD simulaci [14]

3.2.3 Boční prahy (side skirt)

Boční prahy se využívají k redukování proudění vzduchu o vysokém tlaku do prostoru pod vůz, kde je tlak nízký. Zvyšuje se tím účinnost podlahové části vozu, jelikož je tam udržován nízký tlak. Účinnost bočních prahů závisí na tom, jaká je světlá výška mezi prahem a vozovkou. Čím je světlá výška nižší, tím účinnější boční prahy jsou.



Obrázek 16 Závislost součinitele vzlaku C_L na světlé výšce mezi vozovkou a bočním prahem (hodnoty C_L jsou pro konkrétní vozidlo, nelze brát obecně) [1]

Na obrázku 16 je vidět závislost součinitele vztlaku C_L na světlé výšce mezi vozovkou a bočním prahem. [1]

V minulosti byly pokusy zkonstruovat boční prahy, které byly v přímém kontaktu s vozovkou. Výhodou bylo dokonalé utěsnění nízkotlaké oblasti pod vozem od okolní vysokotlaké oblasti, ale bohužel to přinášelo spoustu nevýhod. Toto řešení dostávalo jezdce závodních vozů často do nebezpečných situací, kdy se boční prahy lámaly, nebo přestaly při přejezdu nějaké nerovnosti těsnit a skokově se zmenšila přítlačná síla, na což musel řidič velice rychle reagovat a mnohdy to nedopadlo dobře. [1]

V dnešní době se také hojně využívá utěsnění podvozkové části pomocí komponent, které se snaží prostřednictvím generovaných vírů bezkontaktně utěsnit podlahu vůči vozovce. Toto řešení je výhodné z hlediska hmotnosti vozu, jelikož vírový



Obrázek 17 Boční prahy na voze Porsche 919 Hybrid Evo v kategorii WEC [18]

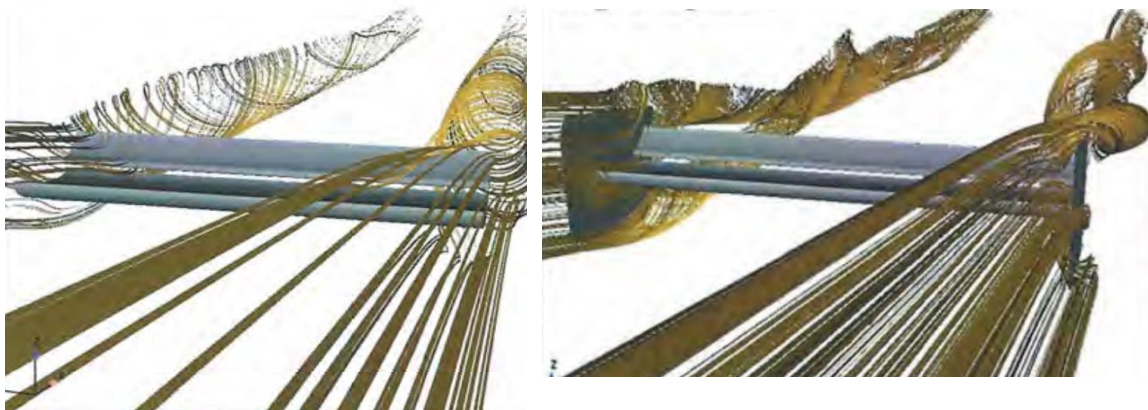
generátor, který vytvoří vír po celé délce vozu je lehčí než celý boční práh. Dále je utěsnění prostoru v celé světlé výšce. [1]

3.2.4 Koncové desky křídla

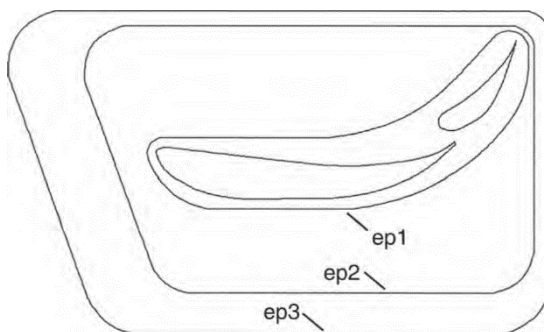
Při obtékání křídla vzniká nesymetrické rozložení tlaku a vzduch má tu vlastnost, že se tyto tlakové diference snaží vyrovnat smísením těchto oblastí. Stejně tak jako je

tomu u vírového generátoru. Nejjednodušší cesta pro mísení těchto tlakových diferencí je právě na konci křídla. Tímto mísením vzniká velmi silný vír, který je energeticky náročný, tudíž generuje odporovou sílu a dále způsobuje snížení rozdílu tlaků mezi horní a spodní stranou křídla, z čehož vyplývá snížení přitlačné síly. Těmto negativním jevům zabráňuje koncová deska, což je vertikální deska připevněná na konci křídla. Samozřejmě je potřeba mít koncovou desku na obou koncích křídla. Účelem těchto koncových desek je zamezení mísení nízkotlaké oblasti s vysokotlakou oblastí. Zároveň tím koncové desky přispívají ke zvýšení přitlačné síly. [1][6]

Čím větší koncové desky jsou, tím vyšší účinnost křídla je. Je to způsobeno tím, že při větší ploše koncových desek je lépe uchován rozdíl mezi vysokotlakou a nízkotlakou oblastí a nedochází k tak prudkému mísení. Velikost odporu a přitlaku při různých velikostech koncových desek je vidět na obrázku 19. [1][6]



Obrázek 18 Ukázka proudění okolo křídla bez koncových desek (vlevo) a s koncovými deskami (vpravo) [6]



Konc. deska	Přítlak [N]	Odpor [N]
ep1	786	188
ep2	873	183
ep3	900	178

Obrázek 19 Porovnání různých velikostí koncových desek [6]

3.3 Hlavní aerodynamické tvarové komponenty upravující proudění

3.3.1 Boční průduchy

Tato komponenta (prvek) je vidět na většině závodních vozů. Použití této komponenty má hned několik důvodů. Všechny důvody se týkají snížení odporu a zlepšení proudění vzduchu. Boční průduchy můžeme vidět za předním a za zadním kolem.

První důvod použití této komponenty spočívá v tom, že většina závodních vozů využívá splitter spojený s předními difuzory. Vzduch, který je nasávaný těmito předními difuzory je potřeba odvést pryč, a nejlépe přes co nejméně překážek, kvůli snížení odporové síly. Boční průduchy uvolňují cestu pro proudění toho nasávaného vzduchu a zvyšují účinnost předních difuzorů. [15]



Obrázek 20 Ukázka bočních průduchů na závodním vozu Mercedes-AMG GT3 [16]

3.3.2 NACA otvory

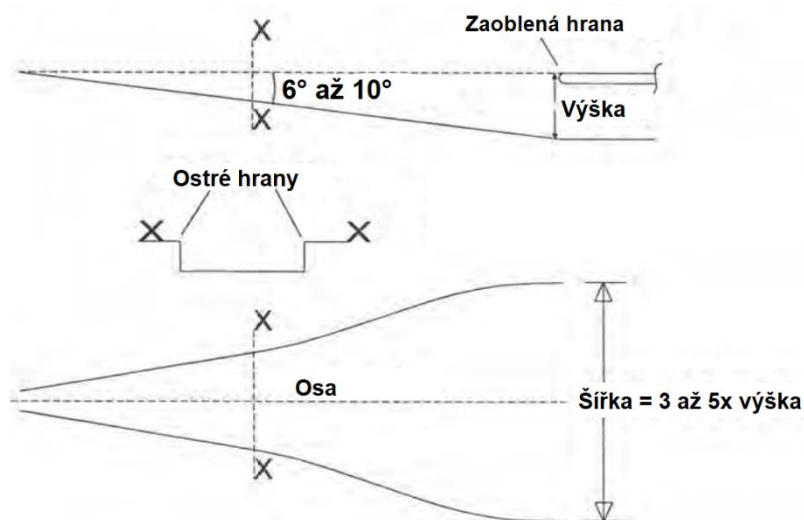
V závodních vozidlech je často potřeba přivést vzduch cíleně na nějaké místo, například kvůli chlazení jednotlivých komponent či elektroniky a zároveň tím nezvyšovat odpory či nějak jinak negativně ovlivňovat proudění vzduchu. NACA otvory jsou vhodnou volbou pro tyto účely. NACA otvor připomíná tvarem trojúhelníkový výřez. Jeho tvar je velmi důležitý a náročný na konstrukci. Záleží, v jaké oblasti vozu se otvor využívá. NACA otvor je možné využít na místech vozu, kde je vyšší tlak. Pro potřebné množství vzduchu, který by například uchlادil motor, by byl NACA otvor příliš veliký. Jeho velikost by se přibližovala k velikosti kapoty vozu. Z toho důvodu jsou pro vysoké objemové toky NACA

otvory nevhodné, a proto se používají jiné vstupy vzduchu. Další nevýhodou, která brání NACA vstupu v použití pro větší objemové toky je ta, že výstupní kanál nemůže být kulatá trubka, ale hranatý kanál, který nemusí být vždy dobrou volbou pro vedení vzduchu. [17]

V případě správné konstrukce NACA otvoru je jeho princip takový, že proudící vzduch vytváří na hranách NACA otvoru víry, které jsou usměrněny směrem dolů, kde pokračuje vedení NACA otvoru. Tyto víry způsobí stažení blízkého okolního vzduchu do NACA otvoru. Hrany NACA otvoru musí být ostré, aby způsobily zvýšení difference tlaků a tím zlepšily tvorbu vírů, které stahují blízký okolní vzduch dovnitř otvoru. Jeho nasměrování má být takové, že „špička“ NACA otvoru míří proti proudění vzduchu. Základní rozměrové definice jsou vidět na obrázku 22. [1][6]



Obrázek 21 Ukázka NACA otvorů na kapotě vozu Porsche [17]



Obrázek 22 Základní definice NACA otvoru [6]

3.4 Nastavitelné aerodynamické parametry vozidla

Na vozidle, které má na sobě různé aerodynamické komponenty, je důležité, aby všechny tyto komponenty byly správně nastaveny a fungovaly společně. Neznamená to totiž to, že stačí na vozidlo připevnit splitter, zadní difuzor, snížit jeho světlou výšku a věřit, že to bude fungovat tak, jaká je představa. Je třeba se na tuto problematiku dívat jako na celek, a ne na jednotlivé komponenty. Z toho důvodu je třeba jednotlivé komponenty nastavit tak, aby bylo docíleno požadovaných jízdních vlastností vozu. U závodních vozidel je možné nastavovat velikost přítlaku, velikost odporu a polohu aerodynamického těžiště. [1] [6]

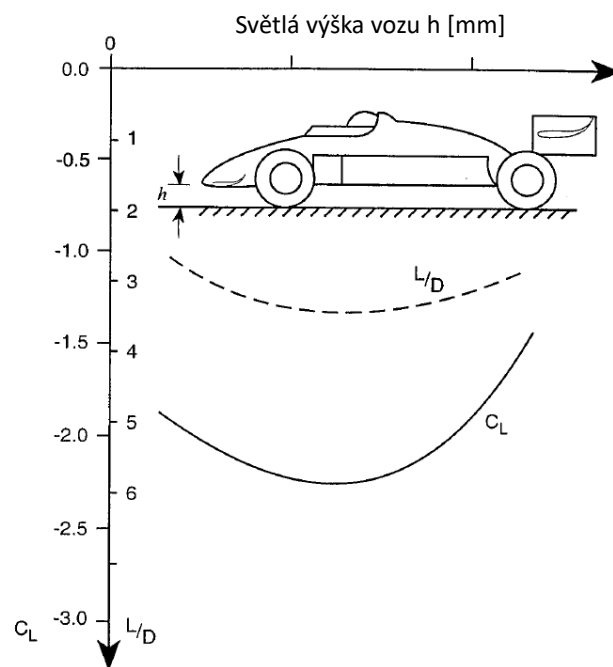
Velikost přítlaku se nastavuje společně s velikostí odporu. Hodnoty těchto sil je možné nastavit pomocí světlé výšky vozu, sklonem podlahy a nastavením úhlu náběhu zadního přítlačného křídla. Tyto možnosti nastavení jsou popsány v následujících kapitolách. [1] [4][6]

Jako další nastavitelný parametr je poloha aerodynamického těžiště. Poloha aerodynamického těžiště se s rychlostí vozu mění a na to je potřeba myslet. Je to z toho důvodu, že aerodynamické komponenty jsou různě veliké a jejich obtékání je také rozdílné. Tyto rozdíly se s přibývajícím rychlostí zvětšují a vzniká nesymetrické zatížení náprav. Proto je potřeba zanalyzovat okruh, na kterém se bude závodit a podle toho nastavit aerodynamické komponenty tak, aby vozidlo mělo požadované jízdní vlastnosti na každém úseku okruhu. Polohu aerodynamického těžiště je možné nastavit pomocí vhodného umístění zadního křídla, světlou výškou vozu a sklonem podlahy. [1] [4][6]

Vhodné nastavení vozu je vždy kompromis mezi přítlakem, odporem a polohou aerodynamického těžiště. Tyto parametry se mohou lišit i dle požadavků jezdce, který bude závodní vůz řídit. [1] [4][6]

3.4.1 Světlná výška vozu

Světlná výška vozu se velkou měrou podílí na celkovém přítlaku. Čím nižší světlná výška vozu je, tím vyšší přítlak je generován. Je to z důvodu Venturiho efektu, který je popsán v kapitole 3.1.2. Je ale zapotřebí dávat pozor na příliš nízkou světlnou výšku, kdy může ve vyšších rychlostech docházet k aerodynamickému ucpání a podlaha vozu nebude fungovat. Jakmile je v důsledku oblasti nízkého tlaku vzduchu mezi podlahou a vozovkou vozidlo přitahováno k vozovce, nastává takzvaný přísavný efekt. Na obrázku 23 je vidět závislost mezi světlnou výškou vozu a součinitelem přítlaku C_L . Dále je na obrázku vidět poměr mezi přítlakem a odporem L/D .



Obrázek 23 Závislost světlné výšky vozu na koeficientu C_L pro konkrétní vůz formulového typu [1]

3.4.2 Sklon podlahy vozu – rake

Sklon vozidla napomáhá zvýšit přítláčnou sílu na podlaze vozidla tím, že pomáhá zvyšovat rychlost proudění pod vozidlem a tím pádem snižovat tlak. Sklon se měří od přední nápravy k zadní nápravě. Jedná se v podstatě o úhel mezi vodorovným povrchem a podlahou vozu. [4][21]

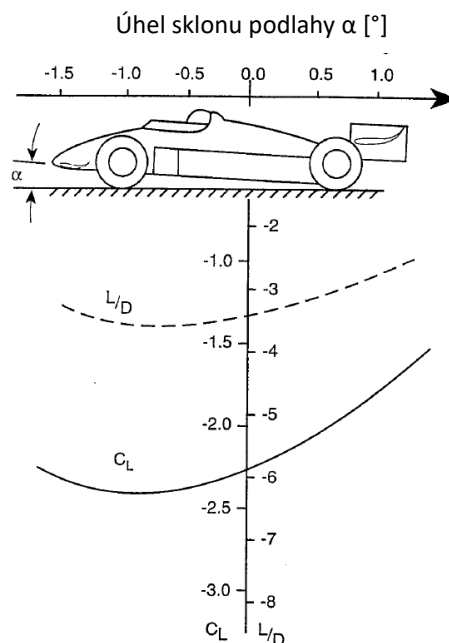
Sklon může být buď pozitivní nebo negativní. Pozitivní úhel sklonu znamená, že zadní část vozu je výše než přední část vozu. Negativní úhel sklonu na druhou stranu znamená,

že přední část vozu je výše než zadní část vozu. U závodních vozidel se používá pouze pozitivní úhel sklonu vozu. Typicky je úhel sklonu 1,5-3°. V případě, že nějaký tým s úhlem sklonu experimentuje, znamená to, že změna světlé výšky vozu se pohybuje v rozmezí jednotek až desítek milimetrů v závislosti na typu vozu. I když se může zdát, že 1,5 – 3° náklonu podlahy nemohou udělat hodně, tak opak je pravdou. Právě díky tomuto sklonu je na podlaze vozu vytvářena většina přítláčné síly. Na obrázku 25 je vidět závislost mezi úhlem sklonu podlahy a součinitelem C_L spolu s poměrem přítlaku a odporu L/D . [21]

Podlaha v tomto mírném sklonu funguje na principu Venturiho efektu a je vytvářen podtlak popsáný v kapitole 3.1.2 u zadního difuzoru. Vlivem zrychlení, brždění a odstředivých sil se může sklon vozidla měnit. I s tím je potřeba při návrhu či nastavování sklonu počítat. [21]



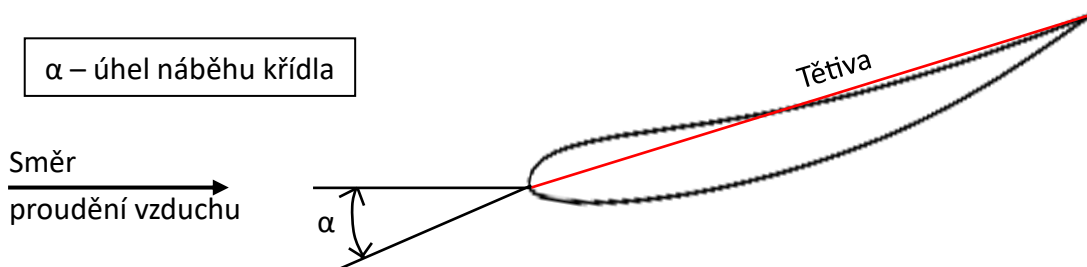
Obrázek 24 Ukázka úhlu sklonu na voze formule 1 [23]



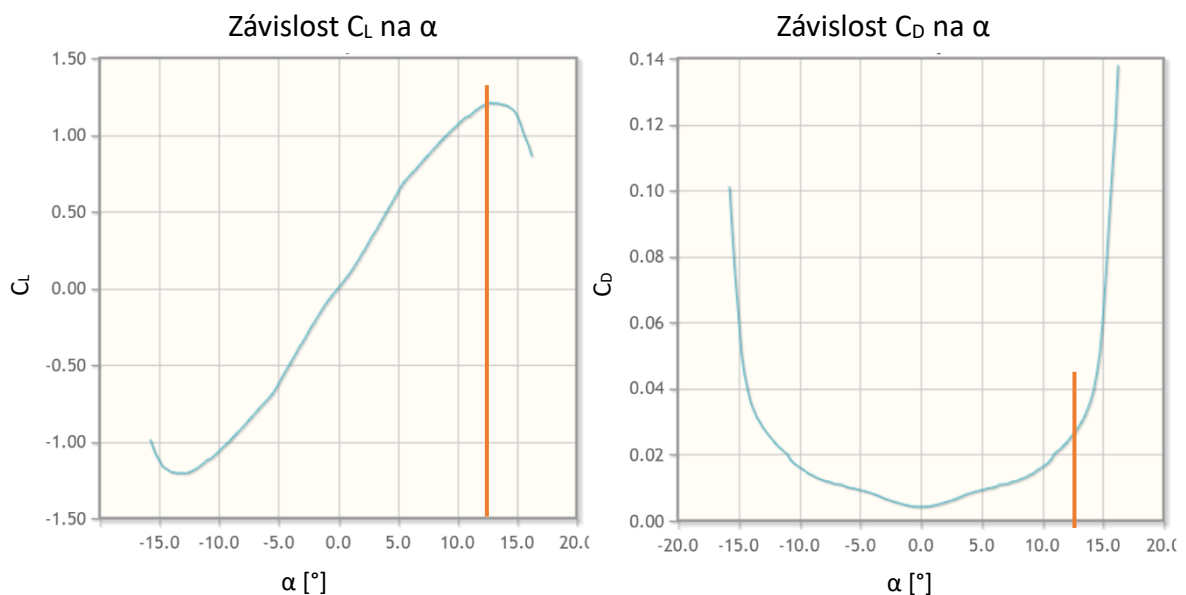
Obrázek 25 Ukázka závislosti mezi sklonem podlahy a součinitelem C_L spolu s poměrem L/D u konkrétního vozu formulového typu

3.4.3 Úhel náběhu křídla

Úhel náběhu křídla je úhel, který svírá tětva křídla se směrem proudění vzduchu. Tento parametr má značný vliv na součinitele přítlaku a tím na výslednou přítláčnou sílu. Každý křídlový profil má svoji charakteristiku závislosti součinitele přítlaku (vztlaku) C_L na úhlu náběhu α zvaný vztlaková čára, která je ukázána na obrázku 27. Další křivka, kterou každý profil má, se nazývá odporová čára, která udává závislost součinitele odporu C_D na úhlu náběhu α (viz. obr. 27). Se zvyšujícím se úhlem náběhu se posouvá bod odtržení vzduchu blíže k náběžné hraně křídla a tím narůstá odporová síla. Jakmile je dosaženo tzv. kritického úhlu náběhu, tak nastává náhlé zmenšení koeficientu C_L a náhlé navýšení odporového koeficientu C_D . V motorsportu je snahou navrhnout křídla tak, aby nedocházelo k odtržení vzduchu od křídla, a tudíž nevznikal přídavný odpor a zároveň se nesnižovala přítláčná síla. O aerodynamických a geometrických charakteristikách je více v kapitole 3.1.3. [1][4]



Obrázek 27 Ukázka úhlu náběhu křídla



Obrázek 26 Ukázka vztlakové (vlevo) a odporové (vpravo) části s vyznačeným kritickým úhlem náběhu z portálu airfool.com

4 CFD

CFD je zkratka pro anglický název Computational Fluid Dynamics neboli počítačová dynamika tekutin. Je to moderní metoda, která se zabývá řešením proudění tekutin, přenosem tepla a hmoty, průběhem chemických reakcí a dalšími jevy s tím souvisejícími. V tomto případě je řešeno proudění, které můžeme popsat rovnicemi s parciálními derivacemi, které nejsou analyticky řešitelné. Tyto rovnice popisují zákon zachování hmotnosti, zákon zachování hybnosti a zákon zachování energie. Rovnice popisující zákon zachování hmotnosti a hybnosti se nazývají jako Navier-Stokesovy rovnice a jsou to základní rovnice mechaniky tekutin. V případě, že je proudění stlačitelné, či je potřeba zahrnout přenos tepla, řeší se dále rovnice zachování energie. [4][22]

Rovnice kontinuity (zákon zachování hmotnosti):

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho v_j)}{\partial x_j} = 0 \quad \text{rovnice 6.}$$

Rovnice zachování hybnosti:

$$\frac{\partial \rho v_i}{\partial t} + \frac{\partial(\rho v_i v_k)}{\partial x_k} = \frac{\partial \sigma_{ki}}{\partial x_k} + \rho f_i \quad \text{rovnice 7.}$$

Díky velkému rozvoji výpočetních zařízení a jejich dostupnosti, je CFD stále používanější. Bohužel ale s masivním rozšířením vzniká také spousta simulací, které jsou fyzikálně špatné a uživatelé je často považují za správné. Při řešení proudění pomocí CFD je zapotřebí mít požadované znalosti ohledně proudění, matematických vztazích a fyzikálních zákonitostech. [22][23]

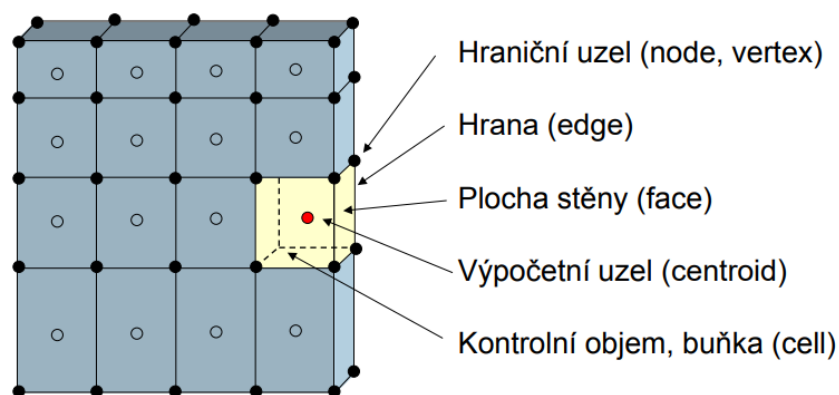
CFD využívá numerické metody pro řešení proudění, jelikož nelze použít analytické řešení z důvodu velmi vysoké náročnosti dnešních výpočtů. Pro jednoduché případy proudění se dříve analytické řešení využívalo. První numerická metoda, která byla využívána, je metoda konečných diferencí. Tato metoda je nejstarší a využívala se na výpočet velice složitých parciálních diferenciálních rovnic. Další metodou je metoda konečných prvků, se kterou se můžeme setkat při simulacích namáhání různých součástí. Princip této metody spočívá v převodu simulovaného objektu na konečný počet prvků. Hrany těchto prvků se stětavají v uzlových bodech, ve kterých jsou určovány

požadované parametry a hodnoty. Tato metoda není vhodná pro turbulentní proudění. Poslední metoda, která je nejvíce využívána (cca 90 % řešičů) pro řešení CFD výpočtů je metoda konečných objemů. Tato metoda je podrobněji popsána v následující kapitole. [22][23]

4.1 Metoda konečných objemů

Metoda konečných objemů spočívá v rozdělení výpočetního objemu na konečně malé kontrolní objemy pomocí dané sítě. Tyto kontrolní objemy mají jak uzly, tak i kontrolní body, které jsou umístěny ve středu kontrolního objemu. A právě tyto kontrolní body jsou velice důležité, jelikož je v nich uložena informace o veličinách, které jsou potřeba k řešení proudění, a které sledujeme. Přesun informací v kontrolním bodu mezi kontrolními objemy probíhá přes stěny kontrolních objemů a počítají se jako suma integrálů přes jednotlivé stěny. Z toho plyne sada lineárních algebraických rovnic. V každém kontrolním objemu je jedna lineárně algebraická rovnice. [22] [24]

Tato metoda je vhodná na tvarově složité objekty, jelikož variabilita ve tvaru kontrolních objemů dokáže při správném nastavení velikosti kontrolních objemů dobře aproximovat povrch simulovaného objektu. Další nespornou výhodou této metody je výrazné zkrácení výpočetních časů pro náročnější úlohy ve srovnání s jinými používanými metodami, například metodou konečných diferencí či metodou konečných prvků. Metodu konečných objemů lze použít na výpočet turbulentního proudění, nadzvukového proudění a směšování. [24]

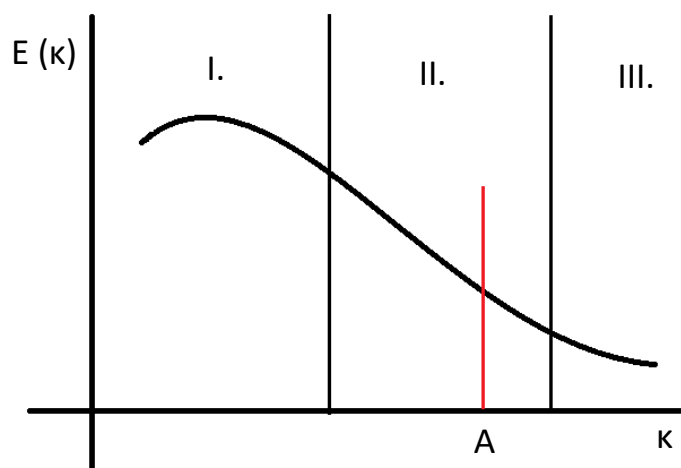


Obrázek 28 Výpočetní síť pomocí metody konečných objemů [22]

4.2 Modelování turbulentního proudění

Turbulentní proudění je deterministicky náhodný pohyb částic tekutiny. Skládá se z různých velikých vírů. Velké víry mají většinu energie a postupně se rozpadají na menší víry, které skončí disipací energie nejmenších vírů v teplo. Výpočet turbulentního proudění je složitá problematika, která vyžaduje velký výpočetní výkon (často použity superpočítače), který často v praxi není dostupný. Jelikož při výpočtu závodních okruhových vozidel jsou skoro všechny aplikace turbulentní, je zapotřebí tuto problematiku vyřešit. Vyvinuly se metody, které umožňují výpočet turbulentního proudění pomocí vybraných turbulentních charakteristik. Tyto metody jsou v praxi využívány, jelikož nevyžadují tak velký výpočetní výkon v podobě superpočítačů a dosahují přesných výsledků. Na druhou stranu žádnou z těchto metod, využívající vybrané charakteristiky turbulence, nelze využít na všechny druhy výpočtů. Volba turbulentního modelu závisí na mnoha aspektech. Například na způsobu toku, požadované přesnosti, dostupnosti výpočetního výkonu, konkrétní inženýrské aplikaci atd... [23][25][26]

Turbulentní proudění je možno rozdělit do 3 oblastí dle energetického spektra turbulentních vírů (obrázek 29). V následujících kapitolách jsou tyto metody popsány.



Obrázek 29 Rozdělení turbulentního proudění dle energetického spektra

4.2.1 Metoda přímé numerické simulace (DNS)

Direct Numerical Simulation (DNS) neboli metoda přímé numerické simulace je teoreticky vhodná na všechny 3 oblasti energetického turbulentního spektra (oblast I., II., III. v obrázku 29). Tato metoda řeší Navier-Stokesovu rovnici s vysokou přesností. Nevýhodou této metody je potřeba velmi jemné výpočetní sítě, která vyžaduje extrémní výpočetní výkon. K nutnosti extrémního výpočetního výkonu přispívá i to, že metoda nepočítá s modelem turbulence, ale prostorové vlastnosti tekutiny jsou řešeny v síti prvků o velikosti nejmenších vírů, které se mění na teplo. Z toho plyne, že nejmenší prvek sítě musí být stejně velký nebo menší než nejmenší vír, který se ve výpočtu objevuje. Dále počet buněk rychle narůstá se zvyšujícím se Reynoldsovým číslem. Když dáme dohromady velmi jemnou výpočetní síť a s tím spojený velmi malý časový krok pro zachycení nejmenších vírů dostáváme kombinaci, které vede k nereálnosti výpočtů. Proto se tato metoda využívá pouze v laboratořích pro speciální případy, výzkumné účely, pro velmi malé a velmi jednoduché geometrie s nízkou hodnotou Reynoldsova čísla. [25][26]

4.2.2 Metoda velkých vírů (LES)

Large Eddy Simulation (LES) neboli metoda velkých vírů je dnes používána v oborech jako je například spalování, anebo ve větrných proudech v atmosféře. Tato metoda počítá s víry, které jsou na obrázku 29. znázorněny od hodnoty v bodě A k počátku. Využívá toho, že energie, hybnost, hmota a další vybrané veličiny jsou přenášeny ve většině případů pouze velkými víry. Díky tomu, že jsou počítány pouze velké víry, lze mít výpočetní síť s menším počtem kontrolních objemů a větším časovým krokem než v metodě DNS. Menší víry, které jsou zodpovědné za energetickou disipaci jsou modelovány tzv. subgridními modely. Tyto malé víry jsou pak odstraněny pomocí filtrace turbulentního pole. Oproti tomu ve srovnání s metodami RANS je výpočetní síť metody LES pořád dost jemná, takže se i tak nelze vyhnout použití velkého výpočetního výkonu. Dále je u této metody potřeba velmi jemná síť v blízkosti stěn, což prodlužuje čas výpočtu a jeho náročnost na výpočetní výkon. [25][26]

4.2.3 Metody časového středování (RANS)

Tato metoda využívá časového středování Navier-Stokesových rovnic a je dnes nejvíce využívanou metodou pro inženýrské aplikace mechaniky tekutin. Tato metoda je nejvhodnější v poměru přesnosti výsledků, náročnosti na výpočetní výkon a ekonomické stránce výpočtů. RANS metoda pouze modeluje charakteristické veličiny vírů a řeší časově zprůměrované hodnoty proudění, což velmi snižuje nároky na výpočetní výkon a čas. I přesto, že hodnoty jsou zprůměrované, tak se dosahuje požadované přesnosti. Základ této metody vychází z předpokladu, že okamžitou hodnotu veličin lze rozdělit na dvě složky, a to časově středěnou a flukтуаční. Když je středování využito na rovnici kontinuity a na Navier-Stokesovu rovnici, tak lze odvodit Reynoldsovy rovnice, které ulehčují rovnice popisující proudění. Bohužel se u tohoto odvození vytvoří nové neznámé. Tyto neznámé lze zapsat do tenzoru turbulentních napětí, který se pak vyjadřuje pomocí různých modelů výpočtu tohoto členu. Těchto modelů existuje několik. Liší se počtem rovnic, tvarem rovnic a dalšími aspekty. Mezi tyto modely patří například modely typu Spalart-Allmaras, $k-\epsilon$ a dané modifikace, $k-\omega$ a dané modifikace. [23][25][26]

a) Model Spalart – Allmaras

Jedná se o jednoduchý jednorovnicový výpočetní model turbulentního proudění. Tento model řeší transportní rovnici pro turbulentní viskozitu. Původně byl tento model navržen pro letecké aplikace, kde se řeší obtékání stěn se slabým odtržením. V případě vystavení mezní vrstvy velkému tlakovému gradientu dává tento model dobré výsledky. Tento model není vhodný pro výpočet aerodynamiky vozů, jelikož u vozů dochází k velkým odtržením a dále tento model nedává dobré výsledky ve volném proudu. [22] [23]

b) Modely $k-\epsilon$ (standart, RNG, realizable)

Pro stanovení turbulentní viskozity transportní rovnice využívají modely $k-\epsilon$ rovnici pro kinetickou energii k , a rovnici pro rychlost disipace ϵ . Modely $k-\epsilon$ jsou proto dvourovnicové výpočetní modely turbulentního proudění. Reynoldsova napětí

tyto modely řeší pomocí turbulentní viskozity. Rozdíl mezi k- ϵ modely je ve způsobu stanovení turbulentní viskozity. Všeobecně modely k- ϵ fungují dobře ve volných prouděch, ale mají horší výsledky v blízkosti stěn. Což neznamená, že se nedají pro proudění okolo stěn použít. [23][25]

Model Standart k- ϵ

Tento model je jeden z nejznámějších modelů turbulentního proudění. Byl vytvořen v roce 1974. Je známý díky tomu, že výpočty přenosu hybnosti a tepla jsou velice robustní, výpočet je z ekonomického hlediska velmi přívětivý a zároveň poskytuje dostatečnou přesnost pro většinu typů turbulentního proudění. Je to semi-empirický model a odvozené rovnice modelu sází na teorii, úvahy a empirii z experimentů. Od proudění se očekává, že je plně turbulentní a efekt molekulární viskozity je zanedbatelný. Z toho důvodu je možné model Standart k- ϵ použít pouze v případě vysokých Reynoldsových čísel. Z modelu se postupem času začaly vyvíjet různé modifikace, které využívají jeho výhod a snaží se odstranit nedostatky. Jedná se například o modely RNG k- ϵ , anebo Realizable k- ϵ . V dnešní době jsou využívány spíše modifikace tohoto modelu. [22][25]

RNG k- ϵ model

Model vznikl úpravou formulace disipace ϵ . Úprava spočívá v přidání členu, který opravuje turbulentní kinetickou energii a turbulentní disipaci při proudění po velmi zakřivené stěně/geometrii. Tím je zlepšena přesnost při velkých rychlostech deformace. Na druhou stranu je tento model v nějakých případech nepoužitelný, jelikož nedosahuje takové přesnosti. Jedná se například o simulaci trysek, kde jsou horší výsledky než u modelu Standart k- ϵ . [23][25]

Realizable k- ϵ model

Další a nejnovější úprava modelu k- ϵ je model Realizable k- ϵ . Ve srovnání s modelem Standart k- ϵ má tento model dvě odlišnosti. Tento model obsahuje odlišnou formulaci pro turbulentní viskozitu a dále obsahuje modifikovanou transportní rovnici pro ϵ . Model Realizable přináší značné vylepšení jako model RNG oproti modelu Standart k- ϵ pro proudění s velkým zakřiveným proudem, víry či rotací. Různé studie poukazují na to, že model Realizable poskytuje nejlepší výkon oproti ostatním modelům k- ϵ , a proto je

v dnešní době tento model nejpoužívanější a nejdoporučovanější. Bohužel i tento model má nějaké nedostatky. Jeden z jeho nedostatků je, že model vytváří nefyzikální turbulentní viskozitu v situacích, kdy se výpočetní oblast skládá z rotační pohyblivé sítě. [22][23]

c) Modely k- ω (standart, SST)

Modely k- ω jsou dvourovnicové podobně jako modely k- ϵ . Liší se rovnice pro disipaci energie. Rovnice disipace energie ω má oproti rovnici pro ϵ několik výhod. Nejzásadnější výhodou je v tom, že rovnici pro ω lze snadno integrovat bez dalších podmínek přes viskózní podvrstvu. Modely k- ω celkově lépe popisují a predikují záporný tlakový gradient, mezní vrstvy, a hlavně odtržení proudění. [23][25]

Standart k- ω model

Tento model je upravený Wilcoxův model k- ω , který obsahuje úpravy pro nízká Reynoldsova čísla, stlačitelnost a smykové proudění. Slabinou tohoto modelu je řešení rovnic k a ω ve volném proudu mimo smykové vrstvy. Model je přesný v blízkosti stěny, ale v rostoucí vzdálenosti od stěny přesnost klesá. V podstatě přesnost tohoto modelu jde přesně naopak než modely k- ϵ . Model Standart k- ω je empirický model založený na výpočtu transportních rovnic pro kinetickou energii turbulence k a na výpočtu rovnic pro specifickou disipaci energie ω . [22][25]

Model k- ω SST

Model k- ω SST (Shear-Stress Transport) vznikl za cílem spojit robustnost modelu k- ϵ a přesnost modelu k- ω v oblastech blízko stěny s přesností modelu k- ϵ ve volném proudu. Tento model spojuje modely k- ω a k- ϵ pomocí matematické funkce. V blízkosti stěny je tato funkce rovna jedné a tím pádem se aktivuje model k- ω . Ve volném proudu je potom tato funkce rovna nule a je aktivován pouze transformovaný model k- ϵ . Díky tomu je model k- ω SST přesnější, spolehlivější a jeho využití je v širokém spektru aplikací. Právě při výpočtu aerodynamiky vozidel je tento model hojně využíván. [23][25]

Existují další modely turbulence, které využívají více rovnic, jiné veličiny atd... Zde jsou uvedeny pouze ty modely, které jsou v praxi nejpoužívanější a jsou z hlediska výpočetních výkonů optimální.

5 TESTOVÁNÍ V AERODYNAMICKÝCH TUNELECH

Aerodynamický tunel je zařízení, ve kterém se generuje proudění vzduchu určitou rychlostí s velmi nízkou turbulencí, které proudí rovnoběžně s podlahou tunelu. Aerodynamický tunel se používá k měření různých aerodynamických charakteristik vozidel, letadel, tahačů a dalších strojů nebo zařízení. Jedná se o měření sil, průtokových veličin, tlaků atp. Často se pro tato měření používají zmenšené modely skutečných strojů či zařízení. Aerodynamické tunely se rozdělují dle typu konstrukce, maximální rychlosti proudění a dle velikosti. Aerodynamické tunely jsou v podstatě velké stavby s vysokými provozními náklady a vysokými náklady na údržbu. Čím větší tunel tím vyšší náklady. To je důvod, proč si velké aerodynamické tunely mohou dovolit pouze velké automobilky a velké společnosti. [1] [4]

5.1 Typy aerodynamických tunelů

Aerodynamické tunely se dle typu konstrukce dělí na aerodynamické tunely s otevřeným okruhem a uzavřeným okruhem. Jejich rozdíl je popsán v kapitolách níže.

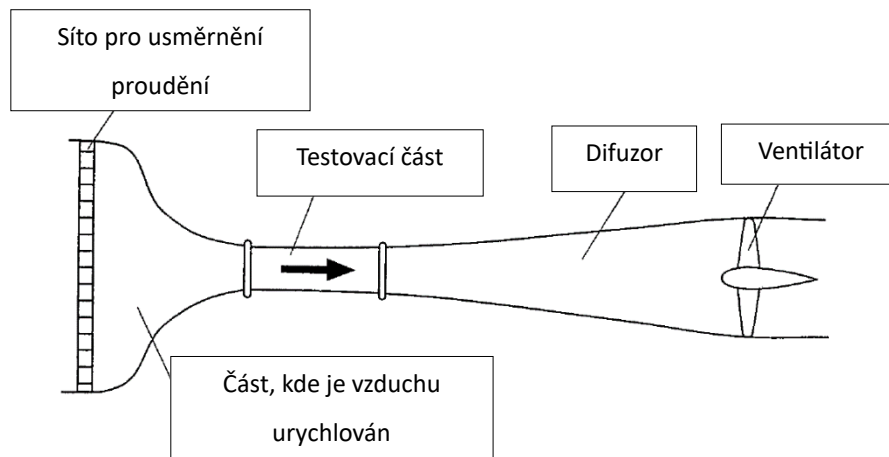
5.1.1 Aerodynamický tunel s otevřeným okruhem

Tento typ aerodynamického tunelu je nejjednodušší na výstavbu a jeho pořizovací náklady jsou nízké. Na druhou stranu provoz tohoto tunelu je dražší než v případě tunelu s uzavřeným okruhem. Vzduch v tomto typu tunelu nekoluje v okruhu. Vzduch, co vstoupí do tunelu je na konci tunelu vypuštěn do okolí. Tento typ tunelu v malém měřítku je nejčastěji na univerzitách, kde se testují modely v malých velikostech. [1]

Výhoda tohoto typu tunelu je ta, že při vizualizaci proudění například pomocí kouře se tento kouř v tunelu nehromadí a nezpůsobuje zbytečné zkreslení výsledků. Další výhodou je taková, že se vzduch v průběhu zkoušky neotepluje a není třeba ho dodatečně chladit. [1]

Nevýhody tohoto typu tunelu jsou v podstatě dvě. První nevýhoda je v závislosti na okolním prostředí, resp. podmínkách. V případě, že je tunel umístěn venku, tak negativním vlivem se stává okolní vítr, nečistoty v ovzduší, proměnlivá teplota okolí

a nízké teploty okolí. Druhá nevýhoda je vysoká energetická náročnost a možné nesplnění hlukových emisí v případě, že je tunel umístěn venku. [1]



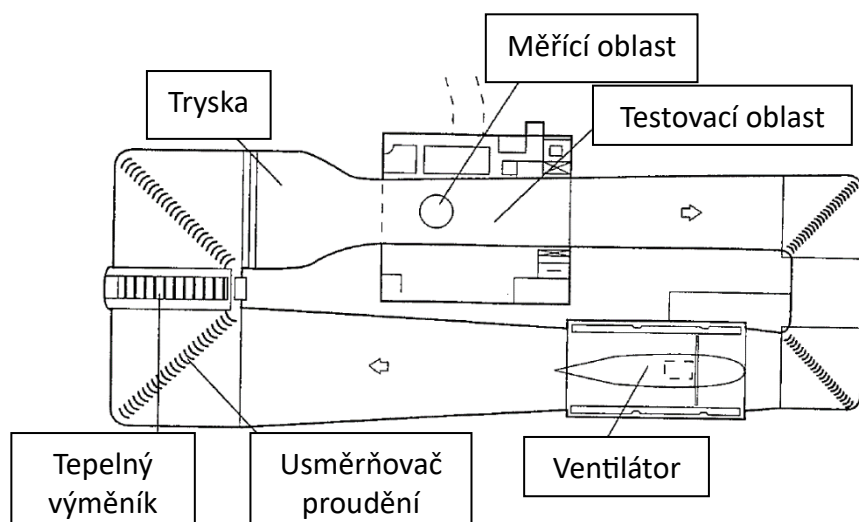
Obrázek 30 Schéma otevřeného větrného tunelu [1]

5.1.2 Aerodynamický tunel s uzavřeným okruhem

Větrný tunel s uzavřeným okruhem je v praxi více využíván, jelikož se lépe regulují vlastnosti vzduchu, tunel není závislý na okolním prostředí a jeho provoz je levnější. Naopak pořizovací náklady jsou vyšší než v případě tunelu s otevřeným okruhem. U tohoto typu tunelu je vzduch uzavřen v jednom okruhu a cirkuluje. [1]

Výhody tohoto tunelu plynou například z nižší energetické náročnosti provozu. Další výhodou je lepší kontrola nad vlastnostmi proudícího vzduchu. Díky tepelným výměníkům je možné vzduch chladit či ohřívat. [1]

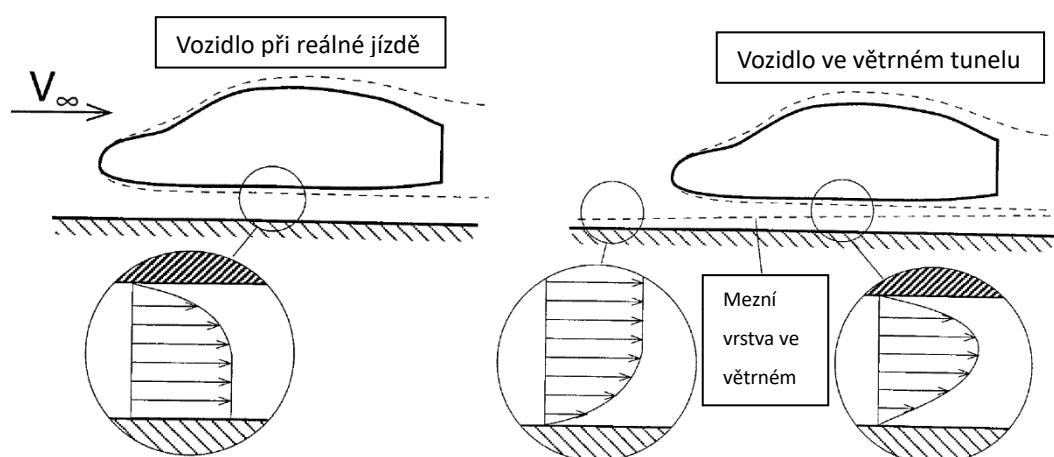
Nevýhody tohoto typu tunelu plynou z cirkulace vzduchu a pořizovacích nákladech. V případě, že by vzduch nebyl v průběhu chodu tunelu nějak vyměňován docházelo by k oteplování vzduchu a zanášení vzduchu kouřem z vizualizace proudění. Z toho důvodu musí být tunel vybaven výměníkem tepla nebo výměníky vzduchu. Ideálně kombinací těchto výměníků. Další nevýhodou jsou pořizovací náklady a velikost budovy, kterou tunel představuje. [1]



Obrázek 31 Větrný tunel s uzavřeným okruhem [1]

5.2 Simulace pohyblivé vozovky a rotujících kol

Problematika pohyblivé vozovky a rotujících kol je při testování závodních vozidel ve větrném tunelu velice klíčová. Jelikož z předchozích kapitol víme, že většina přítlaku se generuje na splitteru, podlaze a difuzoru, tak je velmi důležité tyto komponenty otestovat správně. K tomu je zapotřebí napodobit testování ve větrném tunelu tak, aby bylo co nejvíce podobné reálné situaci na silnici. Tyto dvě problematiky si popíšeme v následujících kapitolách. [1] [4]



Obrázek 32 Mezní vrstva při reálné jízdě (vlevo) a mezní vrstva ve větrném tunelu bez pohyblivé vozovky (vpravo) [1]

5.2.1 Simulace pohyblivé vozovky

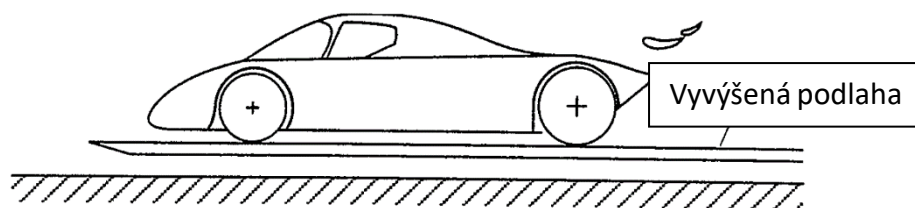
Pohyblivou vozovku je třeba nasimulovat hlavně kvůli správnému rychlostnímu profilu proudění vzduchu mezi vozidlem a vozovkou. Tento rychlostní profil je ovlivněn mezní

vrstvou, která při reálné jízdě vzniká pouze na povrchu vozidla, kdežto při testování ve větrném tunelu bez pohyblivé vozovky vzniká mezní vrstva jak na vozovce, tak na vozidle. Tento rychlostní profil, který je ovlivněn mezními vrstvami, působí na rozložení tlaků a tím pádem na velikosti aerodynamické přítlačné síly. Ve větrném tunelu automobilky GM bylo zjištěno, že mezní vrstva má většinou tloušťku okolo 0,1 m. To znamená, že pokud by bylo testováno vozidlo, které má několikanásobně větší světlou výšku než udávaných 0,1 m, tak by výsledky testování bez pohyblivé vozovky nebyly tolik zkresleny a daly by se považovat za správné. Kdežto při testování závodních vozidel, které mají světlou výšku většinou nižší než udávaných 0,1 m by výsledky byly velice zkreslené a rozhodně by se nedaly považovat za správné. [1][4]

V následující části je ve zkratce popsáno, jaké jsou možnosti řešení simulace pohyblivé vozovky.

a) Vyvýšená přízemní rovina

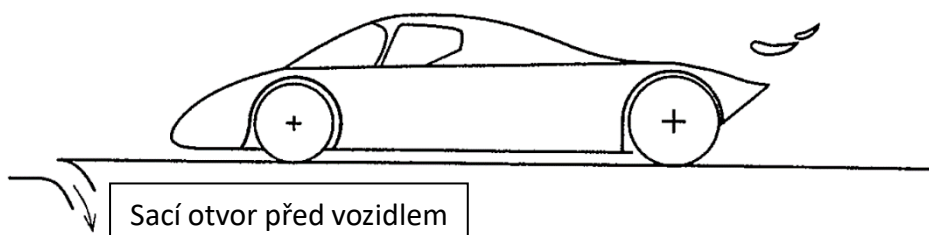
Idea tohoto řešení je taková, že podlaha, na které je vozidlo testováno (testovací rovina), je výše než referenční podlaha větrného tunelu, a tudíž není na testovací rovině tak rozvinutá mezní vrstva jako na referenční podlaze větrného tunelu. Teoreticky by mezní vrstva na testovací rovině měla být menší. [1][4][6]



Obrázek 33 Testování vozidla s vyvýšenou podlahou [1]

b) Podélný sací otvor před vozidlem

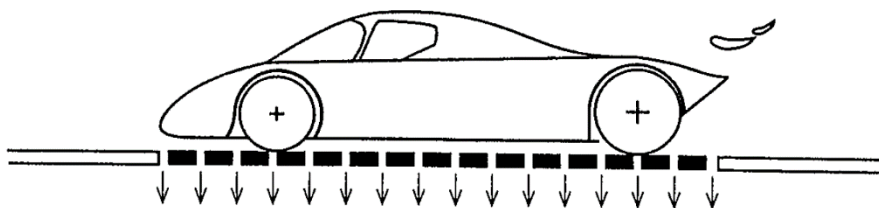
Toto řešení spočívá v principu „odebrání“ rozvinuté mezní vrstvy před vozidlem. Jakmile proud vzduchu překoná sací otvor před vozidlem začne se vytvářet nová mezní vrstva, která má menší tloušťku, než kdyby se k vozidlu dostala rozvinutá mezní vrstva od referenční podlahy. Pro lepší efektivitu by neměla tloušťka nové mezní vrstvy začínající za sacím otvorem překonat 10% světelné výšky vozidla. Díky jednoduchosti je toto řešení hojně využíváno. [1][4][6]



Obrázek 34 Testování se sacím otvorem před vozidlem [1]

c) Odsávání mezní vrstvy po celé délce vozidla

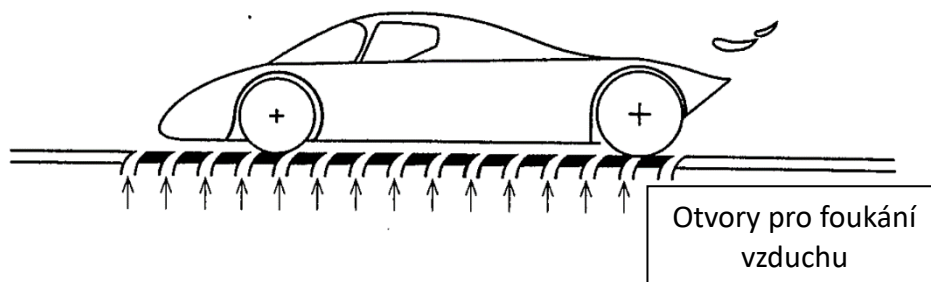
Sací otvory po celé délce vozu v podstatě „odebírají“ mezní vrstvu po celé délce vozidla a tím nejvíce napodobují reálný stav. Bohužel je toto řešení složité na konstrukci a je také finančně náročné. [1][4][6]



Obrázek 35 Testování vozidla se sacími otvory po celé délce [1]

d) Vyfukování mezní vrstvy po celé délce vozidla

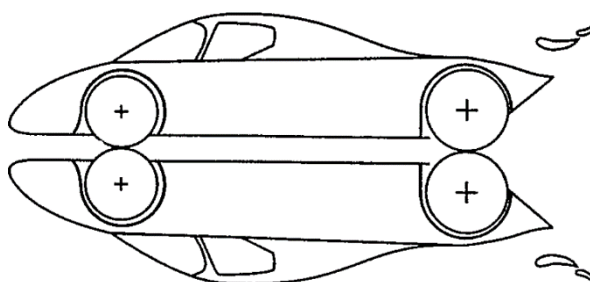
Oproti předchozímu řešení, kde byla mezní vrstva odebírána, je v tomto řešení do mezní vrstvy přidávána rychlost a hybnost, aby se rychlostní profil vyrovnal. Jako v předchozím případě je toto řešení složité a finančně náročné. Jedná se ale o přesné řešení simulace pohyblivé vozovky. [1][4][6]



Obrázek 36 Testování vozidla s foukáním vzduchu po celé délce vozu [1]

e) Symetrický model

Dalším řešením je využití symetrie. To znamená, že se dva modely vozu na sebe zrcadlově usadí. Rovina symetrie je v tomto případě tvořena proudnicí. Díky symetrii je rychlostní profil proudícího vzduchu pod vozem stejný, jako v případě reálné jízdy na okruhu. Toto řešení je ale velice drahé, jelikož potřebujete dva modely vozu místo jednoho. Dále jsou komplikace s ukotvením vozů a s měřícím prostorem pro dva vozy. Toto řešení se v praxi moc nevyužívá. [1][4][6]

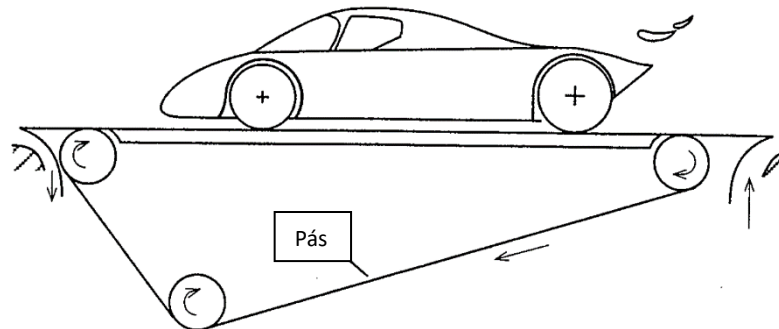


Obrázek 37 Testování vozidla pomocí symetrie [1]

f) Pohyblivý pás

Pohyblivý pás je asi nejlepší řešení v poměru složitosti konstrukce, přesnosti výsledků a finanční náročnosti. Vozovka je v tomto případě nahrazena pohyblivým pásem. Ačkoliv se toto řešení může zdát jako nejlepší, má několik komplikací. První z komplikací je rychlost pohybujícího se pásu. V případě testování sportovních vozů je třeba testovat vůz ve vysoké rychlosti a tuto rychlost nemusí pohybující pás splňovat. Další nevýhoda je taková, že v případě silného podtlaku pod vozem může být pás nadzvednut a rázem se změní světlá výška vozidla a naruší se proudění vzduchu pod vozidlem. A poslední

komplikací je uložení vozidla tak, aby se na pásu nehýbalo. Vozidlo je buď chyceno seshora, nebo vzadu. Obě tyto varianty ovlivňují proudění okolo vozu. V případě uchycení seshora je ovlivněno proudění na zadním křídle. Uchycení vozidla na zadní části zase může způsobit ovlivnění proudění v difuzoru. [1][4][6]



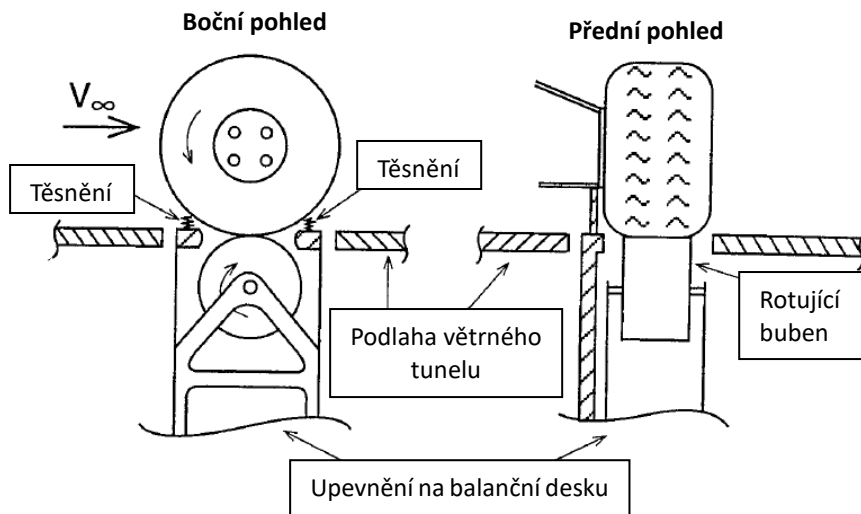
Obrázek 38 Testování vozidla s pohyblivým pásem [1]

5.2.2 Simulace rotujících kol

Tím, že je při testování snaha docílit stavu, který je blízký realitě, nesmí chybět rotující kola. V případě testování závodního vozidla bez rotujících kol, byly by výsledky testování chybné. [1]

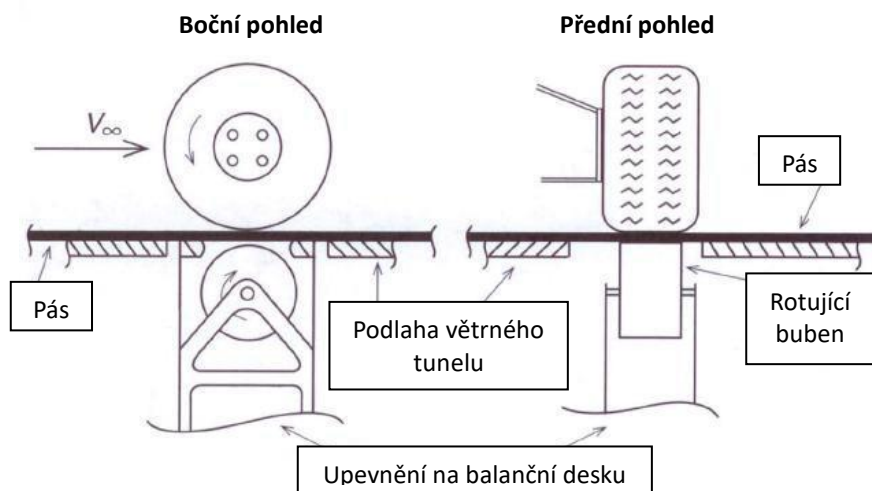
V případě, kdy ve větrném tunelu není pohyblivá podlaha ve formě pohyblivého pásu, ale pouze se nějakým způsobem simuluje, je možné kola uložit na rotující bubnu, který kola roztáčí a zároveň slouží k zaznamenávání sil na každém kole. Toto řešení je přesnější z hlediska zaznamenávání sil každé kolo zvlášť. Na druhou stranu zde vznikají problémy, které je třeba řešit. Jeden z těchto problémů je utěsnění prostoru mezi pneumatikou a částí podlahy u otáčejícího bubnu. Utěsnění způsobí to, že proudící

vzduch neprojde k otáčejícímu bubnu, a tudíž všechen vzduch, který jde pod vůz, je využit tak jak konstruktéři zamýšleli. [1] [6]



Obrázek 39 Rotující kola na nehybné podlaze větrného tunelu [1]

Díky tomu, že je dnes ve větrných tunelech hojně využívána pohyblivá podlaha ve formě pohyblivého pásu, je možné síly na kolech měřit přes tento pás pomocí rotujících bubnů, které jsou pod každým kolem. Tím, že je pás vložen mezi pneumatiku a buben, tak může vznikat určitá nepřesnost stlačováním pásu a třením mezi pásem a bubnem či pneumatikou. To vede k problematice toho způsobu měření. Měření se musí nejprve zkalibrovat, aby bylo měření přesné (kalibrace měření se musí provádět vždy). Kalibrace je jeden ze základních kroků každého měření. Kalibrace je následně použita pro korekci naměřených dat. [1] [6]



Obrázek 40 Rotující kola na pohyblivé podlaze větrného tunelu [1]

6 POPIS PRAGA R1

Praga R1 je závodní vůz určený na okruhové závody. Tento vůz je cenově dostupný (v kategorii závodních vozů), lehký a při vývoji byl kladen velký důraz na aerodynamiku a bezpečnost. Praga R1 je unikátní ve spojení nízkých provozních nákladů s výkonem překonávající závodní kategorii GT3. Vůz může připomínat styl LMP (Le Mans Prototype), kterým byl inspirován. [27]

Aerodynamika tohoto vozu je na vysoké úrovni. Důkazem toho je to, že vůz dokáže generovat přítlakovou sílu až o velikosti jeden a půl násobku své hmotnosti. Je to díky optimalizované aerodynamice karoserie a podlahy. Díky tomu může vůz dosahovat v zatáčkách přetížení až 3G. Při spojení této přítlakové síly, nízké hmotnosti a výkonnému motoru je vytvořen vůz, který je velice rychlý a mrštný v zatáčkách. To přináší obrovské výhody oproti konkurenci. Zajímavostí tohoto vozu je, že se jedná o 1,5místné vozidlo. Sedačka řidiče se dá posunout ze základní střední polohy na kraj monokoku. Díky tomu lze do vozu přidat další sedačku a usadit spolujezdce. Usazení spolujezdce není ideální, jelikož jednu nohu, která je blíže boku monokoku musí mít spolujezdec pokrčenou a nemůže ji natáhnout, jelikož ve vozidle není dost místa. [27]

Bezpečnost tohoto vozu je díky spojení uhlíkových vláken a kevlarových vláken na vysoké úrovni. Vůz disponuje předním a zadním crash boxem, které jsou vyrobeny z uhlíkových vláken a kevlaru. Při crash testech monokoku v testovacím centru ve Velké Británii, které byly provedeny dle standardů FIA CN byl monokok nepoškozen. Když je k tomu přidán šestibodový bezpečnostní pás, podpůrný systém HANS, boční opěrky pro helmu, palivovou nádrž schválenou FIA, polykarbonátová okna a integrovaný hasicí systém, vznikne závodní vůz, který snad už nemůže být bezpečnější. [27]



Obrázek 41 Praga R1T na okruhu

Vůz Praga R1 se vyrábí ve třech konfiguracích. Konkrétně se jedná o verze Praga R1, Praga R1s a Praga R1T.

Technické specifikace:

Motor: Renault Sport Formula 2010 2.0 – 4 válce, 16 ventilů

	Praga R1	Praga R1s	Praga R1T
Hmotnost [kg]	592	592	625
Výkon motoru [kW]	157/7250 min ⁻¹	175/7250 min ⁻¹	254/6900 min ⁻¹
Točivý moment [Nm]	220/4500 min ⁻¹	250/5200 min ⁻¹	410/5750 min ⁻¹
Rozměry [mm]	965 x 4144 x 1800 (výška x délka x šířka)		
Rozvor [mm]	2525		

Informace z roku 2019 [27]

Metodika této práce je provedena na modelu vozu Praga R1.



Obrázek 42 Praga R1 [28]

7 METODIKA POSTUPU AERODYNAMICKÉ ANALÝZY

Navrhovaná metodika aerodynamické analýzy má za úkol zjistit, která komponenta, případně skupina komponent, má na vybraný model vozu výrazný aerodynamický vliv, a které je třeba upravit. Pomocí této metodiky je možné zjistit jak pozitivní, tak i negativní vliv dílčích komponent. Je to vhodná pomůcka pro konstruktéry a aerodynamiky, aby věděli, na jakou oblast modelu se mají při úpravě zaměřit, či je daná komponenta (nebo skupina komponent) správně navržena dle původních záměrů. Tato metodika aerodynamické analýzy se skládá z několika kroků. Tyto kroky jsou dále obecně popsány.

7.1 Studium zkoumaného modelu

Nejprve je třeba se na zkoumaný model (v tomto případě Praga R1) pořádně podívat a zkusit odhadnout jaké části mohou aerodynamicky ovlivňovat jiné části, jak by mohl vzduch okolo modelu proudit a zda na první pohled nebude spatřena nějaká část modelu, která by mohla mít negativní vliv na aerodynamiku. Jakmile je model pochopen a je vytvořena základní představa o jeho fungování, je možné přejít dále.

7.2 Vytipování důležitých komponent

V dalším kroku je třeba si na modelu vytipovat jednotlivé komponenty či části, které aerodynamické vlastnosti vozu výrazně ovlivňují. Tyto komponenty mohou vůz ovlivňovat jak pozitivně, například zvýšením přitlaku, tak i negativně, například zvýšením odporu či nechtěným vytvářením vírů. Mezi vytypované komponenty mohou patřit i takové komponenty, u kterých chceme zjistit aerodynamický vliv na celkový vůz. V tomto případě to je například splitter, difuzor s podlahou, zadní křídlo, kola, zrcátka atp. Tyto komponenty je třeba od modelu odseparovat, aby bylo možné je v pozdějších krocích od modelu postupně odstraňovat a dále s těmito komponentami pracovat samostatně.

7.3 Vytváření dílčích variant modelu

V tomto kroku, kdy jsou odseparované důležité díly, je možné vytvářet jednotlivé varianty modelu vozu. Tyto jednotlivé varianty budou v následujících krocích postupně

simulovány, takže je lepší si jednotlivé varianty dobře pojmenovat a ukládat zvlášť. Dílčí varianty se vytváří tak, že se postupně od celkového modelu vozu odstraňují jednotlivě vytipované důležité komponenty z předchozího kroku. Varianta, při které máme model vozu, od kterého jsou odstraněny všechny důležité vytipované součásti, nazveme „základní těleso“. Vytipované komponenty nelze však odstraňovat v jakémkoliv pořadí. Je třeba se zamyslet nad tím, které díly se navzájem aerodynamicky ovlivňují, které fungují lépe samostatně a podle toho komponenty postupně odstraňovat. Ideální odstraňování je takové, kdy se postupuje obecně řečeno z vnějšku dovnitř. To znamená, že jako první jsou odstraněny díly, které jsou v podstatě nejvíce vzdálené od základního tělesa až po díly, které se základnímu tělesu blíží nejvíce.

7.4 Simulace a vyhodnocení dílčích variant

V posledním kroku je každá varianta simulována zvlášť. Při těchto simulacích je nutné sledovat požadované veličiny a jejich výsledné hodnoty zapisovat. Tyto sledované hodnoty každé varianty jsou poté mezi sebou porovnány. Z tohoto porovnání je možné zjistit, jak se vybrané komponenty podílí na aerodynamických vlastnostech daného modelu vozu. Díky tomu je možné určit, zda se dané komponenty podílí na aerodynamických vlastnostech správně či nikoliv. Jakmile je provedeno takovéto vyhodnocení je možné přejít k návrhu optimalizace dané komponenty či oblasti komponent.

Po optimalizaci vybraných komponent je provedena simulace celého modelu znovu, samozřejmě s optimalizovanými komponentami. U této simulace se musí sledovat stejné veličiny jako v simulacích dílčích variant. Výsledky této nové simulace se poté porovnají s předešlými simulacemi a vyhodnotí se, zda optimalizace byla úspěšná či nikoliv. Tento proces se opakuje dokola až do té doby, nejsou výsledky takové, jaké jsou požadovány.

8 POUŽITÝ SOFTWARE A TURBULENTNÍ MODEL

Z předchozí kapitoly je patrné, že se jedná o komplikovanou problematiku, která propojuje jak práci s 3D modely, tak problematiku spojenou se správným provedením CFD simulací. Vzhledem k dostupnému modelu Pragy R1, který je formátu stl, je potřeba najít vhodný CAD software, který dokáže pracovat s takovýmto formátem, a zároveň bude schopný exportovat data do vhodného programu pro řešení CFD simulací.

Z provedené rešerše dostupných CAD programů a programů pro CFD simulace jsou pro práci zvoleny programy od firmy Ansys. Firma Ansys má ve svém portfoliu programy, které řeší přesně to, co je potřeba a zároveň jsou tyto programy dostupné na fakultě.

Program pro přípravu modelu a dílčích variant se jmenuje SpaceClaim. Tento program ve své podstatě nahrazuje klasické CAD programy. Dokáže skvěle pracovat jak s daty ve formátech stl, obj, tak s klasickými CAD daty, například ve formátu step. Z toho vyplývá, že SpaceClaim je nejlepší volbou pro přípravu dat k CFD simulacím, jelikož je možné pracovat s daty ve formátu stl a step v jednom prostředí. Další nespornou výhodou je to, že SpaceClaim je uzpůsoben pro přípravu dat do programu Fluent, který je využit k CFD simulacím. Tudíž je možné vyloučit problémy spojené s exportováním a kompatibilitou připravovaných dat s programem Fluent.

Jak už je patrné z předchozího odstavce, tak zvolený program pro CFD simulace z portfolia firmy Ansys se jmenuje Fluent. Program Fluent využívají i velké závodní týmy, jako například závodní oddělení Ferrari Competizioni GT. Tento program využívá metodu konečných objemů a jsou v něm dostupné různé modely turbulence. Výhody tohoto programu spočívají v uživatelské přívětivosti, výborných výpočetních vlastnostech a možnosti sledování různých veličin v průběhu výpočtu. Pro vizualizaci výsledků simulací je zvolen program CFD-post, který je vhodný na vizualizace výsledků.

Z provedené rešerše turbulentních modelů je pro výpočet zvolen model k- ω SST. Je zvolen na základě přesné predikce odtržení proudu vzduchu od stěny, správného zachycení záporných tlakových gradientů a dobré přesnosti výpočtu v blízkosti stěn.

9 ROZDĚLENÍ PRAGY R1 DO JEDNOTLIVÝCH VARIANT

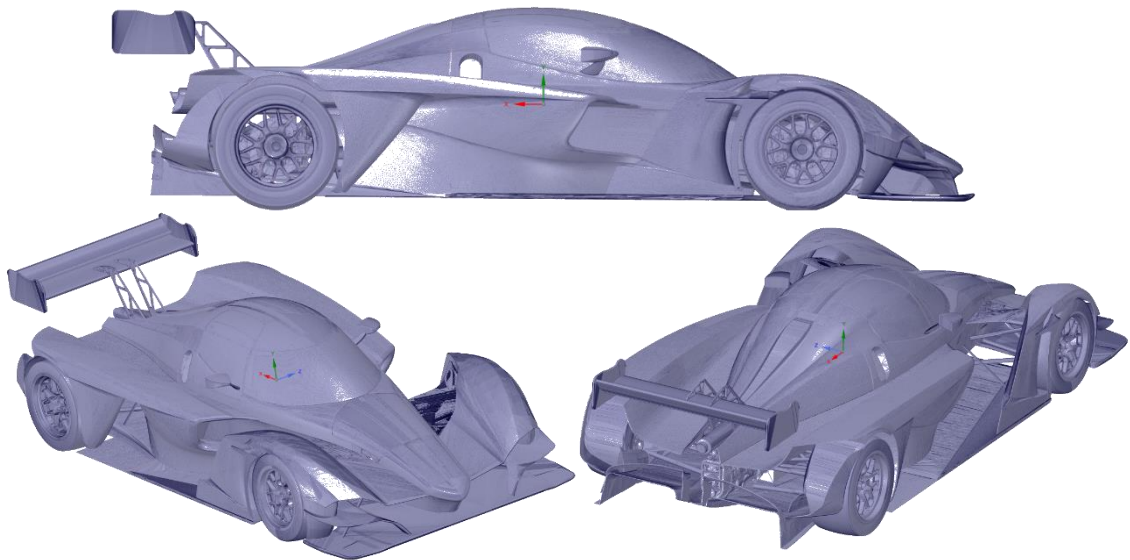
Model Pragy R1 je dle kapitoly 7.1 nastudován, a dle kapitoly 7.2 jsou vytypovány důležité komponenty. Poté je model v programu SpaceClaim rozdělen na jednotlivé díly a jsou vytvořeny jednotlivé varianty.

Za důležité komponenty jsou zvoleny tyto: splitter, difuzor spolu s podlahovou částí, kola s brzdovými kotouči, těhlicemi a jejich nápravami, boky vozu, chladiče, přední blatníky, přední křídélka, zadní blatníky, zadní křídlo, zpětná zrcátka a kryty za předními koly. Z toho plyne, že základní těleso, které zbylo po odstranění všech vybraných komponent se skládá z monokoku, předního deformačního boxu, horního krytu motoru, výfukového potrubí a motorové jednotky (motor, převodovka a doplňující komponenty).

U každého výpočtu dané varianty bude sledován přítlak, odpor, boční síla a momenty okolo všech tří os. Tyto hodnoty budou poté porovnány. Z toho bude možné získat obraz toho, jak se jednotlivé komponenty podílí na aerodynamických vlastnostech vozu. Dále budou u každé varianty vyhodnocovány proudnice zobrazující proudění okolo vozu. Porovnáním těchto proudnic je možné odhalit vzájemné ovlivnění vybraných aerodynamických komponent.

9.1 Varianta 8

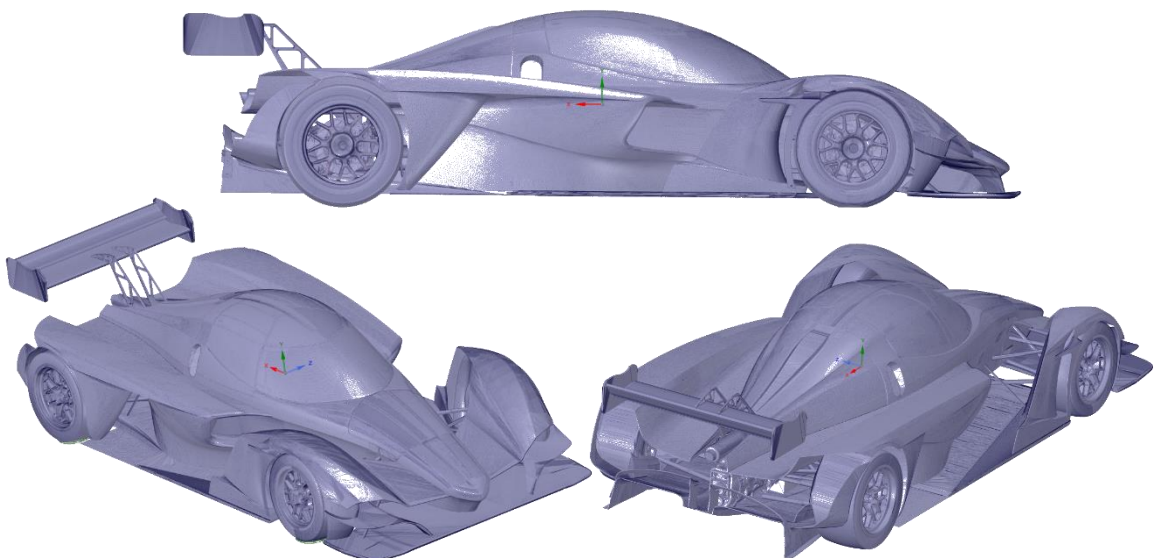
Tato varianta představuje data o kompletním voze se všemi komponentami. Po simulaci této varianty se zjistí, jaké síly vůz generuje a jak vypadá proudění okolo kompletního vozu.



Obrázek 43 Dílčí varianta 8

9.2 Varianta 7

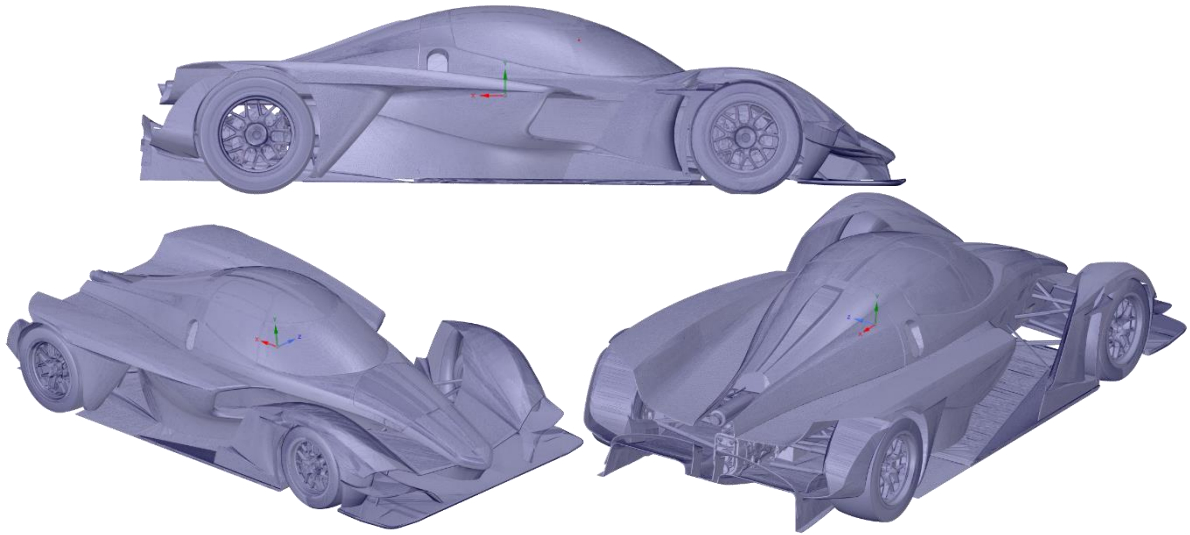
Tato varianta vznikla odebráním krytu za předními koly a zpětnými zrcátky. Důvodem odebrání krytu za předními koly je pozorování vlivu těchto komponent na proudění vzduchu do chladicích tunelů a zjištění vlivu na přítlak a odpor.



Obrázek 44 Dílčí varianta 7

9.3 Varianta 6

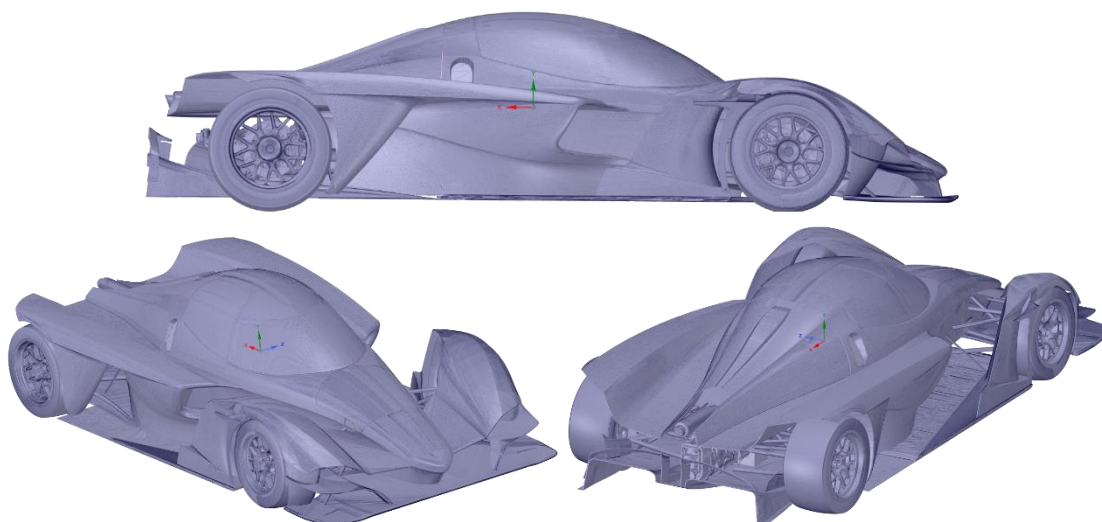
U varianty 6 bylo odebráno zadní křídlo i s držáky. Díky této variantě můžeme určit vliv zadního křídla na celkové aerodynamické vlastnosti vozu.



Obrázek 45 Dílčí varianta 6

9.4 Varianta 5

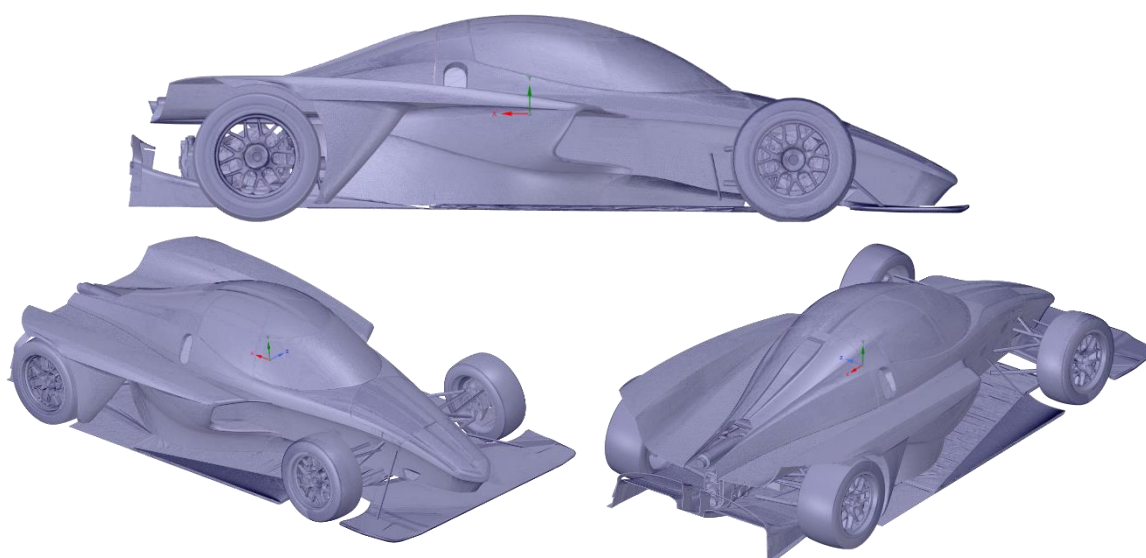
Ve variantě 5 byly odebrány zadní blatníky. Zadní blatníky se nemusejí zdát jako komponenta, která výrazně ovlivňuje aerodynamické vlastnosti vozu. Zadní blatníky byly zvoleny mezi důležité součásti, jelikož byl zkoumán jejich vliv na proudění vzduchu za zadními koly a následného ovlivnění zadního difuzoru.



Obrázek 46 Dílčí varianta 5

9.5 Varianta 4 + 4a

Ve variantě 4 byly odebrány blatníky předních kol s předními malými křídélky. V této variantě bude zjišťován vliv těchto komponent na přítláčnou a odporovou sílu. Dále je možné zjistit, jaký vliv mají tyto přední komponenty na proudění vzduchu do chladících tunelů, na boku vozu či na ovlivnění proudění vzduchu okolo předních kol.

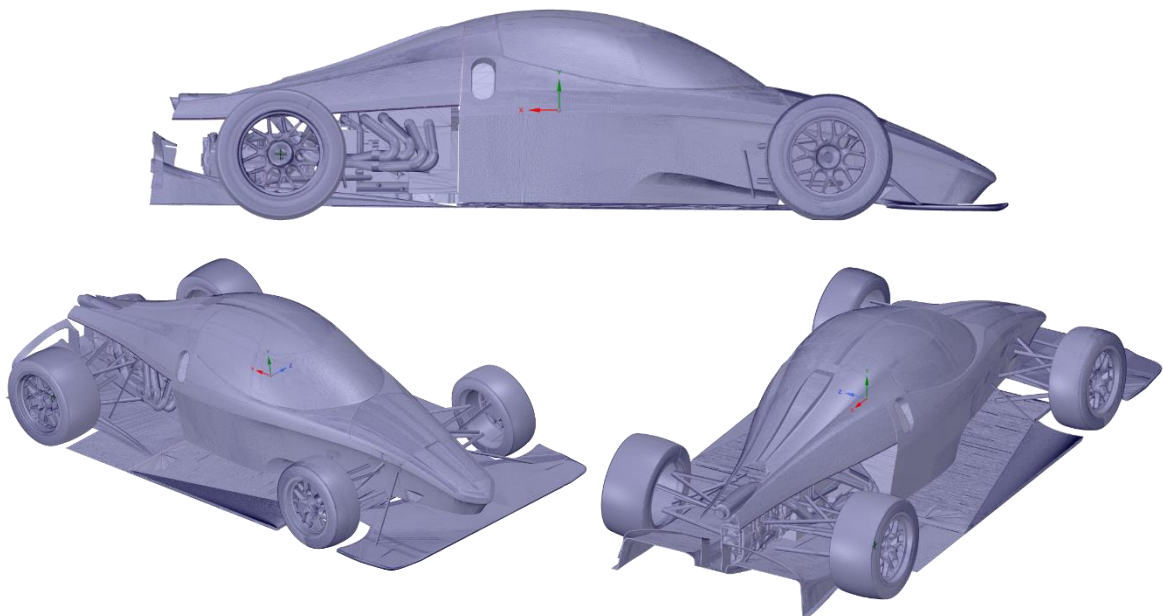


Obrázek 47 Dílčí varianty 4 + 4a

Varianta 4a se liší od varianty 4 pouze tím, že jsou odebrány chladiče, které se nachází uvnitř boků vozu. Tato varianta by nám měla ukázat vliv chladičů na celkové aerodynamické vlastnosti vozu.

9.6 Varianta 3

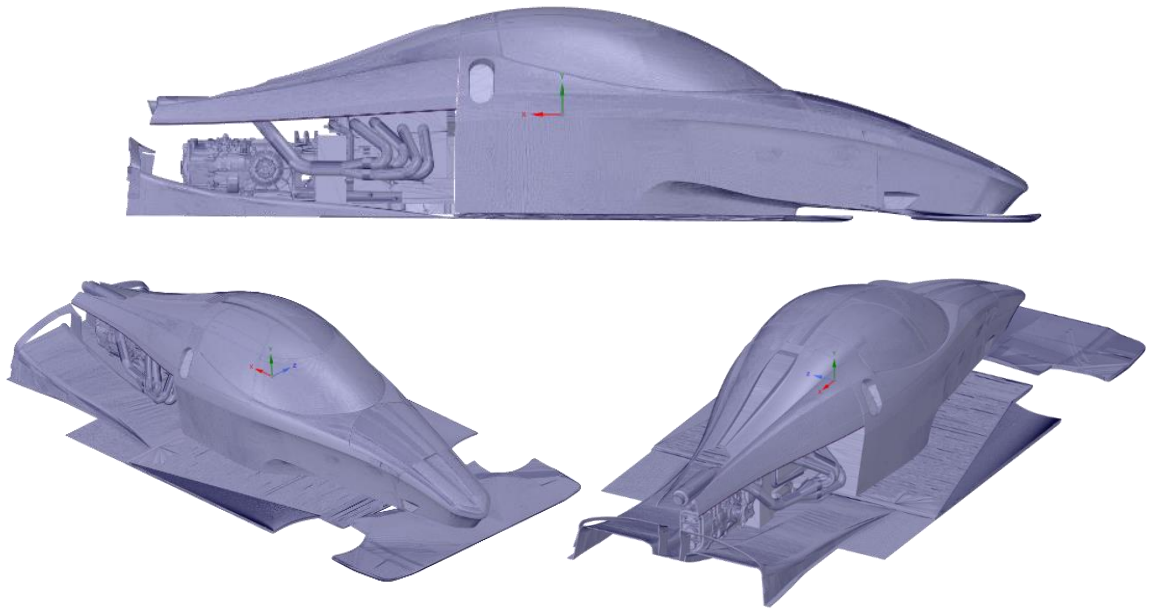
Varianta 3 vznikla odebráním boku vozu i s chladiči. V této variantě je možné pozorovat obtékání vzduchu okolo nezakrytovaných kol a porovnat toto proudění s variantou 5 a vyšší, kde jsou kola zakryta. Z toho je možné vyvodit, zda je zakrytování kol dostatečně účinné a splňuje původní záměr, kterým je snížení odporu vzduchu rotujících kol a správné nasměrování turbulentního proudění, které vzniká u rotujících kol.



Obrázek 48 Dílčí varianta 3

9.7 Varianta 2

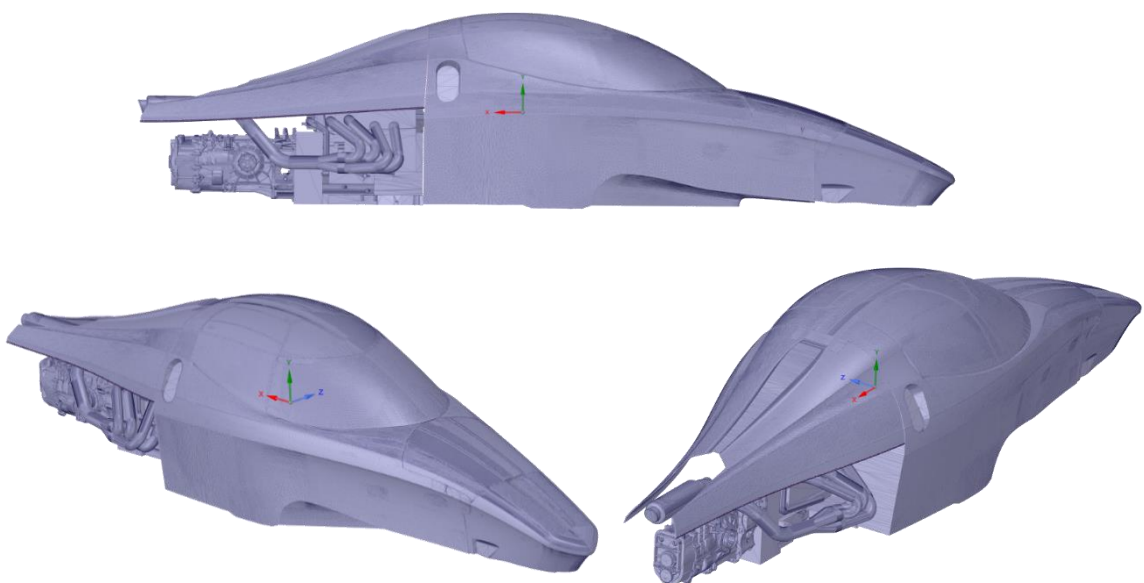
Varianta 2 vznikla odebráním kol, brzdných kotoučů, těhlic a náprav od varianty 3. V této variantě je možné zjistit, jak funguje splitter a difuzor s podlahou při laminárním obtékání. Porovnání výsledků této varianty s výsledky z varianty 3 je možné zjistit, jak samotná rotující kola ovlivňují účinnost podlahy. V případě porovnání s vyššími variantami, než je varianta 3 je možné vidět, zda zakrytování kol a přidání dalších komponent ovlivní proudění vzduchu pod podlahou vozu.



Obrázek 49 Dílčí Varianta 2

9.8 Varianta 1 – základní těleso

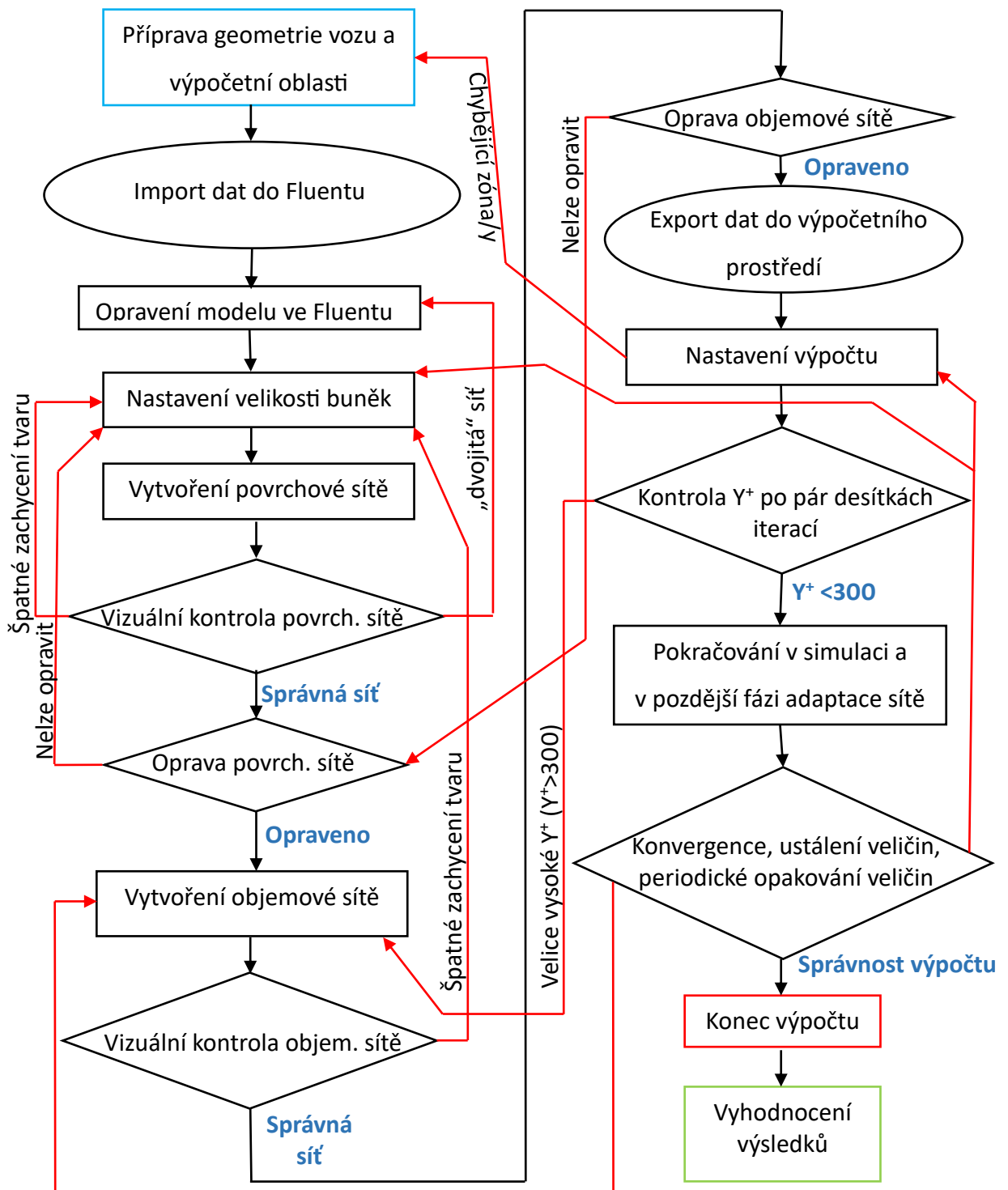
Variantu 1 můžeme nazvat základním tělesem. Všechny vytypované součásti jsou odebrány a zbyl pouze monokok, přední deformační box, kryt motorového prostoru, motor, převodovka a výfukové potrubí.



Obrázek 50 Dílčí varianta 1

10 REALIZACE SIMULACÍ

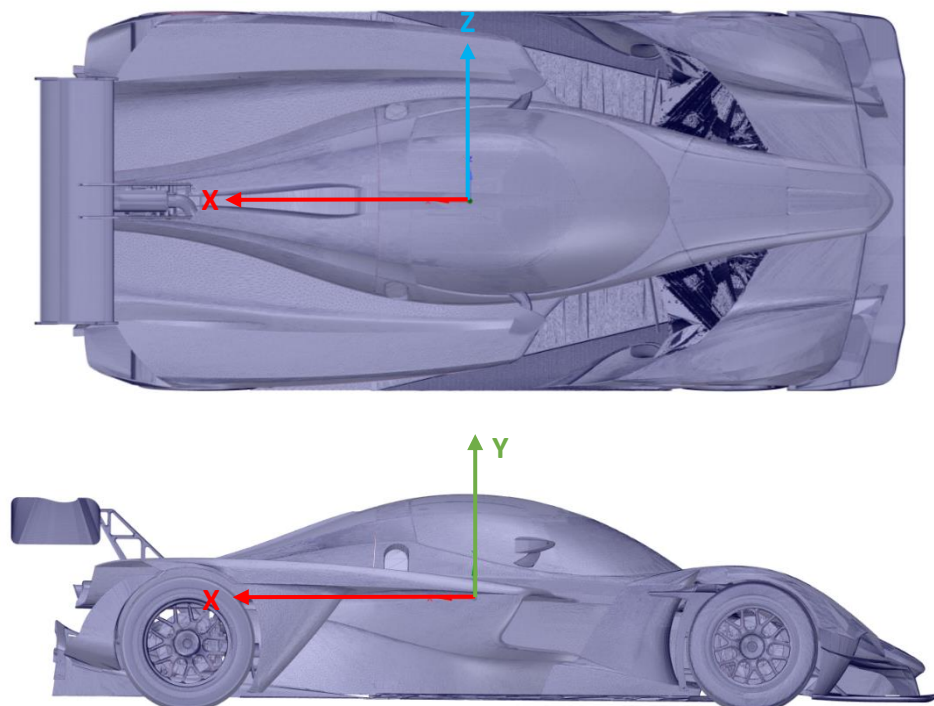
Po vytvoření dílčích variant je možné přejít k samotným simulacím. Proces simulace se skládá z několika kroků, u kterých je třeba splnit určité požadavky. Tyto kroky jsou ve zjednodušené podobě uvedeny do diagramu níže, podle kterého se postupovalo. Jednotlivé důležité kroky diagramu jsou vysvětleny v dalších kapitolách.



Obrázek 51 Zjednodušený diagram postupu simulace v prostředí Ansys Fluent

10.1 Souřadnicový systém výpočetní oblasti

Souřadnicový systém celé výpočetní oblasti, dle kterého se budou značit jednotlivé síly, směry a další značení je zvolen z varianty 8. V programu SpaceClaim je zvolena pro všechny komponenty stejná hustota. Z toho plynoucí těžiště vozu je bráno za střed souřadnicového systému a tento střed je na všech variantách stejný. Osa X je v podélném směru vozu a směřuje od přední části vozu k zadní, osa Y je kolmá na vozovku a směřuje směrem vzhůru, a nakonec osa Z je orientována příčně k vozu s tím, že směřuje od pravé části vozu k levé části vozu. Tato orientace je zvolena dle zvyklostí programu Ansys Fluent, kde jsou například již předem definované jednotlivé síly k daným osám. Například odporová síla je předem definovaná k ose X, přítláčná síla k ose Y a boční síla k ose Z. Na uživateli je pouze zvolení směru, ve kterém se má síla sledovat. Směr je zvolen buď shodný se směrem osy, anebo je možné zvolit směr opačný. Opačný směr v tomto případě bude volen u přítláčné síly. Je to z toho důvodu, aby přítláčná síla vycházela kladná, což je lepší v přehlednosti, čtení výsledků a eliminaci chyb. V budoucnu tato orientace ušetří práci a případné chyby z nepozornosti. Tento souřadnicový systém je ukázaný na obrázku 52 na variantě 8.



Obrázek 52 Souřadnicový systém vozu

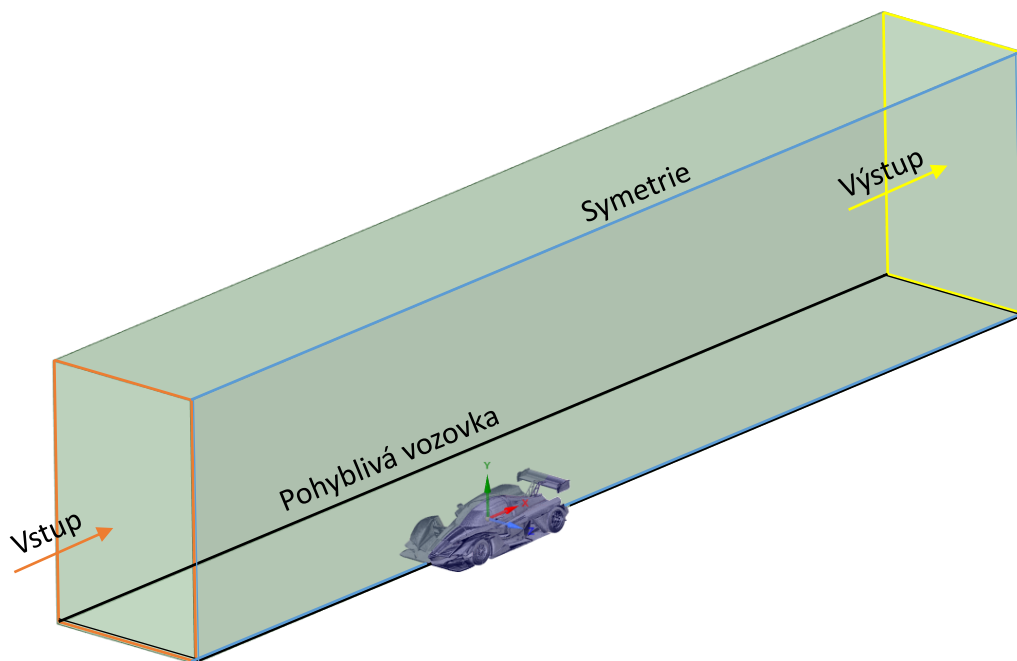
10.2 Příprava geometrie vozu a výpočetní oblasti

Celý proces simulování začíná přípravou geometrie a definování výpočtové oblasti. Tento krok je velice důležitý hned z několika důvodů. Případná chyba v tomto kroku se projeví v každém následujícím kroku a může velmi negativně ovlivnit výsledky. Tudíž je tady veliký vliv na přesnost výpočtu. Poctivá a přesná příprava geometrie ušetří čas a případné mezikroky v dalším postupu simulování. Je tedy dobré při přípravě geometrie nespěchat a vše si pečlivě překontrolovat. V tomto kroku se definuje jak výpočetní oblast, tak se zde definují zóny, na kterých v budoucnu budou sledovány buď vybrané parametry, či na ně budou zadávány okrajové podmínky. V následujících odstavcích je uveden postup přípravy geometrie pro předem připravenou variantu 8.

Varianty vozu popsané v kapitole 8. jsou vytvořeny v programu SpaceClaim a pro další přípravu se v tomto programu dále pokračuje. V první řadě je potřeba definovat oblast, ve které bude vůz počítán. V podstatě je možné tomu říkat virtuální aerodynamický tunel. U tohoto aerodynamického tunelu je třeba dodržet určité rozměrové parametry. Tyto parametry se mohou lišit v závislosti na určitém zdroji. Zde jsou vybrány střední hodnoty těchto parametrů na základě konzultace se zaměstnanci firmy TechSoft Engineering, spol. s.r.o. Velikost tunelu před vozem by měla být minimálně o velikosti dvojnásobku délky vozu, velikost tunelu za vozem by měla být o velikosti minimálně čtyřnásobku délky vozu. Šířka tohoto tunelu by měla být aspoň o velikosti délky vozu. Nakonec výška by měla být minimálně o velikosti 1,5násobku délky vozidla. Velikost tunelu by měla být taková, aby proudící vzduch nebyl ovlivněn stěnami tohoto tunelu. Samozřejmě kromě spodní části tunelu, která simuluje vozovku. V případě ovlivnění proudícího vzduchu stěnami větrného tunelu se může stát, že budou výsledky negativně ovlivněny a bude třeba tento krok opakovat poté, co se vyhodnotí výsledky.

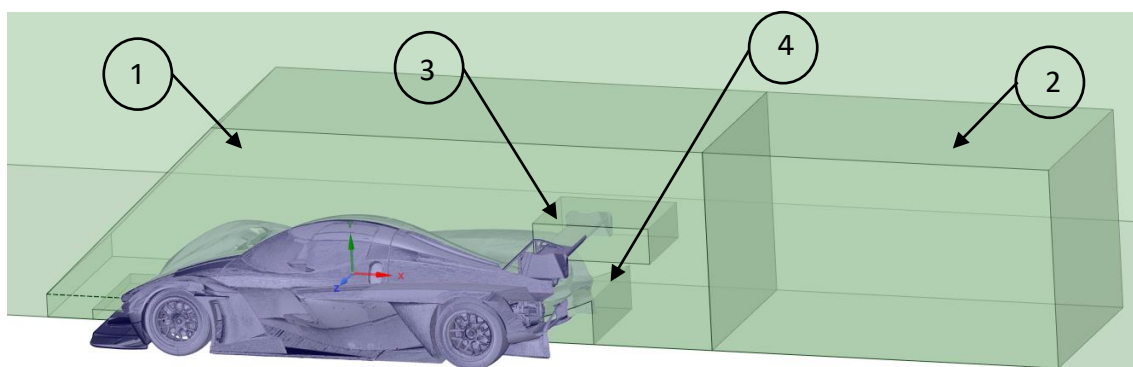
V případě, že je úspěšně vytvořen výpočetní prostor, tak je na něm možné vytvořit zóny, na kterých v pozdějších fázích simulace budou nastavovány okrajové podmínky. Jedná se o zóny vstupu do tunelu, výstupu z tunelu, vozovky a rovin symetrie.

Výpočetní prostor je vytvořen pouze s polovinou vozu. Je to z důvodu symetrie vozu a ušetření výpočetního výkonu i času.



Obrázek 53 Výpočetní prostor s virtuálním větrným tunelem

Z kapitoly 8 je uveden výběr výpočetního model $k-\omega$ SST. Tento model vyžaduje jemnější síť v okolí počítaného objektu, aby bylo zachyceno správné proudění u stěny, a tudíž správná predikce odtrhávání proudu vzduchu a záporný tlakový gradient. Z toho důvodu je nutné okolo vozu vytvořit několik těles, které budou v následujících krocích sloužit jako objekty pro nastavení jemnější výpočetní sítě. Těmto tělesům se říká „body of influence“ zkráceně BOI. Tato tělesa jsou vytvořena všude, kde bude potřeba nějakým způsobem zjemnit velikost výpočetní sítě v celém objemu, a ne pouze na ploše. Konkrétně se jedná o BOI okolo celého vozu, okolo zadního křídla, v prostoru mezi vozovkou a podlahou vozu a úplavovou částí.

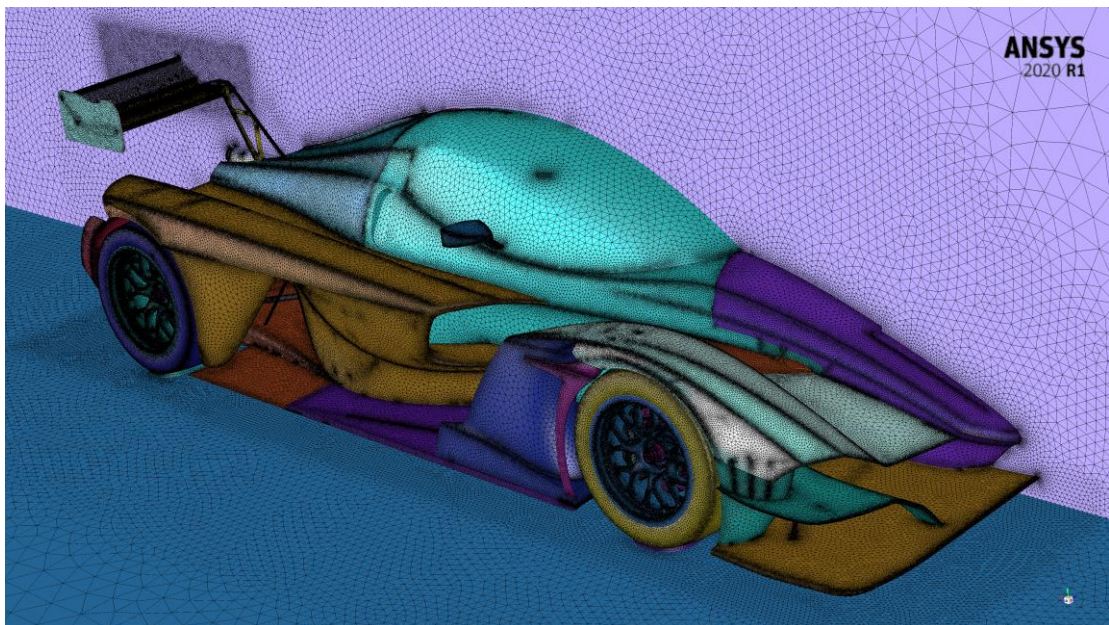


Obrázek 54 Výpočetní prostor s tělesy BOI - 1. BOI okolo celého vozu, 2. BOI v úplavové části, 3. BOI okolo křídla, 4. BOI podvozkové části

10.3 Vytvoření povrchové sítě

V programu Ansys Fluent je před vytvořením objemové sítě, kde se realizuje výpočet, nutné vytvořit povrchovou síť. Povrchová síť slouží k zachycení tvaru obtékaného modelu dle nastavených velikostí buněk a lépe se zde odhalí nedokonalosti sítě či případné vady.

Povrchová síť je vytvořena z trojúhelníkových elementů o určité velikosti. Názorná ukázka povrchové sítě je vidět na obrázku 55. Na tomto obrázku je vidět zjemnění sítě v oblastech těles BOI, které byly připraveny v předchozí kapitole.



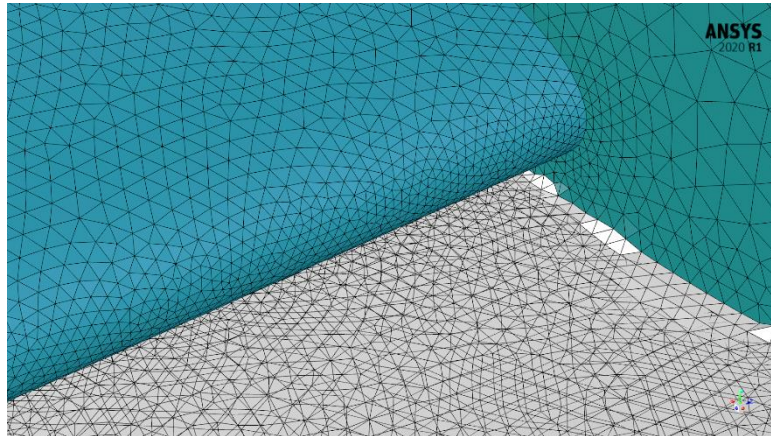
Obrázek 55 Povrchová síť vozu ve variantě 8

V dalších podkapitolách je popsáno, jak v případě chybné povrchové sítě model opravit a jak nastavit velikosti buněk, tak aby byl model vozu správně zachycen a dosáhlo se uspokojivé přesnosti výpočtu.

10.3.1 Opravení modelu

Správná povrchová síť se bohužel v 90 % případů nepovede na první pokus. Většinou tam jsou k nalezení chyby, kterých si při vizuální kontrole nelze lehce všimnout a je potřeba je vyřešit.

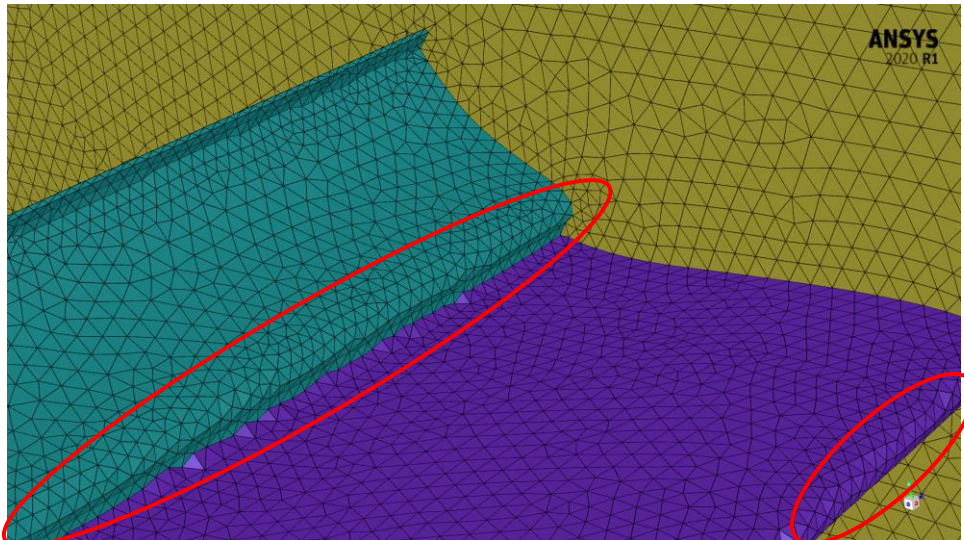
Mezi typické chyby patří takzvaná „dvojitá“ síť. Ta vznikne, když je nějaká plocha síťována z obou stran. Tudíž je z toho možné usoudit, že je někde v modelu díra, kterou je třeba uzavřít. Ansys Fluent disponuje mnohými nástroji na opravu sítí. Tyto nástroje chybu v tomto případě nevyřeší, ale velice pomohou s hledáním neuzavřených děr, které pak pomocí různých nástrojů je možno opravit.



Obrázek 56 Ukázka dvojitě sítě na bílé ploše a správné povrchové sítě na modré a zelené ploše

Další typická chyba je špatné zachycení tvaru počítaného objektu. Tato chyba vznikne špatným nastavením velikosti buněk a způsobí to špatné interpolování povrchu modelu. Tato chyba má velký vliv na přesnost a stabilitu výpočtu. Proto je dobré si model po vytvoření povrchové sítě důkladně přezkontrolovat. S odhalením této chyby Ansys Fluent bohužel moc nepomůže. Dobrým příkladem je správné zachycení náběžné strany profilu křídla. V obrázku 57 je vidět špatně zachycený tvar profilu zadního křídla vozu. Logicky lze odvodit, že špatně zachycený tvar nebude správně fungovat a v lepším případě bude generovat menší přitlačnou sílu a v horším případě způsobí nestabilitu výpočtu.

Další chyby povrchové sítě jsou spíše parametrických charakterů jako je například skos (skewnees), aspect ratio, a další. Tyto chyby pomůže Ansys Fluent odhalit a pomocí automatických nástrojů i opravit. Další takováto chyba, kterou Ansys Fluent dokáže najít a opravit, je chyba při níž se protínají dva či více trojúhelníkových elementů. Tato chyba se nemusí odhalit hned a občas se na její opravu zapomíná. V danou chvíli a v dalších pár krocích o této chybě nemusí uživatel vědět. Potíže nastávají při vytváření objemové sítě, kdy se kvůli této chybě objemová síť nevytvorí a musí se hledat příčina.



Obrázek 57 Špatné zachycení tvaru náběžné hrany

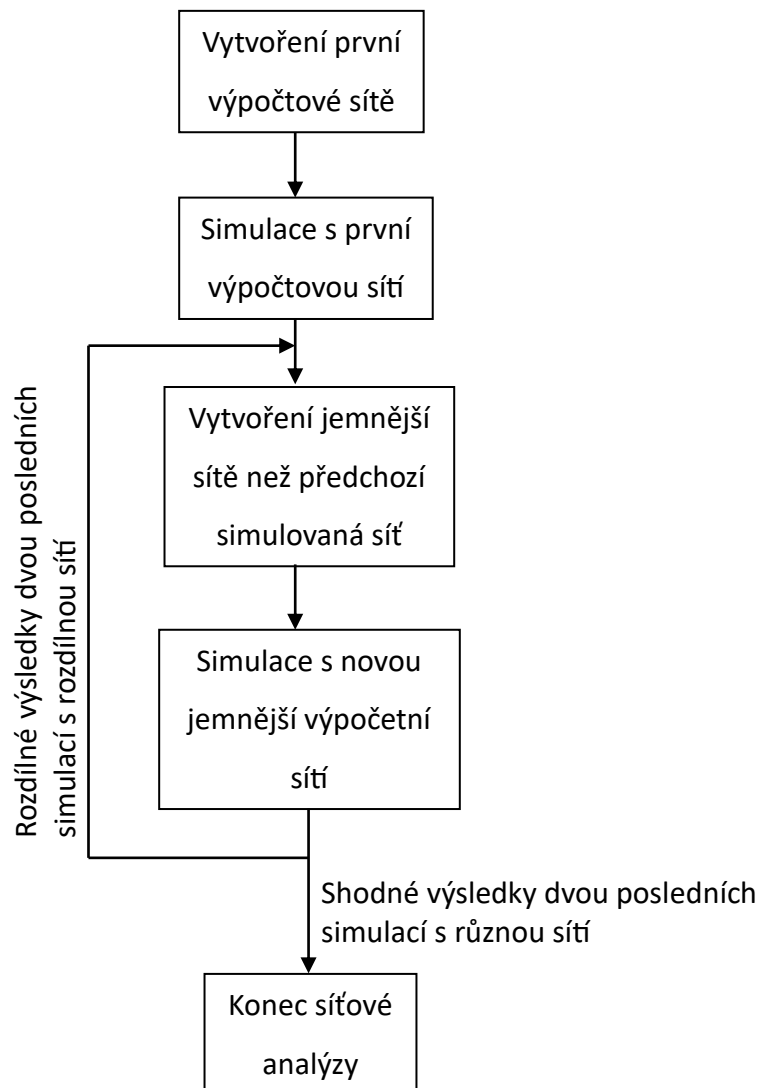
10.3.2 Nastavení velikosti buněk

Správná nastavení velikosti buněk je v celku složitá problematika. Řeší se zde kompromis mezi správným zachycením tvaru počítaného objektu a počtem buněk. Správné zachycení tvaru je důležité z hlediska přesnosti výpočtu. Teoreticky by bylo možné na celém tělese nastavit extrémně malé buňky pro co nejlepší zachycení tvaru objektu a tím provést velice přesný výpočet. Toto nastavení by zapříčinilo extrémní množství buněk, které by se jen tak nedalo spočítat. Jelikož čím více buněk je, tím více výpočetního výkonu je potřeba. Z toho důvodu je snaha počet buněk snížit na co nejnižší možný počet z důvodu ušetření výpočetního výkonu a úspore výpočetního času. Při nastavování velikosti buněk u povrchové sítě je třeba pamatovat na to, že velikost buněk objemové sítě je rovna velikosti buněk povrchové sítě.

V podstatě nelze říct, jaká konkrétní velikost buněk je správná. Vše záleží na typu proudění, obtékaném modelu, tekutině, která je použita pro obtékání atd. Při řešení této diplomové práce jsou dodrženy poučky poskytnuté na konzultacích se zaměstnanci firmy TechSoft Engineering, spol. s.r.o. Nejmenší velikost buněk by měla odpovídat nejmenšímu rozměru na součásti. V případě, že jde o větší souvislou plochu, tak nejmenší počet buněk pro relativně správné zachycení proudění je nasítovat danou oblast minimálně 15 buňkami po délce této plochy. Pro správné zachycení proudění v nějaké mezeře či kanálu je zapotřebí nastavit velikost buněk tak, aby v příčném průřezu daného kanálu či mezery bylo minimálně 5 buněk. Ansys Fluent dovoluje nastavit různé

druhy typů velikosti buněk. Díky tomu je možné síťovat každou jednotlivou plochu, těleso, či zónu (která je nastavena v přípravě geometrie v kapitole 9.1) zvlášť. Tím je možné zachytit tvar součástí či zón správně při zachování co nejmenšího počtu buněk.

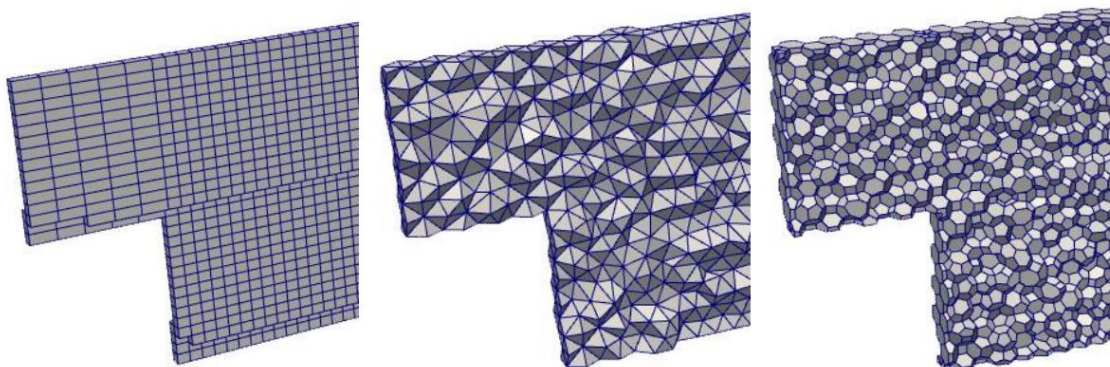
Pro ověření správné velikosti buněk je takzvaná síťová analýza. Ta se provádí tak, že je vytvořena síť o takové velikosti, která se zdá správná, provede se simulace a poté se síť zjemní a provede se simulace znovu. V případě, že se výsledky simulací shodují, je možné říci, že první méně jemná síť je správná a dále ji je možné využít. Diagram postupu síťové analýzy je vidět na obrázku 58.



Obrázek 58 Diagram postupu síťové analýzy

10.4 Vytvoření objemové sítě

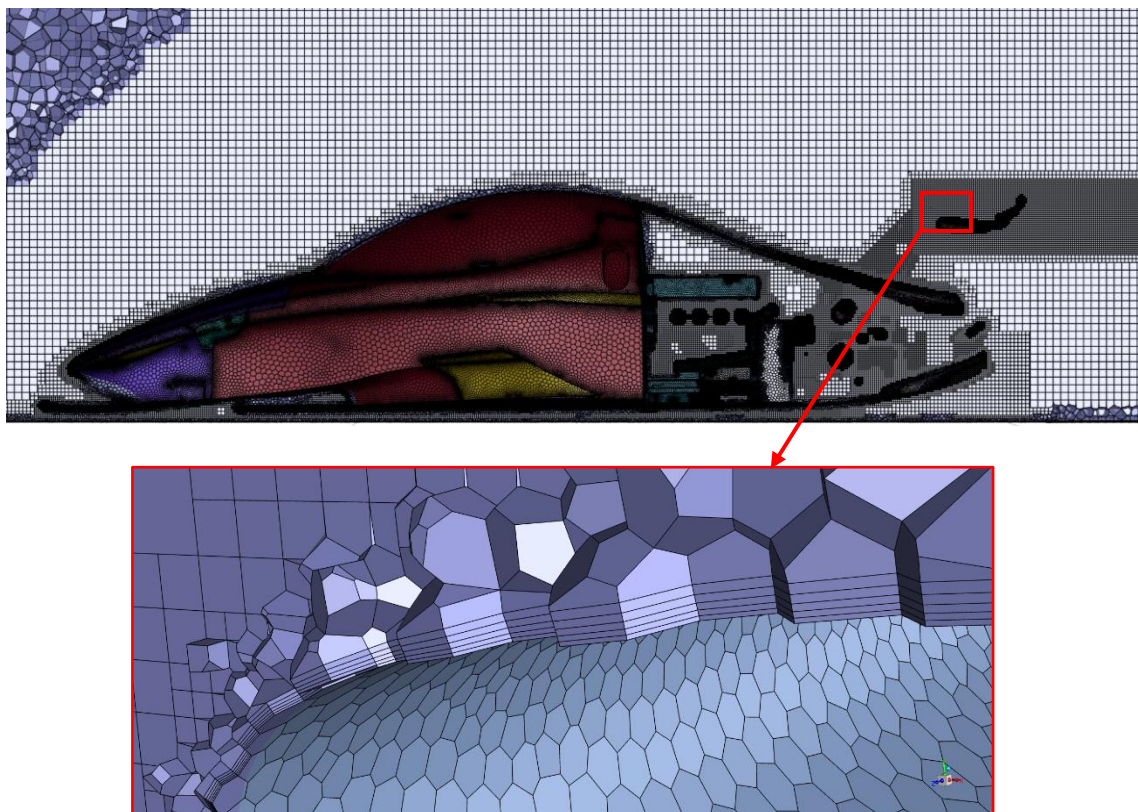
Objemová síť modeluje prostor, ve kterém je realizován výpočet, tudíž se jedná o vymodelovanou vzdušninu v celém objemu výpočetního prostoru. Objemová síť je vytvořena dle velikosti buněk povrchové sítě. Tudíž je třeba mít povrchovou síť opravenou, bez otevřených děr a se správnou velikostí buněk. Na rozdíl od povrchové sítě, která je vytvořena trojúhelníkovými elementy, je možné objemovou síť vytvořit pomocí různých tvarů buněk, případně kombinací daných tvarů buněk. Ansys Fluent nabízí tři druhy buněk, ze kterých je možné vytvořit objemovou síť. Jedná se o čtyřstěnné, šestistěnné a mnohostěnné buňky. Jejich rozdíl je vidět na obrázku 59. Ansys Fluent nabízí ještě jednu variantu vytvoření objemové sítě, a to pomocí kombinace mnohostěnných a šestistěnných typů buněk. Tato kombinace je ideální z hlediska počtu buněk, rychlosti výpočtu a přesnosti výpočtu. Tudíž je tato kombinace buněk využita ve výpočtech dílčích variant vozu. Při vytváření objemové sítě, se kromě druhu buněk musí také definovat prismatické vrstvy, které zachycují mezní vrstvu, která vzniká na povrchu obtékané plochy. Tyto prismatické vrstvy jsou podrobněji popsány v kapitole 10.4.1. Po vytvoření objemové sítě je třeba ji opravit dle určitých parametrů. Hlavním kontrolním parametrem byla tzv. Inverse Orthogonal Quality, která se pomocí automatických nástrojů musí opravit tak, aby její hodnota byla nižší než 0,9. Tato hraniční hodnota je vhodná pro složité geometrie jako je vůz Praga R1. Pro jednoduché objekty je vhodnější opravit objemovou síť na hodnotu parametru o dost níže než 0,9. Objemové sítě všech variant měly po opravení průměrně okolo 14 miliónů buněk. Z toho největší část buněk byla právě v prismatických vrstvách.



Obrázek 59 Rozdíl mezi jednotlivými druhy buněk. Zleva šestistěnné buňky, čtyřstěnné buňky, mnohostěnné buňky [29]

10.4.1 Prismatické vrstvy

Prismatické vrstvy se vytvářejí na stěnách výpočetní oblasti a jsou to buňky s velmi malou výškou. U úloh jako je tato, se tyto buňky vytváří v 5 až 10 vrstvách. Výjimku tvoří stěny, na kterých budeme v následujícím kroku nastavovat okrajovou podmínku symetrie. Z toho plyne, že prismatické vrstvy se vytvoří na povrchu vozu a části virtuálního aerodynamického tunelu, která tvoří vozovku. Tyto vrstvy se vytváří za účelem správného zachycení mezní vrstvy. Tím, že rychlost proudění se se zvyšující se vzdáleností od stěny roste, je třeba tento rychlostní profil zachytit. Správné zachycení mezní vrstvy je důležité z hlediska správných výsledků a správné predikce odtržení proudu vzduchu od stěny. Kontrolní parametr toho, zda je dostatečně nízká první prismatická vrstva je nazýván Y^+ . Přesnou hodnotu tohoto parametru je možné zjistit až po pár iteracích výpočtu. Pro tento případ je potřebné, aby hodnota Y^+ byla na komponentech, které výrazně ovlivňují aerodynamické vlastnosti vozu (zadní křídlo, celá podlaha vozu a přední křídélka) nižší než 5. Je to z důvodu korektního zachycení turbulentních veličin v mezní vrstvě v turbulentním modelu $k-\omega$ SST. Na ostatních plochách může být hodnota Y^+ vyšší, a to až do hodnoty 300. Je třeba si ale dávat pozor, aby hodnota parametru Y^+ nebyla nikde na modelu v rozmezí 5-15 z důvodu správného fyzikálního zachycení mezní vrstvy. V jiných programech pro výpočet dynamiky tekutin je třeba, aby hodnota Y^+ byla na celém modelu pod hodnotu 5. V tom se Ansys Fluent liší, a to tím, že v oblastech s hodnotou Y^+ vyšší než 5 nastaví stěnovou funkci, která způsobí zpřesnění výpočtů, a to i v případě horší sítě. V případě, že hodnota Y^+ je na důležitých komponentech pod 300, lze využít funkce programu Ansys Fluent, která adaptuje síť na požadovaných plochách na požadovanou hodnotu parametru Y^+ v průběhu výpočtu. To znamená, že se eliminuje několikanásobné vytváření objemové sítě a ušetří se spousta času. Tato funkce je výpočtech několikrát použita.



Obrázek 60 Objemová síť varianty 8 s ukázkou prismatických vrstev

10.5 Nastavení výpočtu

Pro výpočet byl zvolen výpočetní model k- ω SST. Tím, že se při těchto simulacích nebude řešit nic jiného krom proudění vzduchu okolo vozu, tak není za potřebí nastavovat jiné výpočetní modely, které se využívají například pro výpočet přestupu tepla apod.

Tekutina, která obtéká vůz je ve výchozím nastavení zvolena jako vzduch s konstantní hustotou a viskozitou. Tyto hodnoty jsou ponechány ve výchozím nastavení.

Jako další je zapotřebí nastavit okrajové podmínky. V tomto případě nastaví na vstupu do aerodynamického tunelu okrajová podmínka „velocity-inlet“, která udává počáteční rychlost proudění vzduchu na vstupu do tunelu. Tato rychlost byla nastavena na hodnotu 150 km/h. Na protější straně tunelu byla nastavena okrajová podmínka „pressure-outlet“, kde byla ponechána hodnota tlaku 0, což udává na výstupu atmosférický tlak, který je předem nastaven na určitou výchozí hodnotu. Na stěně, která byla v přípravě geometrie nastavena jako pohyblivá vozovka byla nastavena okrajová

podmínka „wall“, která je na všech plochách nastavena jako výchozí. Této stěně byla určena rychlost pohybu, a to ve směru osy X o rychlosti 150 km/h. Je to z toho důvodu, aby se výpočet co nejvíce přiblížili realitě. Na zbylých stěnách aerodynamického tunelu byly nastaveny okrajové podmínky symetrie nazvané „symmetry“. Z důvodu lepšího přiblížení simulace vozidla realitě je zapotřebí nastavit rotující kola. Kola jsou ve výchozím nastavení nastavena okrajovou podmínkou „wall“. Tato podmínka je modifikována pomocí nastavení vektoru rotace a to takovým, aby respektoval rotaci kol v takové geometrii kol, v jaké byl model dodán. K této modifikaci je dále potřeba doplnit úhlovou rychlost, která byla spočtena z průměru pneumatik a ze simulované rychlosti vozu, která je 150 km/h.

V případě variant vozu, kde je chladič, je zapotřebí nastavit chladič jako porézní těleso. Je to z toho důvodu, aby chladičem mohl protékat vzduch jako v reálném světě. Tím je přiblížena simulace zase o krok blíže k realitě.

V poslední fázi jsou nastaveny sledované veličiny. V tomto případě to bude přítlačná síla, odporová síla, boční síla a momenty okolo všech os. Sledování těchto veličin je nastaveno až po uplynutí první až druhé stovky iterací. Je to z toho důvodu, že trvá pár iterací, než se síly ustálí okolo konkrétní hodnoty. Díky tomu je možné na konci výpočtu lépe přečíst hodnoty těchto veličin.

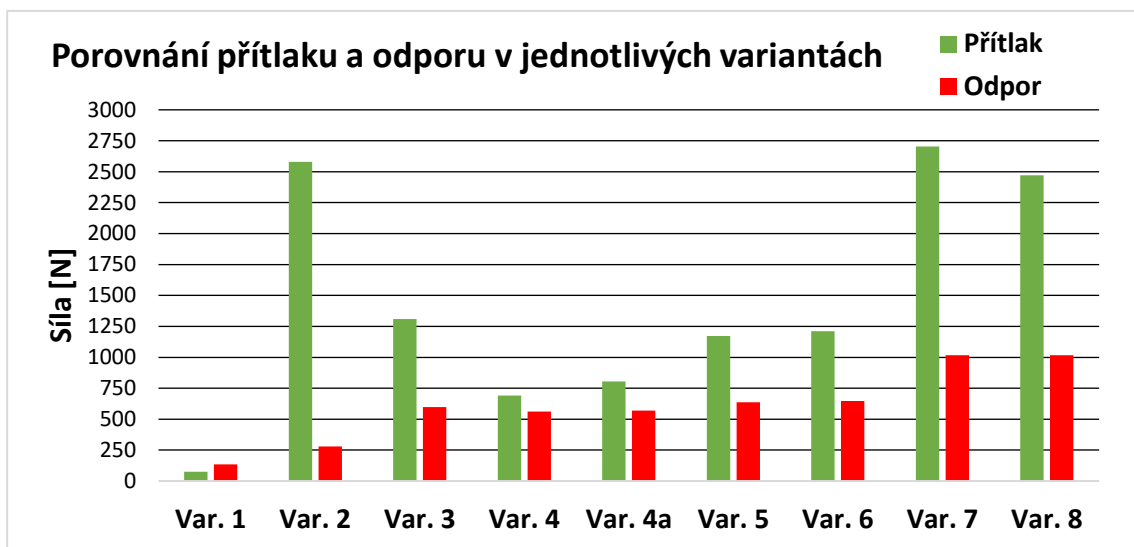
V průběhu výpočtu je sledována také hodnota Y^+ . Je to z toho důvodu, aby bylo jasno, zda je třeba se vrátit k vytváření objemové sítě, anebo je možno nastavit adaptaci sítě a ve výpočtu pokračovat.

10.6 Ukončení výpočtu

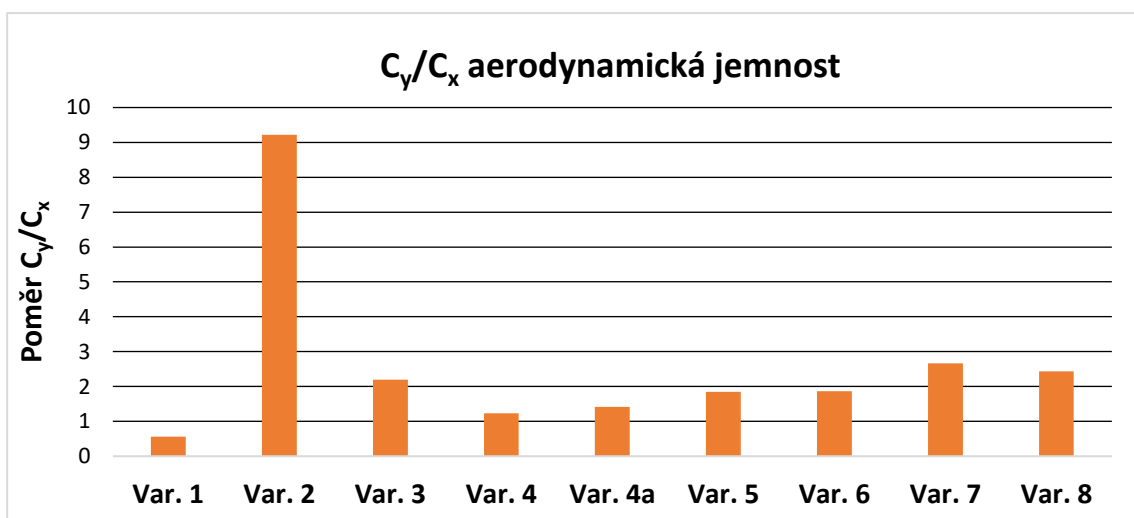
Ukončení výpočtu lze provést až při splnění několika kritérií. Těmito kritérii je ustálení hodnot residuí, hodnota kontinuity je pod hranicí $1e-2$, ustálené hodnoty sledovaných veličin nebo jejich periodické opakování a velikost hodnoty Y^+ na důležitých komponentech pod 5 a na ostatních místech pod 300. V případě nesplnění těchto kritérií (kromě hodnoty Y^+) je třeba se vrátit zpět do tvorby objemové, případně povrchové sítě a vhodně ji upravit. V případě nesplnění hodnoty Y^+ je možné danou síť v průběhu výpočtu adaptovat a docílit tak požadované hodnoty Y^+ .

11 VYHODNOCENÍ VÝSLEDKŮ JEDNOTLIVÝCH VÝPOČTŮ

Po výpočtu všech devíti navržených variant jsou hodnoty výsledných sil a momentů vloženy do programu MS Excel a jsou porovnány hodnoty sil a momentů jednotlivých variant. Z tohoto porovnání lze vyčíst, které komponenty, případně skupiny komponent, ovlivnily aerodynamické vlastnosti vozu správným směrem nebo naopak. Na obrázku 61 je vidět porovnání přítlakové a odporové síly jednotlivých variant. Tyto hodnoty jsou přepočítány na koeficient odporu vzduchu C_x a koeficient přítlaku C_y . Z těchto koeficientů je stanovena tzv. aerodynamická jemnost, která vznikla poměrem C_y a C_x viz. obrázek 62.



Obrázek 61 Porovnání přítlaku a odporu základních variant

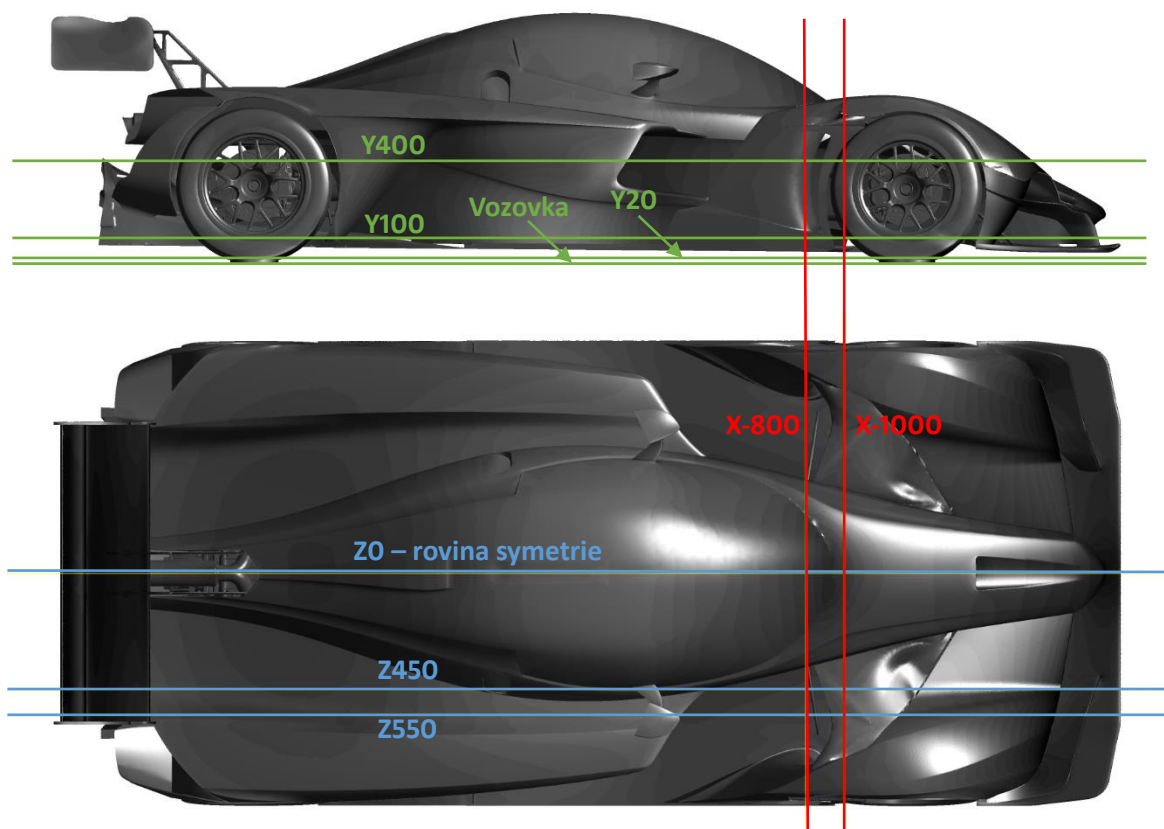


Obrázek 62 Porovnání aerodynamické jemnosti základních variant

11.1 Vysvětlení značení vizualizací výsledků

Vizualizace výsledků je v této práci provedena na konkrétních rovinách, na kterých jsou zobrazeny kontury rychlostí nebo tlaků. V popisku obrázku dané vizualizace je napsáno, zda se jedná o konturu rychlosti či tlaku. Dále je v popisku obrázku napsané, na jaké rovině je kontura zobrazena. Značení roviny je například Y40 nebo Z550. První písmeno (X, Y nebo Z) znamená, na jakou osu je rovina kolmá. Číslo za písmenem znamená, v jaké vzdálenosti od počátku souřadnicového systému se rovina nachází. Výjimku zde tvoří roviny značené Y. Jejich hodnota za písmenem udává vzdálenost, měřenou od vozovky. Hodnota vzdáleností rovin je v milimetrech.

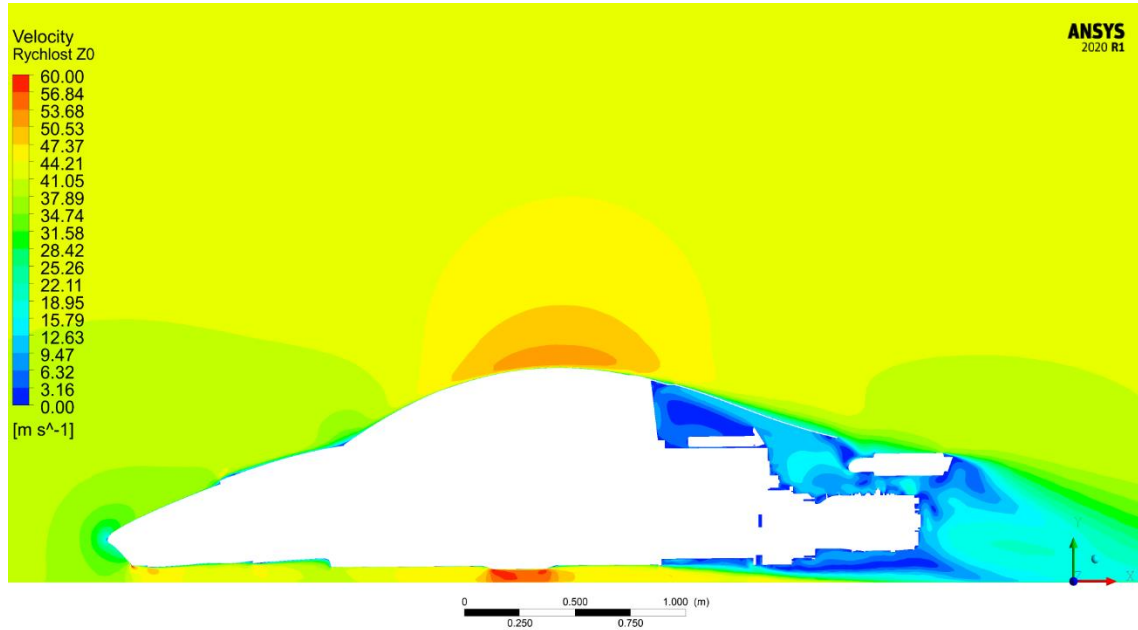
Dále je na každém obrázku vlevo zobrazena stupnice hodnot. Pod touto stupnicí je napsáno, v jakých jednotkách jsou hodnoty dané veličiny.



Obrázek 63 Polohy rovin použitých ve vizualizaci výsledků

11.2 Vyhodnocení varianty 1 – základní těleso

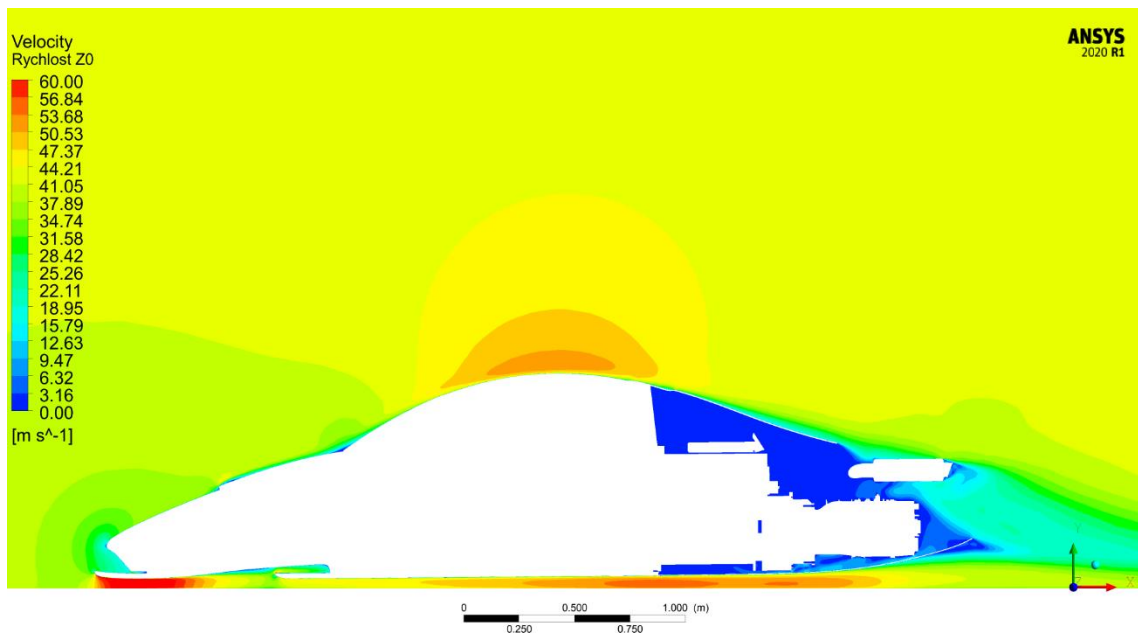
Jelikož se jedná o základní těleso, složené ze základních komponent, tak nelze očekávat velké síly. U této základní varianty bylo důležité zjistit, jak je základní těleso obtékáno a zda nevznikají nežádoucí víry. Při obtékání základního tělesa nevznikají nežádoucí víry.



Obrázek 64 Kontury rychlosti v rovině symetrie základního tělesa

11.3 Vyhodnocení varianty 2

Přidáním podlahy k základnímu tělesu vznikl obrovský nárůst přitlačné síly. Navýšení přitlačné síly se dalo očekávat. Toto navýšení přitlačné síly je díky správně nastavené světlé výšce vozu, vhodně tvarovaným splitterem a difuzorem. Vzduch je pod splitterem značně urychlován, k čemuž přispívá i zadní difuzor. Kombinace těchto komponent znamená správně urychlené proudění vzduchu pod podlahou s efektem vysoké přitlačné síly a nízké odporové síly.



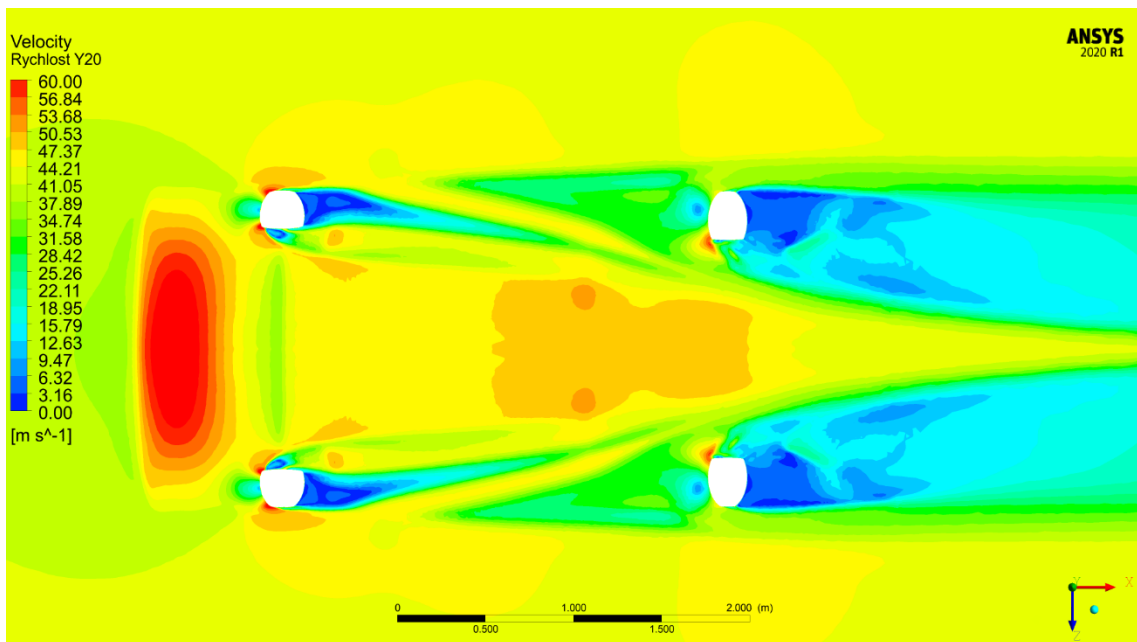
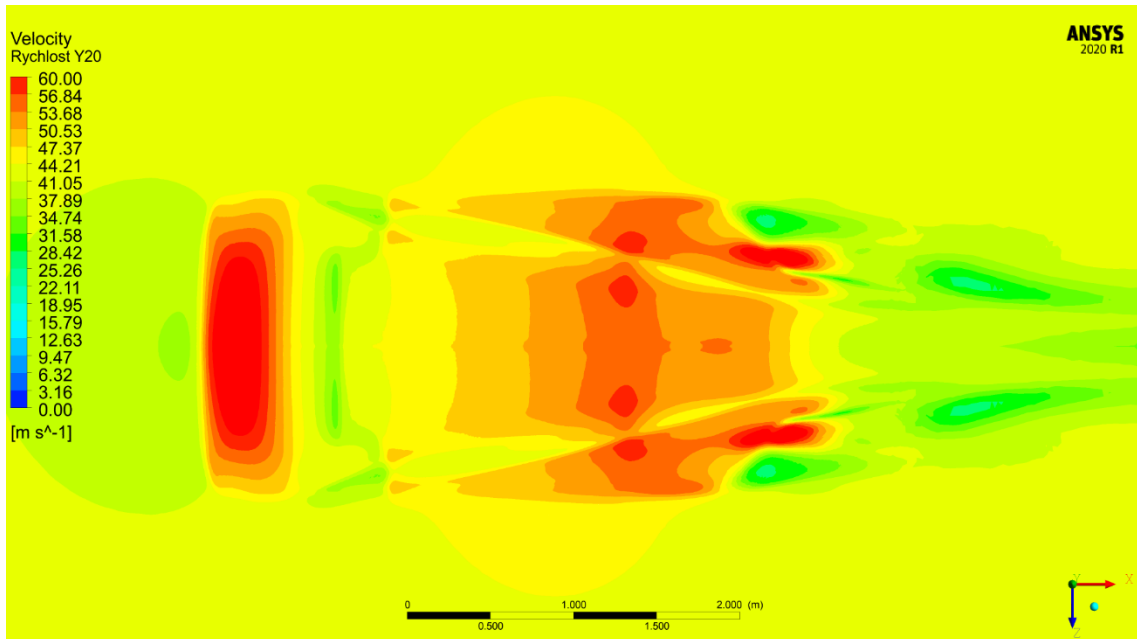
Obrázek 65 Kontury rychlosti v rovině symetrie varianty 2

11.4 Vyhodnocení varianty 3

V této variantě přibyla rotující kola s jejich uložením a nápravami. Na této variantě je vidět značný úbytek přitlačné síly a zvýšení odporové síly. Snížení přitlačné síly je způsobeno turbulentním prouděním, které je vytvářeno rotujícími koly. Toto turbulentní proudění narušuje laminární proudění vzduchu pod podlahou a tím se účinnost podlahy snižuje. Tento efekt rotujících kol bohužel nelze úplně eliminovat. Je možné se však pokusit turbulentní proudění nasměrovat směrem ven z podlahy.

Nárůst odporové síly je kvůli zvýšení plochy, kterou musí vzduch obtékat. Obtékaná plocha je zvýšena o plochu kol oproti variantě 2. Odpor rotujících kol je možné snížit

vhodnými blatníky či jinými součástmi okolo kol, které vytvářejí lepší podmínky pro obtékání vzduchu.

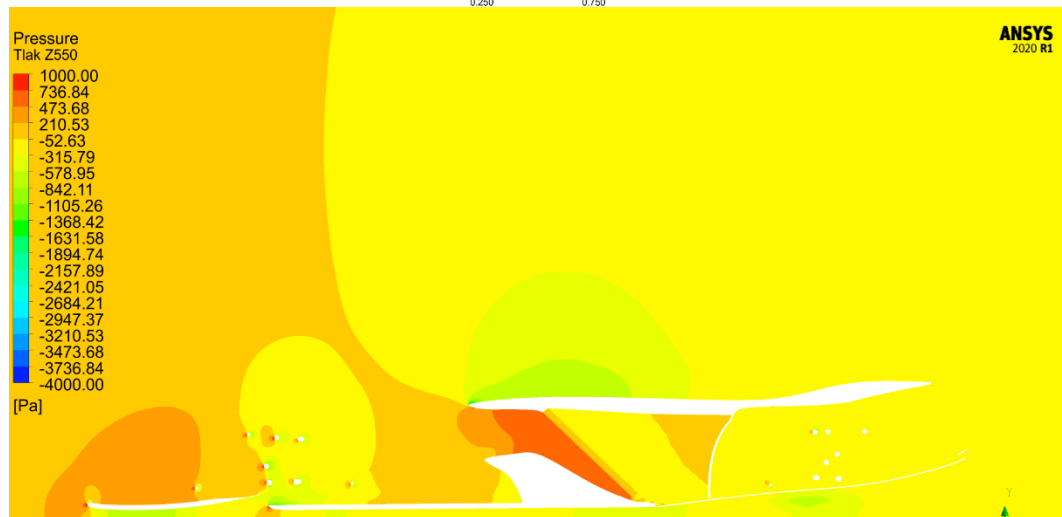
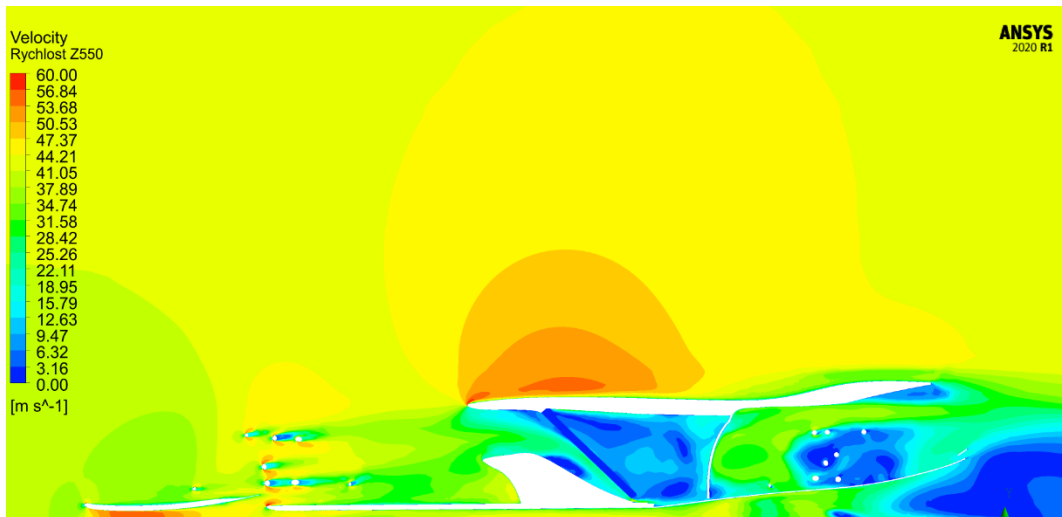


Obrázek 66 Porovnání kontur rychlosti varianty 2 (nahore) a varianty 3 (dole) v rovině Y20 pod podlahou

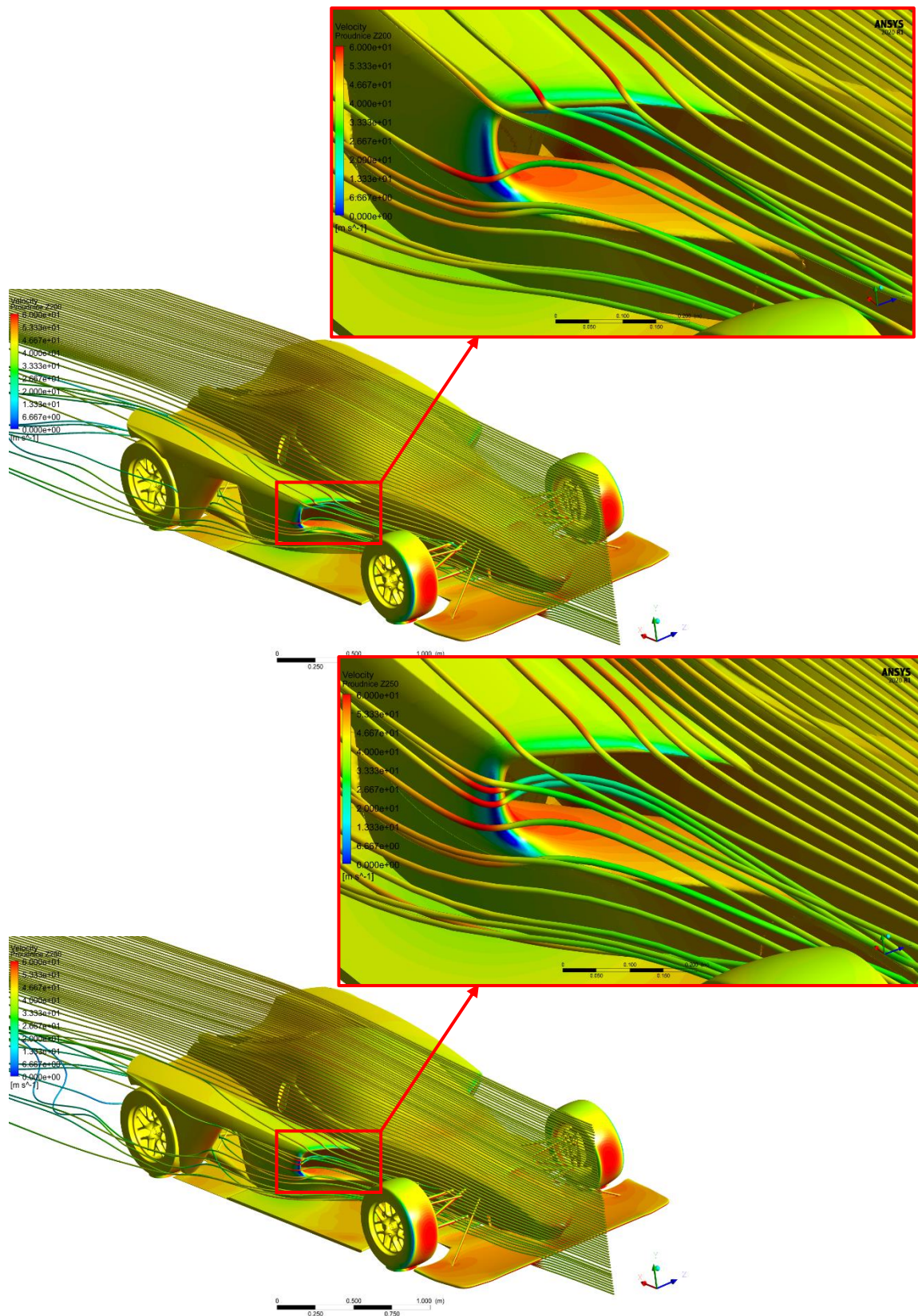
11.5 Vyhodnocení varianty 4

Tato varianta se liší od varianty 3 bokem vozu a přidaným chladičem. Chladič kvůli své poloze způsobuje vztlak, a tudíž negativně ovlivňuje celkovou přítlačnou sílu. Další nevýhodou chladiče je jeho omezená propustnost vzduchu z čehož plyne zvýšení odporové síly. Celková odporová síla se ale lehce zmenšila oproti variantě 3. Je to z důvodu zakrytí přední strany zadního kola a z toho plynoucí zlepšení obtékání vzduchu zadního kola. V této variantě je patrné, jak je důležité správné zakrytí kol z důvodu snížení odporové síly.

Při bližším zkoumání této varianty, kde jsou vykresleny kontury rychlosti proudění a tlaků spolu s proudnicemi kvůli lepšímu zobrazení proudění vzduchu okolo vozu, bylo zjištěno, že vstup do chladičího kanálu nefunguje správně jak by měl. Proudnice před vstupem do chladičího kanálu uhýbají do strany, což může znamenat ucpání chladičího kanálu. Ve vyhodnocování dalších variant bude kladen důraz na vstup do chladičích kanálů.



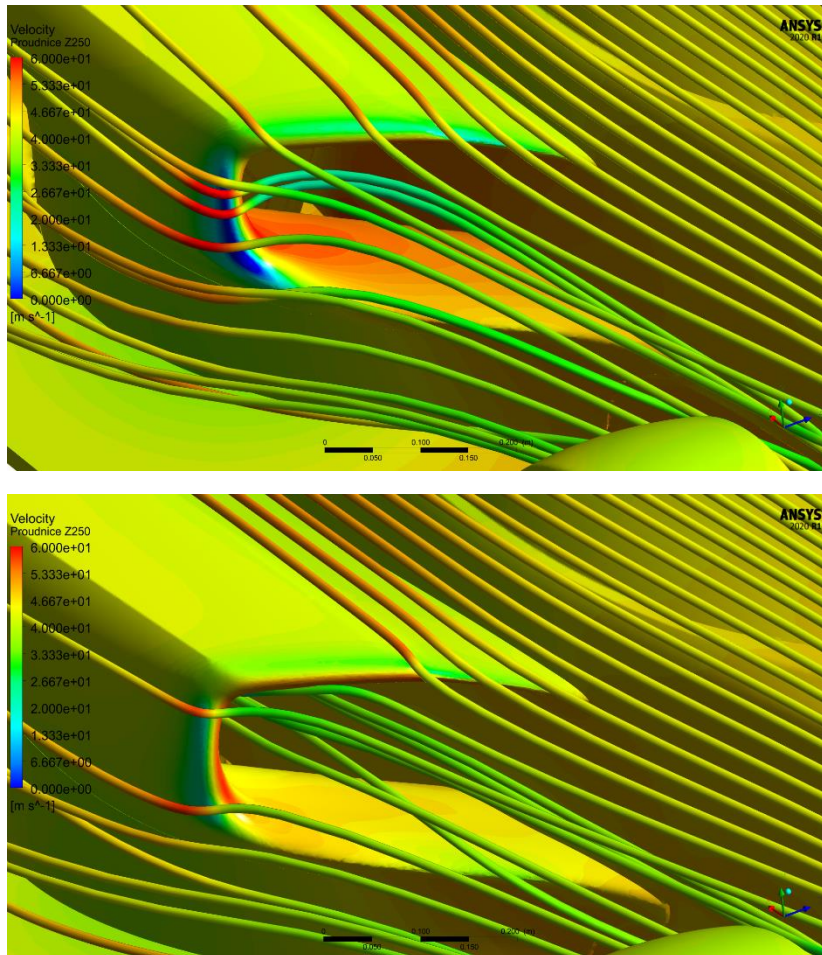
Obrázek 67 Kontury rychlosti (nahore) a tlaku (dole) v rovině Z550 – kanál chladiče



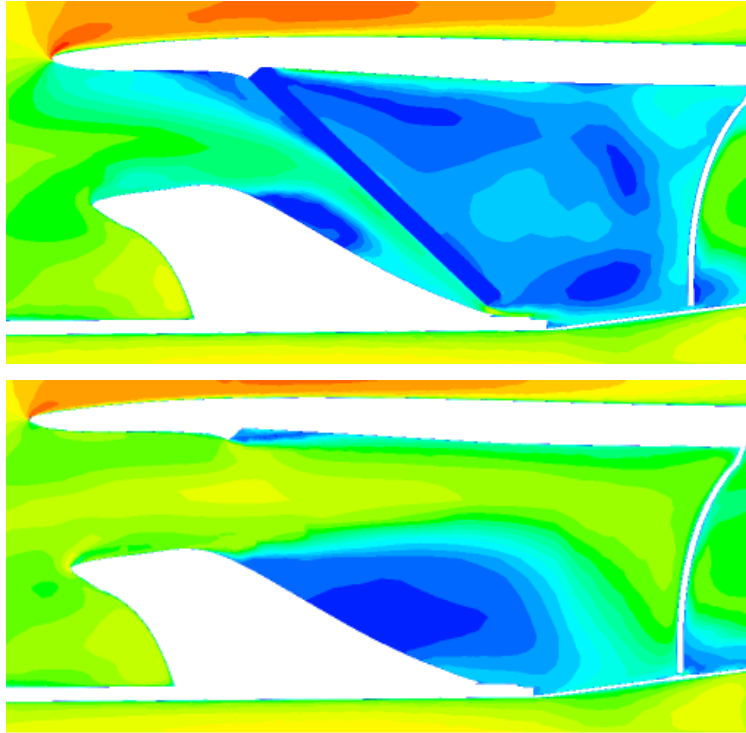
Obrázek 68 Ukázka ucpání vstupu do chladícího tunelu na voze ve variantě 4, na voze zobrazeny kontury tlaku a barva proudnic reprezentuje rychlost

11.6 Vyhodnocení varianty 4a

Tato varianta se liší od původní varianty 4 pouze odebranými chladiči. V této variantě se ukázalo, že chladič má vcelku výrazný vliv na celkovou přítlačnou sílu a zároveň způsobuje ucpání vstupu do chladičského kanálu.



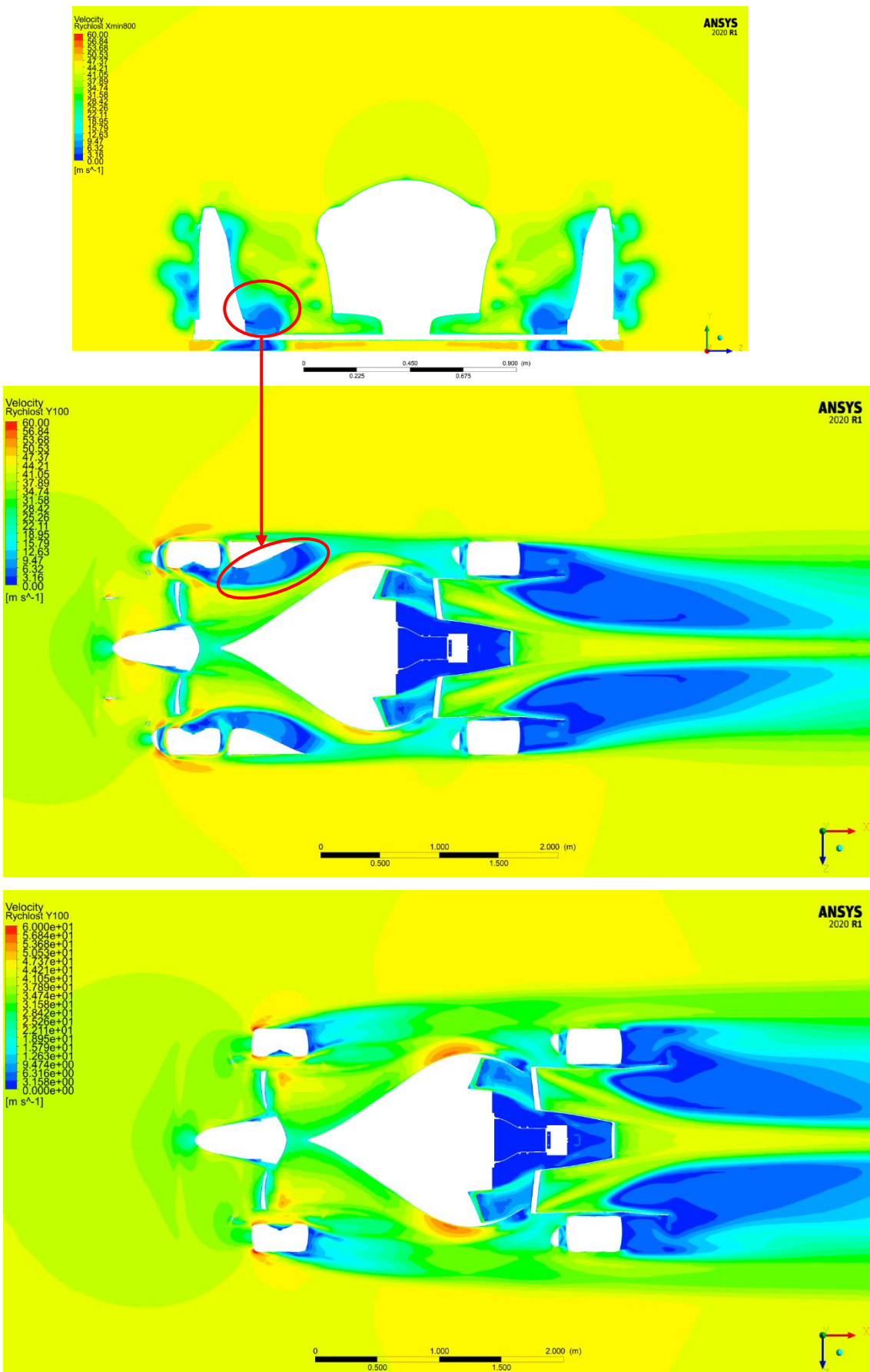
Obrázek 69 Srovnání proudění na vstupu do chladičského kanálu mezi variantou 4 (nahore) a variantou 4a (dole)



Obrázek 70 Porovnání proudění v chladícím kanálu ve variantě 4 (nahore) a variantě 4a (dole) v rovině Z550

11.7 Vyhodnocení varianty 5

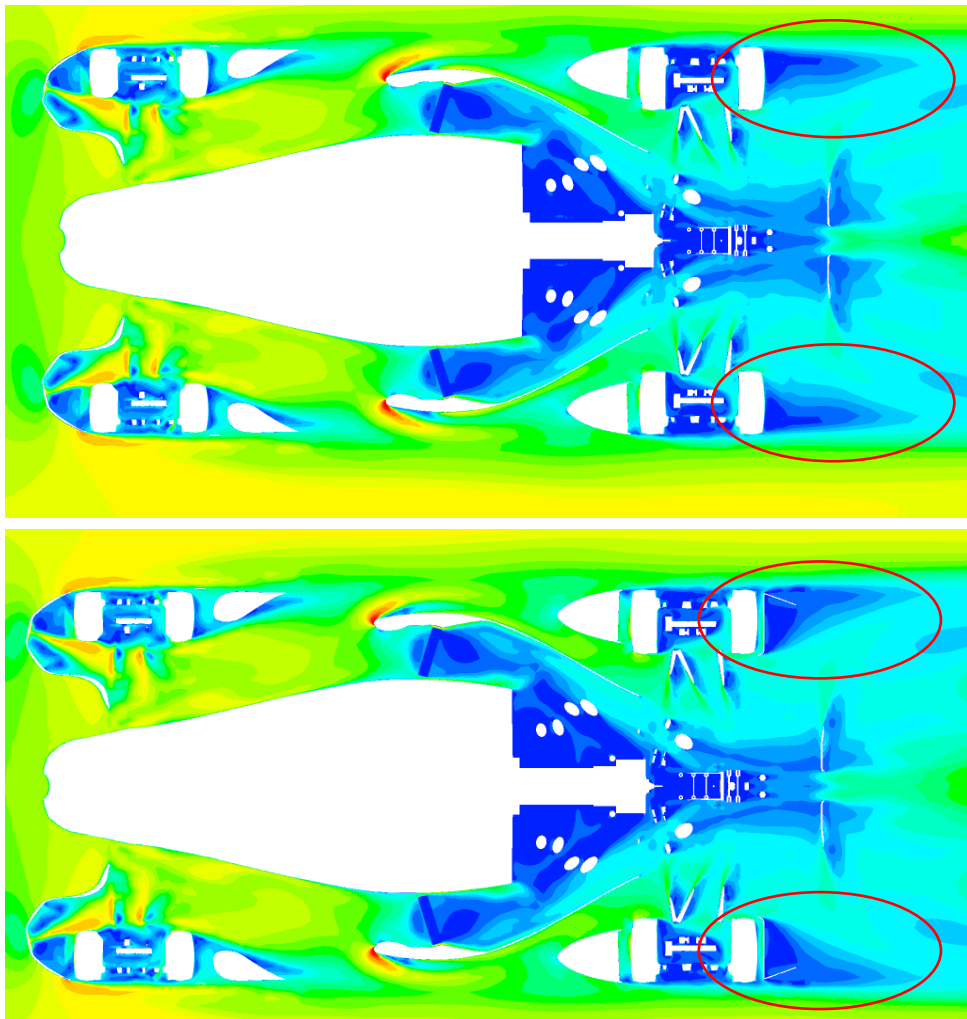
Varianta 5 je v základu varianta 4, doplněná o přední křídla a blatníky. Tyto přední komponenty způsobily nárůst přítláčné síly. Ale zároveň způsobily ovlivnění prostoru mezi vozovkou a podlahou vozu. Ovlivnění vzniklo tak, že vzduch, který ve variantě 4 mohl za kolem volně pokračovat do volného proudu vzduchu v okolí vozu, tak v této páté variantě je tento vzduch zastaven zadní částí předního blatníku. Toto zastavení způsobuje vytlačení zpomaleného vzduchu na vnitřní stranu zadní části předního blatníku a zároveň vytlačení pod podlahu vozu.



Obrázek 71 Ukázka vytlačeného vzduchu ve variantě 5 v rovinách X–800 a Y100 (dva obrázky nahoře) s porovnáním proudění vzduchu ve variantě 4 v rovině Y100 (obrázek dole)

11.8 Vyhodnocení varianty 6

Jediným rozdílem této varianty oproti variantě 5, je zadní část blatníku zadních kol. Původním předpokladem bylo zlepšení proudění za zadními koly a lepší proudění vzduchu za zadním difuzorem. To se nepotvrdilo, a tudíž můžeme usoudit, že zadní část blatníku zadního kola nemá na aerodynamické vlastnosti vozu výrazný vliv. Hodnoty přítláčné a odporové síly se změnily jen nepatrně.

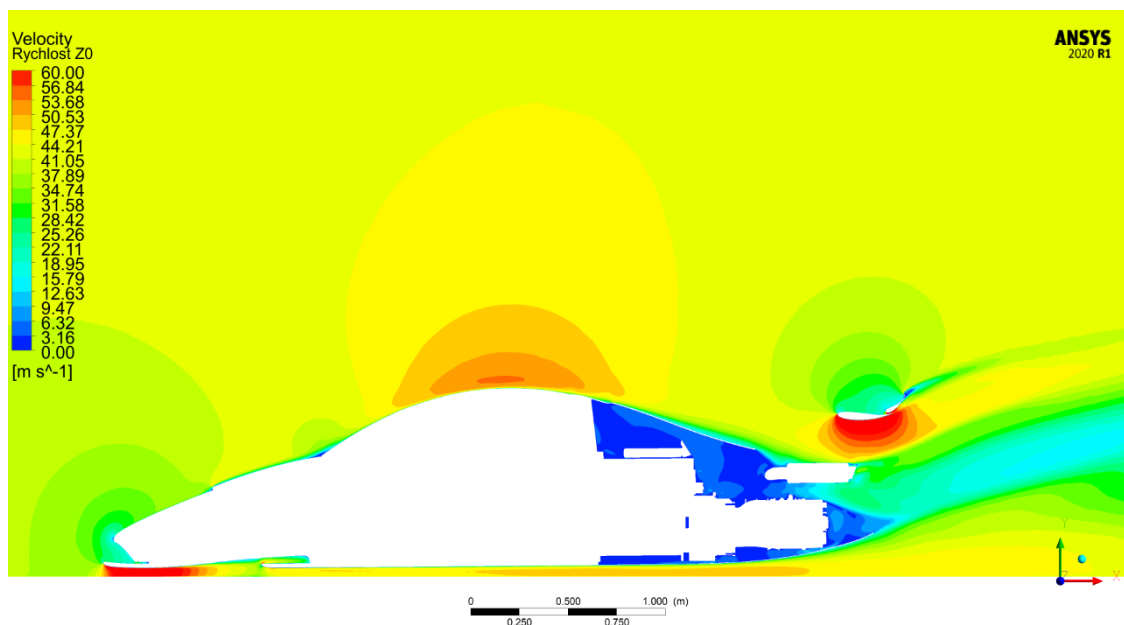


Obrázek 72 Porovnání kontur rychlosti na variantě 5 (nahore) s variantou 6 (dole) v rovině Y400 – nad podlahou vozu

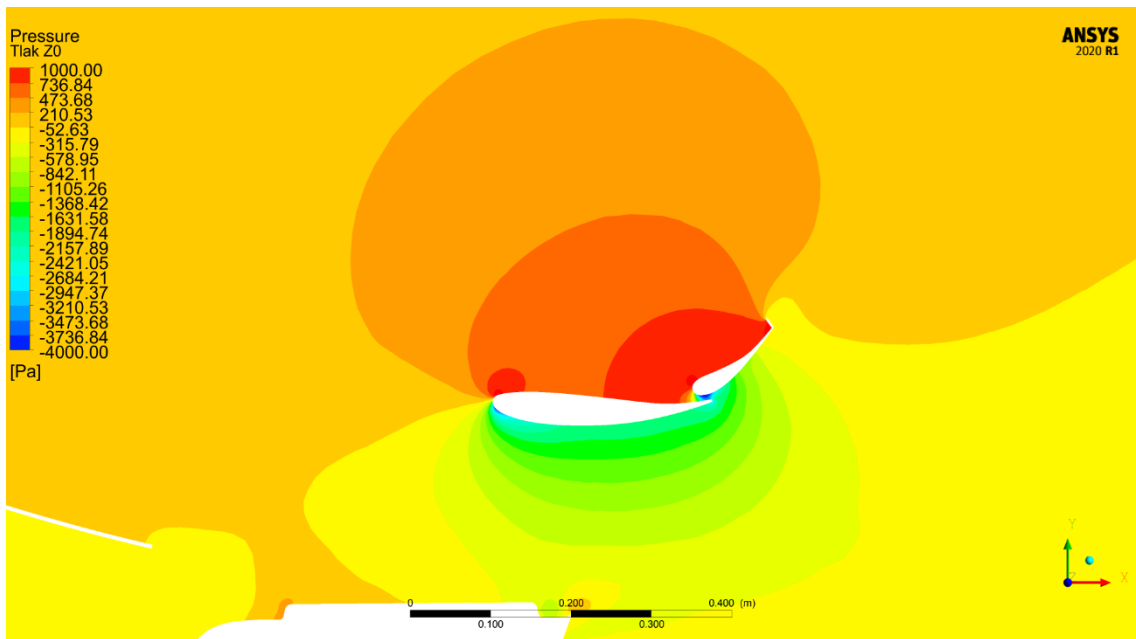
11.9 Vyhodnocení varianty 7

Do této varianty bylo přidáno zadní křídlo s jeho uložením. Přítlačná síla se navýšila na více než dvojnásobek oproti variantě 6. Oproti tomu odporová síla se tak závratně nenavýšila. Navýšení odporové síly odpovídá indukovanému odporu zadního křídla. Indukované odpory se většinou pohybují v rozmezí hodnot 15% - 20% přítlačné síly. V tomto případě se jedná o necelých 20% hodnoty přítlačné síly, které zadní křídlo vytváří. V této variantě je vidět, jak je důležitý správný návrh zadního přítlačného křídla. Na obrázku 73 je vidět, že křídlo je umístěno vhodně ve volném proudu vzduchu. To způsobuje jeho správné obtékání a díky tomu je generována značná přítlačná síla. Dále je na obrázku 73 vidět výrazné urychlení proudění pod křídlem a zpomalení nad křídlem. Rozložení tlaků okolo křídla je vidět na obrázku 74 a na první pohled je patrné, že zadní křídlo ovlivňuje velkou oblast vzduchu v jeho okolí. Dále si můžeme všimnout obrovské difference tlaků nad křídlem a pod křídlem. Díky této diferenci vzniká značná přítlačná síla.

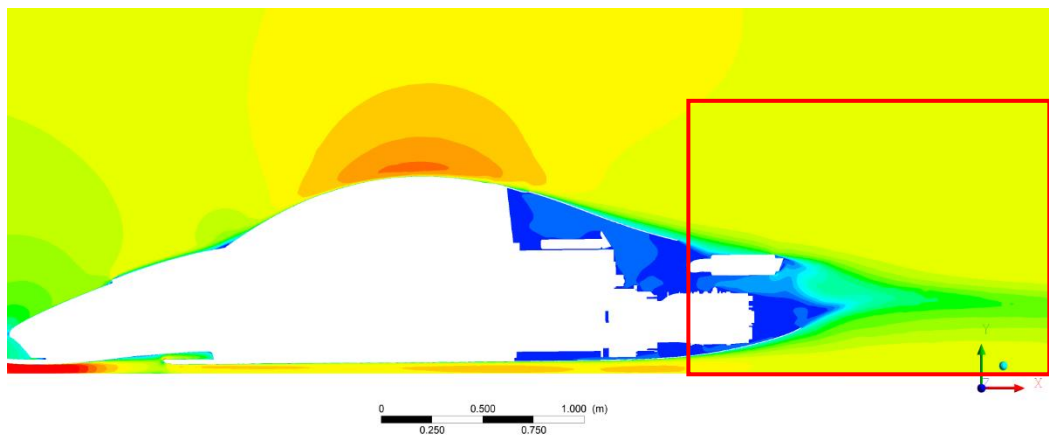
V porovnání s variantou 6 je vidět, jak urychlené a nasměrované proudění vzduchu způsobené zadním křídlem ovlivňuje proudění vzduchu za vozem. Toto porovnání je vidět na obrázku 75.



Obrázek 73 Kontury rychlosti v rovině symetrie ve variantě 7



Obrázek 74 Kontury tlaků okolo zadního křídla varianty 7 v rovině symetrie

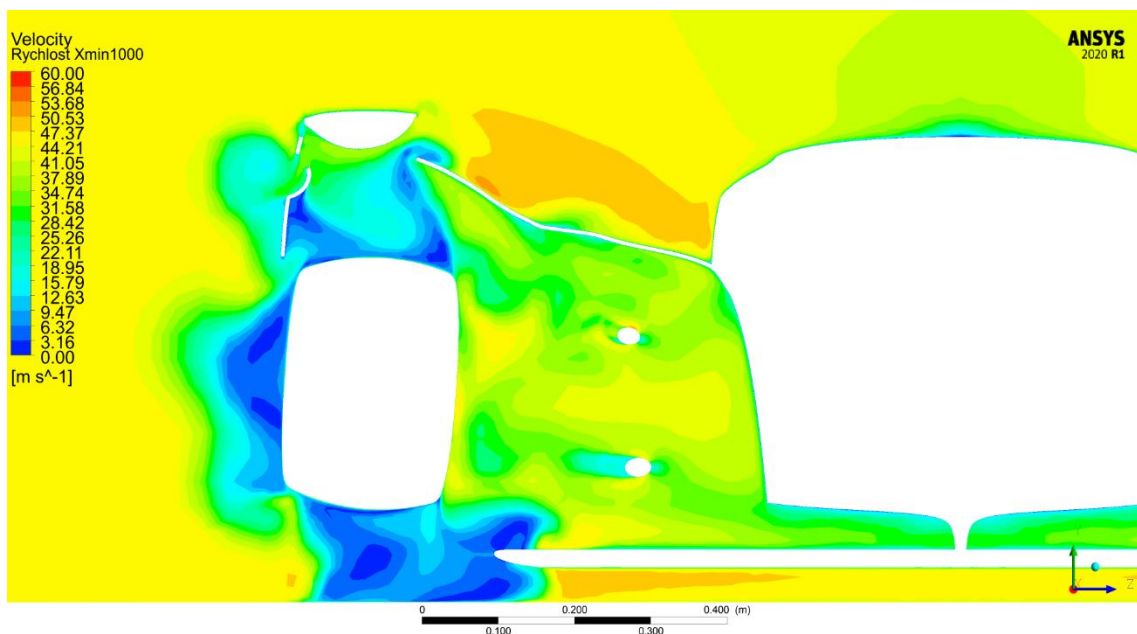


Obrázek 75 Porovnání kontur rychlosti varianty 6 (nahore) a varianty 7 (dole) v rovině symetrie

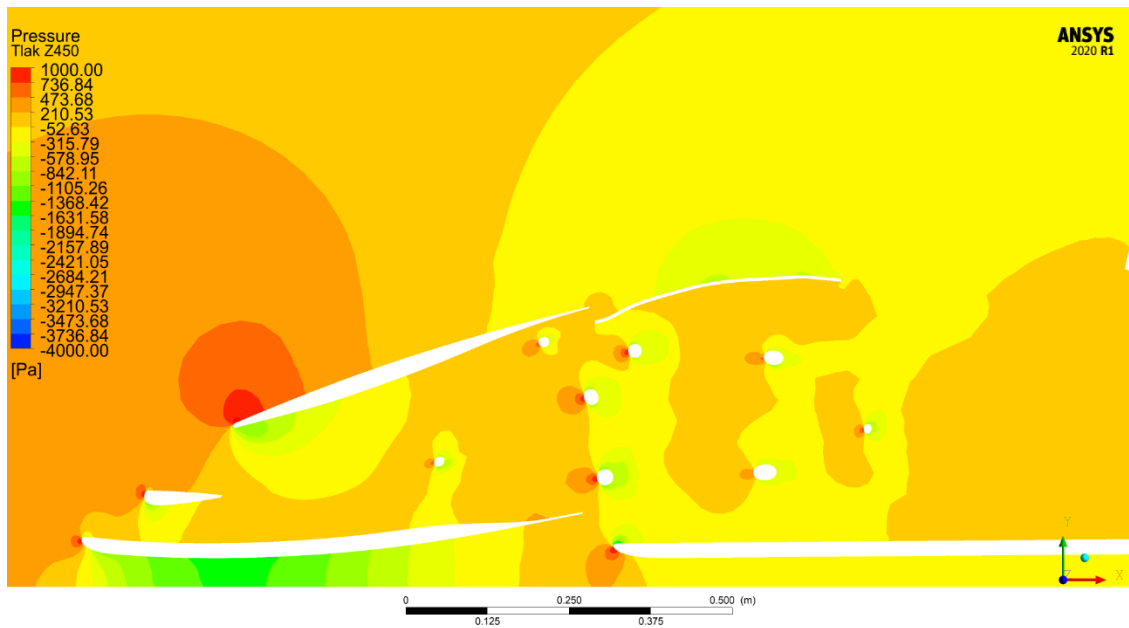
11.10 Vyhodnocení varianty 8

Tato varianta obsahuje celý model vozidla tak, jak byl předán z firmy Praga cars s.r.o. Rozdíl oproti variantě 7 je v přidání krytu za předními koly a zpětných zrcátek. V porovnání s variantou 7 došlo k poklesu celkové přítláčné síly s tím, že odporová síla zůstala stejná. Na tuto změnu má největší vliv kryt za předními koly, jelikož jeho tvar způsobuje vztlak, jak je vidět na obrázku 76 a 77. Na obrázku 76 je vidět urychlené proudění vzduchu nad krytem za předními koly. Na obrázku 77 je vidět nižší tlak nad krytem a vyšší tlak pod krytem, díky tomuto rozdílu vzniká vztlak, který ovlivnil hodnoty přítlaku vozu.

Dále v této variantě byly při simulaci sledovány hodnoty přítláčné a odporové síly u každé důležité komponenty zvlášť. Z těchto hodnot jsou vytvořeny grafy, aby se zjistilo, které komponenty se podílí nejvíce na přítláčné síle, odporové síle a vztlakové síle. Z těchto dat vyplývá, že nejvíce se na přítláčné síle podílí trojice komponent. A to přední splitter, zadní křídlo a podlaha s difuzorem. Naopak oproti tomu se na vztlaku podílí nejvíce monokok a poté chladič a kryt za předními koly. Na odporu se nejvíce podílí zadní křídlo, přední část předního blatníku a chladič.



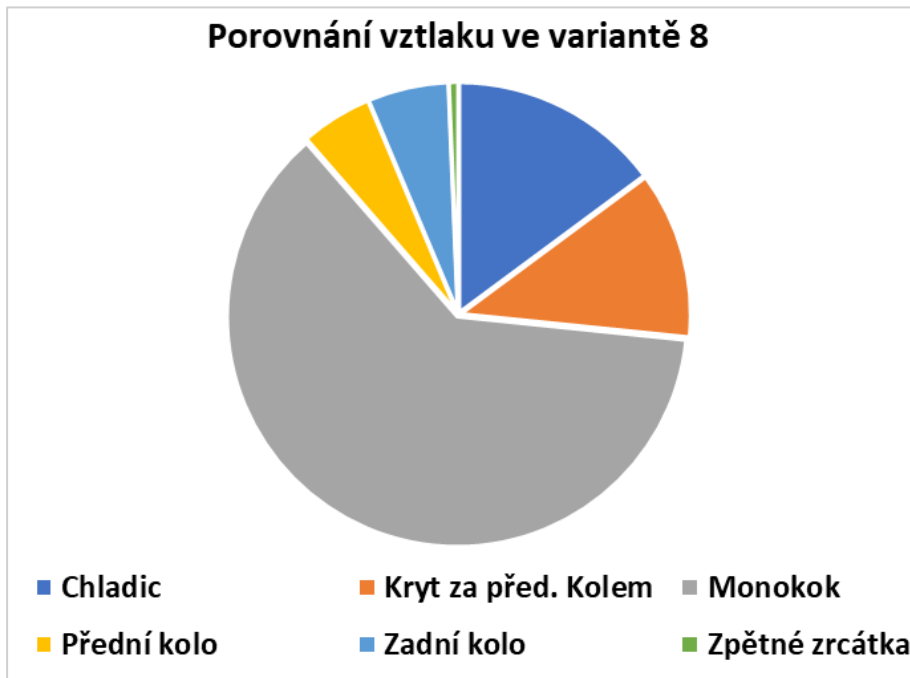
Obrázek 76 Kontury rychlosti okolo krytu za předními koly ve variantě 8 v rovině X-1000 – řez přením kolem



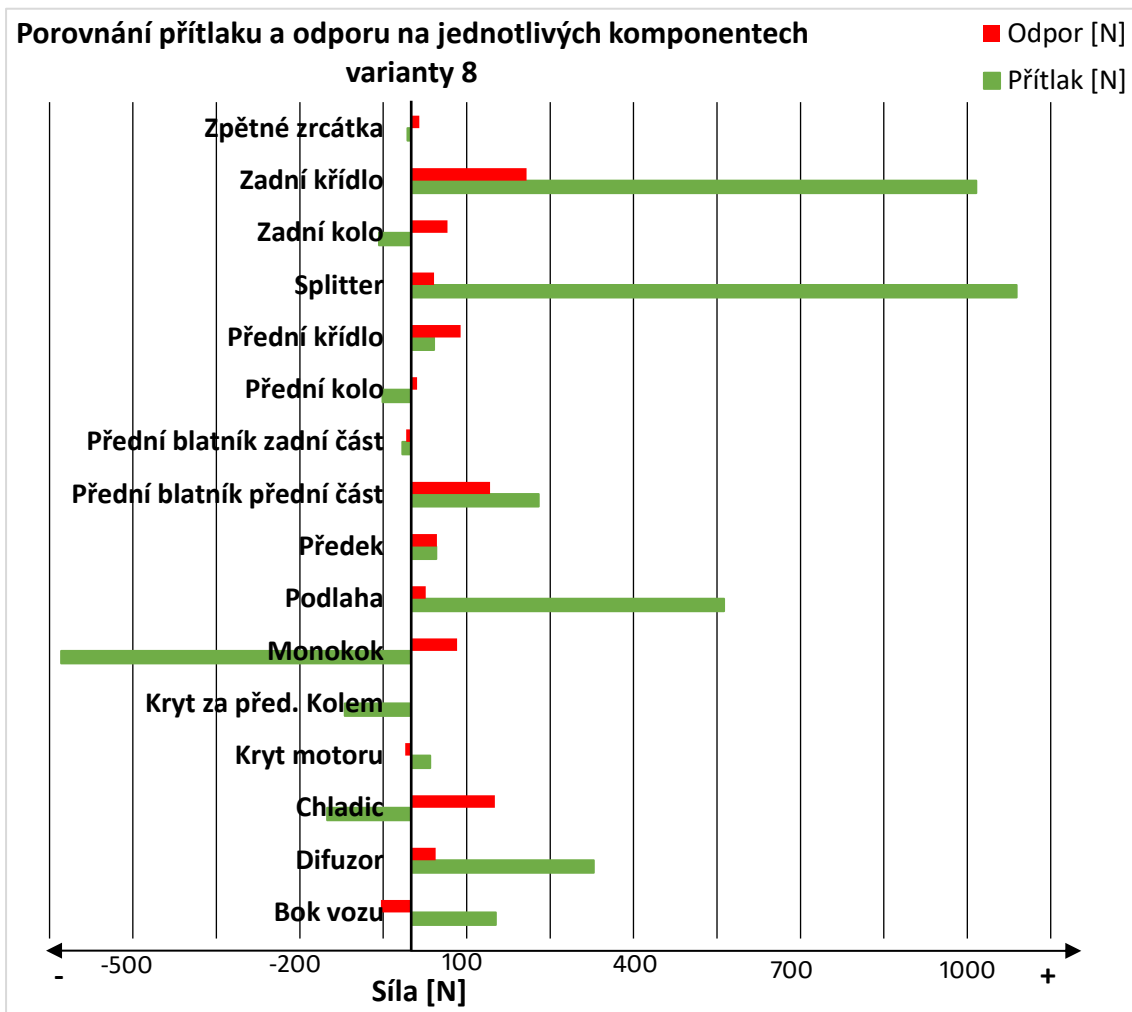
Obrázek 77 Kontury tlaku okolo krytu za předními koly ve variantě 8 v rovině Z450



Obrázek 78 Porovnání přitlaku na jednotlivých komponentech varianty 8



Obrázek 80 Porovnání vztlaku na jednotlivých komponentech varianty 8



Obrázek 79 Porovnání přítlaku a odporu na jednotlivých komponentech varianty 8

12 NAVRHOVANÉ ÚPRAVY VOZU PRAGA R1

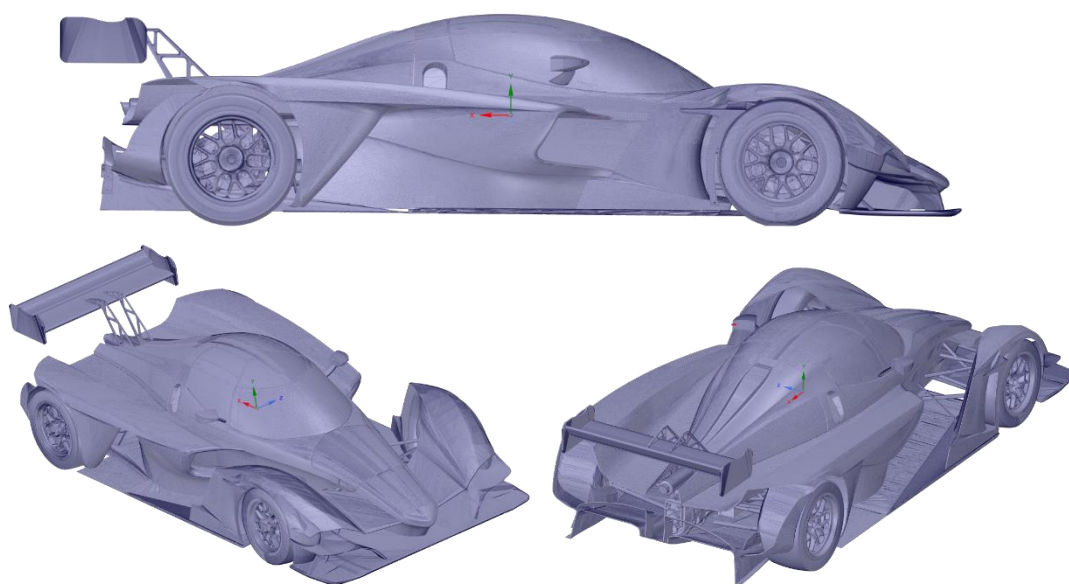
Na základě výsledků simulací základních devíti variant jsou navrženy úpravy vozu, u kterých je možné, že by mohly zlepšit aerodynamické vlastnosti vozu. Úpravy jsou rozloženy do tří kategorií. První kategorie je o odebrání komponent, bez kterých by se mohly zlepšit aerodynamické vlastnosti vozu. Druhá z nich je kategorie, kde jsou navrženy změny tvarování daných komponent. Z důvodu časové náročnosti správného návrhu tvarování komponent a následnou simulací vozu s těmito upravenými komponentami, je tvarování komponent navrženo pouze teoreticky s tím, že dávají podnět k dalšímu pokračování této práce. Ve třetí kategorii jsou do dané simulace doplněny hodnoty teplot daných komponent, které jsou ve skutečnosti zahřáté na určitou teplotu. Tato simulace se zvýšenými teplotami je provedena na již hotové výpočetní geometrii. Tyto tři kategorie navrhovaných úprav jsou popsány v následujících kapitolách.

12.1 Úpravy provedené odebráním komponent

Dle výsledků ze simulací devíti variant je možné se domnívat, že lze odebrat určité komponenty a tím zlepšit aerodynamické vlastnosti vozu. Tento druh úprav je výhodný z hlediska časové náročnosti přípravy geometrie a následného vyhodnocení simulací. Díky tomu si lze ověřit, zda jsou navrhované úpravy vhodné či nikoliv.

12.1.1 Odebrání krytu za předními koly – varianta 9

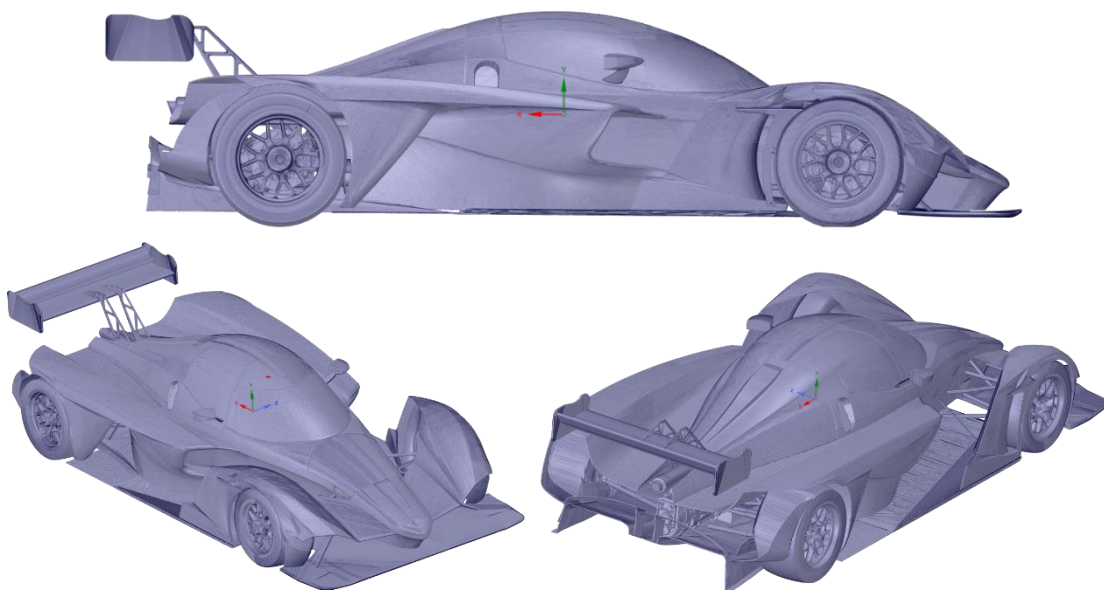
Z porovnání výsledků varianty 7 a 8 lze vyvodit, že odebráním krytu za předními koly je možné zvýšit přítláčnou sílu na hodnotu u varianty 7. Dále je možné se domnívat, že kryt za předními koly může mít negativní vliv na proudění do chladícího kanálu. Tudíž, že může způsobovat a napomáhat k jejich ucpání. Je možné, že kryt za předními koly směřuje proudění vzduchu do již ucpaného chladícího tunelu a jeho odebrání by mohlo způsobit změnu směru proudění vzduchu. Tato změna směru proudění by mohla snížit odporovou sílu díky tomu, že by se vzduch netlačil do již ucpaného chladícího kanálu. Co se týče přítláčné síly, tak je očekáván její nárůst na hodnoty podobné ve variantě 7, kvůli eliminaci rozdílu tlaků, který je vidět na obrázku 77.



Obrázek 81 Upravená varianta 9 – odebraný kryt za předními koly

12.1.2 Odebrání předního křídla – varianta 10

Při zhodnocení funkčnosti předního křídla, kdy je odporová síla vyšší než přítláčná síla, je možné předpokládat, že jeho odebrání nezpůsobí velkou změnu přítláčné síly, ale mohlo by to způsobit snížení odporové síly.



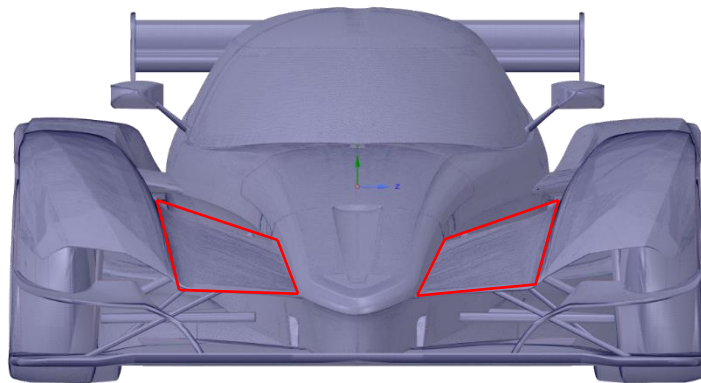
Obrázek 82 Upravená varianta 10 - odebrání předních křídel

12.2 Teoretické změny tvarování komponent

V této kapitole jsou navrženy teoretické změny v tvarování určitých komponent, u kterých je možné, že mohou mít vyšší potenciál v jejich využití, anebo je potřeba zlepšit jejich funkčnost. Na nalezení správných tvarových úprav by bylo zapotřebí iterovat s tvary těchto komponent. To znamená postupně vymodelovat a simulovat každou úpravu tvaru dané komponenty zvlášť. Což by bylo časově velmi náročné a kvůli nedostatku času jsou tyto změny navrženy pouze teoreticky s tím, že jejich vyšetření je možné provést v budoucnu, třeba při příležitosti vypracování dalších akademických prací.

12.2.1 Tvarování přední části předního blatníku

Je možné předpokládat, že přední část předního blatníku by se dala upravit tak, aby generovala více přítláčné síly. Teoreticky navrhovaná změna spočívá v úpravě stávajícího profilu, ze kterého je přední část předního blatníku tvarována. V případě nahrazení stávajícího profilu jiným profilem by se mohlo vygenerovat více přítláčné síly. Zároveň bude potřeba volit kompromis mezi přítláčnou silou a odporovou silou.



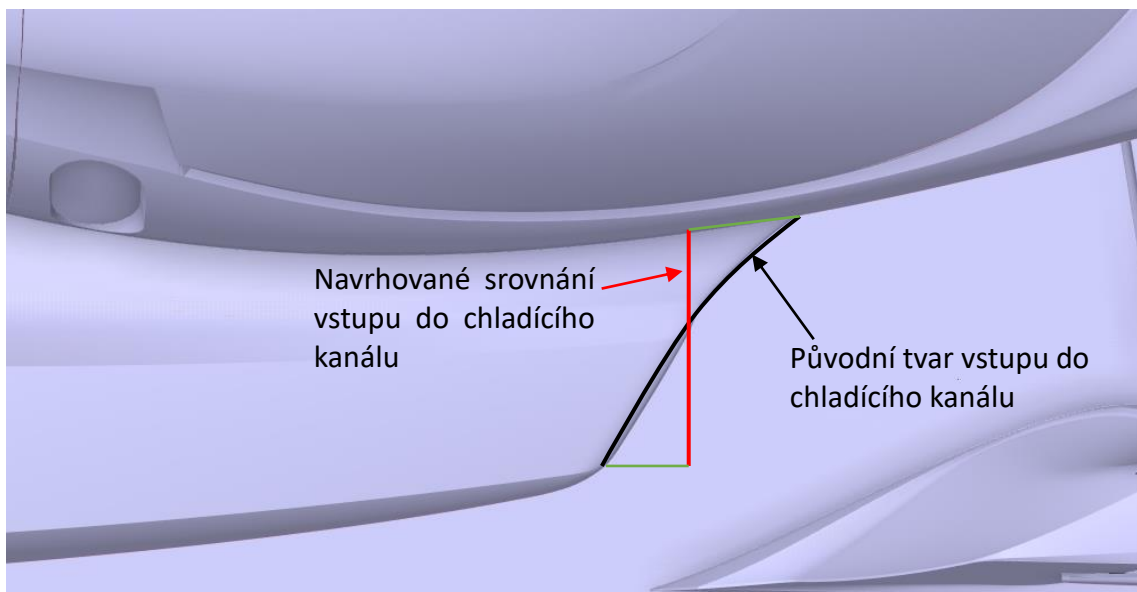
Obrázek 83 Oblast přední části předního blatníku pro provedení teoretické změny profilu

12.2.2 Tvarování chladícího kanálu

Z výsledků simulací variant 4 až 8 je vidět, že chladící kanál nefunguje tak, jak by měl. Dochází k jeho ucpání a odtrhávání proudění vzduchu na vstupu do chladícího kanálu.

Z toho může plynout horší funkčnost chlazení. Z těchto důvodů je navrhována úprava tvaru chladicího kanálu. Je jisté, že úprava tvarování chladicího kanálu umožní lepší chlazení vozu s tím, že chladicí kanál nebude ucpán. Tvarová úprava je navržena jako pozvolné rozšiřování chladicího kanálu namísto postupného lehkého zužování a následné náhlé rozšíření. Je možné předpokládat, že postupné rozšiřování chladicího kanálu způsobí rovnoměrné zpomalení vstupujícího vzduchu do chladicího kanálu bez nežádoucího odtržení od stěn chladicího kanálu. Dále je možné, že díky postupnému rozšiřování dojde k eliminaci ucpání chladicího kanálu a vzduch bude proudit na celou plochu a ne jen na její část, jak je tomu nyní (viz. obr. 70.).

Jako druhá tvarová úprava je navrženo „narovnání“ vstupu na chladicího kanálu tak, aby vstup nebyl zkosen směrem dozadu jako je v nynější verzi vozu. Je možné předpokládat, že srovnání vstupu do chladicího kanálu sníží tendenci vzduchu uhýbat před chladicím kanálem a tím by se mohlo proudění v chladicím kanálu zlepšit. Narovnání vstupu lze provést mezi hranicí, kde se vstup chladicího kanálu dotýká monokoku a konci vstupu do chladicího kanálu, tak jak je vidět na obrázku 84.



Obrázek 84 Ilustrační úprava vstupu do chladicího kanálu

Při simulování těchto úprav by bylo vhodné provést detailnější analýzu různých parametrů. Jako vhodný parametr na analýzu funkce upraveného chladicího kanálu je měření objemového průtoku vzduchu. Měření objemového průtoku vzduchu by bylo

vhodné zjišťovat na více místech z důvodu lepší validace výsledků. Jako vhodná místa se nabízí prostor před chladičem, prostor za chladičem a plocha na vstupu do chladícího kanálu. Dále by se mohly upravit parametry chladiče tak, aby byl více prostupný a propouštěl více vzduchu.

12.3 Výpočet se zahrnutím teplot – varianta 11

Hodnoty teplot daných komponent a oblastí jsou přidány do výpočtu varianty 9. Varianta 9 je zvolena z důvodu předpokladu, že varianta 9 bude mít nejvyšší hodnotu aerodynamické jemnosti C_y/C_x z dosud nasimulovaných variant. Zvýšené teplotní hodnoty jsou přidány na chladič, výfukové potrubí a motor. Aby se výpočet při přidání zvýšených teplot přiblížil co nejvíce k realitě, jsou ještě přidány výfukové plyny o určité rychlosti a teplotě. Dále je přidána i teplota okolního proudícího vzduchu. Hodnoty zvolených teplot a rychlost výfukových plynů jsou v tabulce 1.

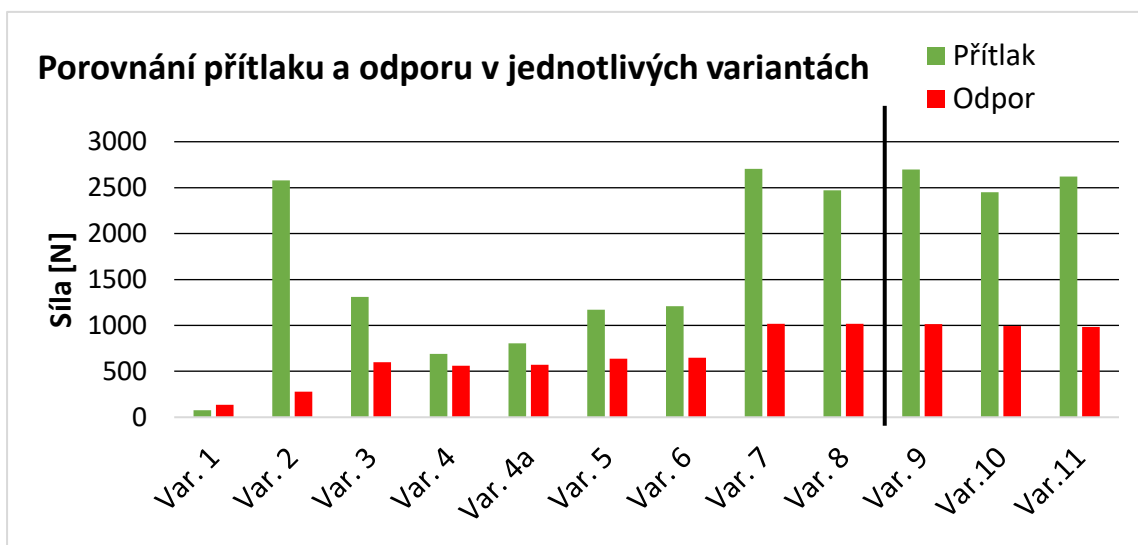
Tabulka 1 Nastavené hodnoty teplot daných komponent a oblastí

Oblast / komponenta	Nastavená teplota [°C] / rychlost [m/s]
Chladič	100 / -
Výfukové potrubí	800 / -
Výfukové plyny	600 / 85
Motor	100 / -
Okolní vzduch	25 / -

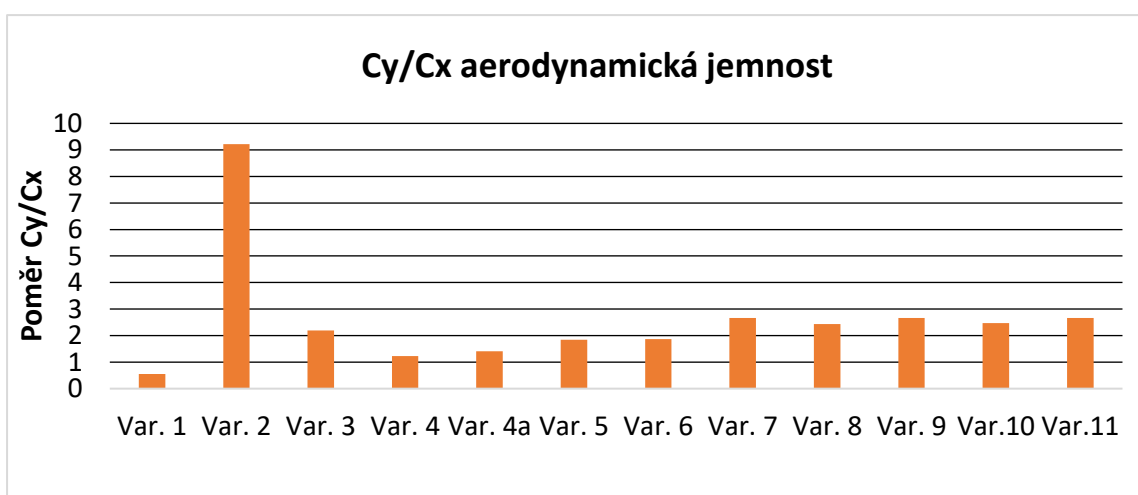
Záměrem bylo ověřit vliv teplot na urychlení proudění za chladičem a z toho plynoucí zlepšení proudění v chladících kanálech. Dalším záměrem bylo zjistit, zda výfukové plyny mohou ovlivnit proudění na zadním křídle a také proudění v zadním difuzoru.

13 VYHODNOCENÍ VÝSLEDKŮ UPRAVENÝCH VARIANT

U upravených variant byly při výpočtu sledovány stejné veličiny jako při výpočtu základních devíti variant. Tyto hodnoty jsou následně porovnané. Na obrázku 85 je vidět porovnání přítláčné a odporové síly upravených variant se základními devíti variantami. Tyto hodnoty sil jsou převedeny na koeficienty odporové síly C_x a přítláčné síly C_y , ze kterých je následně spočítána aerodynamická jemnost C_y/C_x . Na první pohled je vidět, že upravené varianty nedopadly hůře než varianta 8, kde byl počítán celý vůz. V následujících kapitolách jsou všechny upravené varianty vyhodnoceny podrobněji.



Obrázek 85 Porovnání přítlaku a odporu základních variant i upravených variant

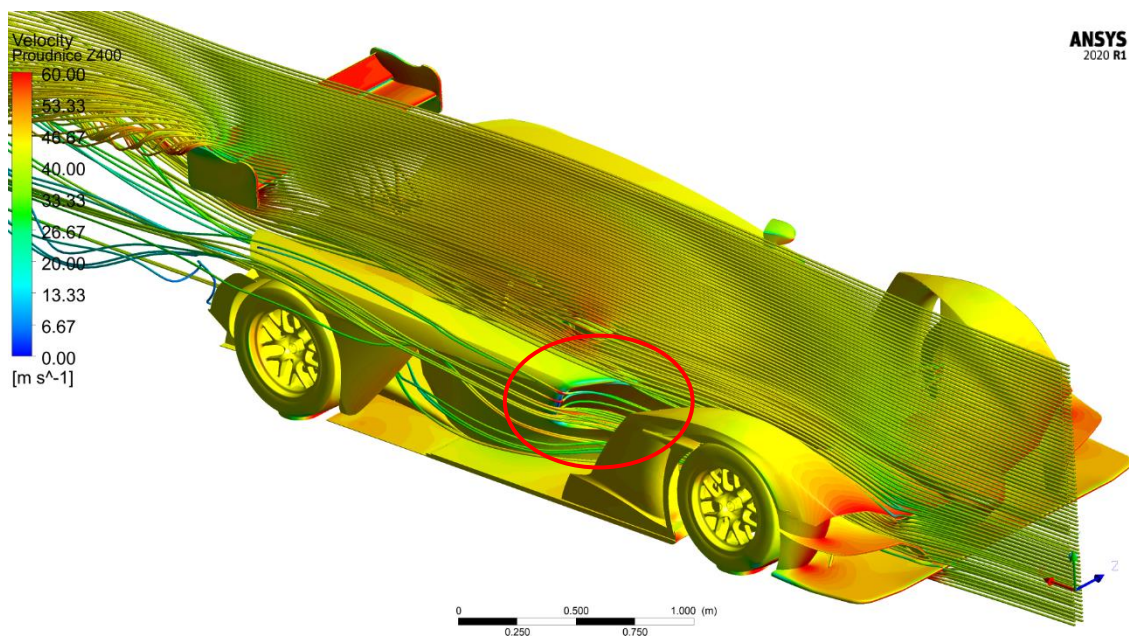


Obrázek 86 Porovnání aerodynamické citlivosti základních variant s upravenými variantami

13.1 Vyhodnocení varianty 9 - odebrání krytu za předními koly

V této variantě je z kompletního vozu odstraněn kryt za předními koly. Domněnka, že se přítláčná síla zvýší na hodnotu jako ve variantě 7, byla správná. Hodnota přítláčné síly varianty 9 oproti variantě 7 se liší jen v řádech jednotek newtonů, což může být způsobeno odlišností ve výpočetní síti. Odporová síla zůstala nezměněna, a tudíž na stejné hodnotě jako varianta 7 a 8.

Bohužel k eliminaci ucpání chladicího kanálu nedošlo. Tudíž domněnka, že kryt za předními koly zhoršuje ucpání chladicího tunelu není správná, jelikož i bez krytu za předními koly je chladicí kanál ucpaný.

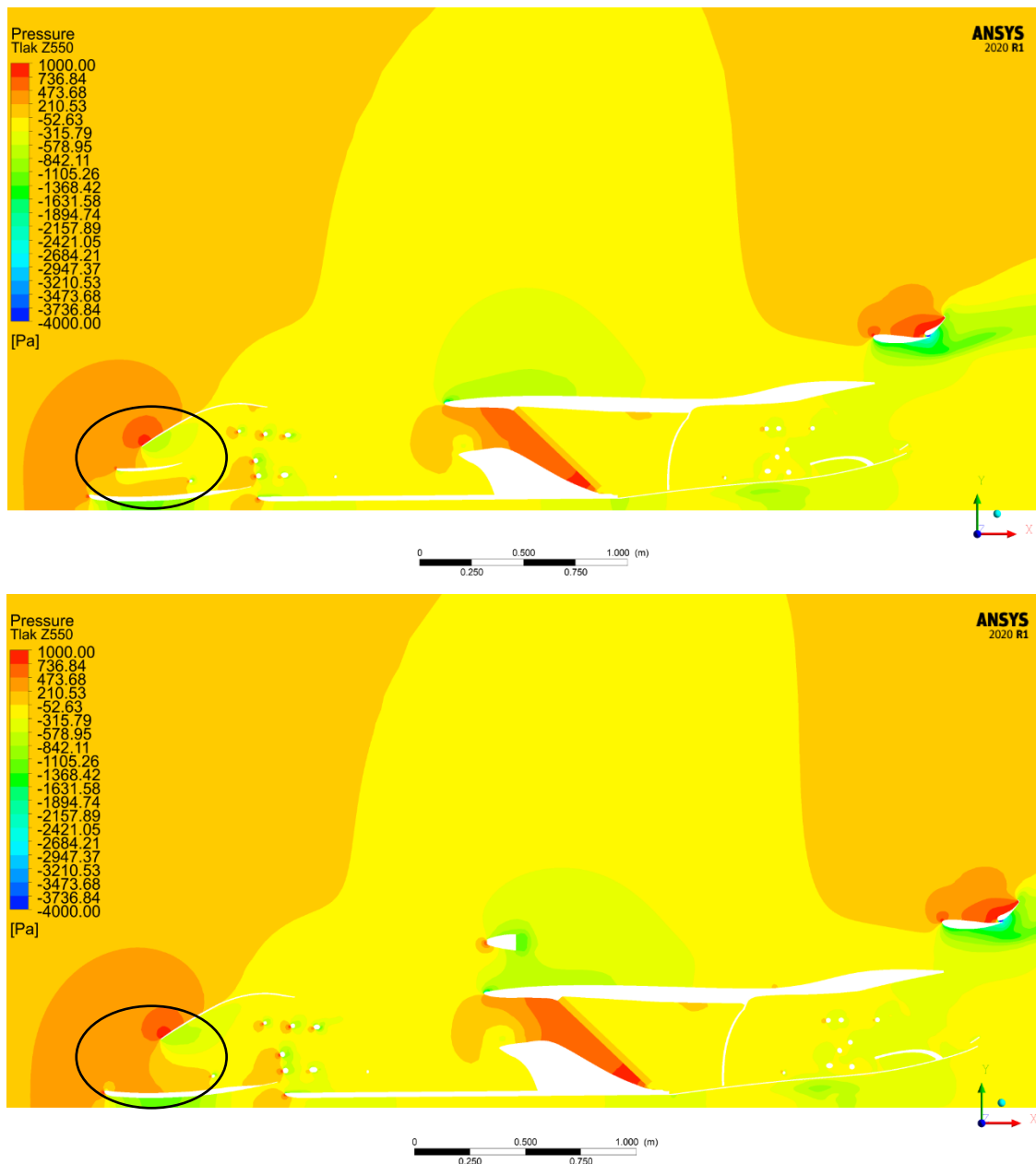


Obrázek 87 Ukázka ucpaného chladicího kanálu ve variantě 9

13.2 Vyhodnocení varianty 10 – odebrání předního křídla

U této varianty překvapivě ztelně klesla přítláčná síla bez toho, aniž by nějak výrazně klesla odporová síla. Když jsou porovnány kontury tlaku, jsou nalezeny rozdíly v rozložení nízkotlaké oblasti v okolí odebraného předního křídla. Tento rozdíl je vidět na obrázku 88. Dále je možné se domnívat, že odebráním předního křídla nastal

na přední spodní části předního blatníku pouze vztlak, který celkovou přítlačnou sílu ještě více snížil.



Obrázek 88 Kontury tlaku ve variantě 7 (nahore) a variantě 10 (dole) v rovině Z500

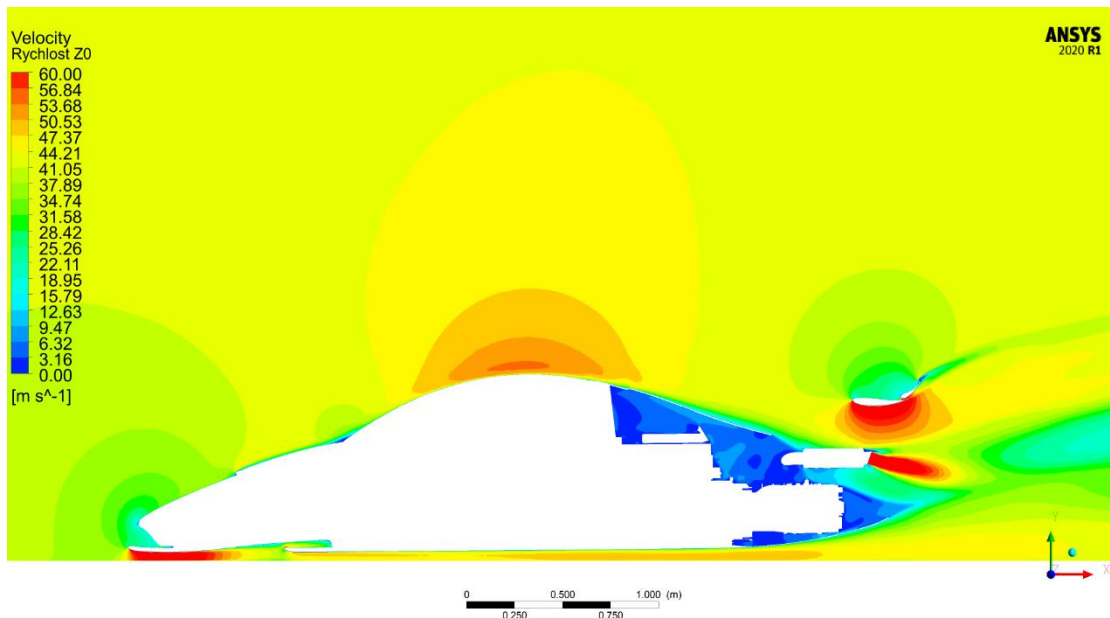
13.3 Vyhodnocení varianty 11 – zahrnutí rozdílných teplot

V této variantě výpočtu oproti variantě 9 mírně klesla odporová síla s tím, že přítlačná síla zůstala na stejné úrovni. Na obrázku 89 je vidět, že přidání výfukových plynů výrazně neovlivnilo zadní křídlo ani zadní difuzor. Dále se potvrdilo, že vzduch v chladícím kanálu proudí špatně, jelikož ani oteplený vzduch z chladiče nepomohl lepšímu proudění.

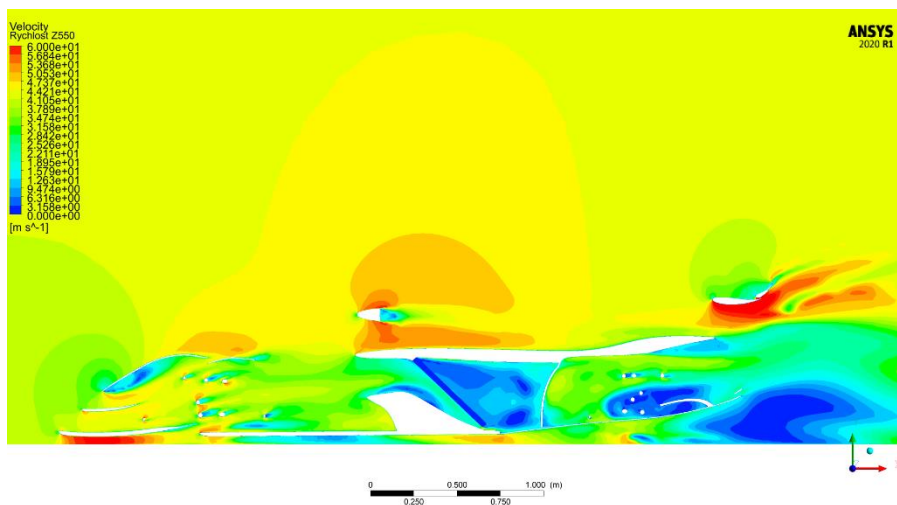
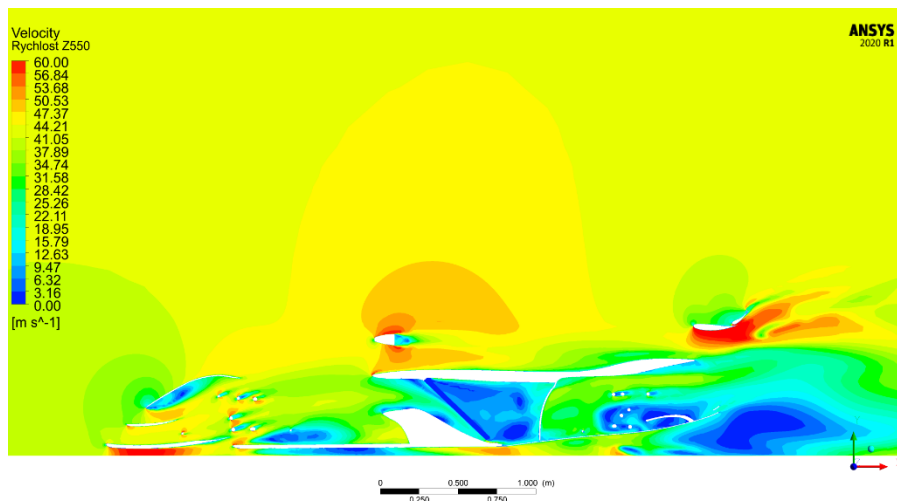
Na obrázku 90 je vidět porovnání proudění vzduchu v chladičím kanále s variantou 8. Na konturách rychlosti není vidět žádný rozdíl.

Zobrazíme-li kontury teplot, je možné vidět špatný přenos tepla z chladiče do okolního vzduchu, jelikož se za chladičem teplota vzduchu skoro nezvýšila. Dále je možné vidět kumulaci teplého vzduchu v motorovém prostoru. Tato kumulace je vidět na obrázku 91. V případě vyššího ohřátí vzduchu za chladičem by teplý vzduch proudil do již teplého vzduchu v motorovém prostoru, a tudíž by teplota v motorovém prostoru dále rostla. Což nemusí být příznivé pro případné ohřátí dalších komponent.

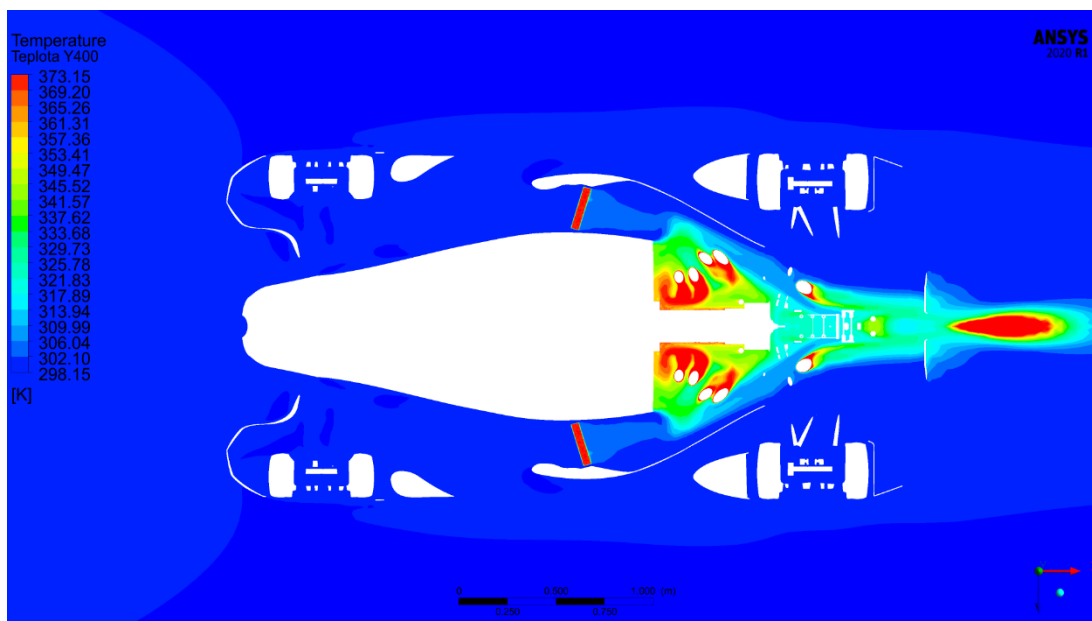
Bylo by dobré tento výpočet s teplem udělat přesnější. Z časových důvodů a z důvodů dostupné výpočetní techniky, již nemohl být zpřesňující výpočet proveden, a proto je možné, že hodnoty v této simulaci budou mít mírné odchylky od reality. Tyto odchylky jsou způsobeny zjednodušením problematiky přenosu tepla, jelikož ve výpočtu není zahrnut přenos tepla mezi okolním vzduchem, monokokem, horním krytem motoru a dalšími neohřátými komponentami. Další odchylky mohou být způsobeny tím, že z důvodu nedostatečného výpočetního výkonu a časových důvodů nebylo možné udělat jemnější výpočetní síť, a tudíž chybělo ověření, zda jsou tyto výsledky 100% správné (dle síťové analýzy popsané v kapitole 10.3.2.).



Obrázek 89 Kontury rychlosti varianty 11 v rovině symetrie



Obrázek 90 Porovnání kontur rychlosti varianty 8 (dole) s variantou 11 (nahore) v rovině Z550



Obrázek 91 Kontury teploty ve variantě 11 v rovině Y400

14 STATISTIKY PROVEDENÝCH SIMULACÍ

Simulace byly provedeny na výpočetních serverech fakulty strojní ČVUT. Fakulta nabízí studentům přístup k 6 výpočetní serverům. K této práci byly využívány dva servery, které jsou nazvány ELA a ELC. Jejich parametry jsou vypsány v tabulce 2. Servery jsou přístupné pro každého studenta, takže jen v málo případech byly servery těmito simulacemi využity na 100% z důvodu potřeby výpočetního výkonu ostatních studentů. Většinou bylo nastaveno, aby tyto simulace využívaly 30-50% celkového počtu výpočetních jader. Paměť RAM byla využívána dle potřeby daného výpočtu. Výpočet varianty 1 zabral nejméně paměti RAM, cca 52GB a nejvíce paměti RAM zabral výpočet varianty 11, což bylo cca 210GB RAM paměti.

Tabulka 2 Parametry výpočetních serverů

Název serveru	RAM paměť	Procesor	Počet procesorů	Celkový počet výpočetních jader
ELA	256GB	Intel Xeon E5-4627 v3; 2,6GHz	4	40
ELC	256GB	Intel Xeon E5-4640; 2,4GHz	4	32

Statistiky výpočtů jednotlivých variant jsou uvedeny v tabulce 3. V tabulce je vidět počet buněk před adaptací a po adaptaci spolu s výpočetním časem. Výpočetní čas byl velmi závislý na tom, kolik počet jader se na výpočtu podílelo a zda server využívali i jiní studenti. Výpočetní čas by se dal snížit tím, že by výpočty využívaly 100% celkového počtu výpočetních jader.

Tabulka 3 Statistiky výpočtů jednotlivých variant

Varianta vozu	Počet buněk před adaptací [milióny]	Počet buněk po adaptací [milióny]	Výpočetní čas [h]
Varianta 1	3,46	neproběhla adaptace	10
Varianta 2	5,8	6,5	15
Varianta 3	15,9	18,3	36
Varianta 4	12,3	16,5	34
Varianta 4a	12	16,1	34
Varianta 5	13,8	17,7	35
Varianta 6	14	17,8	35
Varianta 7	15,9	21	41
Varianta 8	16,1	21,1	52
Varianta 9	17,6	22	49
Varianta 10	18,6	21,8	49
Varianta 11	18,5	21,8	73

15 METODIKA NÁVRHU ZÁKLADNÍCH AERODYNAMICKÝCH PRVKŮ ZÁVODNÍHO VOZU

V případě návrhu úplně nového závodního vozu by aerodynamická řešení a optimalizace měly být prováděny paralelně s vlastním vývojem vozu. To znamená, že navržené komponenty či části vozu by bylo možné podrobit aerodynamické analýze hned po jejich návrhu. Tyto navržené komponenty či skupiny komponent by se pak na sebe mohly skládat jako v případě analýzy v kapitole 11, a tím by byl získán postupný obraz toho, jak dané komponenty na voze fungují, a zda jsou navrženy správně či nikoliv. Tento zamýšlený postup by měl být výhodnější, jelikož je možné si funkčnost aerodynamických komponent ověřit okamžitě po jejich prvotním návrhu a případnou chybu je možno opravit zavčasu. Dalším přínosem by mělo být snadnější pochopení aerodynamiky vozu a lepší vyniknutí závislostí mezi jednotlivými aerodynamickými komponentami.

V první řadě je třeba si definovat, jaký typ vozu bude navrhován, na jakých okruzích bude jezdit a z toho plynoucí omezení vozu, které pramení buď z pravidel dané závodní kategorie či výrobních nebo finančních možností. Mezi omezení pravidly patří například celkové rozměry vozu, výkon motoru, rozměry zadního křídla a další. Tato omezení nám určují maximální rozsah a způsob návrhu dovolených aerodynamických úprav, kterých se musíme držet.

Návrh vozu dále pokračuje tím, že se z okruhů, na kterých bude závodní vůz jezdit, vytvoří dráhové tachogramy. Z těchto tachogramů jsou následně zjištěny rychlosti, ve kterých se vůz bude pohybovat. Poté se zjistí poloměry zatáček na daných okruzích, a nakonec z těchto vstupních dat je spočítána celková přítláčná síla, která je třeba na to, aby vůz projel zatáčkami požadovanou rychlostí. Takto zjištěnou přítláčnou sílu je poté potřeba na voze vytvořit pomocí aerodynamických komponent. Z kapitoly 11 je vidět, že nejvíce se na přítláčné síle podílí trojice komponent. A to splitter, zadní křídlo a podlaha spolu s difuzorem. Tyto hlavní komponenty je třeba dimenzovat na požadovanou přítláčnou sílu a na vhodné rozložení přítláčné síly mezi přední a zadní nápravu. Dále je třeba hledět i na odpor těchto komponent. V případě omezení výkonu motoru, se může stát, že aerodynamické odpory těchto komponent neumožní vozu

zrychlit na požadovanou rychlost, která byla vyjádřena v tachogramech. Z toho plyne generování nižší přítláčné síly a nižší rychlost v zatáčkách.

15.1 Splitter

Splitter je jedna z prvních komponent vozu, která se dostává při jízdě do kontaktu s okolním proudícím vzduchem. Proto je důležité rozmyslet, kam bude vzduch vystupující ze splitteru směřovat, jelikož to může ovlivnit všechny komponenty za splitterem. U splitteru je také důležité, aby vzduch pod ním výrazně zrychloval, a byl vytvořen rozdíl tlaků nad splitterem a pod splitterem.

V případě konstruování vozidla typu jako je Praga R1 je možné využít toho, že je nad koncovou hranou splitteru místo a je možné vzduch vystupující ze splitteru směřovat šikmo vzhůru. Díky tomu je možné tvarovat spodní stranu splitteru s tím, že vzduch zrychlující pod splitterem je směřován nad další část podlahy. Tvarování spodní strany splitteru přispívá ke zvýšení přítláčné síly. Tvarování spodní strany splitteru je ve většině případů podobné tvaru spodní hrany křídla, jelikož díky tomuto tvarování dochází k nejvyššímu urychlení vzduchu pod splitterem bez nežádoucího odtržení proudu vzduchu, a tudíž nejvyšší hodnotě přítláčné síly.

Kdybychom naopak konstruovali závodní vozidlo vycházející z karoserie sériového vozu, tak nejspíše nad koncovou hranou splitteru místo nebude, a tudíž nebude možné využít vyvedení vzduchu nad úroveň splitteru nad další část podlahy. V tomto případě je možné využít vyvedení vzduchu pod splitterem například do prostoru předních brzd a pomoci tak k jejich chlazení. Vzduch, který nebude vyveden do prostoru brzd je možné vyvést dál po podlaze až k zadnímu difuzoru.



Obrázek 92 Ukázka splitteru na voze Lamborghini Gallardo GT3 2008 [30]

15.2 Zadní křídlo

Jak si můžeme všimnout na výsledcích ze simulace Pragy R1 v kapitole 11, tak zadní křídlo má výrazný vliv na velikost přítláčné síly závodního vozu. U zadního křídla je třeba brát ohled na několik aspektů, které rozhodují o tom, zda bude zadní křídlo generovat značnou přítláčnou sílu nebo bude zadní křídlo pouze jako „ozdobný“ aerodynamický prvek.

Prvním z aspektů, na který je třeba brát ohled, je poloha zadního křídla. Zadní křídlo by mělo být umístěno ve volném proudu vzduchu, který je laminární. V případě umístění zadního křídla do zvířeného proudu vzduchu nastává špatné obtékání profilu křídla a z toho plynoucí degradace funkčnosti křídla. Ze simulací základního tělesa s podlahou a případně dalšími aerodynamickými prvky si určíme místo, kde je proudění laminární v co nejbližším místě u vozidla. Do tohoto místa můžeme pak křídlo umístit. Je možné, že poloha křídla bude nařízena pravidly. Kdyby tato pravidla určovala polohu křídla v nevhodné oblasti s turbulentním prouděním, je třeba hledat cestu, jak dostat na křídlo laminární proudění.

Druhým aspektem je volba vhodného profilu křídla. Křídlových profilů je celá řada. Je třeba si určit, co je nejdůležitější, zda je to přítláčná síla anebo odporová síla. Těmto

požadavkům je pak třeba podrobit výběr vhodného profilu křídla. Každý profil má svou vztlakovou a odporovou čáru, na kterých jsou vidět koeficienty vztlaku a odporu při různých úhlech náběhu. Z porovnání těchto křivek si následně vybereme nejvhodnější křídlový profil.

Dalším aspektem, tedy třetím, je správné nastavení úhlu náběhu na křídlo. Na vytipovaném místě z předchozího odstavce je třeba si ze simulací základního tělesa a dalších variant bez zadního křídla zobrazit proudnice vzduchu, případně vektory pohybu, a zjistit v jakém úhlu proudí vzduch v námi vytipovaném místě. Tomuto úhlu proudění pak uzpůsobíme natočení křídla. Je třeba počítat s rozsahem úhlů náběhu, z důvodu aerodynamického doladění dle podmínek na daném okruhu. Úhel nastavujeme dle vztlakové a odporové čáry daného profilu křídla.

15.3 Podlaha s difuzorem

Jak je možné vidět na výsledcích z postupného simulování Pragy R1 a z provedené rešerše, tak podlaha generuje velkou část přitlačné síly s minimem odporové síly. Podlaha je silně ovlivněna turbulentním prouděním za koly. Proto je důležité, aby při simulaci varianty modelu s podlahou bez kol byla podlaha bez jakýchkoliv nežádoucích vírů a proudění pod ní bylo z co největší části laminární. Další aspekt, který ovlivňuje funkčnost podlahy je světlá výška mezi vozovkou a podlahou. Proto je třeba dávat pozor na příliš malou světlou výšku, která může spíše uškodit nežli pomoci. Dále je třeba podlahu vhodně naklonit (tzv. rake – viz. kapitola 3.4.2). Vhodné naklopení způsobí razantní nárůst přitlačné síly, a proto je dobré vyzkoušet různé světlé výšky v přední a zadní části vozu. Je možné, že světlá výška vozu i sklon podlahy bude nařízen pravidly dané kategorie závodních vozidel. V tomto případě je vhodné nejdříve vyzkoušet světlou výšku se sklonem daný pravidly a na základě těchto výsledků se rozhodovat dále.

15.3.1 Podlaha

Tato část podlahy se nachází mezi splitterem a zadním difuzorem. Její tvarování je ve většině případů omezeno pravidly. Nejčastěji je tato část podlahy rovinná. V případě správného náklonu podlahy je na této části generován nižší tlak, než je tlak okolí. Ve spojení s velkou plochou, kterou tato část podlahy zabírá, je vytvořena vysoká hodnota přitlačné síly. Z tohoto důvodu je žádoucí, aby se na této části podlahy

nevytvářely nežádoucí víry a nevznikalo odtrhávání vzduchu. Tyto atributy mohou snížit úroveň nízkého tlaku, a tudíž negativně ovlivnit generování přitlačné síly.

15.3.2 Difuzor

Difuzor, jako koncová komponenta podlahy, se podílí na urychlení vzduchu pod celou podlahou vozu. Proto je důležité dbát na to, aby na difuzoru nevznikalo odtržení proudu vzduchu, které by snížilo jeho účinnost. Při návrhu difuzoru je nutné dbát na správný úhel a profil stoupání horní stěny difuzoru. S tím je spojený přechod mezi difuzorem a střední částí podlahy. Je vhodné, aby tato přechodová hrana plynule navazovala na rovinnou střední část podlahy. V případě ostré přechodové hrany může vznikat odtržení proudu vzduchu, které značně sníží účinnost difuzoru a tím by se ovlivnilo urychlení proudění pod celou podlahou vozu.

15.4 Chladiče + chladící kanály

Chladiče jsou velmi důležitými komponentami, jak z hlediska chlazení motoru a jeho příslušenství, tak z hlediska aerodynamiky. Z grafu na obrázku 80 je vidět, že chladiče se podílí velkou měrou na odporové síle i vztakové síle. Proto je třeba se zamyslet nad jejich umístěním. Není úplně výhodné umísťovat chladiče do nejširší části vozu, jelikož se tím zvýší čelní plocha vozu. Z toho plyne vyšší odporová síla, což je nežádoucí. Další atributem, na který je třeba myslet je krom samotné polohy chladičů i jejich natočení. Jak je vidět z výsledků simulací v kapitole 11, tak natočení chladičů ve voze Praga R1 způsobuje značný vztlak. Při návrhu umístění a natočení chladičů se snažíme generování vztlaku vyvarovat.

U chladících kanálů je snaha navrhnout je tak, aby vzduch navedly správně na celou plochu chladiče. Toto je důležité z hlediska správné funkčnosti a účinnosti chladičů. Další problematikou chladících kanálů, na kterou je třeba dbát, je dostatečná velikost průtoku vzduchu chladícím kanálem. V případě malého průtoku vzduchu chladícím kanálem není dosaženo potřebné výměny tepla mezi chladičem a proudícím vzduchem. To může znamenat v budoucnu přehřívání motoru či jiné problémy. V případě Pragy R1 je třeba dbát i na to, aby vstup do chladícího kanálu nebyl aerodynamicky ucpán. V případě zjištění ucpání je například možné upravit tvarování chladícího kanálu anebo zvětšit průřez, kterým může vzduch vstupovat do chladícího kanálu.

15.5 Blatníky kol

Blatníky kol, respektive zakrytí kol výrazně zlepšuje aerodynamické vlastnosti vozu, a proto je třeba dbát na jejich vhodný návrh. Na výsledcích ze simulací vozu Praga R1 je vidět, že zakrytí kol má výrazný vliv na snížení celkové odporové síly. Kola je vhodné zakrýt tak, aby mezi kolem a blatníkem byla co nejmenší mezera. Dále je třeba blatníky vhodně natvarovat, aby při průchodu okolním vzduchem generovaly co nejmenší odporovou sílu. Například na voze Praga R1 můžeme vidět tvarování přední části blatníku do špičky se zaoblenou přední hranou.

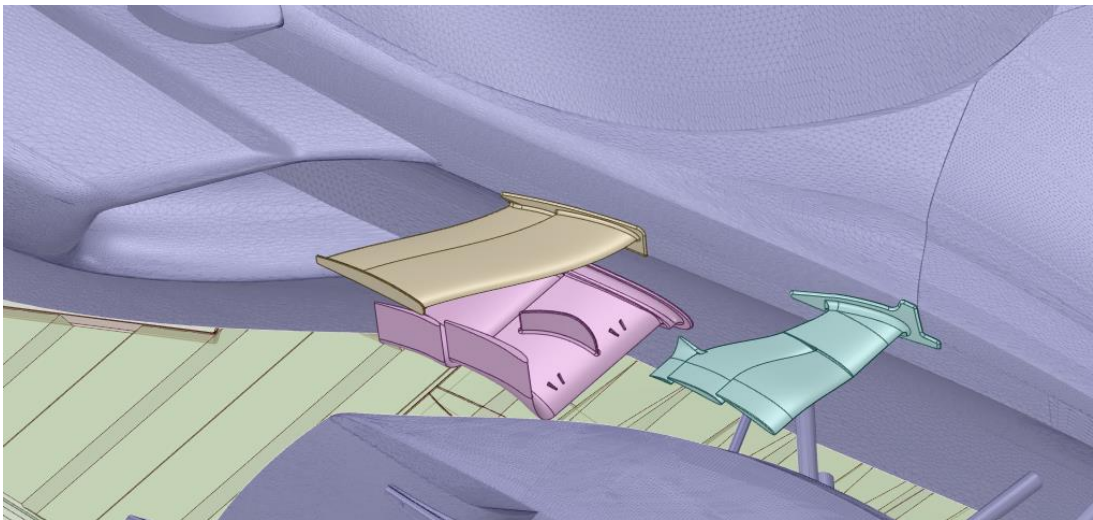
Blatníky ale nemusí sloužit pouze k minimalizaci odporové síly. Mohou se využít také ke generování přítláčné síly, navádění proudění vzduchu tak, aby proudění pozitivně ovlivnilo aerodynamické komponenty za blatníky, anebo k uchycení dalších komponent, které pozitivně ovlivní vlastnosti vozu.

15.6 Monokok

Monokok je součástí základního tělesa pro simulování, a tudíž je snaha docílit co nejmenší odporové síly, kterou monokok spolu se základním tělesem vytváří. U tvarování monokoku je snaha přizpůsobit ho tak, aby nevznikalo nežádoucí odtržení vzduchu od stěn monokoku. Jak je možné vidět v kapitole 11, tak monokok může vytvářet vztlačovou sílu a to značnou. Dále je dobré snažit se monokok tvarovat tak, aby nebyl příliš široký, ale jednalo se spíše o tenké těleso, kde délka tělesa výrazněji převažuje nad jeho šířkou. Přesně takový monokok je vidět na voze Praga R1.

16 SIMULACE KOMPONENT UPRAVUJÍCÍ PROUDĚNÍ DO CHLADÍCÍCH KANÁLŮ

Na základě problému s prouděním vzduchu do chladících kanálů, přišla firma Praga Cars s.r.o. s řešením pomocí komponenty, která se připevnila před vstup chladícího kanálu. Firma Praga Cars s.r.o. navrhla tuto komponentu ve 3 provedeních. Zadání bylo všechny tyto komponenty simulovat a zhodnotit, která komponenta je vhodná pro vyřešení problematiky proudění vzduchu do chladícího kanálu. Komponenty jsou vidět na obrázku 93. U simulování těchto komponent bylo důležité vyhodnocení směřování proudění vzduchu, a ne vyvolávané síly, jak tomu bylo u simulovaných variant doposud. Na první pohled je vidět, že komponenty budou vytvářet na svých koncích víry, a tudíž je třeba tomuto jevu uzpůsobit a patřičně zjemnit výpočetní síť. Je to z toho důvodu, aby víry byly zachyceny správně a jejich ovlivnění proudění vzduchu do chladícího kanálu bylo simulováno bez zbytečných chyb.

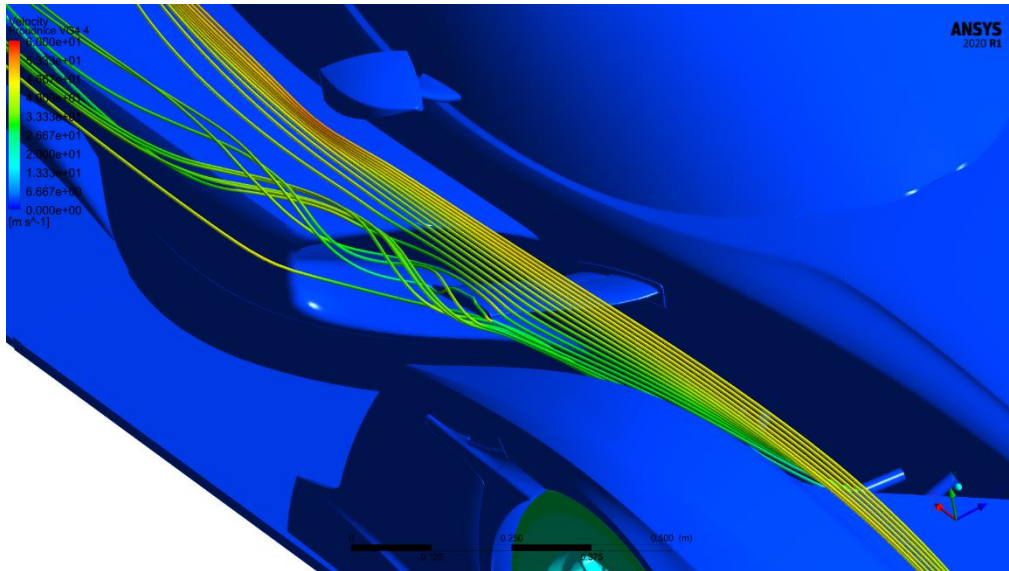


Obrázek 93 Ukázka komponent upravující proudění vzduchu do chladícího kanálu (žlutá – VG1, zelená - VG2, růžová - VG3)

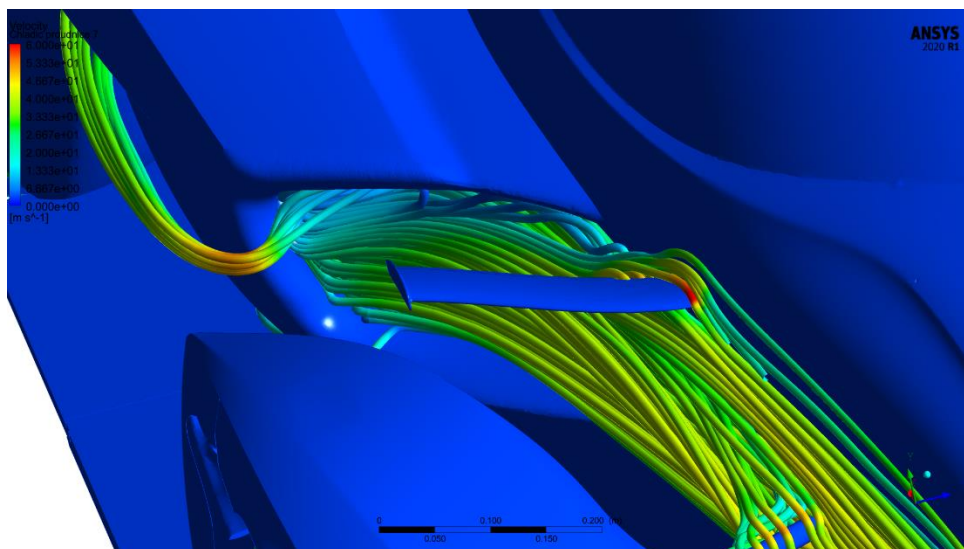
16.1 Vyhodnocení proudění s komponentou VG1

Tato komponenta se podobá dvuelementovému křídlu, které je otočené o 180° oproti zadnímu přitlačnému křídlu. Na obrázku 94 je vidět, že komponenta VG1 vytváří koncový vír, který bylo třeba zachytit pomocí jemnější výpočetní sítě. Na obrázku 95 je

vidět celkové proudění vzduchu do chladícího kanálu. Je patrné, že komponenta VG1 trochu vzduchu nad ní nasměrovala směrem do chladícího kanálu, ale vzduch stále z chladícího kanálu uniká. Další jev, který je patrný, je ten, že průřez, kterým proudí vzduch do chladícího kanálu, není tak velký jako celkový průřez vstupu do chladícího kanálu. Tudíž toto řešení není doporučeno jako správné.



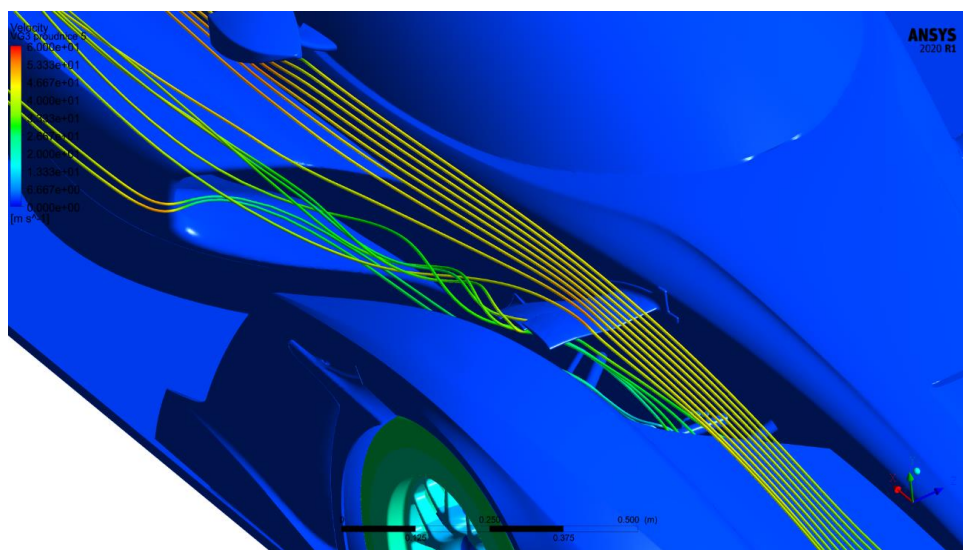
Obrázek 94 Koncoví vír na VG1



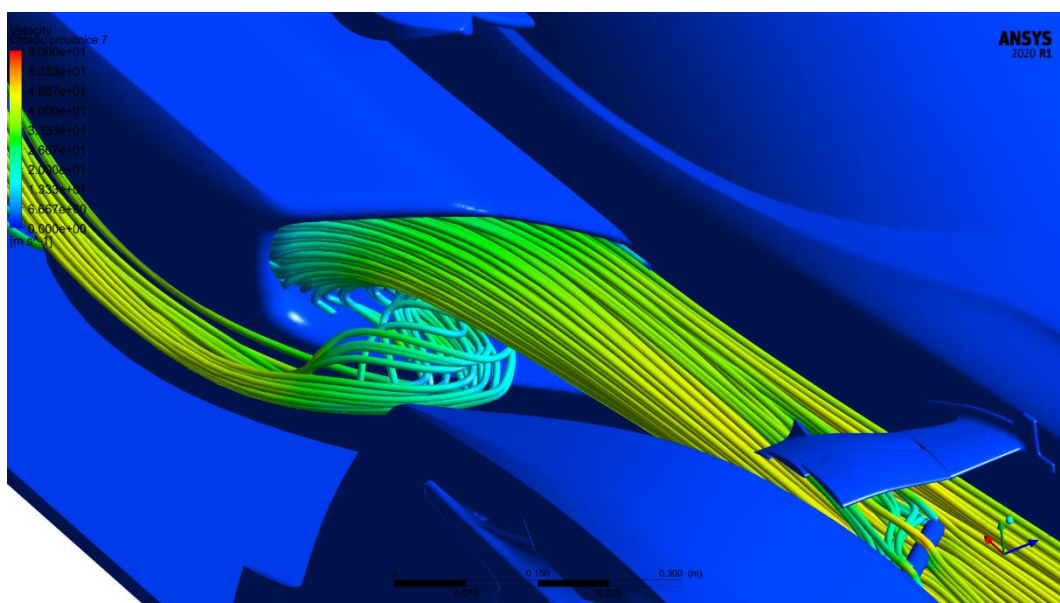
Obrázek 95 Zobrazení proudění vzduchu do chladícího kanálu

16.2 Vyhodnocení proudění s komponentou VG2

Tato komponenta je tvořena z jednoho elementu křídla, který je v dané části rozdělen na dva elementy, ke kterým je připojen ještě třetí element. Tudíž na konci, u těchto tří profilů, vzniká koncový vír. Tento vír je vidět na obrázku 96. Je vidět, že tento vír má tendenci vstoupit do chladicího kanálu, ale těsně před ním jsou proudnice víru odkloněny ven. Z toho je možné soudit, že je chladicí kanál stále aerodynamicky ucpán. Přesto, že je kanál stále ucpán, tak se oproti komponentě VG1 zvýšila plocha průřezu, kterou vzduch do chladicího kanálu proudí. Toto proudění je vidět na obrázku 97.



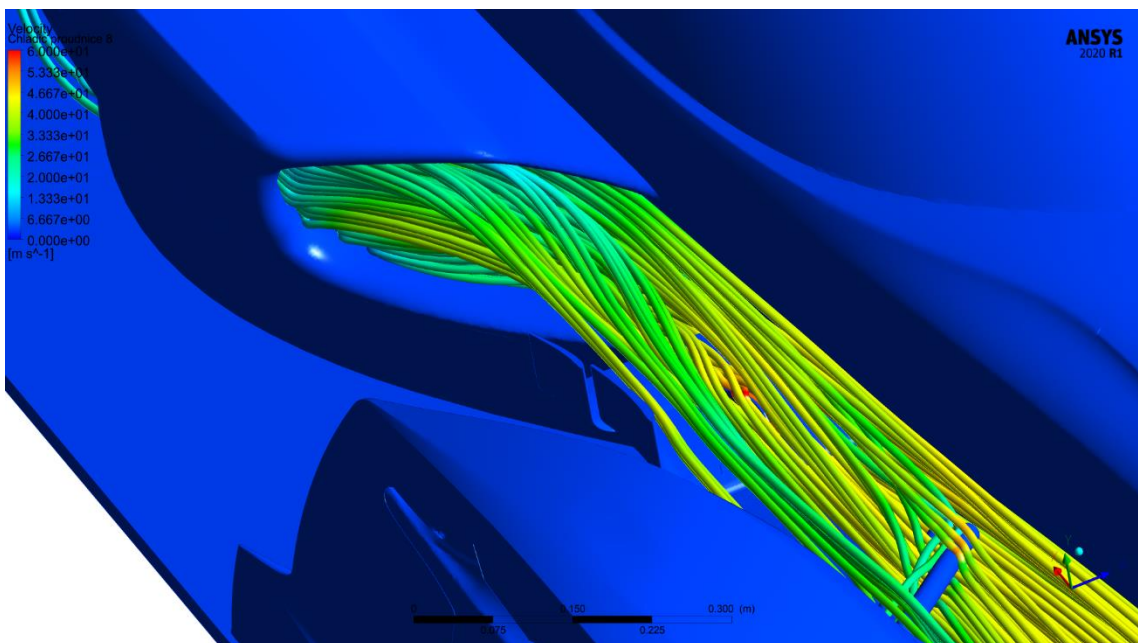
Obrázek 96 Ukázka koncového víru na komponentě VG2



Obrázek 97 Zobrazení proudění vzduchu do chladicího kanálu s komponentou VG2

16.3 Vyhodnocení proudění s komponentou VG3

Tato komponenta je podobně jako komponenta VG1 dvouelementové křídlo vzhůru nohama oproti zadnímu přitlačnému křídlu. Rozdíl je v tom, že tato komponent VG3 je větší a na svém konci jsou tyto dva elementy zahnuté směrem nahoru. Na horní hraně prvního elementu je lehce zahnutá část, která funguje jako víroví generátor. Vír, který tato část komponenty VG3 generuje, prostupuje až do chladicího kanálu. Je to vidět na obrázku 98 společně s tím, že plocha průřezu, kterou proudí vzduch do chladicího kanálu, je srovnatelná s řešením pomocí komponenty VG2. Výhodou komponenty VG3 je ten, že vzduch z chladicího kanálu neutíká pryč jako v předchozích dvou variantách. Tato komponenta vypadá jako nejvhodnější k eliminaci problému s chlazením v porovnání s ostatními komponentami. I nadále je ale potřeba problém s chladicími kanály řešit, jelikož plocha, která je zasažena proudícím vzduchem není taková, jaká by měla být.



Obrázek 98 Zobrazení proudění vzduchu do chladicího kanálu s VG3

17 ZÁVĚR

Tématem, kterým se diplomová práce zabývala, byla metodika aerodynamické optimalizace závodního vozu. V teoretické části je zpracována rešerše, jak aerodynamických komponent, které se na závodních vozech vyskytují, tak i přiblížení problematiky simulování v CFD programech. Dále je v této části popsáno, jak na sebe aerodynamické komponenty navazují, jak navzájem spolupracují a na co je třeba brát ohled při jejich navrhování. V poslední kapitole teoretické části je popsána problematika testování závodních vozů ve větrných tunelech s popisem typů větrných tunelů.

V praktické části diplomové práce je na začátku popsáno závodní vozidlo Praga R1 a následně obecný popis navrhované aerodynamické analýzy. Postup navrhované aerodynamické analýzy spočívá ve studiu zkoumaného modelu závodního vozidla, vytypování důležitých komponent, následného vytvoření dílčích variant, a nakonec simulování dílčích variant a jejich vyhodnocení. V dalších kapitolách jsou tyto kroky aerodynamické analýzy detailně popsány a je vytvořena kompletní analýza. Vytváření dílčích variant modelu Pragy R1 je pomocí odebrání jednotlivých aerodynamických komponent, které jsme si předem vytypovaly.

Následně je v praktické části popsána realizace CFD simulací od vytvoření a přípravě geometrické oblasti přes vytvoření povrchové a objemové výpočetní sítě až po nastavení okrajových podmínek a konečného výpočtu. V tomto úseku diplomové práce je detailně popsáno vytvoření výpočetních sítí, jelikož je to nejdůležitější část CFD simulací, která rozhoduje o přesnosti a ekonomičnosti výpočtu. Správná výpočetní síť je taková, při které je zapotřebí co nejmenší výpočetní výkon na simulování a zároveň přináší dostatečnou přesnost výpočtu.

Jako další větší úsek praktické části diplomové práce je vyhodnocení výsledků simulací navržených variant, vytvořených v předchozích kapitolách. Výsledek každé varianty je ve zkratce popsán a jsou naznačeny případné nedostatky či silné stránky dané varianty. Výsledky dílčích variant jsou porovnány s předchozími variantami a jsou zde uvedené případné rozdíly a jejich odůvodnění. Při vyhodnocení dílčích variant bylo zjištěno, že chladicí kanály jsou při simulované rychlosti 150 km/h aerodynamicky ucpány a proudění vzduchu před vstupem do chladících kanálů uhýbá. Dále je proveden rozbor

sil na jednotlivých komponentech, aby se zjistilo, které komponenty na vozidle Praga R1 se podílí nejvíce na vytváření přítláčné síly, vztlakové síly a odporové síly. Z tohoto rozboru je zjištěno, že se na generování přítláčné síly nejvíce podílí trojice komponent, a to zadní křídlo, splitter a podlaha s difuzorem. Na generování vztlakové síly se naopak nejvíce podílí monokok, chladiče a kryty za předními koly. Co se týče odporové síly, tak ta se projevuje nejvíce na chladiči, zadním přítláčným křídle a na předním blatníku.

Dále jsou navrženy úpravy vozu Praga R1, které by mohly zlepšit aerodynamické vlastnosti vozu. Úpravy jsou rozděleny do dvou kategorií. První kategorie se týká úprav vozu, způsobených odebráním určitých komponent vozu. Konkrétně jsou odebrány kryty za předními koly a přední přítláčná křídélka. Jako další kategorie úprav je teoretické navržení tvarových změn určitých komponent. Tato kategorie úprav je brána jako podnět k dalšímu pokračování této práce. Tato kategorie úprav z časových důvodů není ověřena CFD simulacemi. Návrh komponent, jejich ověření a případné úpravy je velmi časově náročný postup. Proto jsou změny navrženy pouze teoreticky a ilustračně ukázány. Změny se týkaly komponent, u kterých je možné se domnívat, že mají větší potenciál k využití anebo je zapotřebí zlepšit jejich funkčnost. Kategorie úprav pomocí odebrání komponent byla poté porovnána s výsledky dílčích variant, aby se zjistilo, zda provedené úpravy vedly správným směrem či nikoliv.

Jako poslední část úprav jsou do CFD simulací zahrnuty i teplotní charakteristiky daných komponent. Zjišťováno bylo, zda zahrnutí tepla výrazně ovlivní aerodynamické vlastnosti vozu. Bohužel z časových důvodů nebylo možné provést zpřesnění CFD simulace, a proto je možné, že se výsledné hodnoty mohou od reality mírně lišit. Bylo by přínosem tyto simulace s teplem rozvinout dále a zabývat se jimi detailněji.

Na základě výsledků z těchto všech simulací je navržena metodika návrhu základních aerodynamických prvků závodního vozu. Tato metodika spočívá v paralelním aerodynamickém ověřování komponent při samotném návrhu vozu. Tato metodika dokáže ušetřit čas jak na samotné aerodynamické optimalizaci, tak i čas aerodynamického ladění komponent, jelikož aerodynamické úpravy se mohou vytvářet paralelně s konstruováním vozu. Dále jsou zde popsány postupy a typy k návrhu základních aerodynamických komponent v případě navrhování nového závodního vozu.

Na konci této diplomové práce je řešena problematika proudění vzduchu do chladících kanálů dle navrhovaného řešení firmou Praga Cars s.r.o. Firma Praga Cars s.r.o. navrhla komponenty pro úpravu proudění vzduchu do chladících kanálů. Tato řešení byla simulována a vyhodnocena. Na základě tohoto vyhodnocení bylo doporučeno nejvhodnější řešení z navrhovaných konstrukčních variant.

18 ZDROJE

[1] KATZ, Joseph. Race car aerodynamics: designing for speed. 2. upravené vydání. Cambridge: Bentley Publishers, 1995. ISBN 978-0-8376-0142-7.

[2] Chevrolet announces Chaparral 2X Vision Gran Turismo Concept [online]. 14. listopadu 2014, 1 [cit. 2021-01-03]. Dostupné z: <https://www.carbodydesign.com/2014/11/chevrolet-announces-chaparral-2x-vision-gran-turismo-concept/>

[3] KOVANDA, B., KOVANDA, J. Aerodynamika vozidel. Vydavatelství ČVUT, Praha, 1999. ISBN 80-01-01942-X.

[4] HUCHO, Wolf-Heinrich. Aerodynamics of road vehicles: from fluid mechanics to vehicle engineering. Upravené vydání. Cambridge: Butterworth-Heinemann, 1987. ISBN 0-408-01422-9.

[5] PAVIOT, Andrien. Alphatauri design. In: Adrien Paviot [online]. [cit. 2021-02-15]. Dostupné z: <http://adrienpaviot.com/>

[6] MCBEATH, Simon. Competition car aerodynamics. Sparkford: Haynes Publishing, 2006. ISBN 1-84425-230-2.

[7] Splitter and air dam. Technical F1 dictionary [online]. [cit. 2021-02-16]. Dostupné z: <http://www.formula1-dictionary.net/splitter.html>

[8] , Dan. DIY Downforce – How to Design Front Splitters, Diffusers, Flat Bottoms, Wings and more! In: Professional awesome! Racing [online]. 9. července 2018 [cit. 2021-02-16]. Dostupné z: <https://professionalawesome.com/diy-downforce/>

ale-uz-skoda-120.A090418_174304_automoto_vok

[9] JordanMugen. Ideal minimum ground clearance for a ground effects floor? F1technical [online]. 8. 12. 2018 [cit. 2021-4-24]. Dostupné z: <https://www.f1technical.net/forum/viewtopic.php?t=27783>

[10] SLAVĚTÍNSKÝ, Dušan. Profil křídla. O letadlech: a také něco málo o mně [online]. 2006, 25. 4. 2010 [cit. 2021-4-24]. Dostupné z: http://www.slavetind.cz/stavba/konstrukce/kridlo/Profil_kridla.aspx

[11] VOKÁČ, Luděk. Difuzor dnes rozhoduje závody F1. Měla ho ale už Škoda 120 [online]. In: . 20. 4. 2009 [cit. 2021-4-24]. Dostupné z: <https://www.idnes.cz/auto/zpravodajstvi/difuzor-dnes-rozhoduje-zavody-f1-mela-ho->

[12] JEŘÁBEK, Ivan. Základy letadlové techniky [online]. In: . Ústav letadlové techniky FS ČVUT, s. 48 [cit. 2021-4-24]. Dostupné z: http://webdav.agents.fel.cvut.cz/data/teaching/bep/BEP2_2014.pdf

[13] Canards (Dive plates) and vortex generators. Technical F1 dictionary [online]. [cit. 2021-02-16]. Dostupné z: <http://www.formula1-dictionary.net/canards.html>

[14] Verus Engineering. VERUS ENGINEERING DIVE PLANE / CANARD KIT, DUAL ELEMENTS - C8 CORVETTE. Paragon Performance [online]. [cit. 2021-4-24]. Dostupné z: <https://www.paragonperf.com/verus-engineering-dive-plane-canard-kit-dual-elements--c8-corvette.html>

[15] Side Duct. Technical F1 Dictionary [online]. [cit. 2021-02-16]. Dostupné z: http://www.formula1-dictionary.net/side_duct.html

[16] 2 SEAS MOTORSPORT CONFIRMS SWITCH TO MERCEDES-AMG FOR 2021 EUROPEAN CAMPAIGN. In: 2 seas motorsport [online]. [cit. 2021-02-16]. Dostupné z: <https://www.2seasmotorsport.co.uk/news/2-seas-motorsport-confirms-switch-to-mercedes-amg-for-2021-european-campaign>

[17] FUSSNER, Christopher. Less Resistance, More (Air) Flow – A Short History Of The NACA Duct. Wob cars concierge vehicle marketing [online]. [cit. 2021-02-16]. Dostupné z: <https://wobcars.com/less-resistance-more-air-flow-a-short-history-of-the-naca-duct/>

[18] Porsche 919 Hybrid Evo, Porsche Team side skirt detail at Porsche 919 Spa record. In: Motorsport [online]. 2021 [cit. 2021-02-19]. Dostupné z: <https://www.motorsport.com/wec/photos/porsche-919-hybrid-evo-porsche-team-side-skirt-detail-16383759/36941851/>

[19] DUSTY, Michael. Big Bottoms: The Massive Rear Diffusers of GT Cars. In: Slipstream network [online]. 27. října 2016 [cit. 2021-02-19]. Dostupné z: <http://www.slipstreamnetwork.com/2016/10/27/big-bottoms-the-massive-rear-diffusers-of-gt-cars/>

[20] FORSTER, Kyle. HOW DO VORTEX GENERATORS WORK? DriveTribe [online]. [cit. 2021-02-19]. Dostupné z: <https://drivetribe.com/p/how-do-vortex-generators-work-G3IMJCdZSTOOCydEOVnmVg?iid=lwv6ooO2QBGyzA4oaffTKg>

[21] Rake Angle. Technical F1 dictionary [online]. [cit. 2021-02-21]. Dostupné z: http://www.formula1-dictionary.net/rake_angle.html#index_top_page

[22] JAHODA, M. Počítačová dynamika tekutin - užitečný nástroj pro inženýry. VŠCHT, 2014. Dostupné také z: http://uchi-old.vscht.cz/uploads/pedagogika/bezpecnostni_inzenyrstvi/CFD.shrnuti.pdf

[23] FERZIGER, Joel H. a PERIĆ, Milovan. Computational methods for fluid dynamics. 3rd ed. Berlin: Springer, ©2002. xiv, 423 s. ISBN 3-540-42074-6.

[24] ZÁCHA, Pavel. CFD pro tepelnou techniku I - přednášky: Metoda konečných objemů (MKO). ČVUT. Dostupné také z: <http://energetika.cvut.cz/wp-content/uploads/CFD-pro-TT-P01-Zacha-MKO.pdf>

[25] VLČEK, Ing. Petr. MODELOVÁNÍ TURBULENTNÍHO PROUDĚNÍ. České Vysoké Učení Technické v Praze, Fakulta strojní, Ústav procesní a zpracovatelské techniky. ČVUT - fakulta strojní. Vedoucí práce Doc. Ing. Tomáš Jirout, Ph.D.

[26] Introduction to ANSYS Fluent: Lecture 7: Turbulence Modeling. Ansys Confidential, 2014.

[27] Praga global, prospekt Praga R1, Orechová Potôň, Slovakia, 2019

[28] Praga_cars. In: Praga_cars [online]. [cit. 2021-03-22]. Dostupné z: <https://www.instagram.com/p/Bpj3prbAddk/>

[29] Polyhedral, Tetrahedral, and Hexahedral Mesh Comparison. Symscap: Computational Fluid Dynamics Software for All [online]. 25. února 2013 [cit. 2021-03-18].

Dostupné z: <https://www.symscape.com/polyhedral-tetrahedral-hexahedral-mesh-comparison>

[30] 2008 Lamborghini Gallardo GT3. In: Ferraris online [online]. [cit. 2021-04-11]. Dostupné z: <https://ferraris-online.com/cars/2008-lamborghini-gallardo-gt3/>

[31] Flow Separation Control Using Plasma Vortex Generator. In: , A.N.M. Mominul Islam Mukut, Hiroshi Mizunuma a Obara Hiromichi. Procedia Engineering [online]. Elsevier, 29. 3. 2015, s. 17 [cit. 2021-4-24]. Dostupné z: <https://www.slideshare.net/kamranashraf52206654/flow-separation-control-using-plasma-vortex-generators>