



**ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE**  
**FAKULTA DOPRAVNÍ**

*Vojtěch Thums*

**CFD VÝPOČTY PROUDĚNÍ TEKUTIN S APLIKACÍ  
NA MODEL MOTOCYKLU**

Diplomová práce

2024



**K616.....Ústav dopravních prostředků**

## **ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE** (PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení studenta (včetně titulů):

**Bc. Vojtěch Thums**

Studijní program (obor/specializace) studenta:

**navazující magisterský – DS – Dopravní systémy a technika**

Název tématu (česky): **CFD výpočty proudění tekutin s aplikací na model motocyklu**

Název tématu (anglicky): CFD Calculations of Fluid Flow with Application to Motorcycle Model

### **Zásady pro vypracování**

Při zpracování diplomové práce se řiďte následujícími pokyny:

- Popište obecně numerickou CFD analýzu, historii a její využití.
- Popište typické aplikace CFD analýzy v kontextu motocyklů.
- Zpracujte podrobný popis CFD numerické analýzy pro 2D a 3D vzorové benchmark úlohy.
- Získané znalosti ze vzorových úloh využijte pro přípravu matematického modelu a k následnému řešení CFD simulace proudění na modelu motocyklu.
- Výsledky z provedené numerické CFD analýzy popište a podrobně diskusí.



Rozsah grafických prací: dle požadavku vedoucího

Rozsah průvodní zprávy: minimálně 55 stran textu (včetně obrázků, grafů a tabulek, které jsou součástí průvodní zprávy)

Seznam odborné literatury: ANSYS FLUENT User's Guide  
Turek, Schaefer; Benchmark computations of laminar flow around cylinder; Vieweg 1996  
S.R. Ahmed, G. Ramm, Some Salient Features of the Time-Averaged Ground Vehicle Wake, SAE-Paper 840300, 1984

Vedoucí diplomové práce: **Ing. Jan Vyčichl, Ph.D.**  
**Ing. Josef Svoboda**

Datum zadání diplomové práce: **30. června 2023**  
(datum prvního zadání této práce, které musí být nejpozději 10 měsíců před datem prvního předpokládaného odevzdání této práce vyplývajícího ze standardní doby studia)

Datum odevzdání diplomové práce: **15. května 2024**  
a) datum prvního předpokládaného odevzdání práce vyplývající ze standardní doby studia a z doporučeného časového plánu studia  
b) v případě odkladu odevzdání práce následující datum odevzdání práce vyplývající z doporučeného časového plánu studia

doc. Ing. Petr Bouchner, Ph.D.  
vedoucí  
Ústavu dopravních prostředků



prof. Ing. Ondřej Příbyl, Ph.D.  
děkan fakulty

Potvrzuji převzetí zadání diplomové práce.

Bc. Vojtěch Thums  
jméno a podpis studenta

V Praze dne..... 30. června 2023

---

## Čestné prohlášení

Nemám závažný důvod proti užívání tohoto školního díla ve smyslu § 60 zákona č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon), v platném znění.

Prohlašuji, že jsem předloženou práci vypracoval samostatně a uvedl veškeré použité informační zdroje v souladu s Metodickým pokynem o dodržování etických principů při přípravě vysokoškolských závěrečných prací a Rámcovými pravidly používání umělé inteligence na ČVUT pro studijní a pedagogické účely v Bc. a NM studiu.

V Praze dne 15. května 2024

.....  
Vojtěch Thums

---

Děkuji Ing. Janu Vyčichlovi, Ph.D. a Ing. Josefu Svobodovi, vedoucím práce, za podnětné rady, doporučení, vstřícnost a ochotu při řešení úkolů v rámci diplomové práce.

Dále děkuji Ing. Přemyslu Tomanovi za cenná doporučení k mému výzkumu a pomoc při řešení numerických úloh.

Poděkování patří též panu Ing. Zdeňku Svatému, Ph.D. za poskytnutí počítače s vysokým výpočetním výkonem a Mgr. Pavle Kroupové za rady týkající se jazykové stránky mé diplomové práce.

---

## Abstrakt

Diplomová práce se zabývá CFD simulacemi obtékání vzduchu okolo závodního motocyklu. Vychází z potřeby zlepšení konstrukce nového motocyklu vyvíjeného studentským týmem CTU Lions. Práce přináší stručný teoretický základ pro CFD analýzu, který je následně použit pro řešení CFD vzorových benchmark úloh ve 2D a 3D prostředí, jež jsou klíčové pro správné nastavení CFD simulací proudění vzduchu kolem modelu motocyklu. Výsledky simulací jsou validovány s experimentálně naměřenými daty. Poznatky a postupy vytváření numerických simulací, které jsou v této práci popsány, budou využity při konstrukčním vývoji nového motocyklu.

## Klíčová slova

CFD simulace, aerodynamické vlastnosti motocyklu, CTU Lions, CTU Lions EVO 2.0, motocykl, analýza, validace

## Abstract

This thesis deals with Computational Fluid Dynamics (CFD) simulations of air flow around a racing motorcycle. It is based upon the need to improve the design of a new motorcycle being developed by the CTU Lions student team. The thesis provides a brief theoretical basis for CFD analysis. This theoretical basis is then used to solve CFD benchmarking problems in 2D and 3D environments, which in turn are crucial to enable the proper setup of CFD simulations of airflow around a motorcycle model. The simulation results are validated with experimentally measured data. The knowledge and procedures for creating numerical simulations described in this thesis will be used in the design development of a new motorcycle.

## Keywords

CFD simulation, motorcycle aerodynamics, CTU Lions, CTU Lions EVO 2.0, motorcycle, analysis, validation

## Obsah

Čestné prohlášení.....	2
Abstrakt.....	4
Klíčová slova.....	4
Abstract.....	4
Keywords.....	4
Seznam použitých zkratk a symbolů.....	7
Úvod.....	8
1 Shrnutí výsledků experimentu ve větrném tunelu.....	9
1.1 Korekce výpočtu bakalářské práce.....	9
2 CFD analýza, historie a využití.....	13
2.1 Síť.....	13
2.2 Prizmatická vrstva.....	14
2.3 Vstup.....	15
2.4 Výstup.....	15
2.5 Základní rozdělení CFD analýzy.....	15
2.5.1 2D CFD analýza.....	15
2.5.2 3D CFD analýza.....	16
2.6 Stručná historie CFD analýzy.....	16
2.7 Využití CFD analýzy.....	18
3 Využití CFD analýzy v kontextu motocyklů.....	20
3.1 Příklady užití CFD analýzy v různých oblastech.....	20
3.1.1 Motorový prostor.....	20
3.1.2 Výfukové potrubí.....	21
3.1.3 Termodynamická výměna teploty.....	22
3.2 CFD analýza obtékání vzduchu okolo motocyklu.....	22
4 Popis CFD analýzy vzorových úloh.....	25
4.1 Obecný popis pracovního postupu simulace.....	26
4.1.1 Nastavení geometrie simulace.....	26
4.1.2 Příprava sítě.....	27
4.1.3 Počáteční podmínky.....	28
4.1.4 Vyhodnocení.....	29
4.2 2D vzorová úloha – kruh.....	30
4.2.1 Nastavení geometrie ve 2D.....	30
4.2.2 2D síť.....	31
4.2.3 Nastavení simulace.....	32
4.2.4 Porovnání výsledků.....	32

4.3	3D vzorová úloha – Ahmed body.....	33
4.3.1	Definice 3D prostoru.....	34
4.3.2	3D síť.....	34
4.3.3	Nastavení simulace.....	36
4.3.4	Porovnání výsledků.....	36
5	Aerodynamická CFD simulace na modelu motocyklu.....	39
5.1	Příprava modelu kapotáží.....	40
5.2	CFD Simulace.....	44
5.2.1	Nastavení geometrie simulace.....	46
5.2.2	Nastavení sítě.....	47
5.2.3	Nastavení simulace.....	48
6	Výsledky CFD simulací a diskuze.....	50
6.1	Validace výsledků.....	50
6.2	Predikce výsledků pro vyšší rychlosti pomocí CFD analýzy.....	56
	Závěr.....	63
	Citovaná literatura.....	64



## Seznam použitých zkratk a symbolů

CFD	[-]	Computational Fluid Dynamics, výpočetní dynamika tekutin
BP	[-]	bakalářská práce
Re	[-]	Reynoldsovo číslo
$\bar{V}$	[m/s]	průměrná rychlost proudící tekutiny
$D$	[m]	charakteristická délka
$\nu$	[m <sup>2</sup> /s]	kinematická viskozita
$F_D$	[N]	odporová síla
$c_x$	[-]	koeficient obtékání vzduchu tělesa
$v$	[m/s]	rychlost
$\rho$	[kg/m <sup>3</sup> ]	hustota
$S_x$	[m <sup>2</sup> ]	čelní plocha tělesa do roviny kolmé ke směru proudění
CAD	[-]	computer-aided design, počítačem podporované kreslení
step	[-]	Standard for the Exchange of Product Data
R	[-]	koeficient spolehlivosti

## Úvod

V posledních letech jsme svědky exponenciálního růstu využití CFD (Computational Fluid Dynamics) simulací v široké škále oblastí, včetně letectví, automobilového průmyslu, energetiky, stavebnictví, biomedicíny, sportu a mnoha dalších odvětví. Pokrok v oblasti hardwaru, softwaru a výpočetních metod napomáhá CFD simulace stále více integrovat do každodenní praxe inženýrů a výzkumníků po celém světě. Využitím této metody mohou být posouvány hranice možného opět o kousek dál.

Předkládaná diplomová práce navazuje na autorovu bakalářskou práci zaměřenou na popis aerodynamických vlastností závodního motocyklu, při které byl proveden experiment ve větrném tunelu. Bakalářská práce poskytla základní vhled do problematiky aerodynamiky tohoto specifického typu vozidla, analyzovala proudění vzduchu kolem jeho karoserie a zhodnotila vliv různých návrhových prvků na aerodynamický odpor, stabilitu a manévrovatelnost motocyklu. Diplomová práce má za cíl téma prohloubit prostřednictvím numerických CFD simulací.

Primárním cílem předkládané diplomové práce je rozšířit stávající poznatky a identifikovat klíčové faktory ovlivňující aerodynamiku závodního motocyklu pro lepší výsledky studentského závodního týmu CTU Lions, kterého je autor této diplomové práce členem. Výsledky práce poslouží k vylepšení návrhu a vývoje motocyklu CTU Lions EVO 4.0 pro mezinárodní univerzitní soutěž MotoStudent 2024-2025.

V úvodu práce je provedena korekce výsledků experimentu ve větrném tunelu, která je stěžejní pro následnou validaci analyzovaných hodnot z CFD simulací. Dále je uvedena problematika CFD analýzy a její využití v kontextu motocyklů.

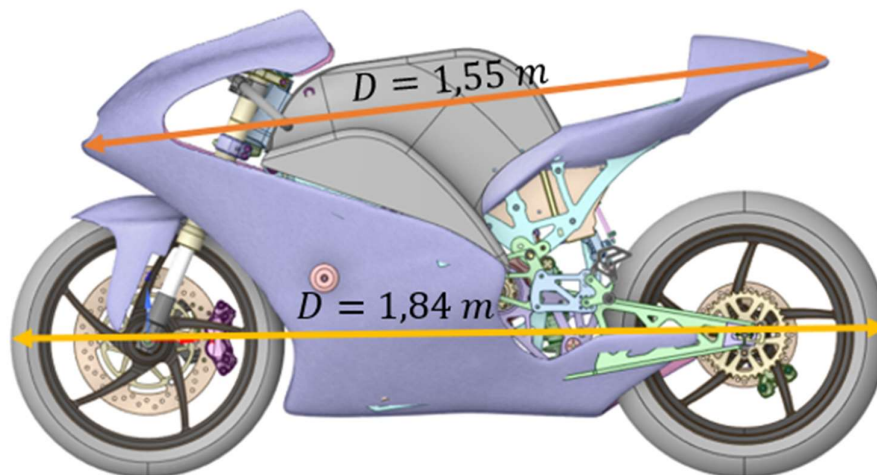
V praktické části práce jsou v první řadě vypracovány vzorové úlohy CFD simulací ve 2D a 3D prostředí. Zpracování benchmarkových úloh je důležité pro ověření správného nastavení simulace a dále bylo nezbytné k hlubšímu porozumění problematiky CFD analýzy. V dalším postupu jsou vytvořené simulační modely přeneseny do CFD simulace obtékání vzduchu okolo modelu motocyklu, přičemž samotná tvorba 3D modelu motocyklu tvoří další důležitou kapitolu práce. Na závěr práce jsou shrnuty výstupy simulací, na jejichž základě bude provedena validace, porovnání a diskuse výsledků.

## 1 Shrnutí výsledků experimentu ve větrném tunelu

Diplomová práce navazuje na bakalářskou práci autora. Korekce výstupů z bakalářské práce je klíčovým prvkem pro validaci výsledků uvedených v této diplomové práci. Opravené výsledky jsou užity a prodiskutovány v poslední kapitole.

### 1.1 Korekce výpočtu bakalářské práce

V teoretické části BP byly stručně popsány základní fyzikální principy v oblasti aerodynamiky. Dále zde byla krátce uvedena podkapitola o teorii podobnosti a o významu Reynoldsova čísla. Toto číslo je bezrozměrné a udává, kdy je proudění tekutiny laminární, v přechodové fázi nebo turbulentní. V BP se pro přepočet hodnot z modelu v měřítku 1:5 na model v měřítku 1:1 pracovalo pouze s hodnotami  $Re \geq 500\,000$ , a to z důvodu odtržení mezní vrstvy od geometrie modelu motocyklu a možnosti pozorování turbulentního proudění. To však platí pouze pro tvary podobné leteckým profilům křídla. Pro motocykly nebo vozidla se složitou geometrií může být hodnota  $Re$  nižší.



Obrázek 1 – Znázornění charakteristické délky na motocyklu

Charakteristická délka  $D$  motocyklu pro výpočet  $Re$  byla zvolena od náběžné hrany kapotáže motocyklu až po odtokovou hranu podsedlovky, na *Obrázku 1* je tato vzdálenost znázorněna oranžovou kótou s délkou  $D = 1,55$  m. Charakteristická délka byla přehodnocena na vzdálenost mezi náběžnou hranou předního kola a odtokovou hranou zadního kola, na *Obrázku 1* je zobrazena žlutou kótou. Tím se využije celková

## 1 Shrnutí výsledků experimentu ve větrném tunelu

délka motocyklu s hodnotou  $D = 1,84$  m, nikoli pouze kapotáže. Pro validaci experimentálního měření může být uvažováno o motocyklu jako statickém tělese, protože při experimentu nerotovala kola ani nebyla použita pohyblivá podlaha.

Výpočet  $Re$  je zobrazen v rovnici (1.1) a vyjadřuje podíl průměrné rychlosti proudící tekutiny  $\bar{v}$  a charakteristické délky předmětu  $D$  ku kinematické viskozitě proudící tekutiny  $\nu$ .

$$Re = \frac{\bar{v} \cdot D}{\nu} [-] \quad (1.1)$$

V následujícím srovnání jsou zanalyzovány oba výpočty, při kterých byla použita hodnota  $\nu = 0,0000152 \frac{\text{m}^2}{\text{s}}$ . Následující hodnoty  $\bar{v}$  a  $D$  byly proměnné. Výsledky znázorněné pro výpočet  $Re$  na modelu motocyklu v měřítku 1 : 5 s hodnotou  $D = 0,368$  m jsou znázorněny v *Tabulce 1*. Dále jsou zde znázorněny výsledky  $Re$  pro model motocyklu v měřítku 1 : 1, pro který musely být na základě teorie podobnosti použity rychlosti obtékaného vzduchu 5krát menší.

*Tabulka 1 – Výpočet hodnoty  $Re$  pro model motocyklu v měřítku 1 : 5 a 1 : 1*

Rychlost vzduchu pro model v měřítku 1 : 5 [m/s]	<b>7,70</b>	<b>20,20</b>	<b>32,00</b>	<b>44,00</b>	<b>50,00</b>
Re [-]; $D = 0,368$ m	$0,15 \cdot 10^6$	$0,42 \cdot 10^6$	$0,66 \cdot 10^6$	$0,90 \cdot 10^6$	$1,03 \cdot 10^6$
Rychlost vzduchu pro model v měřítku 1 : 1 [m/s]	<b>1,54</b>	<b>4,04</b>	<b>6,40</b>	<b>8,80</b>	<b>10,00</b>
Re [-]; $D = 1,841$ m	$0,15 \cdot 10^6$	$0,42 \cdot 10^6$	$0,66 \cdot 10^6$	$0,90 \cdot 10^6$	$1,03 \cdot 10^6$

Díky shodné hodnotě  $Re$  pro různé velikosti modelu a různé průměrné rychlosti vzduchu bude charakter obtékání vzduchu stejný. To umožňuje využít přepočtu výsledků z modelu motocyklu v měřítku 1 : 5 na model motocyklu v měřítku 1 : 1.

V rámci experimentu bylo ve větrném tunelu na Fakultě strojní ČVUT provedeno měření aerodynamického obtékání motocyklu na modelu motocyklu CTU Lions EVO 2.0 v měřítku 1 : 5. Experiment byl proveden v různých natočení v ose jízdy motocyklu a při různých rychlostech proudícího vzduchu. Výstupem z experimentu byly odporové síly  $F_D$  naměřené na aerodynamických vahách. Nejdůležitější pro jízdu motocyklu jsou síly

## 1 Shrnutí výsledků experimentu ve větrném tunelu

odporu, vztlaku a boční síly. Výsledné hodnoty naměřené při pěti různých rychlostech proudění v ose jízdy (při nulovém natočení modelu motocyklu) jsou zaznamenány v *Tabulce 2*. Hodnoty boční síly byly kvůli nulovému natočení modelu motocyklu vůči zdroji proudění rovny nule. Všechny hodnoty naměřené v experimentu jsou zobrazeny v *Příloze 1*.

*Tabulka 2 – Naměřená data na aerodynamických vahách*

Rychlost vzduchu [m/s]	7,70	20,20	32,00	44,00	50,00
Vztlak [N]	-0,27	-0,74	-1,00	-1,27	-1,51
Odpor [N]	0,32	1,85	4,91	9,70	13,00

Na základě naměřených dat byl vypočítán koeficient obtékání vzduchu tělesa  $c_x$  pro odpovídající odporovou sílu  $F_D$ . Pro výpočet  $c_x$  bylo vyjádřeno z teoretické rovnice odporové síly vzduchu  $F_D$ , kde hustota vzduchu  $\rho = 1,184 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$  při teplotě  $25^\circ\text{C}$ , plocha průmětu čelní plochy tělesa do roviny kolmé ke směru proudění  $S_x = 0,078 \text{ m}^2$ , a  $v$  je průměrná rychlost proudícího vzduchu. [1]

$$F_D = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot c_x \cdot S_x \cdot v^2 \text{ [N]} \quad (1.2)$$

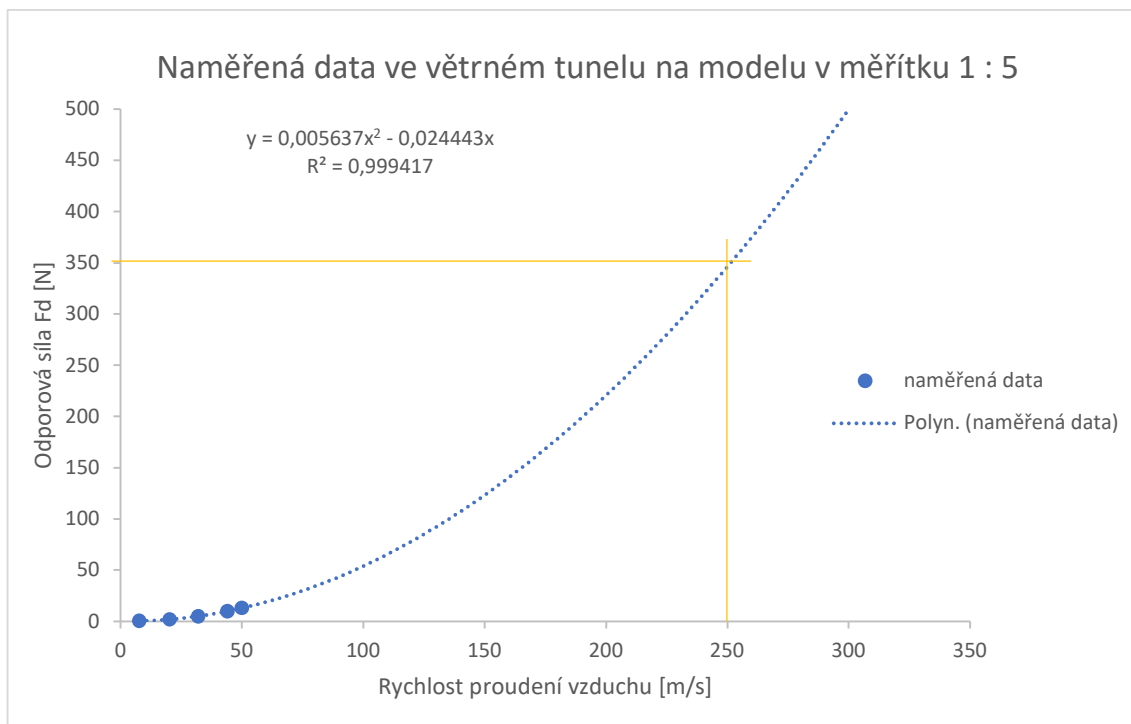
Po úpravě rovnice a následném dosazení do ní je vypočítán koeficient  $c_x$  pro rychlost proudění  $v = 50 \frac{\text{m}}{\text{s}}$ .

$$c_x = \frac{2 \cdot F_D}{\rho \cdot S_x \cdot v^2} = \frac{2 \cdot 13}{1,290 \cdot 0,078 \cdot 50^2} \quad (1.3)$$

$$c_x = 0,112 \text{ [-]} \quad (1.4)$$

Díky rozdílným hodnotám  $Re$  by měla být hodnota rychlosti proudícího vzduchu  $v$  na model v měřítku 1 : 5 při experimentu 5krát vyšší pro validaci výsledků CFD analýzy obtékání vzduchu na modelu v měřítku 1 : 1. Z rovnice  $F_D$  je patrná závislost odporu vzduchu na  $v^2$ . Z tohoto důvodu jsou v *Grafu 1* znázorněna naměřená data z experimentu proložená parabolou druhého řádu. Výsledná hodnota  $F_D$  pro model motocyklu v měřítku 1 : 1 odpovídá hodnotě 352 N, která je znázorněna v grafu žlutým průsečíkem.

## 1 Shrnutí výsledků experimentu ve větrném tunelu



Graf 1 – Zobrazení naměřených dat ve větrném tunelu proložených parabolou

## 2 CFD analýza, historie a využití

Existují tři základní metody pro predikci chování tekutin a jejich interakce s okolním prostředím: experimentální, analytická a numerická. Výpočetní dynamika tekutin neboli Computational Fluid Dynamics je odvětví mechaniky tekutin, které využívá numerickou analýzu a datové struktury k analýze a řešení problémů spojených s prouděním tekutin. Zjednodušeně řečeno CFD analýza slouží k vizualizaci proudění tekutin, proto můžeme lépe pochopit chování tekutin bez nutnosti fyzických experimentů v reálných podmínkách [2].

CFD je vědní obor, který pomocí výpočetního výkonu počítačů vytváří kvantitativní předpovědi jevů spojených s prouděním tekutin na základě zákonů zachování hmoty, hybnosti a energie, jimiž se pohyb tekutin řídí. Nejčastěji používanými rovnicemi jsou rovnice kontinuity a Navier-Stokesovy rovnice, které jsou základními výpočetními nástroji pro simulaci široké škály jevů [3] [4].

Numerická CFD metoda využívá řešení makroskopického pohledu na chování látek, tedy umožňuje zkoumat sledovaný prostor jako celek neboli kontinuum. Z tohoto důvodu můžeme výrazně zjednodušit popis zkoumaného systému a tuto metodu použít pro řešení většiny praktických problémů spojených s prouděním tekutin [5].

Mezi nejčastější aplikace CFD analýzy patří proudění tekutin, proudění termodynamického záření, tepelná výměna nebo akustické šíření vln. Simulace se stávají díky stále narůstajícímu výpočetnímu výkonu počítačů velmi efektivními. Inženýři a vědci je využívají k predikci rychlostí, tlaků, teplot a dalších charakteristik tekutin, což jim umožňuje provádět virtuální testování a upravovat geometrii těles bez nutnosti realizace fyzických prototypů [6].

CFD analýza je závislá na výpočtáři, který musí dodat potřebné komponenty pro řešení simulace, jako jsou konečně prvková síť, okrajové podmínky, vlastnosti tekutin nebo drsnosti povrchů. V následujících podkapitolách budou definovány základní pojmy této odborné oblasti.

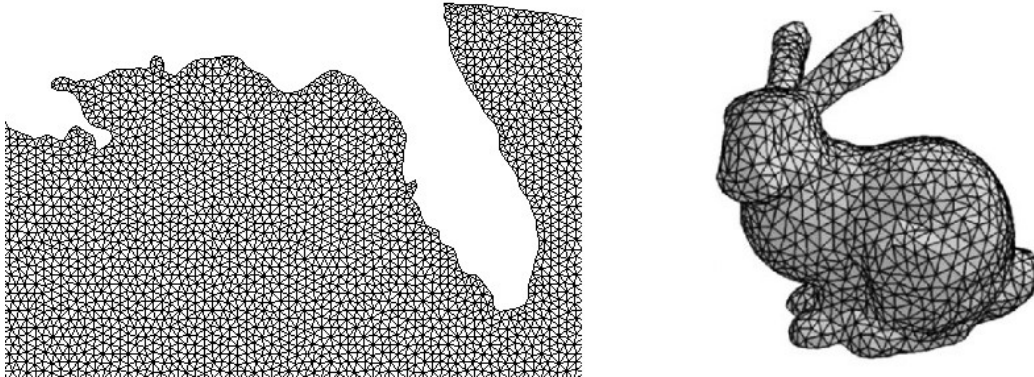
### 2.1 Síť

Síť (tzv. mesh) je digitální reprezentace objektu, která se skládá ze souboru vrcholů, hran a ploch, nazývaných elementy, definujících tvar daného objektu. Síť může být ve 2D i 3D

## 2 CFD analýza, historie a využití

prostoru, kde jsou dané vrcholy definovány prostorovými souřadnicemi X, Y a (Z). Hrany spojují sousední vrcholy a plochy tvoří povrch objektu [7].

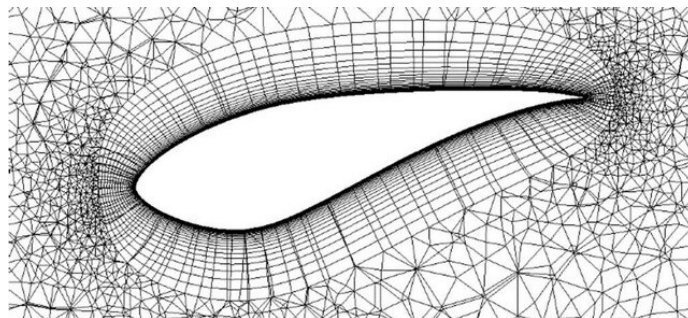
Na *Obrázku 2* jsou zobrazené příklady dvou sítí. Vlevo je znázorněna mapa pevniny, kterou obklopuje 2D síť znázorňující oceán. Tato síť může pomoci např. s vizualizací mořských proudů. Vpravo je zobrazen příklad 3D sítě ve tvaru králíka, který může sloužit např. k 3D tisku.



*Obrázek 2 – Příklady sítě; vlevo mapa – 2D síť, vpravo králík – 3D síť [8] [9]*

### 2.2 Prizmatická vrstva

Prizmatická vrstva se používá k přesnému zachycení mezní vrstvy při simulacích. Mezní vrstva je oblast v blízkosti povrchu pevného tělesa, kde se rychlost proudění snižuje v důsledku tření o povrch. Na *Obrázku 3* je znázorněn příklad prizmatické vrstvy okolo leteckého profilu křídla [10].



*Obrázek 3 – Příklad prizmatické vrstvy [11]*



## 2.3 Vstup

V CFD simulacích je vstup (tzv. inlet) kritickým parametrem pro vstupní okrajovou podmínku, která definuje proudění tekutiny vstupující do výpočetní oblasti. Hraje významnou roli při určování chování tekutiny v rámci simulace a zajišťuje přesnou reprezentaci reálných podmínek [12] [13].

Jedním z nejčastějších nastavení vstupu do simulací je tzv. „Velocity-inlet“, který definuje nastavení vstupního parametru pomocí rychlosti proudící tekutiny z této oblasti. Dalším parametrem, jenž se zde nastavuje, je např. intenzita turbulence nebo směr proudícího vzduchu. Bez vstupu nemůže být provedena většina simulací [12].

## 2.4 Výstup

Výstup (tzv. outlet) je kritickým parametrem a slouží jako výstupní okrajová podmínka, která definuje proudění vystupující z výpočetní oblasti. Výstupní okrajová podmínka má zásadní vliv na vlastnosti proudění na konci tělesa prostoru dané simulace [12] [13].

U velké části úloh obtékání vzduchu okolo tělesa se výstup simulace nastavuje na tzv. „Pressure-outlet“, který svými vlastnostmi negeneruje zbytečný tlak proudící tekutině. Díky tomu nejsou výsledky simulace ovlivněny výstupní rychlostí simulované tekutiny [12].

## 2.5 Základní rozdělení CFD analýzy

CFD analýza může být rozdělena podle mnoha kritérií, např. podle typu proudění na stacionární a dynamické, podle typu tekutin na inkompresibilní a kompresibilní nebo podle typu analýzy na 2D a 3D CFD analýzu. Pro potřeby této práce bude použito rozdělení na 2D a 3D CFD analýzu.

### 2.5.1 2D CFD analýza

Většina problémů se dá řešit ve 2D i 3D prostoru, ale vždy záleží na úrovni zjednodušení a na tom, jestli jsou výsledky reprezentované daným modelem dostatečně přesné. I když se může zdát, že 2D CFD simulace jsou v dnešní době již přežitek, opak je pravdou. První výhodou 2D simulací jsou nižší požadavky na výpočetní výkon, který je potřeba pro jejich provedení. Díky tomu jsou tyto simulace obvykle rychlejší a méně náročné na výpočetní

## 2 CFD analýza, historie a využití

čas než 3D simulace, což je užitečné při analýze velkého množství variant nastavení a parametrů simulace [14] [15].

Další výhodou je jednodušší modelování geometrie a sítě oproti 3D prostoru. To umožňuje rychlejší iterace při návrhu a celkově zjednodušuje proces přípravy modelu. Jednou z často prováděných 2D simulací je simulace obtékání vzduchu okolo profilu leteckého křídla. Díky snížené dimenzionalitě 2D simulace je interpretace výsledků obvykle přímější a jednodušší, což výrazně zrychluje a zefektivňuje rozhodovací procesy [14] [15].

### 2.5.2 3D CFD analýza

I když jsou 2D simulace užitečné a efektivní pro mnoho aplikací, je důležité si uvědomit, že mají svá omezení a nejsou vždy vhodné. Pro komplexnější problémy s třemi rozměry nebo významným stupněm třírozměrnosti mohou být 3D simulace nezbytné pro získání přesnějších a relevantnějších výsledků. Jako příklad může být uvedena CFD simulace obtékání vzduchu okolo pozemních dopravních prostředků. Geometrie těchto vozidel je často velmi složitá a nedá se plně nahradit simulacemi ve 2D prostoru [15].

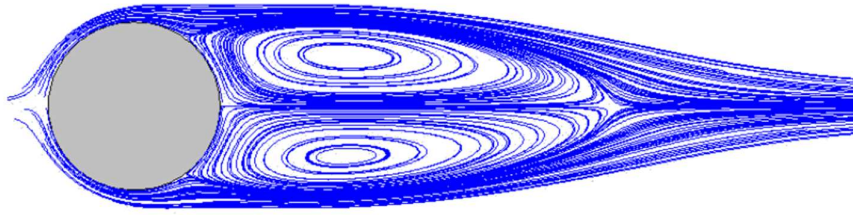
Největší výhodou 3D CFD analýzy je její komplexnost při řešení reálných problémů spojených s prouděním tekutin. Žádné proudění tekutin neprobíhá pouze ve 2D prostoru a je na expertním uvážení každého výpočtáře, zdali lze daný problém vyřešit za předpokladu zjednodušení. Na to navazuje množství dat, které může být výstupem CFD analýzy. Určité parametry proudění mohou být dostupné pouze z analýzy ve 3D prostoru. Díky tomu mohou být tato data lépe vizualizována a mohou pomoci k lepšímu pochopení dané problematiky. Přínos 3D analýzy je vykoupen větší náročností přípravy modelu, která může generovat určitou míru chybovosti. Následná analýza a interpretace výsledků nemusí být tak zřejmá [14] [15].

## 2.6 Stručná historie CFD analýzy

Historie CFD simulací začíná v polovině 20. století, kdy byly první výpočty simulací proudění tekutin prováděny ručně pomocí diferenciálních rovnic. Z důvodu vysoké náročnosti bylo možné počítat pouze jednoduché případy proudění. Pro příklad pracnosti těchto výpočtů můžeme uvést vizualizaci obtékání vzduchu na *Obrázku 4*, kde je znázorněn kruh obtékáný vzduchem od výzkumníka Kawagutiho z roku 1953, který

## 2 CFD analýza, historie a využití

strávil výpočtem 20 hodin týdně po dobu 18 měsíců. K výpočtu používal mechanickou stolní kalkulačku [16] [17] [18].



Obrázek 4 – Kawagutiho numerická analýza obtékání válce [17]

První výpočty založené na výpočetním stroji byly provedeny již v druhé polovině 40. let 20. století, ale významných objevů z hlediska metod analýzy CFD bylo dosaženo v 50. a 60. letech 20. století v teoretickém oddělení Národních laboratoří v Los Alamos. Zde byly položeny základy mnoha výpočetních modelů CFD, které se používají dodnes [16] [5].

Jedním ze zde definovaných modelů je simulační metoda s názvem  $k-\varepsilon$ , která je dodnes jednou z nepoužívanějších metod pro CFD simulaci charakteristik proudění v podmínkách turbulentního proudění. Je to doporučená dvourovnicová metoda, která udává turbulenci veličin, jako jsou turbulentní kinetická energie  $k$  a rychlost disipace turbulentní kinetické energie  $\varepsilon$ . Vzhledem k tomu, že simulační model  $k-\varepsilon$  poskytuje detailní informace o turbulentním chování tekutin, může být použit pro optimalizaci různých průmyslových prostředí včetně obtékání vzduchu okolo dopravních prostředků [19].

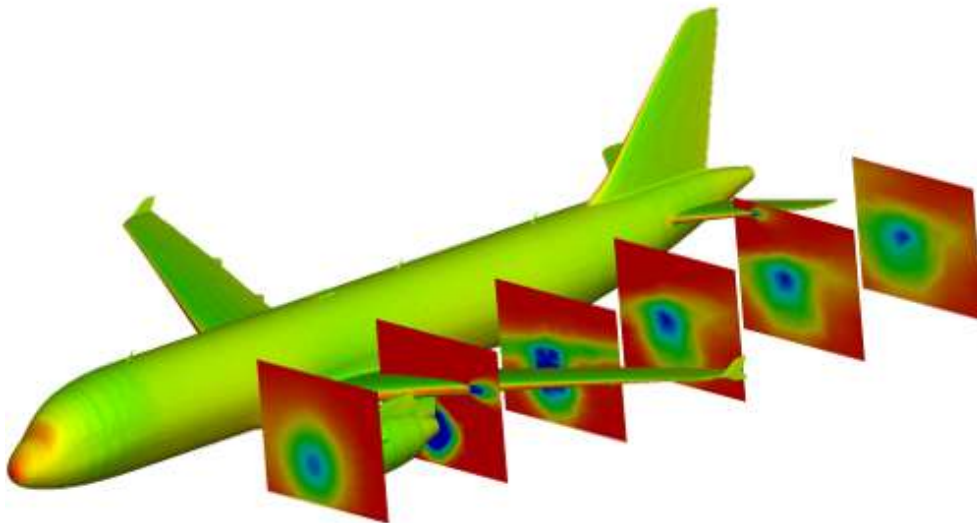
Největším konkurentem zmíněné simulační metody  $k-\varepsilon$  je metoda  $k-\omega$  vyvinutá o cca 20 let později. Tato metoda je také dvourovnicová a pracuje s turbulencí veličin.  $k-\omega$  vychází z metody  $k-\varepsilon$ , ve které se používá druhá neznámá jako měrný rozptyl  $\omega$ . Jednou z výhod metody je predikce v blízkosti stěn, což je velmi důležité např. pro simulace obtékání leteckého profilu křídla. Metoda  $k-\omega$  má nižší citlivost na počáteční podmínky než ostatní používané metody pro turbulentní proudění, díky čemuž může být v horších podmínkách jemnosti sítě stabilnější a spolehlivější. Oba zmíněné modely se ve velké míře používají dodnes. Výsledky obou modelů jsou porovnány v praktické části této práce [20].

## 2 CFD analýza, historie a využití

V 80. a 90. letech se s rostoucím výpočetním výkonem počítačů společně s vylepšením algoritmů začaly simulace stávat stále přesnějšími a rychlejšími. V této době bylo běžné pro každého akademického nebo výzkumného pracovníka psaní vlastních výpočetních kódů pro všechny druhy technologických problémů. CFD simulace nebyly výjimkou. V důsledku toho se v prostředí softwarů pro CFD simulace objevilo mnoho významných softwarových společností, např. Fluent, Ansys, Flow 3D nebo Star CD. Jejich rozvoj dodnes pomáhá při řešení většiny problémů spojených s numerickou analýzou [16].

### 2.7 Využití CFD analýzy

Jedna z prvních aplikací CFD simulací byla na leteckých profilech křídla. Rozvoj technologií nám dnes umožňuje analyzovat nejenom profil křídla, ale také aerodynamické proudění například okolo celého letounu. Na *Obrázku 5* je zobrazena vizualizace rychlosti obtékaného vzduchu s detailem na proudění před a za leteckým motorem. I díky podobným simulacím můžeme zefektivnit energetickou náročnost letu a tím zredukovat finanční náklady na každou letenku nebo zásilku.



*Obrázek 5 – Vizualizace proudění vzduchu okolo leteckého motoru [21]*

V automobilovém průmyslu je využití numerické analýzy různorodé. Simulace proudění vzduchu na vozidlech se využívají např. pro analýzu proudění vzduchu od topení nebo klimatizace v interiéru vozidla. Díky vizualizaci proudění může být navrženo lepší řešení designu výdechů klimatizace, které následně vede k většímu jízdnímu komfortu

## 2 CFD analýza, historie a využití

posádky vozidla. Další simulace se používají např. pro dokonalejší chlazení motorového prostoru nebo optimalizaci sání vzduchu do motoru.

Opomenuty nemohou být ani simulace prováděné s jinou tekutinou než vzduchem. Příkladem může být proudění chladicí kapaliny v chladicím okruhu vozidla. Díky podobným optimalizacím chladicího okruhu a dalších systémů mohou být vyvíjeny motorové jednotky s vyššími výkony pro různé druhy dopravních prostředků.

V dnešní době se simulace používají u všech tekutin ovlivňujících správný chod a jízdu vozidla. Jednou z nejčastějších aplikací CFD analýzy je obtékání vzduchu okolo karoserie vozidla, ovšem podobné typy simulací pomáhají k určení aerodynamických vlastností celého vozidla.

## 3 Využití CFD analýzy v kontextu motocyklů

V dnešním dynamickém světě motocyklů, kde se technologie neustále posouvá vpřed a konkurence je stále silnější, je nezbytné neustále hledat inovativní způsoby vylepšení výkonu a efektivity jízdy. Jednou z klíčových technologií pro vývoj motocyklů je právě CFD analýza. Hlavním tématem této práce je vnější obtékání vzduchu okolo motocyklu, ale neměly by být opomenuty možnosti aplikace CFD analýzy i na jeho jiné části. Jednou z mnoha možností CFD simulací je např. lubrikace motorového prostoru, pohon kapalin v rámci palivových či chladicích okruhů nebo simulace zahřívání pneumatik jízdou motocyklu. V následující kapitole budou stručně zmíněny typické aplikace numerických simulací proudění tekutin v kontextu motocyklů.

### 3.1 Příklady užití CFD analýzy v různých oblastech

Motor je „srdcem“ každého motocyklu a ani tuto součástku neminul vývoj pomocí CFD analýzy. Díky ní je účinnost dnešních pohonných jednotek mnohem větší, než tomu bývalo v historii. Nejprve budou v této kapitole zmíněny možnosti využití CFD analýzy v kontextu motoru motocyklu. Další zaměření se bude týkat již simulací obtékání geometrie motocyklu.

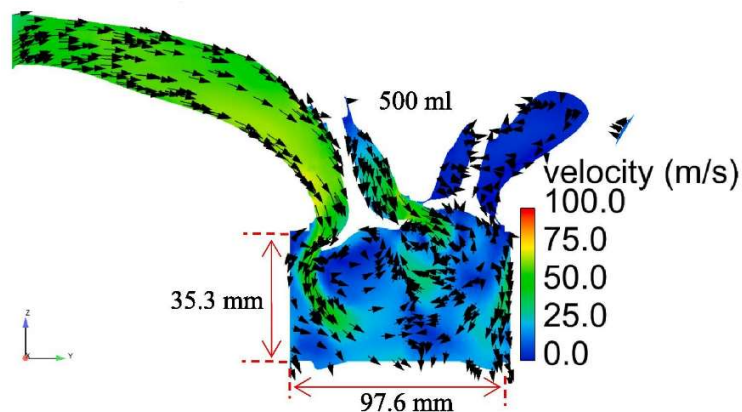
#### 3.1.1 Motorový prostor

Největší výzvou dnešních motorových inženýrů je vyvinout a zkonstruovat motor s co nejlepším poměrem výkonu k nízkým emisím, zvláště sledovanému CO<sub>2</sub>. Simulace v tomto ohledu pomáhá mimo jiné s dokonalejším prouděním vzduchu do uzavřeného vzduchového sání, takzvaného „air boxu“ uvnitř motocyklu. Dalším příkladem může být proudění palivové směsi ze vstříku do válce motoru. CFD analýza nemusí být použita čistě pro plyny nebo kapaliny, ale dají se zde nastavit různé „hybridy“ mezi těmito dvěma stavy [22] [23] [24].

Jedním z využití v rámci motorového prostoru je CFD simulace zaměřená na proudění palivové směsi do spalovací komory válce. Na *Obrázku 6* můžeme pozorovat rozdíly rychlosti proudu směsi paliva a vzduchu mezi sacím potrubím a spalovací komorou, která je oddělena v pozorované chvíli otevřeným ventilem. Díky této vizualizaci může konstruktér jasně určit, zda jsou dané proudění a objem vzduchu dostatečné pro

### 3 Využití CFD analýzy v kontextu motocyklů

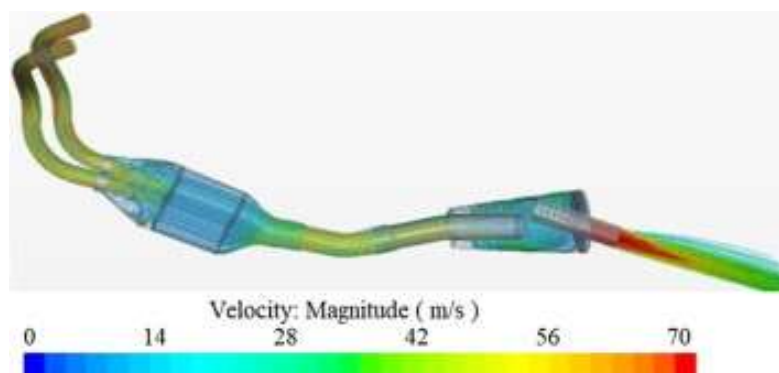
dokonalé spalování, nebo bude muset být vymyšlena jiná geometrie sacího potrubí nebo ventilu, který rozráží nasátou palivovou směs do stran spalovací komory a pomáhá k rovnoměrné distribuci směsi ve válci [24] [25].



Obrázek 6 – Vizualizace rychlosti proudění do válce motoru [24]

#### 3.1.2 Výfukové potrubí

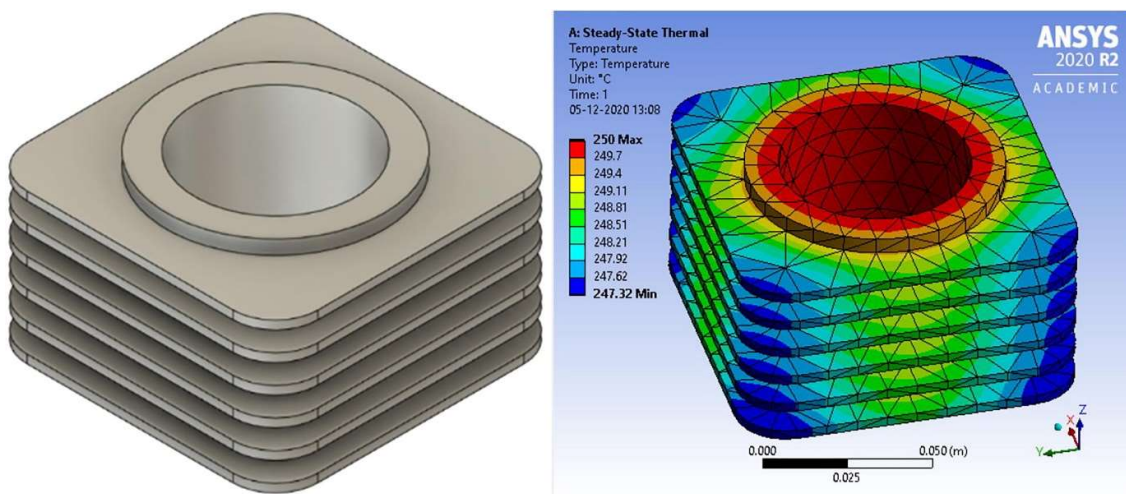
Výfuk zplodin z válce může být simulován stejným způsobem, jako je znázorněn při sání na *Obrázku 6*, jen s rozdílem proudění výfukových plynů přes výfukový ventil dále do svodů a výfukového potrubí. Přes koncovku proudí výfukové plyny ven z vnitřní soustavy motocyklu. Další z popisovaných příkladů CFD simulace je proudění výfukových plynů a jejich vizualizace závislá na rychlosti. Na *Obrázku 7* je zobrazena distribuce rychlosti v systému tlumiče výfuku. Proudění uvnitř tlumiče je plynulé bez výrazného gradientu rychlosti. Nejvyšší pozorovatelné rychlosti jsou u svodů z motoru a u koncovky výfuku. U té může být tak vysoký nárůst rychlosti způsoben rozdílem tlaků v koncovce výfuku a okolního vzduchu [26].



Obrázek 7 – Rychlost proudění výfukových plynů ve výfuku [26]

#### 3.1.3 Termodynamická výměna teploty

Jedním z běžných problémů spojených s numerickou analýzou v kontextu motocyklů je termodynamická výměna známá také jako chlazení. Motocykly, které nejsou chlazené kapalinou, mají přímo na motoru vyrobené žebrování, jež slouží k chlazení motoru. Nejčastější umístění tohoto termoregulačního prvku je na válci a hlavě motoru z důvodu lokace nejvyšších teplot motoru. Na *Obrázku 8* je zobrazen příklad geometrie žebrování na hliníkovém válci a výstupy z CFD analýzy termodynamických dějů na daném válci [29].



*Obrázek 8 – Porovnání geometrie žebrování válce s teplotní charakteristikou [29]*

Na *Obrázku 8* jsou dále znázorněny kontury tepelného toku pro obdélníkové žebro o tloušťce 3 mm. Nejvyšší teplota je nasimulovaná na vnitřní vložce válce s hodnotou 250 °C a teplota obtékajícího vzduchu válce je 25 °C. Díky CFD analýze je viditelná teplotní distribuce po celém tělese. Nejnižší teplota je znázorněna tmavě modrou barvou na rozích žebrování. Tato teplota je pouze o 1 % nižší než simulovaná teplota na vložce. Na tomto příkladu je pozorovatelná obtížnost chlazení motorů s vnitřním spalováním, s níž se musí konstruktéři po celém světě potýkat [29].

#### 3.2 CFD analýza obtékání vzduchu okolo motocyklu

Po stručném uvedení některých možností CFD simulací v kontextu motorové jednotky motocyklu budou uvedeny příklady CFD analýzy obtékání vzduchu okolo motocyklu, která je hlavním tématem této diplomové práce.

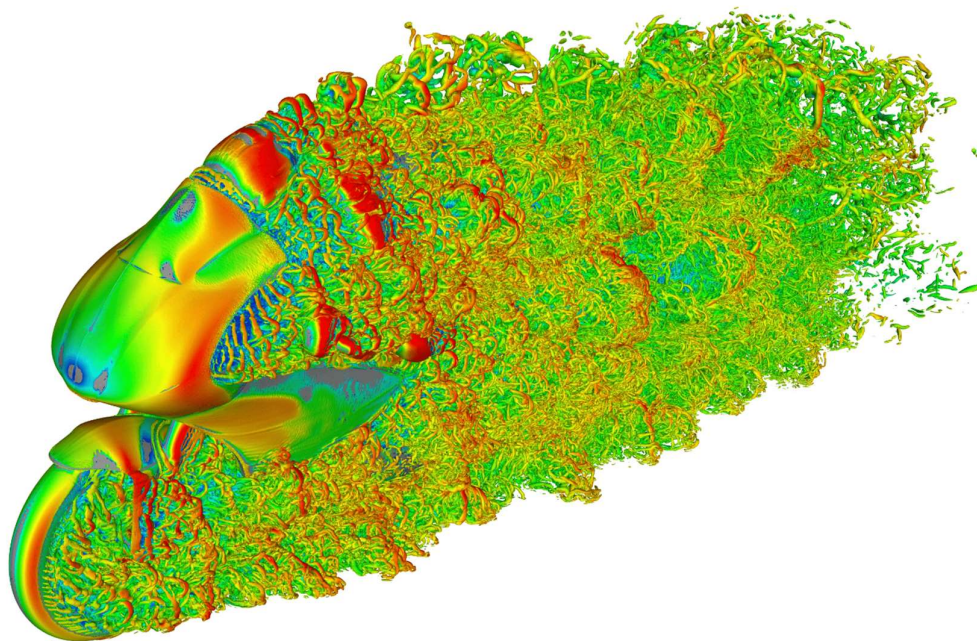


### 3 Využití CFD analýzy v kontextu motocyklů

Nejčastější CFD simulace proudění vzduchu je prováděna okolo celého geometrického tvaru motocyklu s kapotáží, jež je nedílnou součástí stroje. Díky kapotážím můžeme snižovat jízdní odpor motocyklu, vylepšit jízdní komfort jezdce nebo mimo jiné vylepšit chladičí výkon motoru motocyklu [22].

Kapotáž může sloužit i jako ochrana jezdce proti povrchům s příliš vysokou teplotou. Je to tedy i bezpečnostní prvek, který zároveň pomáhá ochránit důležité komponenty motocyklu před prachem, nečistotami, vodou a jinými vnějšími vlivy, které by mohly tyto komponenty poškodit [22].

Na *Obrázku 9* je zobrazen abstrakt turbulentního proudění okolo celého motocyklu včetně jezdce. Můžeme zde pozorovat nejvyšší rychlost obtékaného vzduchu na náběhové hraně přilby jezdce (zobrazeno červenou barvou) a na boční části kapotáže. Velká část motocyklu je schována ve vizualizaci proudění. Z tohoto důvodu je tento způsob vizualizace lepší pro pochopení turbulentního proudění okolo motocyklu, nikoliv k úpravě kapotáží [30].

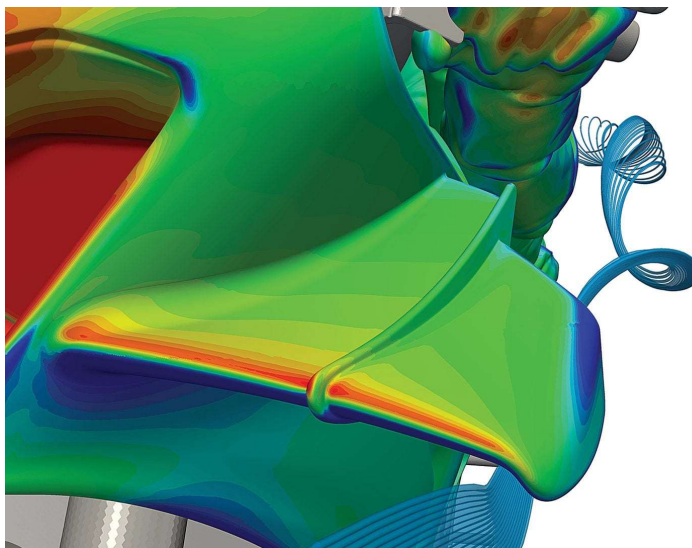


*Obrázek 9 – Vizualizace turbulentního proudění díky CFD simulaci [30]*

Výhodnější vizualizace pro úpravu geometrie kapotáže motocyklu je zobrazena na *Obrázku 10*. Zde je znázorněna vizualizace proudění vzduchu okolo motocyklového

### 3 Využití CFD analýzy v kontextu motocyklů

wingletu, tzv. „křídélka“. Tento winglet slouží k vytvoření většího přitlaku na přední kolo, což má za důsledek lepší stabilitu jízdy motocyklu při vyšších rychlostech. Tento přidaný přitlak však zvyšuje aerodynamický odpor ve směru jízdy motocyklu [31].



Obrázek 10 – Vizualizace proudění okolo wingletu neboli „křídélka“ kapotáže [31]

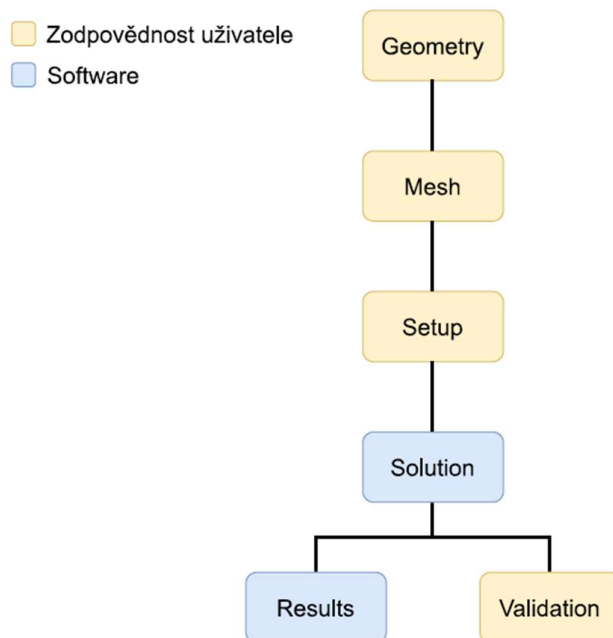
Negativní dopad mají tzv. křídélka také na obratnost motocyklu ve vyšších rychlostech, což zvyšuje nároky na fyzickou kondici jezdce. Dalším z problémů, které mohou křídélka generovat, je vliv na okolí motocyklu, protože jízda jiného motocyklu ve vysoké rychlosti za motocyklem s křídélky může být velmi nebezpečná. Usměrnění proudu tímto aerodynamickým prvkem způsobuje odlehčení předního kola následujícího motocyklu, které může vyústit ve ztrátu kontaktu přední pneumatiky s vozovkou, čímž se může motocykl stát neovladatelným. Proto návrh pomocných křidélek musí být důkladně prověřen vhodnou metodou např. CFD simulací [32].

Vnější simulace celého motocyklu s kapotáží bude provedena v praktické části této diplomové práce.

## 4 Popis CFD analýzy vzorových úloh

Vzorové benchmark úlohy jsou standardizované testy. Slouží k porovnání výkonu a spolehlivosti různých CFD softwarových nástrojů. Tyto úlohy jsou verifikované experimenty, které jsou navrženy pro posuzování a porovnání reálně definovaných problémů, v nichž lze přesně určovat schopnost softwaru modelovat a simulovat chování tekutin a tepelných jevů. Pro znázornění rozdílností vnějších CFD simulací byly provedeny vzorové úlohy ve 2D a 3D prostoru v prostředí softwaru Ansys Fluent.

Postup simulace je pro oba typy úloh shodný a je znázorněný na *Obrázku 11*. Prvním krokem při provádění simulace je příprava geometrie, která spočívá ve vytvoření nebo vložení geometrického modelu. Následuje generování vhodné sítě okolo obtékaných těles. Následně musí být definovány okrajové podmínky a fyzikální vlastnosti všech těles a sítě. Pro správný průběh simulace musí být nastaveny také fyzikální procesy a vhodná výpočetní metoda. Tyto charakteristiky jsou závislé na typu řešené úlohy dle předmětu zkoumání. Po provedení všech přípravných kroků, za něž je zodpovědný výpočtář, může být simulace spuštěna.



Obrázek 11 – Postup CFD simulace

#### 4 Popis CFD analýzy vzorových úloh

Po dokončení běhu simulace následuje analýza a interpretace výsledků na základě fyzikálních veličin, zejména rychlosti  $v$  [ $\frac{m}{s}$ ] a tlaku  $P$  [Pa], kdy důkladně zkoumáme výsledky a porovnáváme je s očekávaným chováním systému, který vzorové benchmark úlohy popisují. Pokud je to možné, simulace je validována s experimentálními daty nebo analytickými řešeními. Na základě získaných poznatků a interpretace výsledků je iterativně upravován a zpřesňován numerický model i celá simulace. Tento proces zajišťuje přesné a spolehlivé simulace, které poskytují cenné poznatky pro další vývoj a optimalizaci systému.

### 4.1 Obecný popis pracovního postupu simulace

#### 4.1.1 Nastavení geometrie simulace

Při nastavování geometrie v CFD simulaci je klíčové začít s pečlivou přípravou modelu, která zahrnuje načtení nebo vytvoření geometrického tělesa, jež bude předmětem analýzy. Tento proces často začíná importem předem připraveného CAD modelu do softwaru, ve kterém je simulace provedena. Poté je potřeba provést důkladnou kontrolu geometrie, aby se identifikovaly případné problémy – zejména případné nespojitosti nebo jiné detaily modelu, které by mohly ovlivnit výsledky simulace. V případě potřeby se iterativně provádí úpravy, dokud není geometrie vhodná pro analýzu.

Při definování geometrie musí být nastaven i prostor, ve kterém se bude scénář dané simulace provádět. Vhodné je použití rozměrů prostoru shodných s případně prováděným experimentem. Příkladem může být experiment ve větrném tunelu, kdy je pro dosažení obdobných podmínek v simulaci vhodné definovat i stejné prostorové podmínky.

Dalším krokem pro přípravu geometrie je sjednocení objemů obtékaných těles a tělesa prostoru (pomocné těleso, ve kterém proudí tekutina) do jedné společné geometrie. Pro CFD simulace se nejčastěji používá booleovské odečtení, jež umožňuje odstranit geometrické části jednoho tělesa z tělesa druhého. Vytvoří se tak obtisk povrchových ploch obtékaného tělesa se stejnými geometrickými parametry v tělese prostoru.

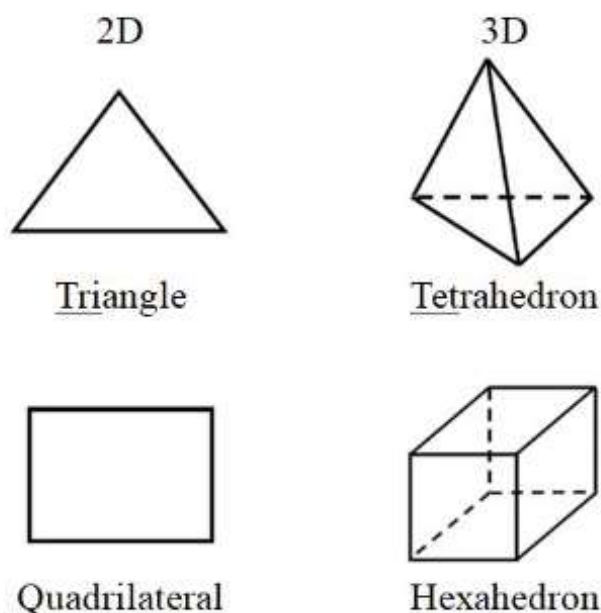
Důsledný proces přípravy geometrie je klíčový pro zajištění přesnosti a spolehlivosti výsledků a platí obecně pro všechny druhy CFD simulací.

### 4.1.2 Příprava sítě

Vytváření sítě je proces rozdělení fyzikálního prostoru na menší části, nazývané elementy. Tyto elementy tvoří síť, která umožňuje počítačovému programu modelovat a simulovat chování tekutiny v daném prostoru [13] [8].

Síť je vytvářena z důvodu numerického řešení simulací dle metody konečných objemů. Hlavní záměr metody spočívá v rozdělení početní oblasti na konečný počet tzv. kontrolních objemů. Pro ty je použit integrální tvar rovnic, ve kterých jsou aproximovány vhodným způsobem jednotlivé členy. Pole proměnných je nahrazeno průměrnými hodnotami pro dané kontrolní objemy, nikoliv uzly [33].

Před přípravou sítě musí výpočtář vědět, jaké má výpočetní možnosti. K tomu musí být přizpůsobeno rozlišení vytvářené sítě a to, jaký typ bude pro dané potřeby vhodný. Na *Obrázku 12* jsou znázorněny nejčastější způsoby sítě v současné CFD analýze.



*Obrázek 12 – Nejčastější typy sítí [34]*

Pro vytvoření sítě se nejprve rozdělí všechny plochy v prostředí na výpočtářem nastavené různě veliké plošky. Z těchto plošek poté vychází proces generování sítě v celém geometrickém prostoru simulace. Zmíněný proces je zcela automatizovaný a není bezchybný. Proto musí každý výpočtář provést zpětnou kontrolu, nevhodné elementy upravit, odstranit nebo změnit způsob tvorby sítě tak, aby nedocházelo k jejím

#### 4 Popis CFD analýzy vzorových úloh

chybám. Nejčastější chybové oblasti bývají právě okolo geometrie obtékaných předmětů, z důvodu složitého tvaru pro obepnutí pouhými ploškami, které mohou být eliminovány promptní změnou geometrie obtékaného předmětu. Další z možností eliminace chyb sítě je změna jemnosti sítě nebo přidání dodatečného způsobu jemnosti sítě ve výpočtářem nastavených oblastech [13] [35] [36].

Zjemnění sítě může být dosaženo např. přidáním velmi jemné prismatické vrstvy nejčastěji okolo obtékaného tělesa. Tato vrstva zpřesňuje výpočet CFD analýzy a následné vizualizace výsledků [36].

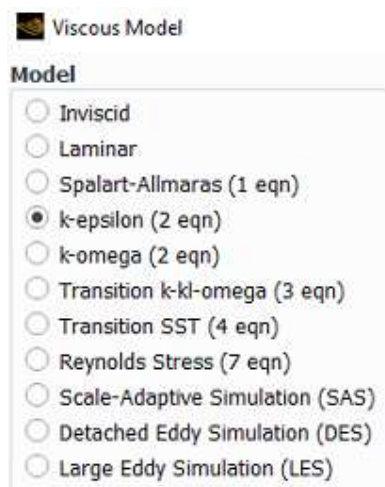
Správně vytvořená síť je klíčová pro úspěch CFD simulace a přesnost výsledků. Tomuto kroku je potřeba věnovat dostatečnou pozornost a provádět průběžné kontroly a úpravy tak, aby byla zajištěna co nejlepší kvalita výsledné sítě.

##### 4.1.3 Počáteční podmínky

Dalším krokem v procesu nastavení simulace je definice postupů, které zahrnují konfiguraci různých parametrů a podmínek. Ty ovlivňují jejich chování na základě výsledných předmětů analýzy. Následuje definice okrajových podmínek, jako je rychlost nebo tlak na okrajích tělesa prostoru a specifikace počátečních podmínek, kterými jsou např. počáteční rychlosti a tlak proudící tekutiny ze vstupu [13] [36].

CFD analýza může být provedena mnoha výpočetními metodami. Pro daný typ problému musí být vybrána nejvhodnější simulační metoda, která nejlépe odpovídá fyzikálním podmínkám a cílům simulace. To může zahrnovat např. volbu režimů turbulentního proudění nebo interakce s pevnými částicemi. Na *Obrázku 13* je zobrazen výčet všech možných simulačních metod pro CFD analýzu proudění tekutin v softwaru Ansys Fluent. Pro všechny simulace zmíněné v této práci byly použity simulační metody  $k-\varepsilon$  a  $k-\omega$  [13] [36].

#### 4 Popis CFD analýzy vzorových úloh



Obrázek 13 – Výčet všech možných simulačních metod pro simulování proudění tekutin v softwaru Ansys Fluent

Nastavení kritérií konvergence je dalším důležitým prvkem v procesu nastavování simulace. Algoritmus simulace postupuje iterativně a kritéria konvergence se vypočítávají v každém iteračním kroku. Kritéria konvergence určují, kdy je simulace považována za dostatečně přesnou a vyhodnocují se ke každému druhu simulací individuálně [13] [35].

V neposlední řadě musí být nastavena výstupní data, která jsou pro danou simulaci předmětem analýzy. Softwarové prostředí umí vypočítat mnoho různých výstupů a výpočtář CFD simulací musí definovat, které z nich jsou pro existující problém přínosné.

#### 4.1.4 Vyhodnocení

Po dokončení běhu simulace následuje analýza a interpretace výsledků. Jde o krok, jehož cílem je pochopení a posouzení proudění tekutiny v rámci celého zkoumaného systému.

Vyhodnocování výsledků a jejich interpretace závisí na zkušenostech výpočtáře. Ideální postup spočívá v porovnání výsledků CFD simulace s výsledky z experimentálního měření. Tento postup je ale velice nákladný časově i finančně. Limity experimentálního měření mohou být ve velikosti analyzovaného předmětu nebo v nebezpečnosti proudící tekutiny daným systémem, a proto jej nelze bezpečně otestovat v laboratoři [2].

Pokud se výsledky diametrálně liší, musí být kvůli případným chybám zkontrolován postup experimentu a přepracován postup simulace. Chyba v rámci simulace může být

#### 4 Popis CFD analýzy vzorových úloh

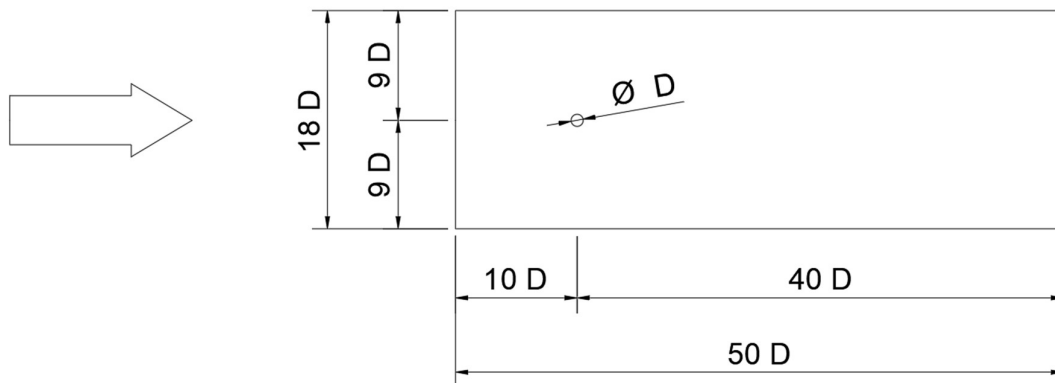
v každém z dříve zmíněných kroků. V případě chybějících dat z experimentálního měření by se výsledky měly porovnat s podobným typem úlohy [35].

### 4.2 2D vzorová úloha – kruh

Pro 2D vzorovou benchmark úlohu byla vybrána CFD simulace proudění okolo kruhu. Výzkumný tým ve složení L. Lausová, I. Kološ a V. Michalcová z Vysoké školy báňské – Technické univerzity Ostrava v roce 2019 zpracovali tuto vzorovou úlohu pro ověření použití simulační metody  $k-\omega SST$  (Shear Stress Transport, neboli přenos smykového napětí) pro 2D obtékání vzduchu okolo geometrie kruhu [37].

#### 4.2.1 Nastavení geometrie ve 2D

Na *Obrázku 14* jsou zobrazeny geometrické charakteristiky simulace. Kóta  $D$  udává průměr kruhu, který je předmětem pozorování. Pro průměr kruhu byl zvolen rozměr  $D = 0,1$  m [37].



*Obrázek 14 – Geometrie pro vyřešení benchmarkového obtékání vzduchu okolo kruhu [37]*

V *Tabulce 3* jsou znázorněny všechny rozměry simulačního prostoru. Vzdálenost středu obtékaného kruhu ke vstupu  $l$  je zvolena v 1/5 délky celého simulovaného prostředí. Tato vzdálenost byla expertně zvolena z důvodu ustálení proudícího vzduchu v simulačním prostředí [37].



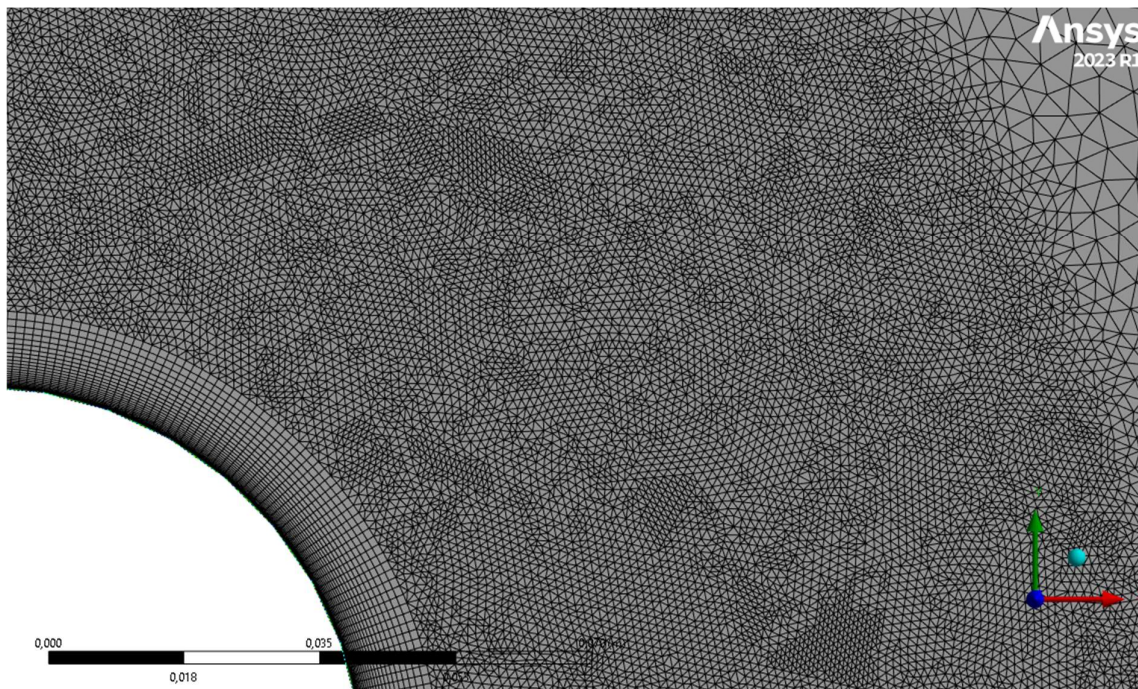
Tabulka 3 – Geometrie prostoru 2D úlohy

GEOMETRICKÉ PARAMETRY SIMULACE	HODNOTY
Průměr obtékaného kruhu	$D = 0,1$ m
Délka simulovaného prostředí	$L = 5,0$ m
Výška simulovaného prostředí	$H = 1,8$ m
Vzdálenost středu kruhu k inletu	$l = 1,0$ m

#### 4.2.2 2D síť

Pro vytvoření sítě byla vybrána varianta s trojúhelníky. Síť se skládá ze 193 000 převážně plošných trojúhelníkových elementů a 101 000 uzlů. Pouze prizmatická vrstva sítě je nastavena na tvar čtyřúhelníků [37].

Velikost buněk prizmatické vrstvy v blízkosti stěny byla nastavena jako  $0,002 D$  ( $D$  je průměr kruhu), přičemž rychlost růstu buněk je 1,1násobek pro následujících 25 buněk. Tato vrstva plynule přechází do zjemněné vrstvy, jejíž šířka je  $0,1$  m od povrchu kruhu s maximální velikostí trojúhelníkového elementu  $0,02 D$ . Na *Obrázku 15* je znázorněn detail popisované sítě [37].



Obrázek 15 – Detail sítě pro 2D úlohu obtékání kruhu; Udávané měřítko je v metrech

## 4 Popis CFD analýzy vzorových úloh

### 4.2.3 Nastavení simulace

Pro nastavení simulace bylo využito základních hodnot zobrazených v *Tabulce 4*.

*Tabulka 4 – Základní parametry simulace [37]*

ZÁKLADNÍ PARAMETRY SIMULACE	HODNOTY
Rychlost proudícího vzduchu ze vstupu	$\bar{V} = 3 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$
Intenzita turbulence	$i_u = 2 \%$
Kinematická viskozita	$\nu = 1,7 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$
Hustota	$\rho = 1,225 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$

Proudění okolo kruhu je velmi citlivé na změny Reynoldsova čísla, jehož výpočet je vysvětlen v 1. kapitole práce – vzorec (1.1). Hodnota  $Re = 1,7 \cdot 10^5$  a vyšší reprezentuje plně rozvinutou turbulenci v podkritickém režimu. Z tohoto důvodu by měl být použit simulační model SST  $k - \omega$ . [37]

$$Re = \frac{\bar{V} \cdot D}{\nu} = \frac{3 \cdot 0,1}{1,7 \cdot 10^{-5}} \quad (4.1)$$

$$Re = 17647,06 \approx 1,8 \cdot 10^4 [-] \quad (4.2)$$

### 4.2.4 Porovnání výsledků

V *Tabulce 5* jsou porovnány výstupní hodnoty vzorové úlohy a hodnoty získané numerickou simulací. Pro výpočet průměrné hodnoty  $c_x$  z výstupu simulace byly použity hodnoty ze 700 iterací, které měly hodnotu kontinuity menší než  $9,5e-03$ . [37]

*Tabulka 5 – Porovnání hodnot vzorové úlohy a provedené simulace [37]*

	Benchmarkové hodnoty	Výstupy ze simulace
Hodnota $c_x$	(1,13–1,26)	(1,12–1,29)
Průměrná hodnota $c_x$	1,20	1,18

Simulované hodnoty koeficientu aerodynamického odporu  $c_x$  jsou vůči vzorové úloze ve 2% chybě. Chyba mohla být zapříčiněna různě zvolenými parametry sítě. Tato chyba je brána jako velmi malá a může být zanedbána. Po posouzení použití dané simulační

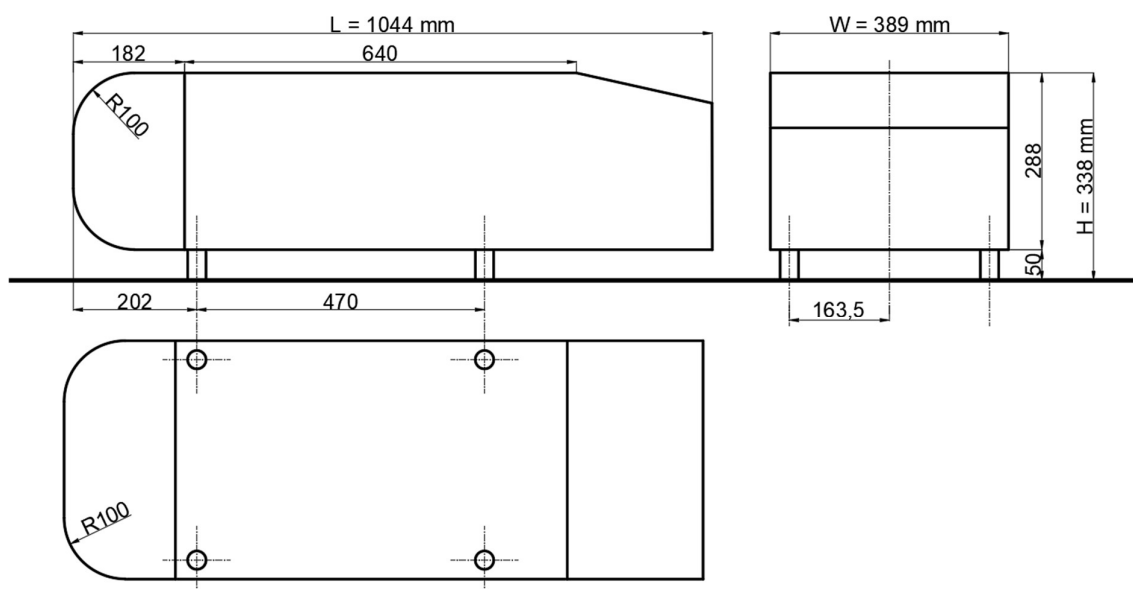
#### 4 Popis CFD analýzy vzorových úloh

metody bylo usouzeno, že nastavení a provedení simulace pro ověření vzorových hodnot bylo provedeno korektně.

#### 4.3 3D vzorová úloha – Ahmed body

Pro řešení vzorové úlohy ve 3D prostředí bylo použito článku od S. R. Ahmeda, G. Ramma a G. Faltina z německé univerzity Technische Universität Braunschweig a Institut für Entwurfs – Aerodynamik, Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V. z roku 1984. Autoři provedli experimentální pokus obtékání vzduchu ve větrném tunelu okolo tzv. Ahmed body. Dále popsali vlastnosti aerodynamického proudění okolo daného tělesa na základě sil a tlaku. [38]

Ahmed body je těleso s jednoduchou geometrií, která vzdáleně připomíná pozemní vozidlo. Rozměry tělesa jsou znázorněny na *Obrázku 16*. [39]



*Obrázek 16 – Rozměry tělesa tzv. Ahmed body ze tří různých pohledů; Udávané hodnoty jsou v milimetrech. [39]*

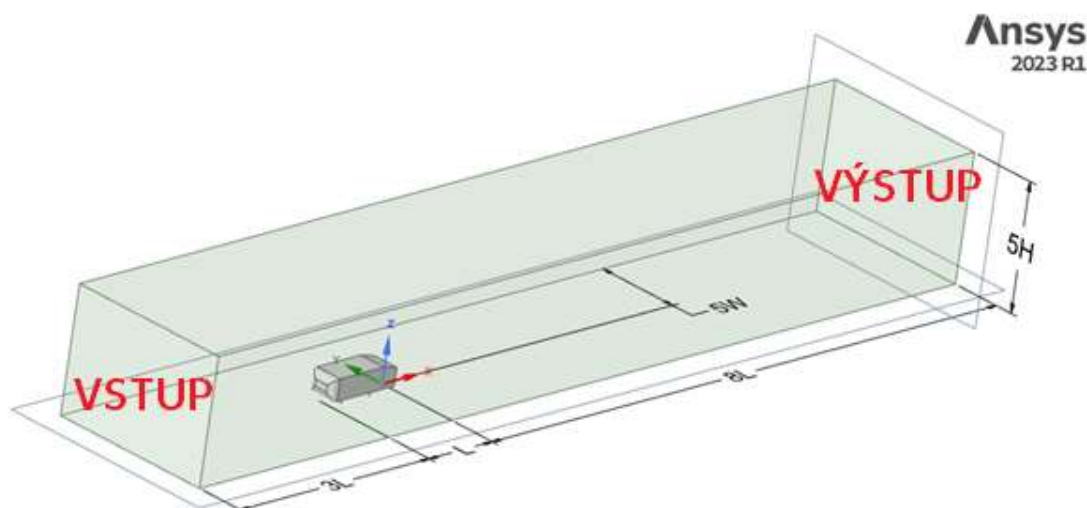
Jediný volitelný parametr v modelu je úhel  $\varphi$ , který se pohybuje od  $0^\circ$  do  $35^\circ$ . Pod různými úhly se mění způsob obtékání vzduchu okolo zkoumaného tělesa. Pro úhel  $\varphi < 12,5^\circ$  zůstává proudící vzduch v mezní vrstvě okolo tělesa laminární. Těleso má v této variantě malý aerodynamický odpor. Varianta s úhlem sklonu  $\varphi = 12,5^\circ$  byla použita pro ověření 3D vzorové úlohy obtékání vzduchu okolo tělesa.

#### 4 Popis CFD analýzy vzorových úloh

Pro úhly  $\varphi$  mezi  $12,5^\circ$  a  $30^\circ$  se proudění stává mnohem prostorově zajímavějším, protože se mezní vrstva obtékaného vzduchu postupně odděluje od povrchu vozidla a tvoří se v ní sloupové víry. Odpor vzduchu je nejvyšší ve variantě se sklonem zadní části v úhlu  $\varphi = 30^\circ$ . Pro úhel  $\varphi$  větší než  $30^\circ$  se proudění zcela odděluje od sklonu vozidla, což má za následek náhlý pokles odporu a oslabení sloupových vírů. [38] [39]

##### 4.3.1 Definice 3D prostoru

Velikost prostoru simulace byla stanovena pro ustálení proudícího vzduchu před modelem a následné proudění za Ahmed body ve směru proudění. Rozměry prostoru simulace jsou znázorněny na *Obrázku 17*. Hodnoty délky  $L$ , šířky  $W$  a výšky  $H$  jsou znázorněny na *Obrázku 16*. [36] [30]



*Obrázek 17 – Rozměry prostoru pro simulaci proudění okolo zkoumaného tělesa*

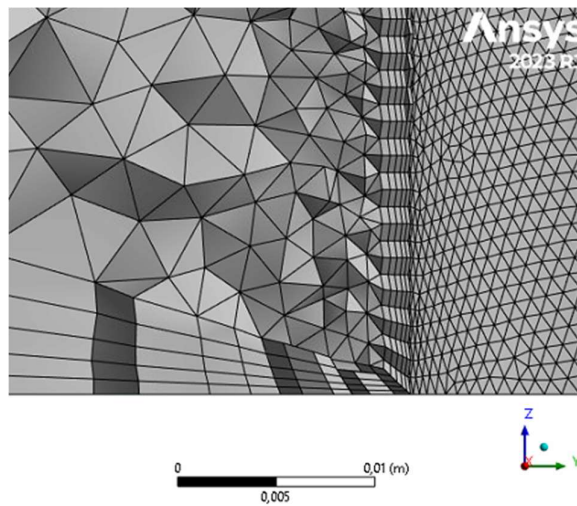
##### 4.3.2 3D síť

Pro nastavení sítě byly vybrány elementy typu tetrahedron. Počet elementů v celé síti je  $1,4 \cdot 10^6$  elementů a  $0,4 \cdot 10^6$  uzlů. Nejjemnější je síť na stojinách zkoumaného tělesa, které jsou spojené s podlahou. Stojiny mají definovanou velikost plošného elementu 1 mm z důvodu kontaktu s podlahou. Díky jemné síti v této oblasti je zabráněno následné chybě simulace.

Dále byla nastavena nejmenší velikost plošných elementů na zbytku ploch tělesa na 1,5 mm. Prizmatická vrstva byla na zkoumaném tělese a na podlaze nastavena na šířku

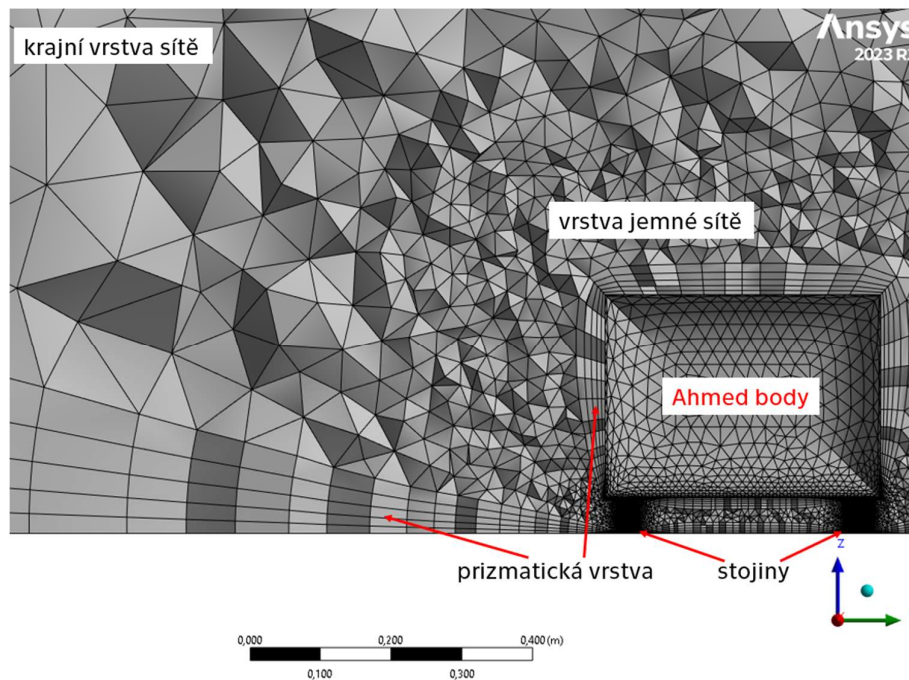
#### 4 Popis CFD analýzy vzorových úloh

5 elementů s koeficientem růstu 1,2násobku předcházejícího elementu. Na *Obrázku 18* je zobrazen detail přechodu prismatické vrstvy ze stojiny Ahmed body na podlahu.



*Obrázek 18 – Přechod prismatické vrstvy na podlahu*

Na *Obrázku 19* je viditelná prismatická vrstva okolo celého tělesa a podlahy a její přechod do jemné sítě okolo zkoumaného tělesa na velikost největšího elementu 30 mm. Krajní vrstva sítě, která navazuje na okraje prostoru simulace, je limitována největší velikostí elementu 300 mm.



*Obrázek 19 – Zobrazení sítě okolo zkoumaného tělesa*

### 4.3.3 Nastavení simulace

Pro nastavení simulace bylo použito modelu  $k - \varepsilon$  *Realizable*, který je vhodný právě pro simulace proudícího vzduchu okolo těles jednoduché geometrie. V *Tabulce 6* jsou znázorněny základní parametry simulace. Změnou oproti 2D simulacím je rozdílná intenzita turbulence na vstupu a výstupu z důvodu větší přesnosti modelu. Ustálený proud vzduchu před tělesem má díky tomuto nastavení více laminární průběh, což pomáhá k simulování podmínek podobných ve větrném tunelu. Proud vzduchu před obtékaným tělesem je vždy více laminární. Právě obtékání vzduchu okolo tělesa tvoří určité prvky nelinearity. [19] [36] [40]

Tabulka 6 – Základní parametry simulace [39]

ZÁKLADNÍ PARAMETRY SIMULACE	HODNOTY
Rychlost proudícího vzduchu ze vstupu	$\bar{V} = 60 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$
Intenzita turbulence vstupu	$i_v = 1 \%$
Intenzita turbulence výstupu	$i_o = 5 \%$
Kinematická viskozita	$\nu = 1,4601 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$
Hustota	$\rho = 1,225 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$

### 4.3.4 Porovnání výsledků

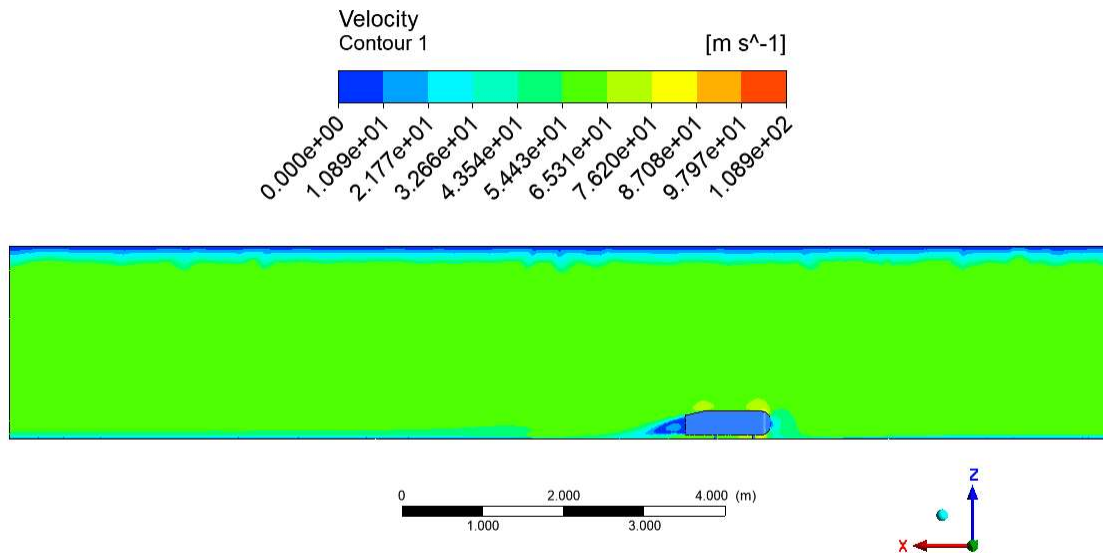
Výsledná hodnota součinitele aerodynamického odporu se sklonem zádě tělesa pod úhlem  $\varphi = 12,5^\circ$  odpovídá hodnotě získané ze simulace  $c_x = 0,245$ . Hodnota udávaná pro stejný úhel v rámci srovnávací 3D úlohy typu „Ahmed body“ je  $c_x = 0,230$ . Celková chyba je tedy 6% a mohla vzniknout v síti, která nikdy zcela nekoresponduje s podmínkami ve větrném tunelu. [39]

Následná drsnost povrchu, která byla zvolena jako velmi hladká, nemusí korespondovat s drsností povrchu v provedeném experimentu. Taktéž povrch podlahy nebo samotného tělesa v provedeném experimentu nemusely být vždy geometricky čisté a povrch mohl měnit v průběhu simulace svoje geometrické vlastnosti. [10]

Na *Obrázku 20* jsou znázorněny kontury rychlosti obtékaného vzduchu okolo zkoumaného tělesa v závislosti na rychlosti. Zde je také pozorovatelná důležitost nastavení prizmatické vrstvy okolo podlahy, z důvodu ustálení proudícího vzduchu.

#### 4 Popis CFD analýzy vzorových úloh

Prizmatická vrstva nebyla nastavena na horní části tělesa prostoru, na které je viditelné zpomalení rychlosti proudícího vzduchu ve vrstvě o velikosti 0,25 m a nemá na zkoumané těleso žádný vliv. Naopak absence prizmatické vrstvy na podlaze geometrie tělesa by generovala velkou chybovost na výsledcích simulace.



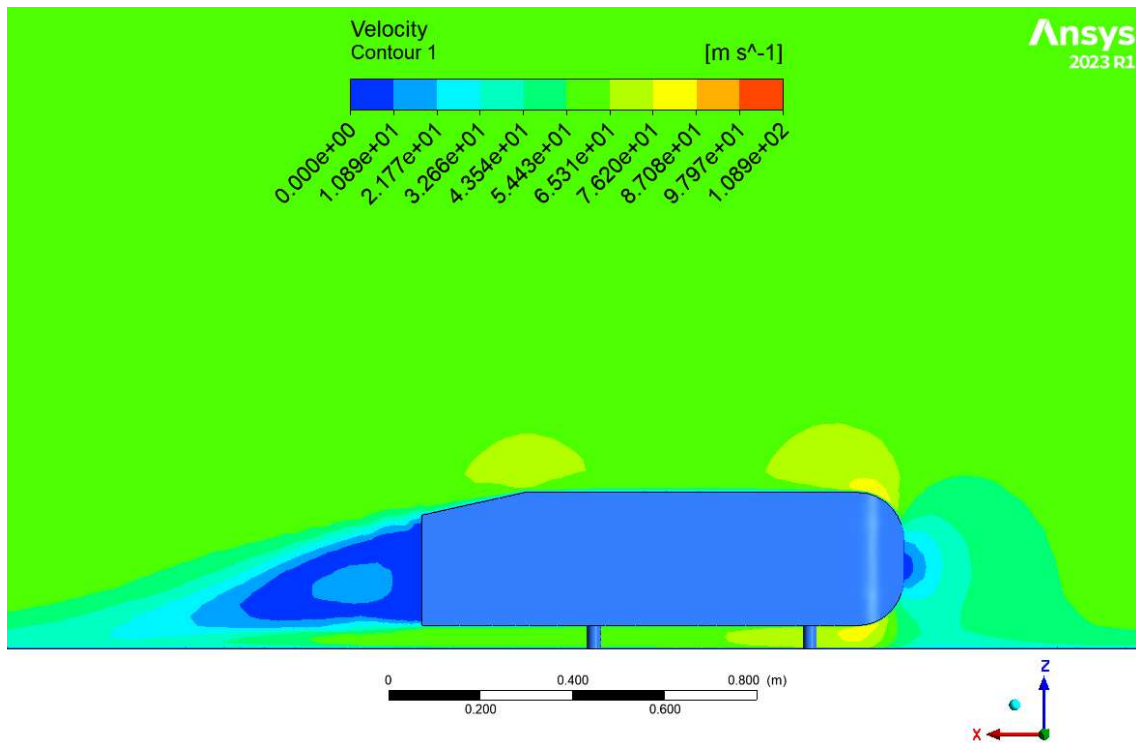
Obrázek 20 – Kontury rychlosti obtékaného vzduchu okolo zkoumaného tělesa

Na *Obrázku 21* je zobrazen detail kontur rychlosti obtékaného vzduchu okolo zkoumaného tělesa. Výsledky nastavení prizmatické vrstvy aplikované na podlaze jsou viditelné pouze jako velmi tenká linie znázorněná tmavě modrou barvou. Chybovost prizmatické vrstvy podlahy je minimální a na zjišťované veličiny zkoumaného tělesa nemá velký vliv.

Proudící vzduch byl v simulaci nastaven pro pohyb v ose X. Nejnižší rychlosti obtékaného vzduchu jsou na čelní stěně zkoumaného tělesa a v úplavu vytvořeném za ním. To může být vysvětleno geometrií tělesa, kde čelní i zadní strana jsou kolmé k ploše proudícího vzduchu. Čelní a zadní plocha tělesa generují největší část aerodynamického odporu.

[22]

#### 4 Popis CFD analýzy vzorových úloh



Obrázek 21 – Detail kontur rychlosti obtékaného vzduchu okolo tělesa

Na *Obrázku 21* jsou viditelné počátky tvorby sloupových vírů, které se tvoří na zlomu vodorovné části střechy se zádí tělesa. Tyto víry se prezentují zvýšenou rychlostí proudění, oproti rychlosti proudící ze vstupu (v obrázku znázorněné zelenou barvou).

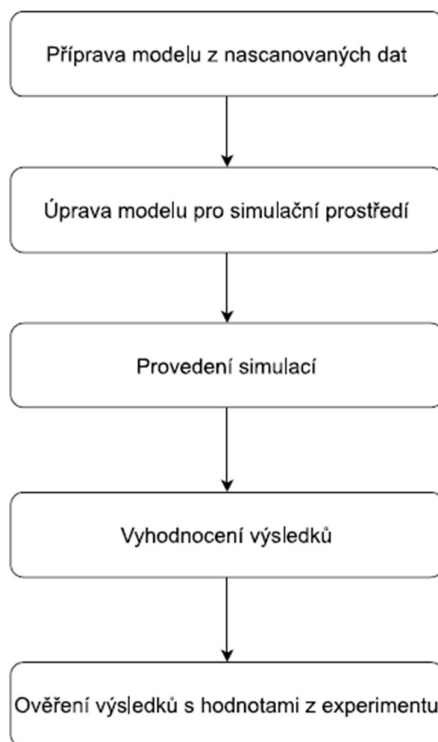
Zobrazené kontury rychlosti obtékaného vzduchu okolo zkoumaného tělesa, tzv. Ahmed body potvrzují předpoklady vzorové úlohy. Díky nízké chybovosti modelu bude použito stejné nastavení simulace pro následující numerické analýzy obtékání vzduchu okolo modelu motocyklu.



## 5 Aerodynamická CFD simulace na modelu motocyklu

V předešlé závěrečné práci autora byly naměřeny experimentální výsledky proudění vzduchu okolo modelu motocyklu v měřítku 1 : 5 ve větrném tunelu sestrojeném na Fakultě strojní ČVUT. Tato vstupní data tvoří základ pro ověření výsledků numerické CFD analýzy obtékání vzduchu okolo modelu motocyklu.

Samotné simulaci předcházela tvorba komplexního modelu motocyklu – zvláště kapotáží, jejichž tvar byl zrekonstruován na základě metod 3D skenování. Simulace budou provedeny za použití dvou numerických metod, které budou následně porovnány. V dalším postupu bylo nutno nalézt ideální a také stabilní nastavení simulace. V následujících dvou kapitolách budou popsány jednotlivé kroky tvorby modelu motocyklu, nastavení a provedení simulací obtékání vzduchu okolo modelů motocyklu v měřítku 1 : 1 a 1 : 5. Celý postup přípravy modelu a simulací je znázorněn na *Obrázku 22*.

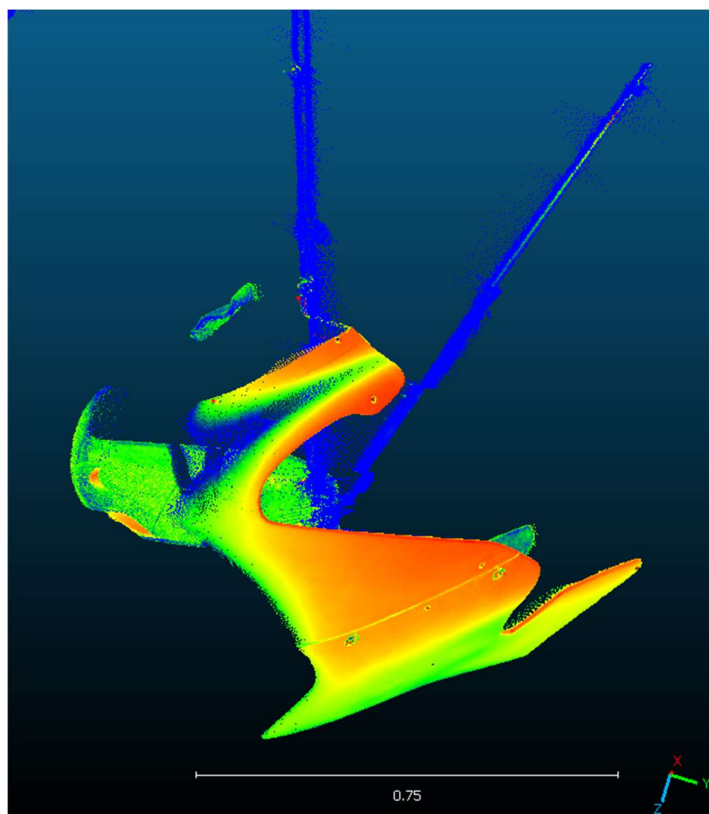


Obrázek 22 – Blokové schéma postupu praktické části práce

### 5.1 Příprava modelu kapotáží

Příprava modelu začala, z důvodu chybějícího CAD modelu od dodavatele kapotáží, scanováním kapotáží 3D scannerem Leica.

Kapotáž byla umístěna ve stabilizačním přípravku uprostřed měřicí místnosti. Dohromady bylo provedeno 35 scanů všech částí kapotáže z různé výšky a úhlu. Důvodem velkého počtu jednotlivých scanů je velmi složitá geometrie kapotáží. Pro následný postprocesing byly v místnosti umístěné kalibrační body, které slouží jako referenční body pro jednotlivé scany. Díky nim se všechny scany mohly proložit do jednoho modelu, na kterém byla provedena úprava dat pomocí softwarů CloudCompare. Na *Obrázku 23* je zobrazen příklad jednoho ze scanů, ve kterém je zobrazeno mračno bodů. Tyto body mají definované prostorové souřadnice X, Y a Z, a jsou základním prvkem pro generování sítě.



*Obrázek 23 – Příklad mračna bodů naměřených scannerem Leica*

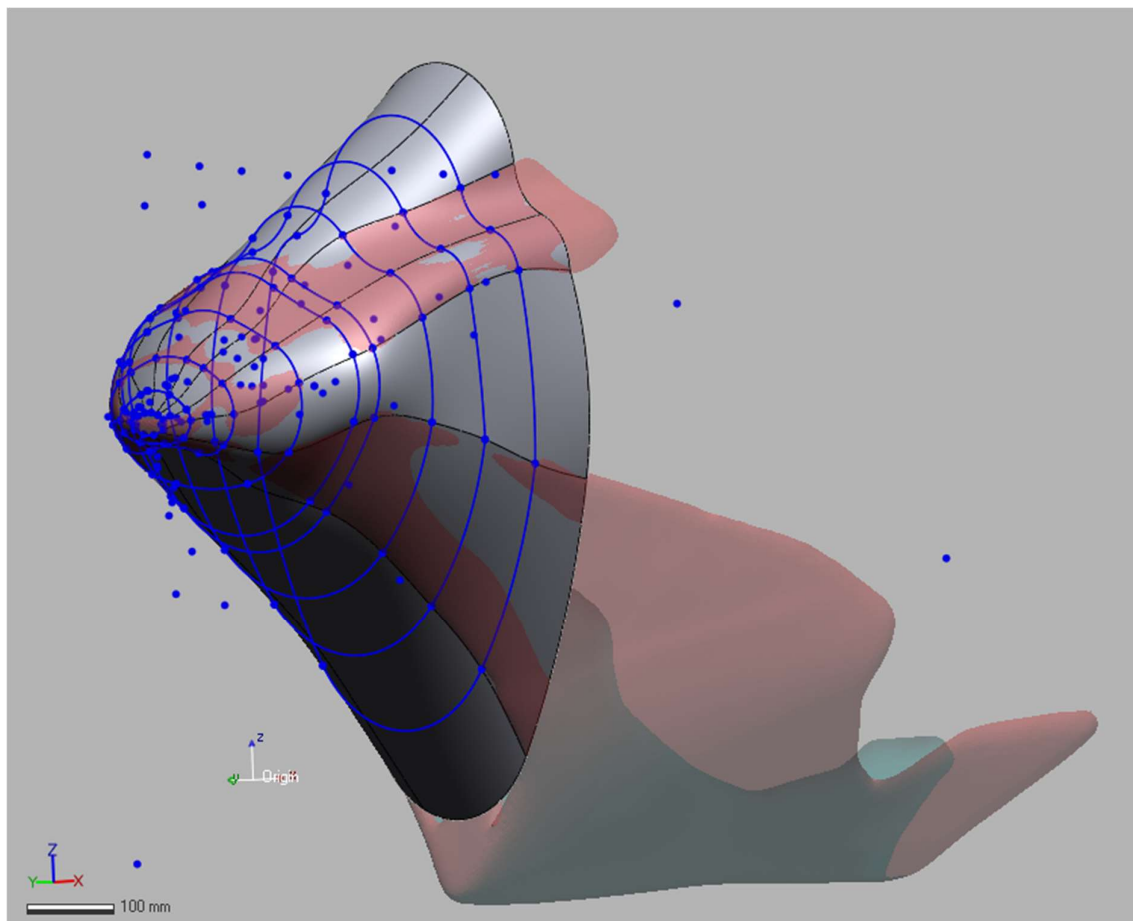
Při filtraci dat musely být odebrány všechny nepotřebné body stabilizačních přípravků a dalšího šumu. Následně byla vyhodnocena přebytečná data ze skenování kapotáží, aby

## 5 Aerodynamická CFD simulace na modelu motocyklu

nedocházelo k záměně vnější a vnitřní stěny kapot. V neposlední řadě musela být provedena redukce nascanovaných bodů na vnější stěně kapotáže.

Výsledkem nascanovaných dat byla vnější stěna kapotáží, ze které byla vygenerována síť v softwaru Geomagic složená z cca 70 000 bodů. Vzniklá plošná síť postrádala tloušťku a pro potřeby CFD simulací je nevhodná.

Dalším krokem přípravy modelu bylo vytvoření 3D modelu ve formátu step, jenž je vhodný pro numerické analýzy. Proces vytvoření modelu není automatizovaný. Z tohoto důvodu byla zobrazená síť proložena 22 plochami, na kterých se promítl příčný řez sítě v daném místě. Řezy se následně spojily vytažením do jednoho tělesa, které bylo pro účely CFD analýzy dostatečně hladké. Tento postup je viditelný na *Obrázku 24*, kde jsou modrou barvou znázorněny řezy sítě, červenou barvou je znázorněna síť a šedivou barvou je zobrazena finální část tělesa s vnější geometrií kapotáže.

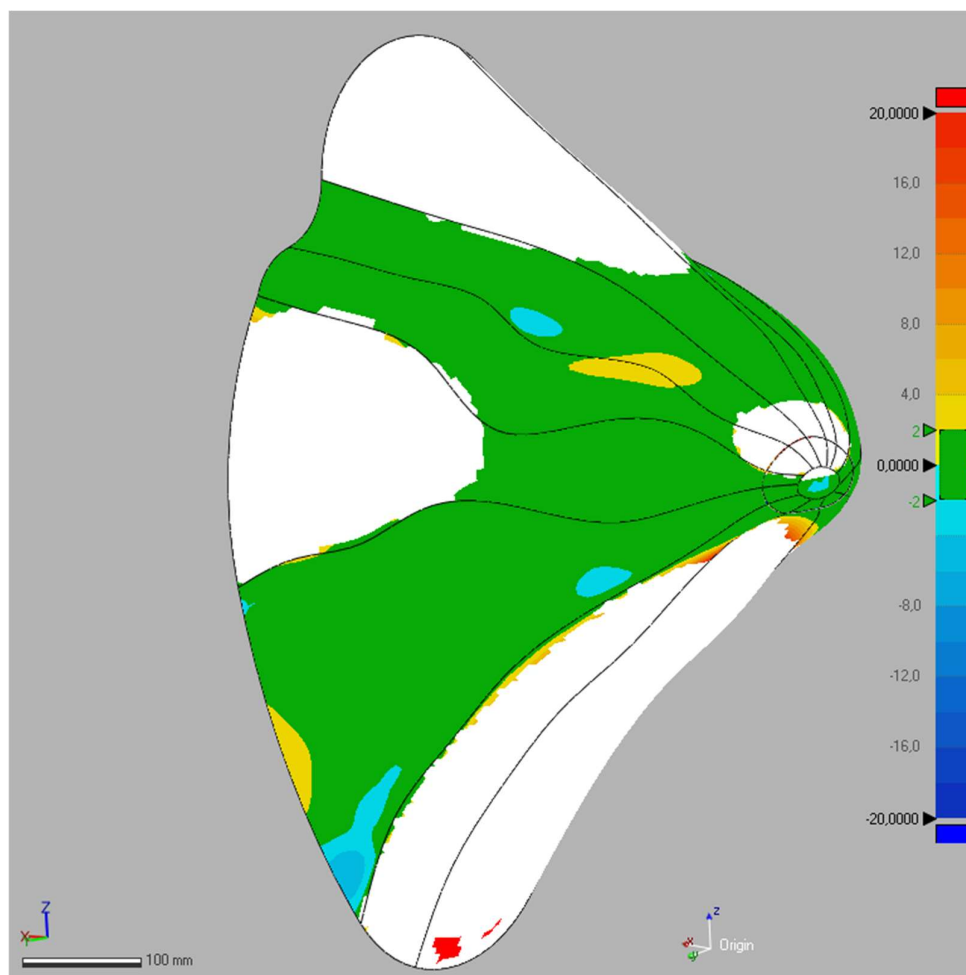


Obrázek 24 – Postup řezání kapotáží za účelem vymodelování 3D tělesa

## 5 Aerodynamická CFD simulace na modelu motocyklu

Přesnost zmíněného postupu je po validaci rozměrů s reálným motocyklem CTU Lions EVO 2.0 v přijatelné toleranci a odpovídá maximální chybě 2 %. Chyba geometrie se mohla promítnout již v uchycení kapotáže při scanování na stabilizačním přípravku, které nebylo vzhledem k pevnosti kapotáže ideální. Kapotáže byly vychýlené k jedné straně, čímž se v nascanovaných datech roztáhly o cca 10 mm na pravou stranu z pohledu jízdy motocyklu. Tato chyba byla částečně odstraněna ozrcadlením levé poloviny kapotáže.

Následná filtrace dat a prokládání sítě kapotáže pomocí ploch mělo také vliv na přesnost vytvořeného 3D modelu. Na *Obrázku 25* jsou viditelné nepřesnosti zpracovaného 3D tělesa kapotáže vůči síti, kde největší chyba má hodnotu 4,8 mm od scanu kapotáže. Pro lepší představu je uvedena šířka celé kapotáže, jejíž hodnota je 0,5 m. Výsledná chyba 3D tělesa použitého pro simulaci proudění tekutiny byla nižší než 1 %.

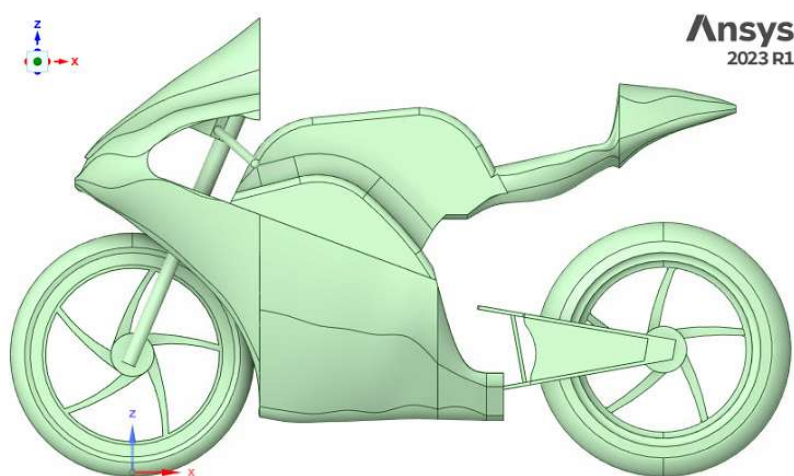


Obrázek 25 – Nepřesnosti na profilu kapotáže v mm

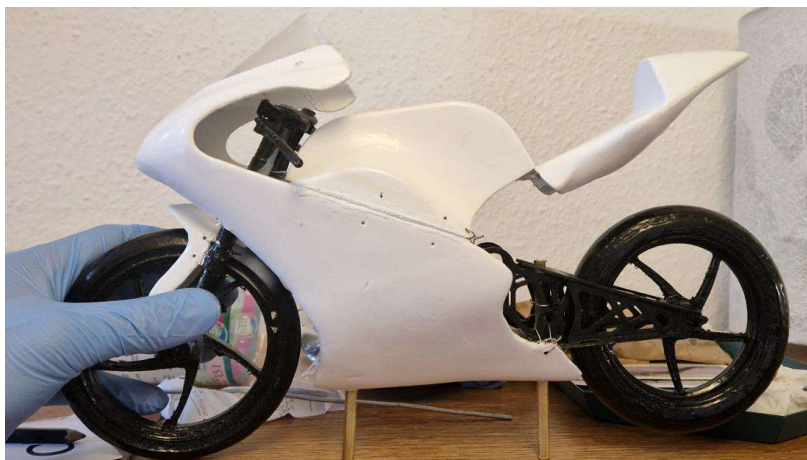
## 5 Aerodynamická CFD simulace na modelu motocyklu

Stejným pracovním postupem byly všechny části kapotáže převedeny z nascanovaných dat do 3D těles. Přebytečné části, které jsou na *Obrázku 25* znázorněny bílou barvou, byly následně odstraněny pro větší referenci s modelem použitým při experimentálním měření.

Ke kapotáži, podsedlovce a hornímu krytu battery boxu byly přidány také zjednodušené modely kol s pneumatikami, předních vidlic a zadní kyvné vidlice. Na *Obrázcích 26 a 27* je porovnání modelu motocyklu pro CFD analýzu s modelem motocyklu v měřítku 1 : 5, použitým pro experimentální pokus ve větrném tunelu. Všechny modely měly základní parametry z CAD dat motocyklu CTU Lions Evo 2.0. Pro referenci modelů je na *Obrázku 28* přidána fotografie právě tohoto motocyklu.



Obrázek 26 – Model motocyklu pro CFD simulace 1



Obrázek 27 - Model motocyklu v měřítku 1 : 5

## 5 Aerodynamická CFD simulace na modelu motocyklu



Obrázek 28 – Motocykl CTU Lions EVO 2.0

Při porovnání obou modelů motocyklu jsou viditelné určité rozdíly. Největší rozdíl je v úhlu naklonění podesedlovky. Na modelu pro experimentální pokus je podesedlovka připevněna ke krytu battery boxu s mnohem strmějším horizontálním úhlem než u modelu motocyklu pro CFD simulace. Tento model více koresponduje s tvarem celého motocyklu zobrazeného na *Obrázku 28*. Pro validaci výsledků z experimentálního měření byl vyhodnocen model zobrazený na *Obrázku 26* jako vyhovující.

### 5.2 CFD Simulace

Pro validaci experimentálních hodnot bylo provedeno několik simulací s různými rychlostmi obtékajícího vzduchu s modelem v měřítku 1 : 5, které se nastavením shodovaly s podmínkami měření na aerodynamických vahách ve větrném tunelu.

Na *Obrázku 29* jsou znázorněny podmínky modelu pro experimentální měření. Model motocyklu v měřítku 1 : 5 je zde připevněn mosaznými tyčemi do aerodynamických vah a visí ve výšce 2 mm nad váhami. Podlaha byla zalepena velmi hladkou hliníkovou páskou pro dostatečné simulování rovné plochy.

## 5 Aerodynamická CFD simulace na modelu motocyklu



Obrázek 29 – Podmínky experimentu na aerodynamických vahách ve větrném tunelu

Upevňovací tyče se pro CFD simulaci modelovat nemusely, protože jejich odpor byl odečten od finálního aerodynamického odporu naměřeného v experimentu.

Další simulace byly provedeny na modelu v měřítku 1 : 1, kde se shodovaly vypočtené hodnoty  $Re$  z experimentálního měření se simulovaným prostředím v numerické analýze. Finální simulace na modelu 1 : 1 byly provedeny pro rychlosti do 180 km/h z důvodu maximální rychlosti reálného motocyklu EVO 2.0 na závodním okruhu.

V *Tabulce 7* jsou vypsány scénáře, které se liší v měřítku modelu a rychlosti obtékaného vzduchu. Ke každému ze scénářů byly provedeny dvě simulace simulačních metod  $k-\varepsilon$  Realizable a SST  $k-\omega$ .

Tabulka 7 – Seznam provedených CFD simulací pro modely SST  $k-\omega$  a  $k-\varepsilon$  Realizable

Měřítko modelu	Rychlost [m/s]	Měřítko modelu	Rychlost [m/s]
1 : 1	1,54	1 : 5	7,70
1 : 1	4,04	1 : 5	20,20
1 : 1	6,40	1 : 5	32,00
1 : 1	8,80	1 : 5	44,00
1 : 1	10,00	1 : 5	50,00
1 : 1	20,00		
1 : 1	30,00		
1 : 1	40,00		
1 : 1	50,00	1 : 5	250,00

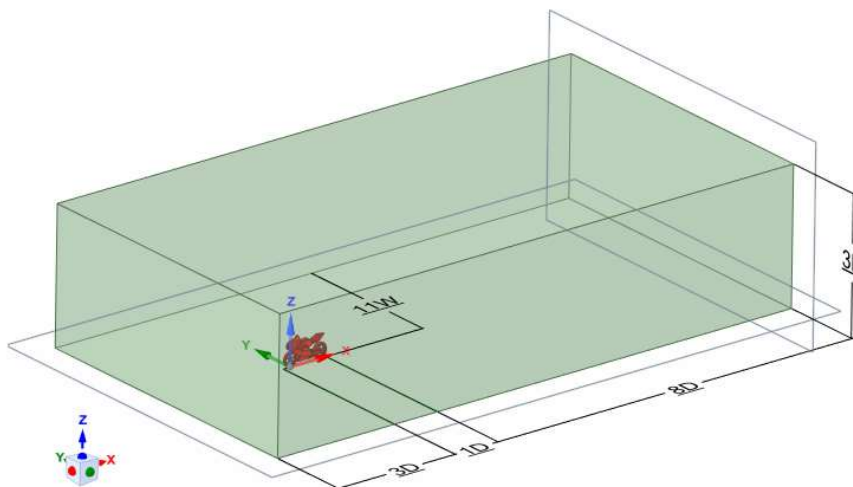
## 5 Aerodynamická CFD simulace na modelu motocyklu

Pro přesnější výsledky CFD analýzy byly výsledné simulace na modelu v měřítku 1 : 1 provedeny se sníženým modelem o 10 mm v ose jízdy motocyklu pod plochu podlahy tělesa prostoru. Tento stav simuloval zploštění pneumatiky motocyklu při zatížení gravitační silou. Další výhodou sníženého modelu bylo jednodušší generování sítě okolo obtékaného modelu motocyklu.

### 5.2.1 Nastavení geometrie simulace

Nastavení geometrie simulace je obdobné jako ve 3D vzorové benchmark úloze obtékání vzduchu okolo tělesa, tzv. Ahmed body a zobrazené na *Obrázku 30*. Největším rozdílem jsou zmenšené násobky výšky  $H$  pro vytvoření geometrie prostoru pro simulaci. Tato hodnota výšky  $H$  byla zmenšena z důvodu optimalizace výpočetního času na úlohu. Zmenšení bylo provedeno po expertním uvážení rozdílů ve výsledcích simulací s oběma výškami simulačního prostoru, přičemž bylo zjištěno, že výsledky byly totožné.

**Ansys**  
2023 R1



*Obrázek 30 – Velikost simulačního prostoru pro obtékání vzduchu modelu motocyklu*

V *Tabulce 8* jsou znázorněny rozměry modelu motocyklu pro měřítka 1 : 1 a 1 : 5. Pro použití varianty simulace se sníženým modelem motocyklu pod povrch podlahy bylo použito oříznutí modelu i tělesa prostoru rovinou XY. Proto model motocyklu i tělesa prostoru lícoval a byl vhodným pro bezproblémové generování sítě.



## 5 Aerodynamická CFD simulace na modelu motocyklu

Tabulka 8 – Rozměry modelů motocyklu pro CFD analýzu

Rozměry modelu motocyklu	Model 1 : 1	Model 1 : 5
délka	$D = 1,841 \text{ m}$	$D = 0,368 \text{ m}$
šířka	$L = 0,620 \text{ m}$	$L = 0,124 \text{ m}$
výška	$H = 1,750 \text{ m}$	$H = 0,350 \text{ m}$

### 5.2.2 Nastavení sítě

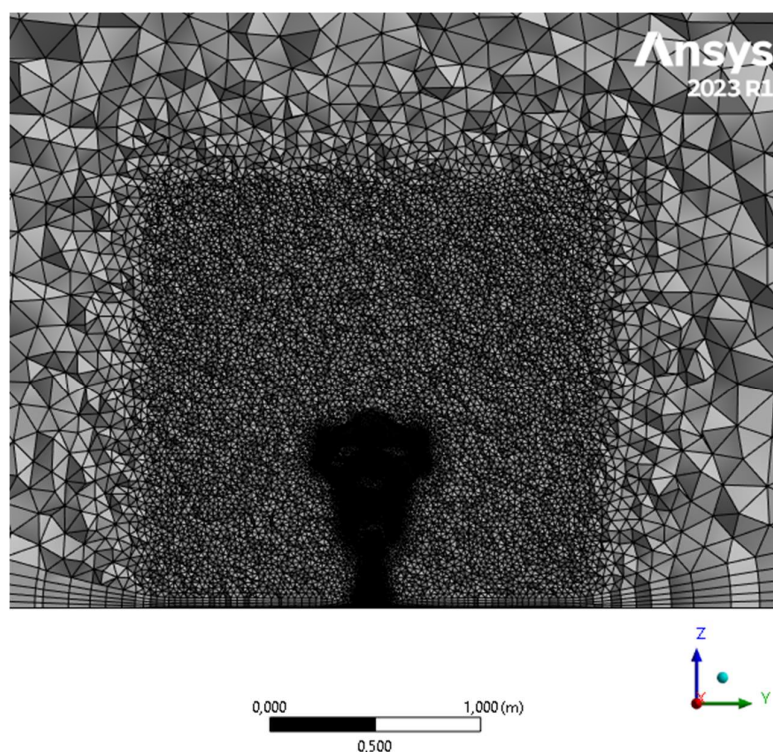
Pro každý scénář CFD simulaci v měřítku 1 : 1 a 1 : 5 byly použity simulační metody  $k-\varepsilon$  Realizable a SST  $k-\omega$ . Síť pro simulace v měřítku 1 : 1 i pro 1 : 5 zůstala stejná a měnily se pouze okrajové podmínky. Tím byla eliminována chyba, která by mohla vzniknout vlivem rozdílné sítě mezi provedenými simulacemi.

Síť pro simulaci v měřítku 1 : 1 byla nastavena s maximální velikostí elementu obtékaného tělesa na 1 mm. Prismatická vrstva geometrie byla nastavena pro obtékaný model a podlahu ve velikosti 5 vrstev elementů s růstem 1,2násobku. Vrstva zjemněné sítě okolo modelu motocyklu byla nastavena na maximální velikost 20 mm. Díky tomu byla vygenerována síť s  $18 \cdot 10^6$  elementů a  $4 \cdot 10^6$  uzlů. Tato síť byla vyhodnocena jako dostatečně přesná pro potřeby CFD simulace obtékání vzduchu okolo modelu motocyklu.

Pro simulaci s modelem motocyklu v měřítku 1 : 5 bylo použito 5krát poníženého nastavení hodnot hustoty sítě, než u zmíněného nastavení v případě modelu motocyklu v měřítku 1 : 1. Tím byly zajištěny srovnatelné podmínky pro obě velikosti simulovaného modelu.

Na *Obrázku 31* je viditelný řez sítí a zhuštění elementů okolo tvaru motocyklu. V porovnání se 3D vzorovou úlohou je jemnost sítě okolo modelu motocyklu vyšší z důvodu složitější geometrie modelu motocyklu. Nejmenší elementy prismatické vrstvy a sítě dosahují objemu  $5 \cdot 10^{-13} \text{ m}^3$ . Takto malé elementy pomáhají vizualizovat proudění na povrchu zkoumaného tělesa a zároveň stabilizovat kritéria konvergence dané simulace.

## 5 Aerodynamická CFD simulace na modelu motocyklu



Obrázek 31 – Zobrazení sítě okolo modelu motocyklu v měřítku 1 : 1

### 5.2.3 Nastavení simulace

Simulace pro ověření dat z experimentálního měření byly provedeny oběma zmíněnými simulačními metodami, tedy  $k-\omega SST$  a  $k-\varepsilon Realizable$ . Tyto numerické metody byly zvoleny z důvodu velmi složité geometrie modelu motocyklu a předpokladu turbulentního proudění za motocyklem.

V *Tabulce 9* jsou zaznamenány základní hodnoty nastavení scénářů pro obě simulační metody  $k-\omega SST$  a  $k-\varepsilon Realizable$  na modelech v měřítku 1 : 5 a 1 : 1. Jediná změna je v intenzitě turbulence vstupu simulace  $i_v$  z důvodu jiného postupu řešení transportních rovnic řešících kinetickou energii dané metody [13] [40] [41].

Tabulka 9 – Nastavení základních parametrů simulací [13]

ZÁKLADNÍ PARAMETRY SIMULACE	$k - \omega SST$	$k - \varepsilon Realizable$
Intenzita turbulence vstupu	$i_v = 5 \%$	$i_v = 1 \%$
Intenzita turbulence výstupu	$i_o = 5 \%$	$i_o = 5 \%$
Kinematická viskozita	$\nu = 1,7894 \cdot 10^{-5} m^{-2}s^{-1}$	$\nu = 1,7894 \cdot 10^{-5} m^{-2}s^{-1}$
Hustota	$\rho = 1,225 kg \cdot m^{-3}$	$\rho = 1,225 kg \cdot m^{-3}$

## 5 Aerodynamická CFD simulace na modelu motocyklu

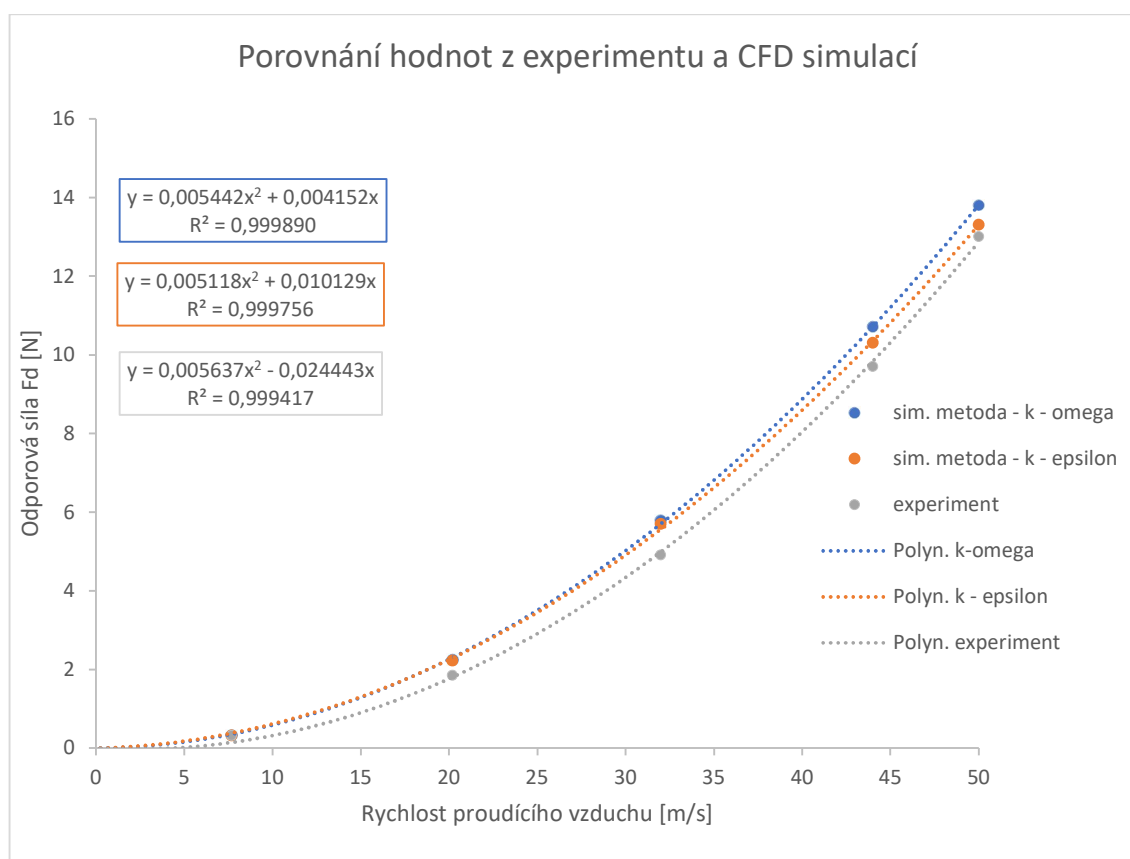
Pro každý scénář simulace byla počítána hodnota pro nízké hodnoty konvergence. Výsledná data ze simulace reprezentují vzorek 100 hodnot odporové síly  $F_D$  a koeficientu obtékání tělesa vzduchem  $c_x$  vždy s hodnotou kontinuity menší než  $9e-3$ . To znamená, že změna v rámci sledovaných veličin byla v každé iteraci v řádu tisícín. Tato hodnota konvergence byla vyhodnocena jako dostačující pro potřeby CFD simulací proudění vzduchu okolo modelu motocyklu.

## 6 Výsledky CFD simulací a diskuze

V rámci kapitoly ohledně analýzy výsledků bude nejprve provedeno porovnání přesnosti výsledků scénářů simulačních metod  $k-\omega SST$  a  $k-\varepsilon Realizable$  ve srovnání s hodnotami naměřenými při experimentu na modelu v měřítku 1:5. Poté budou výsledky zanalyzovány dle hodnot  $Re$  na model v měřítku 1:1. V posledním kroku bude vykonána predikce výsledků pro vyšší rychlosti, které nebylo možné testovat experimentálně ve větrném tunelu.

### 6.1 Validace výsledků

Po získání dat ze scénářů obou simulačních metod bylo možné výsledky validovat. V *Grafu 2* jsou porovnány hodnoty, které byly naměřeny v ose jízdy motocyklu ve větrném tunelu s hodnotami nasimulovanými pomocí CFD simulací na modelu v měřítku 1:5. Všechna data naměřená pomocí CFD analýzy jsou k dispozici také v *Příloze 2*.



Graf 2 – Porovnání hodnot z experimentu a CFD simulací

## 6 Výsledky CFD simulací a diskuze

Největší rozdíl naměřených hodnot je při rychlosti proudícího vzduchu  $v = 32 \frac{\text{m}}{\text{s}}$ , kdy průměrná odchylka od naměřené experimentální hodnoty  $F_D = 4,91 \text{ N}$  je  $0,84 \text{ N}$ . Tato odchylka může být způsobena nejen chybou simulace, ale také chybou při sběru dat během experimentu. Data byla zaznamenávána a odčítávána ručně z digitálního ciferníku, který ukazoval hodnoty o měřícím kroku velikosti  $0,16 \text{ N}$  a síla  $F_D$  měřená na aerodynamických vahách oscilovala v určitém intervalu. Procentuální chyba se pro simulace ve vyšších rychlostech snižuje, což zvyšuje pravděpodobnost chyby v měřených datech rychlosti  $v = 32 \frac{\text{m}}{\text{s}}$ . Pro rychlost  $v = 50 \frac{\text{m}}{\text{s}}$  je chyba od experimentálně naměřených dat k datům získaným pomocí simulační metody  $k-\omega SST$  5%, a k datům získaným na modelu  $k-\varepsilon Realizable$  3%. Z tohoto důvodu byly obě simulační metody vyhodnoceny jako vhodné pro provedení CFD simulace na modelu celého motocyklu. [35] [36]

Parametrem potvrzujícím vhodnost použití obou simulačních metod je regresní koeficient vycházející z předpokladu kvadratické závislosti odporové síly  $F_D$  na rychlosti proudícího vzduchu  $v$ . Dalším parametrem je koeficient determinace  $R$  (tzv. koeficient spolehlivosti), který může nabývat maximální hodnoty 1, jež značí dokonalou predikci hodnot závislé proměnné. Hodnoty těchto parametrů jsou zobrazeny v *Tabulce 10* a jsou vůči sobě velmi podobné, přičemž se rozcházejí pouze v řádech deseti tisícin. [42]

*Tabulka 10 – Porovnání hodnot koeficientu kvadratické regrese a koeficientu spolehlivosti*

	experiment	$k-\omega SST$	$k-\varepsilon Realizable$
Koeficient regrese [kg/m]	0,999417	0,999890	0,999756
Koeficient spolehlivosti [-]	0,999708	0,999944	0,999878

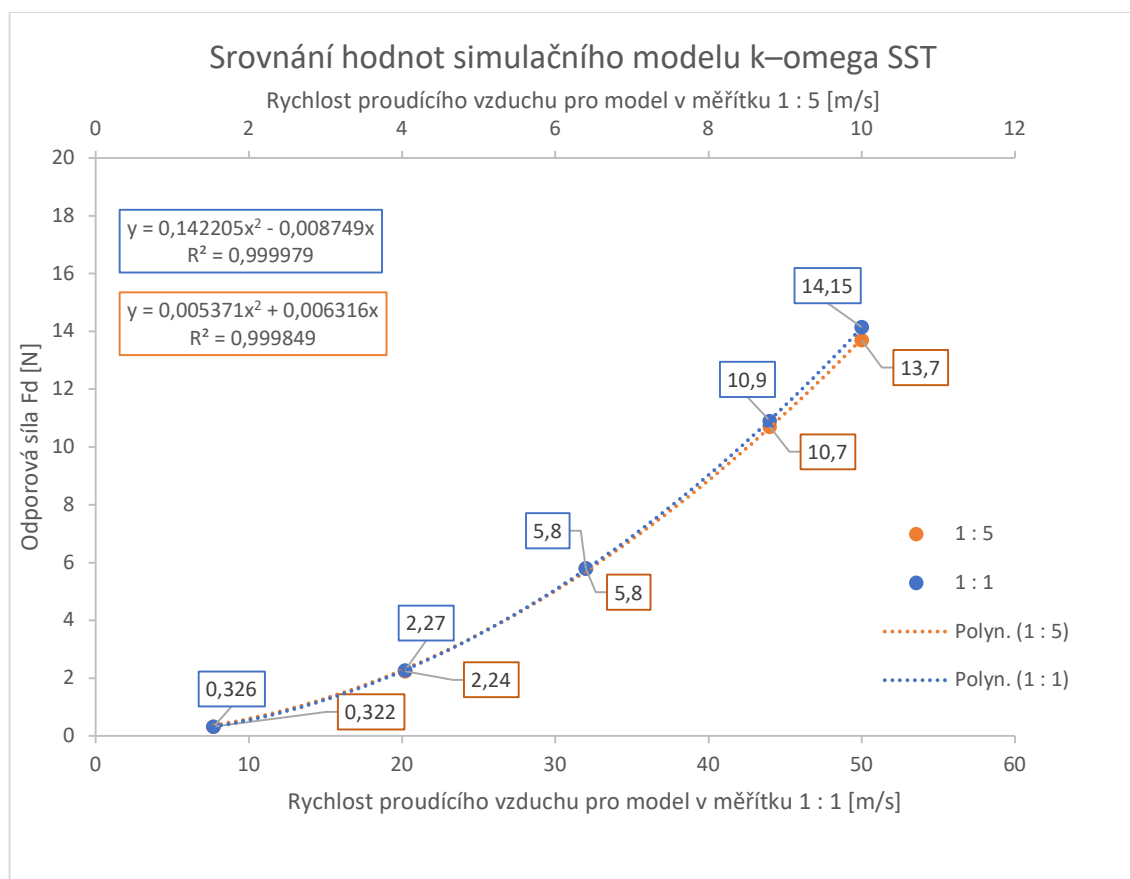
Pro porovnání hodnot simulací na modelu v měřítku 1:1 a 1:5 byla vypočtena podobnostní čísla  $Re$ . V *Tabulce 11* jsou znázorněny hodnoty  $Re$  modely pro obě měřítka s různými rychlostmi proudícího vzduchu. Průměrná rychlost proudícího vzduchu  $\bar{v}$  byla použita stejná, jako byla během experimentálního měření. Rychlosti pro výpočet  $Re$  na modelu v měřítku 1:1 byly 5krát zmenšeny.

## 6 Výsledky CFD simulací a diskuze

Tabulka 11 - výpočty  $Re$  pro různé velikosti modelu

$\bar{v} \left[ \frac{m}{s} \right]$	<b>7,70</b>	<b>20,20</b>	<b>32,00</b>	<b>44,00</b>	<b>50,00</b>
$Re [1 : 5]$	$0,15 \cdot 10^6$	$0,42 \cdot 10^6$	$0,66 \cdot 10^6$	$0,90 \cdot 10^6$	$1,03 \cdot 10^6$
$\frac{\bar{v}}{5} \left[ \frac{m}{s} \right]$	<b>1,54</b>	<b>4,04</b>	<b>6,40</b>	<b>8,80</b>	<b>10,00</b>
$Re [1 : 1]$	$0,15 \cdot 10^6$	$0,42 \cdot 10^6$	$0,66 \cdot 10^6$	$0,90 \cdot 10^6$	$1,03 \cdot 10^6$

Díky shodné hodnotě podobnostního čísla  $Re$  pro různé velikosti modelu a různé rychlosti proudícího vzduchu, bude charakter obtékání vzduchu stejný. V *Grafu 3* je tento předpoklad potvrzen pro všechny vypočtené hodnoty  $Re$  na modelech v měřítku 1 : 1 a 1 : 5 za použití simulační metody  $k-\omega$  SST.

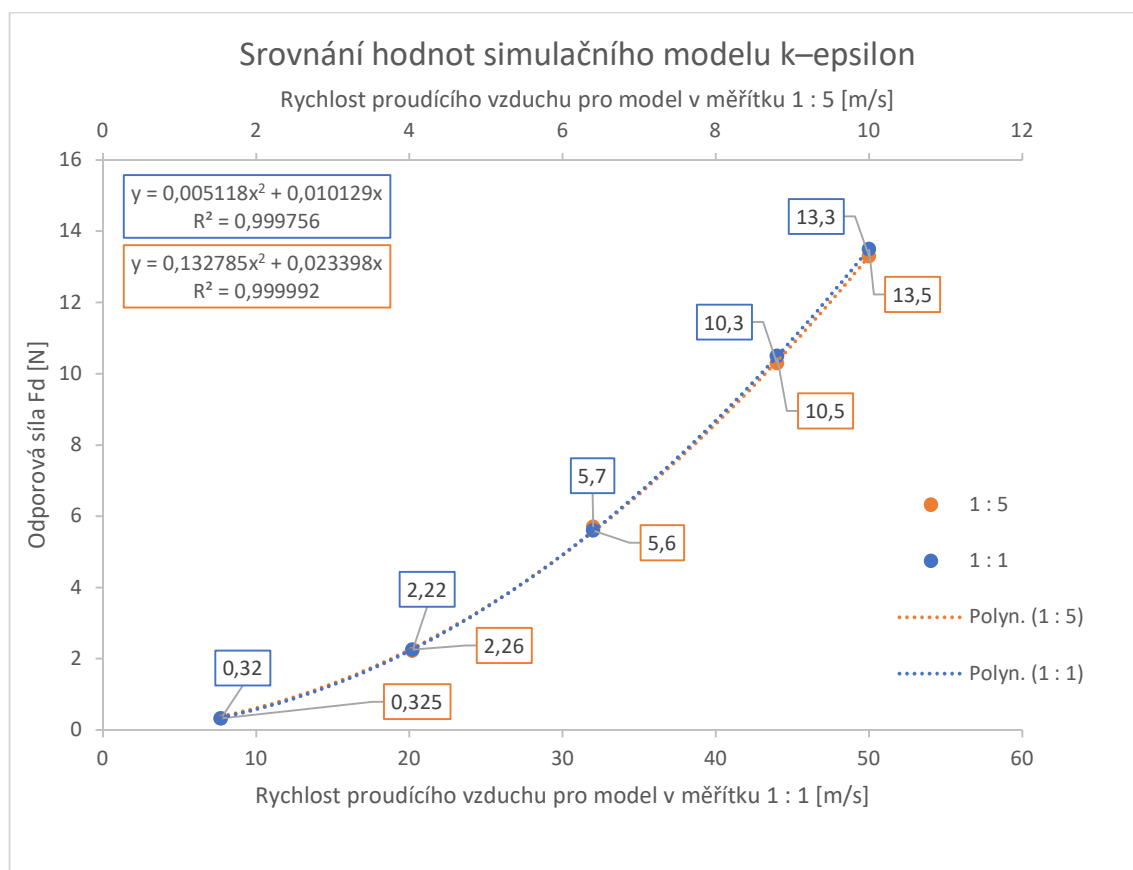


Graf 3 – Výsledné hodnoty simulací pro shodné hodnoty  $Re$  pro simulační metodu  $k-\omega$  SST

## 6 Výsledky CFD simulací a diskuze

Hodnoty naměřené na obou velikostech modelu se v daných hodnotách  $Re$  shodují a nevzniká zde významné pochybení v prezenci výsledků. Nejvýraznější chyba se projevila při hodnotě  $Re = 1,03 \cdot 10^6$ . Tato chyba může být způsobena vyšší oscilací naměřených hodnot  $F_D$  v každé iteraci při vyšších rychlostech  $v$  nastavených na vstupu simulace. Tato 5% chyba byla vyhodnocena jako minimální [35].

Další vyhodnocení dat bylo provedeno na základě scénáře použití simulační metody  $k-\varepsilon$  Realizable. Výsledky této simulační metody více korespondují mezi modely v měřítku 1 : 1 a 1 : 5, než metoda  $k-\omega$  SST. Vyhodnocení dat je zobrazeno v Grafu 4. Pro tento simulační model byla stanovena největší chyba 2%, a to shodná pro hodnoty  $Re = 0,90 \cdot 10^6$  a  $Re = 1,03 \cdot 10^6$ . Tato chyba je opět vyhodnocena jako minimální pro výpočet simulací na modelu v měřítku 1 : 1 [35]

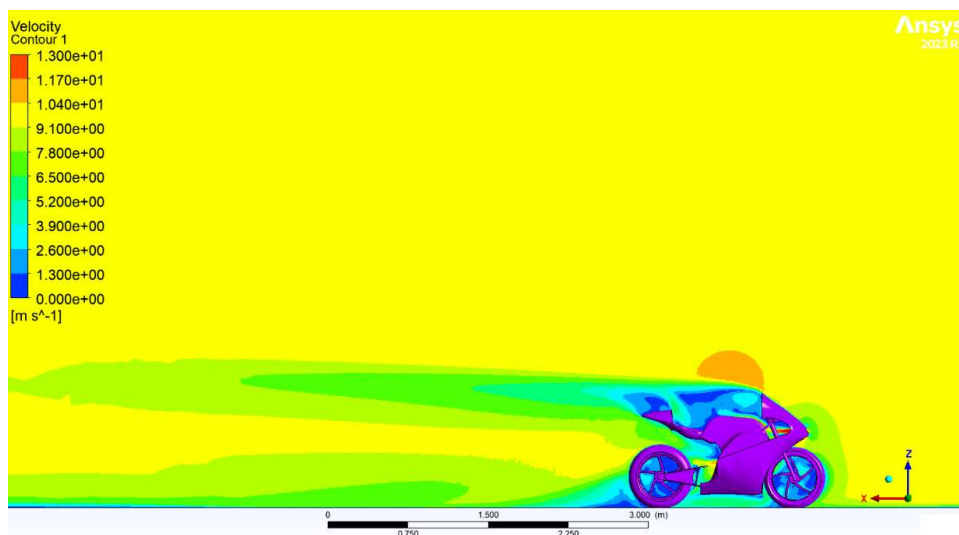


Graf 4 – Výsledné hodnoty simulací pro shodné hodnoty  $Re$  při simulačním modelu  $k-\varepsilon$  Realizable

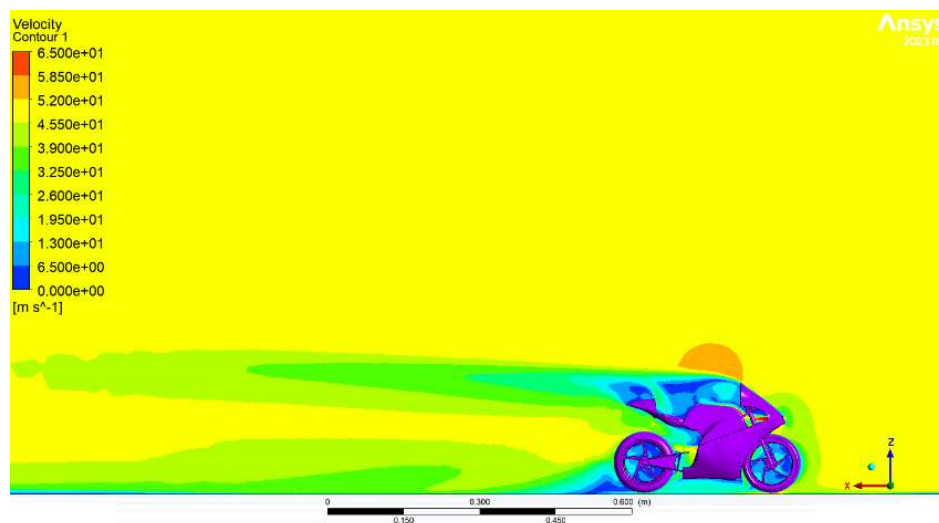
Porovnání znázorněné v Grafu 4 koresponduje s Obrázky 32 a 33, kde jsou zobrazeny kontury obtékaného vzduchu v závislosti na rychlosti řešené simulační metodou

## 6 Výsledky CFD simulací a diskuze

$k-\omega$  SST. Znázorněné kontury rychlosti jsou téměř totožné pro obě velikosti zkoumaného tělesa.



Obrázek 32 – Vizualizace rychlosti proudícího vzduchu okolo modelu motocyklu v měřítku 1 : 1, 10 m/s

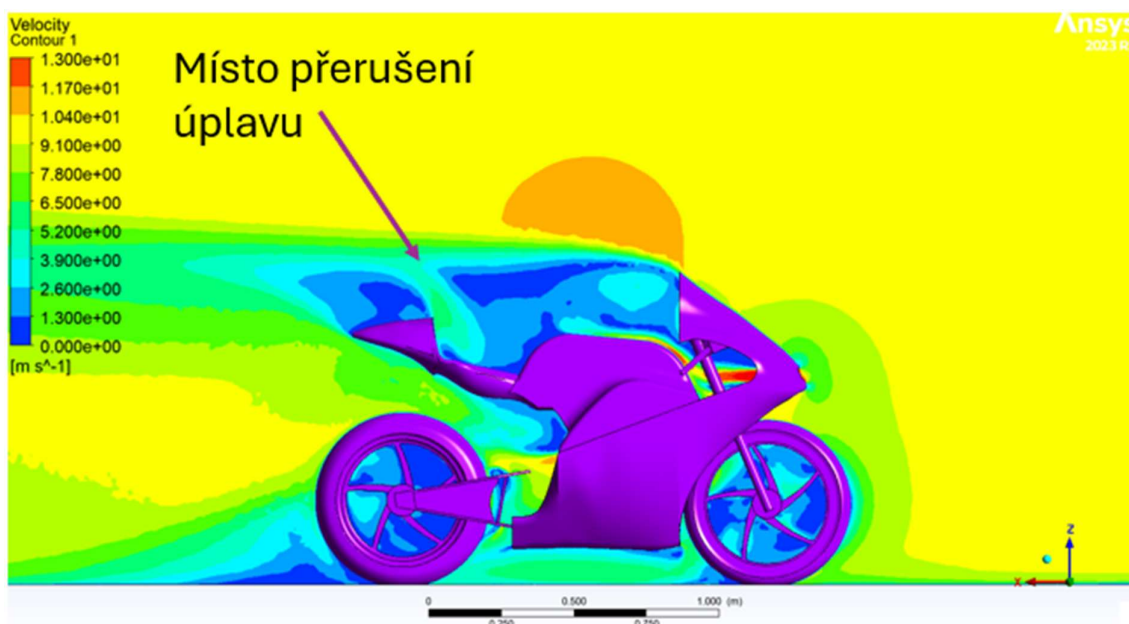


Obrázek 33 – Vizualizace rychlosti proudícího vzduchu okolo modelu motocyklu v měřítku 1 : 5, 50 m/s

Na Obrázku 34 je zobrazen detail kontur obtékaného vzduchu při rychlosti  $v = 10 \frac{\text{m}}{\text{s}}$  okolo modelu motocyklu v měřítku 1 : 1. Zde jsou viditelné kontury nízké rychlosti vzduchu za aerodynamickým štítem řidiče, které vizualizují vzniklý úplav. Za povšimnutí stojí přerušení tohoto úplavu horizontální stěnou podsedlovky, díky které se vzduch v této oblasti opět zrychlí až na rychlosti poloviční oproti rychlosti nastavené na vstupu simulace. Úplav v této oblasti by v reálných podmínkách jízdy motocyklu byl vyplněn řidičem motocyklu.



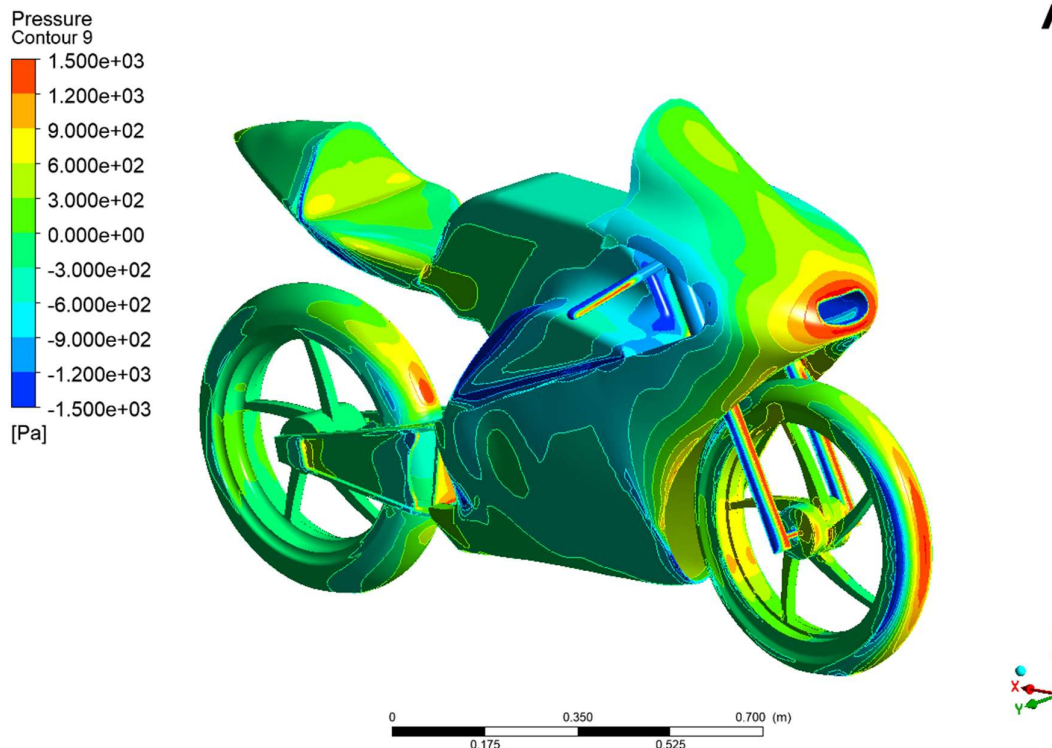
## 6 Výsledky CFD simulací a diskuze



Obrázek 34 – Detail kontur obtékaného vzduchu v závislosti na rychlosti pro model 1 : 1, 36 km/h

Další úplavy jsou vizualizovány v kolech motocyklu, které nekorespondují s variantou reálné jízdy motocyklu, protože simulace byla provedena se statickým modelem motocyklu a kola se během simulace neotáčela.

Kromě úplavů je na *Obrázku 34* viditelné zrychlení proudícího vzduchu pozorovatelné nad aerodynamickým štítem řidiče a zobrazené oranžovou barvou. Další a mnohem intenzivnější zrychlení vzduchu, zobrazeno červenou barvou, je pozorovatelné mezi kapotáží a řídítky. V této části kapotáže je otvor, jehož geometrie určuje směr proudění vzduchu směrem dovnitř motocyklu. Rychlost proudícího vzduchu v tomto otvoru je o 30 % vyšší, než je simulovaná rychlost vzduchu na vstupu simulace, což potvrzuje vhodnou lokalizaci chladičového otvoru pro účely náporového chlazení. S tím se shodují vyobrazené kontury tlaku na modelu motocyklu na *Obrázku 35*. Na reálném motocyklu CTU Lions EVO 2.0 je otvor v kapotáži využíván pro usměrnění proudu vzduchu pomocí tří hadic k chlazení bateriových článků motocyklu.



Obrázek 35 – Tlakové kontury zobrazené na modelu motocyklu v měřítku 1 : 1

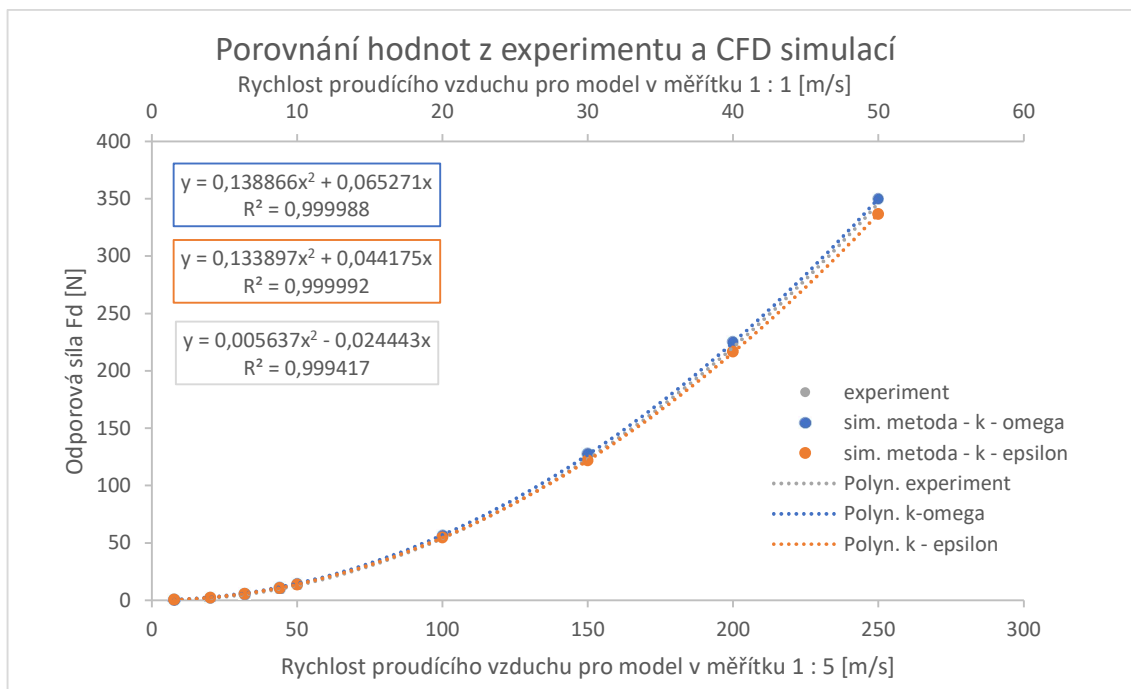
Zobrazení kontur pro simulační model  $k-\varepsilon$  *Realizable* bylo totožné jako pro model  $k-\omega$  *SST*, a proto zde nebylo uvedeno.

## 6.2 Predikce výsledků pro vyšší rychlosti pomocí CFD analýzy

Po validaci výpočetních scénářů pro simulační metody  $k-\varepsilon$  *Realizable* a  $k-\omega$  *SST* s experimentálním měřením byly provedeny CFD simulace na modelu motocyklu v měřítku 1 : 1 pro rychlosti  $v = 10; 20; 30; 40; 50 \frac{\text{m}}{\text{s}}$ . Na modelu motocyklu v měřítku 1 : 5 byly experimentálně provedeny měření pouze do rychlosti  $v = 50 \frac{\text{m}}{\text{s}}$  z důvodu technických limitací větrného tunelu. Pro přepočítání hodnot z modelu motocyklu v měřítku 1 : 5 na model v měřítku 1 : 1 musí být užito hodnot rychlosti  $v$  5krát menších.

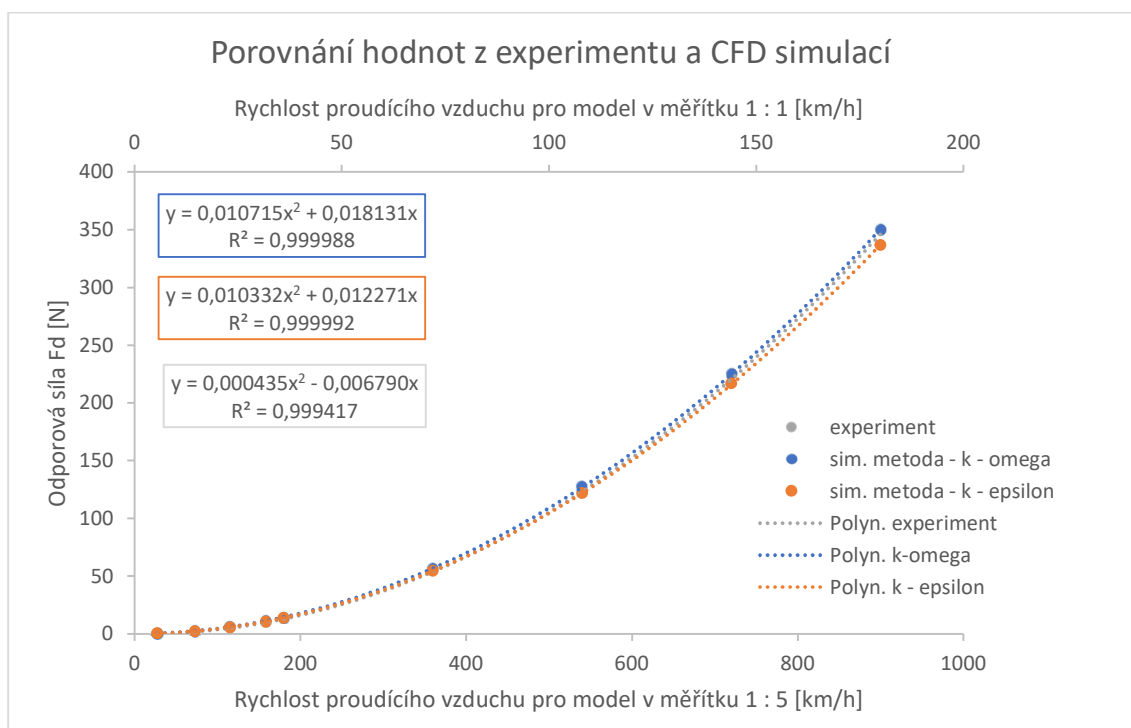
V *Grafu 5* jsou znázorněny výsledky odporové síly  $F_D$  ze scénářů simulačních metod pro model motocyklu v měřítku 1 : 1 při rychlostech do  $v = 50 \frac{\text{m}}{\text{s}}$  včetně. Tato data jsou proložena kvadratickou regresí experimentálně naměřených dat na modelu motocyklu v měřítku 1 : 5 do rychlosti  $250 \frac{\text{m}}{\text{s}}$ . Predikovaná data z experimentálního měření se shodují s daty naměřenými pomocí CFD simulací.

## 6 Výsledky CFD simulací a diskuze



Graf 5 – Výsledné hodnoty simulací pro rychlosti do 50 m/s proložené kvadratickou regresí z exp. měření

V okamžiku provozního používání motocyklu jsou užívány hodnoty rychlosti  $v$  v jednotkách  $\frac{\text{km}}{\text{h}}$ . Z důvodu lepší představy naměřených hodnot byl přidán Graf 6.



Graf 6 – Výsledné hodnoty simulací vyhodnocené pro km/h

## 6 Výsledky CFD simulací a diskuze

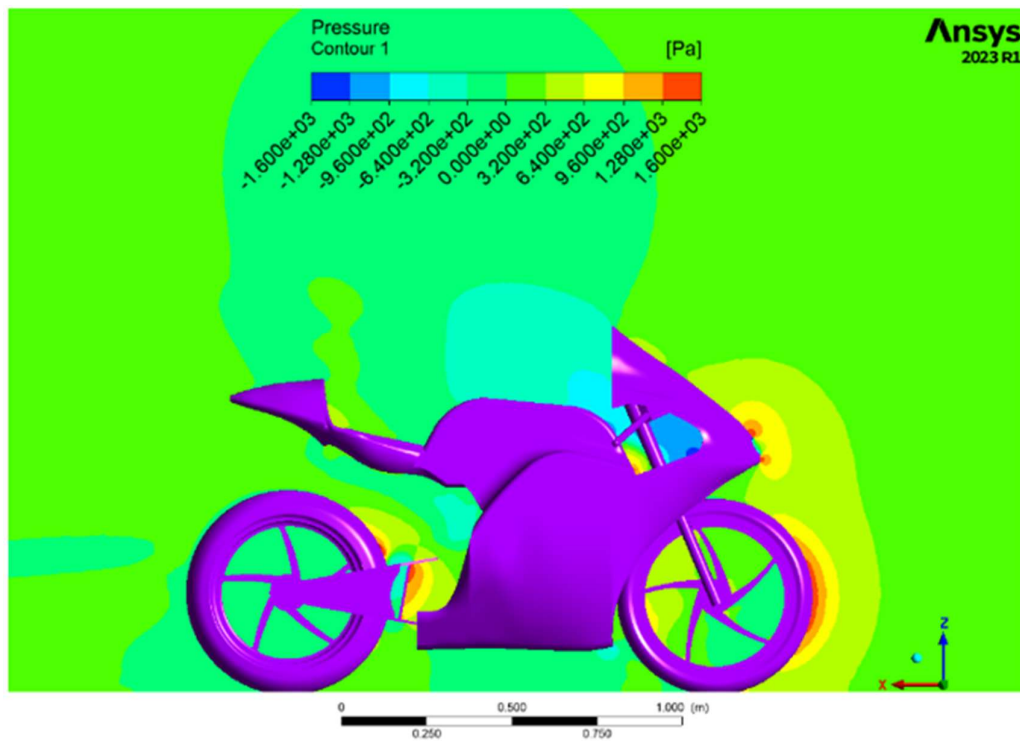
Pro účely stanovení hodnot aerodynamického odporu motocyklu byly obě simulační metody uznány za vhodné. Rozdílnost geometrií modelů motocyklu pro experimentální měření s modelem pro CFD simulace neměla závažný vliv na validaci těchto hodnot. Výsledky jsou řádově stejné a liší se pouze o jednotky procent. V *Tabulce 12* jsou zobrazeny hodnoty porovnávající koeficient kvadratické regrese a koeficient spolehlivosti  $R$  z naměřených dat při experimentálním měření s daty získanými pomocí CFD simulace. Koeficient spolehlivosti  $R$  se vůči oběma simulačním metodám prakticky neliší. Rozdíl je patrný při porovnání s koeficientem spolehlivosti kvadratické regrese experimentálně naměřených dat. Prostřednictvím numerické analýzy jsou výsledky vyhodnocovány přesněji než na fyzickém experimentu, který může být zatížen větší mírou chybovosti. Koeficient regrese je obdobný pro obě simulační metody.

*Tabulka 12 – Porovnání hodnot koeficientu kvadratické regrese a koeficientu spolehlivosti z experimentálního měření s provedenými simulacemi*

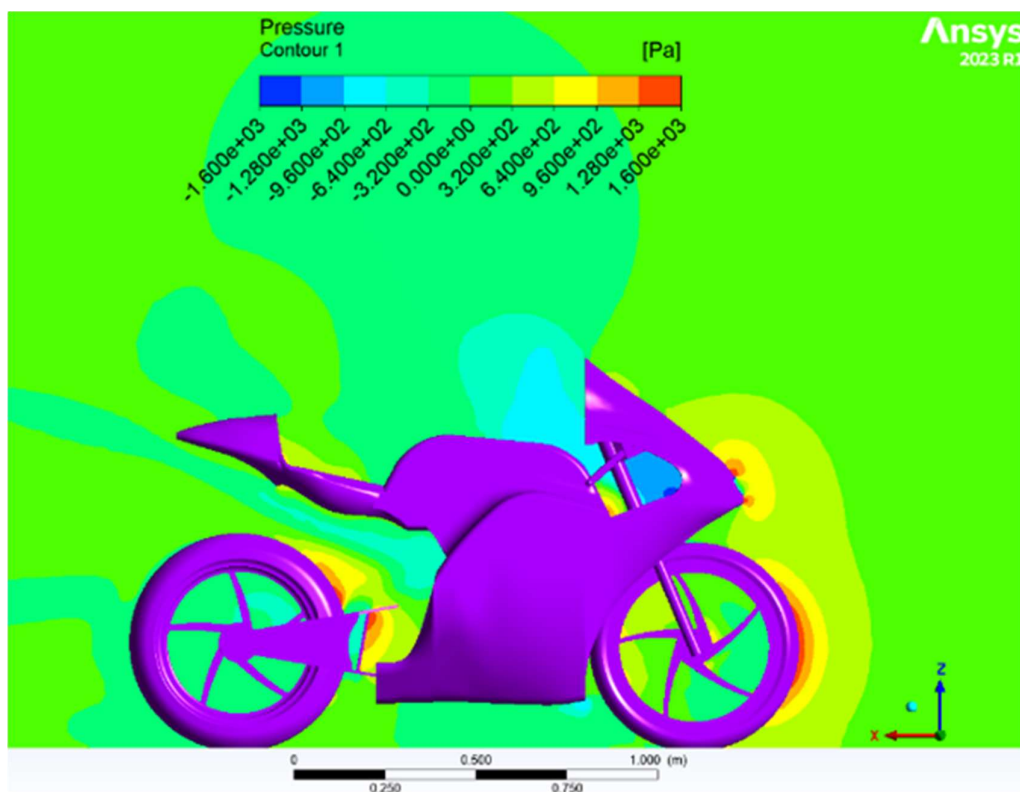
	experiment	$k - \omega SST$	$k - \varepsilon Realizable$
Koeficient regrese [kg/m]	0,005637	0,0138866	0,133897
Koeficient spolehlivosti $R$ [-]	0,999708	0,999994	0,999996

Na *Obrázcích 36 a 37* jsou porovnány tlakové kontury obtékaného vzduchu modelu v měřítku 1 : 1 pro scénáře řešené simulačními metodami  $k - \varepsilon Realizable$  a  $k - \omega SST$ . Kontury tlaku vzduchu jsou téměř totožné pro obě znázorněné situace a největší rozdíl je patrný v úplavu za aerodynamickým štítem řidiče. Na *Obrázku 36* je znázorněný úplav větší a spojený s horní plochou podsedlovky modelu motocyklu. Naopak na *Obrázku 37* je úplav těsně za aerodynamickým štítem řidiče intenzivnější a rozdělen zrychleným proudem vzduchu horizontální stěnou podsedlovky.

## 6 Výsledky CFD simulací a diskuze



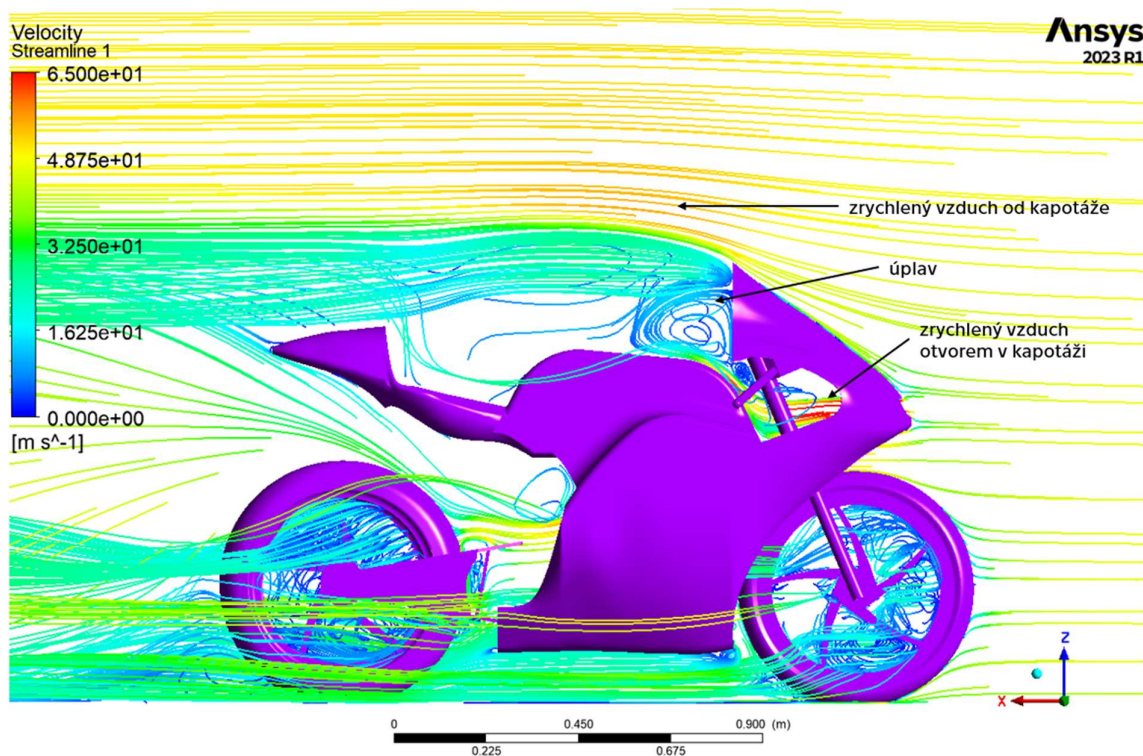
Obrázek 36 – Zobrazení tlakových kontur ze simulační metody  $k - \varepsilon$  Realizable



Obrázek 37 - Zobrazení tlakových kontur ze simulační metody  $k - \omega$  SST

## 6 Výsledky CFD simulací a diskuze

Pro lepší vizualizaci je na *Obrázku 38* zobrazen detail proudícího vzduchu okolo modelu motocyklu pomocí proudnic. Jedním z prostorů zrychleného vzduchu obtékajícího motocykl je vzduch v blízkosti odtokové hrany větrného štítu. Další prostor zrychleného vzduchu je v místech za otvorem v kapotáži motocyklu. Díky proudnicím může být pozorováno chování tohoto proudu vzduchu a jeho postupné zpomalení při obtékání krytu battery boxu a následující zacyklení v úplavu za větrným štítem. Díky vizualizaci proudění může být vyhodnoceno, že větrný štít je krucální k plynulému obtékání vzduchu okolo motocyklu a jeho parametry by měly být dostatečné pro částečné zakrytí jezdce.

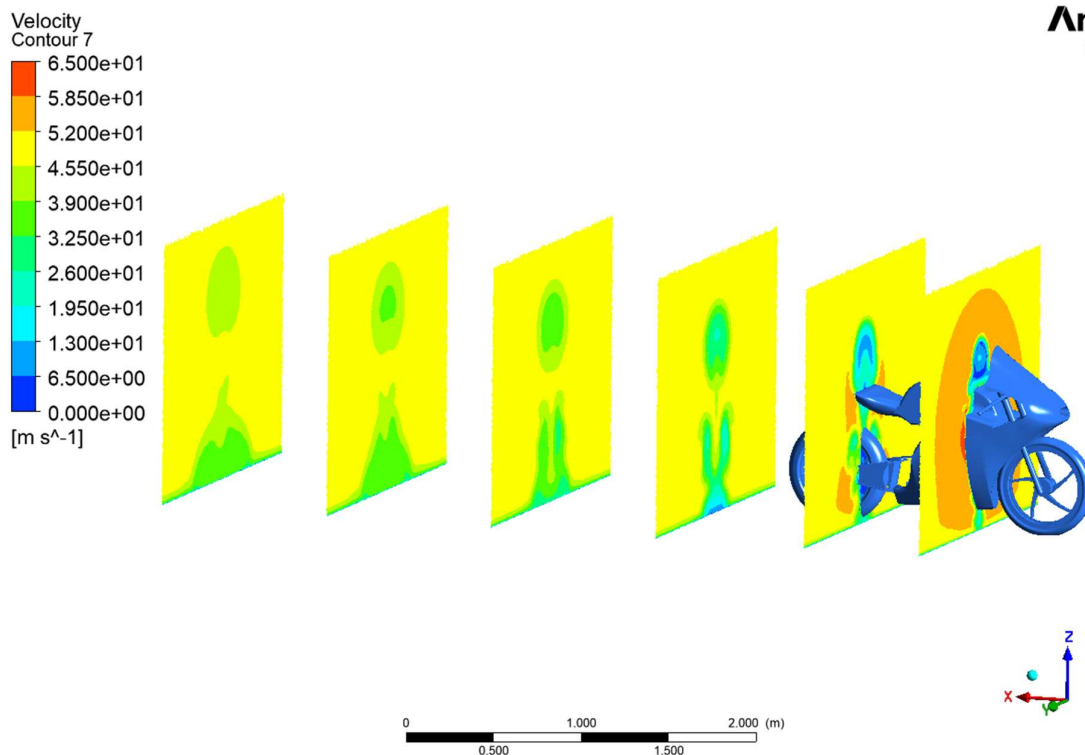


*Obrázek 38 – Detail zobrazení úplavu za větrným štítem pomocí proudnic; metoda  $k-\varepsilon$  Realizable,  $v = 50 \frac{m}{s}$*

V neposlední řadě byla provedena analýza vzduchu proudícího za modelem motocyklu, který je také ovlivněn geometrií motocyklu a rychlostí proudícího vzduchu. Na *Obrázku 39* jsou viditelné řezy proudícím vzduchem, na kterých je patrné zrychlení obtékajícího vzduchu až o 20 % okolo geometrie kapotáží motocyklu a postupné zpomalování s rostoucí vzdáleností od motocyklu. Každá projekční rovina za motocyklem je ve vzdálenosti 1 m.

## 6 Výsledky CFD simulací a diskuze

Ansys  
2023 R1



Obrázek 39 – Zobrazení rychlostí proudícího vzduchu za modelem motocyklu na řezech ve vzdálenosti 1 m

Odporová síla  $F_D$  není jediná veličina, která je důležitá pro analýzu výsledků CFD analýzy obtékání vzduchu okolo modelu motocyklu. Další z důležitých veličin je koeficient obtékání vzduchu tělesa  $c_x$ . V *Tabulce 13* jsou viditelné hodnoty  $c_x$  pro různé scénáře při použití simulační metody  $k-\varepsilon$  *Realizable* a  $k-\omega$  *SST*. Pro rychlosti  $v$  od  $10 \frac{\text{m}}{\text{s}}$  do  $50 \frac{\text{m}}{\text{s}}$  byla hodnota  $c_x$  pro jednotlivé simulační metody shodná. Pro vzájemné porovnání jsou zde uvedeny i hodnoty  $c_x$  vypočtené z naměřených dat během experimentu ve větrném tunelu.

## 6 Výsledky CFD simulací a diskuze

Tabulka 13 – Porovnání hodnot  $c_x$  pro oba simulační modely a experimentu

CFD simulace 1 : 1			Experiment 1 : 5	
Rychlost proudícího vzduchu $v$ [m/s]	Hodnota $c_x$ [-] pro simulační model $k - \omega SST$	Hodnota $c_x$ [-] pro simulační model $k - \varepsilon Realizabl$	Rychlost proudícího vzduchu při experimentu $v$ [m/s]	Hodnota $c_x$ [-] vypočtená z experimentálních dat
1,54	0,59	0,60	7,70	0,16
4,04	0,60	0,61	20,20	0,10
6,40	0,62	0,60	32,00	0,10
8,80	0,62	0,60	44,00	0,10
10–50	0,62	0,59	50,00	0,11

Stanovené hodnoty koeficientu  $c_x$  získané CFD simulacemi se liší od hodnot vypočtených na základě naměřených dat během experimentu ve větrném tunelu. Jedním z možných odůvodnění těchto rozdílů je, že teoretický vzorec odporové síly  $F_D$  vzorec použitý pro výpočet koeficientu  $c_x$  není vhodný pro geometricky složitě těleso jako je motocykl. Stanovení koeficientu  $c_x$  pomocí tohoto výpočtu dává dobré výsledky pro jednoduchá tělesa, pro složitější geometrii je vhodné stanovovat koeficient  $c_x$  numerickými simulačními metodami, jež by pro tyto případy měly být daleko přesnější a měly by být zohledněny pro vývoj dalšího motocyklu studentského závodního týmu CTU Lions.

Je nutné ale zmínit, že výsledky simulace zohledňují pouze jeden ideální stav s řadou zjednodušení. Při reálné jízdě na závodním okruhu vstupují do proudění obtékajícího vzduchu další vlivy, které chování proudu vzduchu velmi ovlivňují. Příkladem může být boční vítr, klonění a klopení motocyklu, pohyb jezdce na motocyklu nebo ovlivnění od jízdy ostatních motocyklů.



## Závěr

Cílem této práce bylo rozšíření stávajících poznatků a identifikace klíčových faktorů ohledně problematiky CFD analýzy obtékání vzduchu okolo motocyklu. Poznatky byly použity pro hlubší pochopení aerodynamických vlastností modelu motocyklu.

V první části práce byly uvedeny a zpřesněny výsledky experimentálního zkoumání aerodynamického proudění okolo modelu motocyklu v měřítku 1:5 z předešlé závěrečné práce autora. V teoretické části byla popsána stručná historie CFD analýzy a popsány stěžejní termíny používané pro CFD simulace. Na následujících stránkách bylo popsáno využití CFD simulací s dalším zaměřením na aplikaci CFD analýzy v kontextu motocyklů.

V praktické části práce byly vypracovány vzorové benchmark úlohy ve 2D a 3D prostředí CFD simulací, na nichž byla osvojena problematika nastavení a vyhodnocování dat z CFD analýzy. Dále byla popsána tvorba vhodného 3D modelu motocyklu, který byl zkoumaným tělesem různých scénářů CFD simulací obtékání vzduchu. V neposlední řadě byla provedena validace hodnot získaných pomocí CFD simulace s experimentálně naměřenými daty, která pokračovala predikcí zkoumaných veličin na reálném motocyklu, jež nemohly být experimentálně ověřeny na menším modelu. Numericky vyhodnocené hodnoty veličin se shodovaly s experimentálním měřením. Jejich přepočtení není možné z důvodu komplexní geometrie motocyklu.

Provedená CFD analýza se zaměřila na jeden ideální případ jízdy motocyklu s ustáleným proudem vzduchu před modelem motocyklu. Tyto podmínky jsou vhodné pro analyzování obtékajícího proudu vzduchu okolo kapotáží motocyklu.

Poznatky nabyté těmito simulacemi budou využity pro přípravy a vývoj motocyklu CTU Lions EVO 4.0. Díky osvojení problematiky CFD simulací obtékání vzduchu okolo modelu motocyklu mohou být věrohodně testovány aerodynamické vlastnosti různých úprav geometrie motocyklu a kapotáží.

Práce může být zdrojem pro další výzkum aerodynamiky motocyklu pomocí uvedených metod, kterému bych se rád věnoval v následujícím studiu.

## Citovaná literatura

- [1] ENGINEERS EDGE. Viscosity of Air, Dynamic and Kinematic [online]. 2000 [cit. 2024-04-24]. Dostupné z: [https://www.engineersedge.com/physics/viscosity\\_of\\_air\\_dynamic\\_and\\_kinematic\\_14483.htm](https://www.engineersedge.com/physics/viscosity_of_air_dynamic_and_kinematic_14483.htm)
- [2] SPRAYING SYSTEMS CO. CO JE CFD A PROČ JE DŮLEŽITÁ? [online]. 2024 [cit. 2024-05-11]. Dostupné z: <https://www.spray.com/cs-cz/blog/co-je-cfd-a-pro%C4%8D-je-d%C5%AFle%C5%BEit%C3%A9>
- [3] HU, Howard H. Computational Fluid Dynamics. Fluid Mechanics [online]. Elsevier, 2012, 421-472 [cit. 2024-05-11]. ISBN 9780123821003. Dostupné z: doi:10.1016/B978-0-12-382100-3.10010-1
- [4] FEMTO I ENGINEERING. What is CFD? [online]. 2017 [cit. 2024-05-11]. Dostupné z: <https://www.femto.eu/stories/what-is-cfd/>
- [5] VŠCHT. Obecně o CFD [online]. [cit. 2024-05-03]. Dostupné z: <https://e-learning.vscht.cz/mod/page/view.php?id=63542&lang=en>
- [6] Real-world Examples of CFD simulation in Action [online]. [cit. 2024-05-12]. Dostupné z: <https://www.mr-cfd.com/real-world-examples-of-cfd-simulation-in-action/>
- [7] AWATI, Rahul. What is 3D mesh? [online]. 2024 [cit. 2024-05-12]. Dostupné z: <https://www.techtarget.com/whatis/definition/3D-mesh>
- [8] GMS:2D Mesh Polygon Attributes [online]. [cit. 2024-05-12]. Dostupné z: [https://www.xmswiki.com/wiki/GMS:2D\\_Mesh\\_Polygon\\_Attributes](https://www.xmswiki.com/wiki/GMS:2D_Mesh_Polygon_Attributes)
- [9] 3d Digital Recording of Archaeological, Architectural and Artistic Heritage [online]. [cit. 2024-05-12]. Dostupné z: doi:10.4312/9789612378981
- [10] LEAP AUSTRALIA. TIPS & TRICKS: INFLATION LAYER MESHING IN ANSYS [online]. 2012 [cit. 2024-05-12]. Dostupné z: <https://www.computationalfluidynamics.com.au/tips-tricks-inflation-layer-meshing-in-ansys/>
- [11] CURRIE, Grant, Nick OSBOURNE a Dominic GROULX. Numerical Modelling of a Three-Bladed NREL S814 Tidal Turbine [online]. 2016 [cit. 2024-05-12]. Dostupné z: [https://www.researchgate.net/publication/306452927\\_Numerical\\_Modelling\\_of\\_a\\_Three-Bladed\\_NREL\\_S814\\_Tidal\\_Turbine](https://www.researchgate.net/publication/306452927_Numerical_Modelling_of_a_Three-Bladed_NREL_S814_Tidal_Turbine)
- [12] NIGAM, Mats. How to Place Inlet and Outlet Boundary Conditions in CFD Simulations [online]. 2018 [cit. 2024-05-12]. Dostupné z: <https://www.comsol.com/blogs/how-to-place-inlet-and-outlet-boundary-conditions-in-cfd-simulations/>
- [13] Ansys Fluent User's Guide [classified]. Ansys Inc. 2023.
- [14] IFES GMBH. COMPUTATIONAL FLUID DYNAMICS (CFD) [online]. [cit. 2024-05-12]. Dostupné z: <https://www.ifes-koeln.de/en/services-20-years-project-experience/simulation-analysis/computational-fluid-dynamics-cfd.html>
- [15] SKOTNY, Łukasz. 2D vs 3D Finite Element Analysis (with examples) [online]. 2020 [cit. 2024-05-12]. Dostupné z: <https://enterfea.com/2d-vs-3d-finite-element-analysis/>

## Citovaná literatura

- [16] BAKKER, A. Lectures on Applied Computational Fluid Dynamics [online]. 2008 [cit. 2024-05-02]. Dostupné z: [www.bakker.org](http://www.bakker.org)
- [17] KAWAGUTI, M. Numerical Solution of the NS Equations for the Flow Around a Circular Cylinder at Reynolds Number 40. *Journal of Phy. Soc. Japan*. 1953, (8), 747-757.
- [18] ZÁCHA, Pavel. ČVUT. Metoda konečných objemů (MKO). In: *Energetika.cvut.cz* [online]. 2013 [cit. 2024-05-02]. Dostupné z: <http://energetika.cvut.cz/wp-content/uploads/CFD-pro-TT-P01-Zacha-MKO.pdf>
- [19] BLAZEK, Jiri. *Computational Fluid Dynamics: Principles and Applications*. 3. Butterworth-Heinemann, 2015. ISBN 978-0-08-099995-1. 10.1016/C2013-0-19038-1.
- [20] CFD-ONLINE.COM. K-omega models [online]. [cit. 2024-05-12]. Dostupné z: [https://www.cfd-online.com/Wiki/K-omega\\_models](https://www.cfd-online.com/Wiki/K-omega_models)
- [21] CFD SUPPORT. TCAE [online]. 2024 [cit. 2024-05-03]. Dostupné z: <https://www.cfdsupport.com/aircraft-aerodynamics-cfd.html>
- [22] FOALE, Tony. *Motorcycle Handling and Chassis Design*. 1. Spain: Tony Foale, 2002. ISBN 84-933286-3-4.
- [23] YILMAZ, Nadir. Effect of biodiesel–butanol fuel blends on emissions and performance characteristics of a diesel engine. *Fuel* [online]. 2014, 7 [cit. 2024-05-03]. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0016236114005882>
- [24] BANGLIN, Deng, Chen YANGYANG, Hou KAIHONG a Fu JIANGIN. An experimental and numerical investigation on cycle-to-cycle variation of three different displacements single-cylinder motorcycle engines: The sequential analysis from intake to flame propagation process. *Fuel* [online]. 2020, 2020(275), 13 [cit. 2024-05-03]. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0016236120309418>
- [25] BAMBANG, Wahano, Setiawan ARDHKA a Lim OCKTAECK. Effect of the intake port flow direction on the stability and characteristics of the in-cylinder flow field of a small motorcycle engine. *Applied Energy* [online]. 2020, 2021(288), 18 [cit. 2024-05-03]. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0306261921001896>
- [26] LIBIN, Tan, Yuan YUEJIN, Tang LIN a Huang CAN. Numerical simulation on fluid flow and temperature prediction of motorcycles based on CFD. *Alexandria Engineering Journal* [online]. 2021, 2022, 21 [cit. 2024-05-03]. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1110016822004537>
- [27] BEDNAR, Marek. Jak funguje výfuk? A kde se bere či ztrácí zvuk vašeho auta? [online]. 2015 [cit. 2024-05-03]. Dostupné z: <https://www.autoforum.cz/technika/jak-funguje-vyfuk-a-kde-se-bere-ci-ztraci-zvuk-vaseho-auta/>
- [28] RAHIMI JOKANDAN, Motaleb, Ali SAFARI VARIANI a Saeid AHMADI. Study of acoustic and aerodynamic performance of reactive silencer with different configurations: Theoretical, modeling and experimental. *Heliyon* [online]. 2023, 9(9), 20 [cit. 2024-05-03]. ISSN 24058440. Dostupné z: [doi:10.1016/j.heliyon.2023.e20058](https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e20058)
- [29] SONAWANE, Chandrakant, Pratyush RATH, Nishant VATS, Shreyas PATEKAR, Prakhar VERMA a Anand PANDEY. Numerical simulation to evaluate the thermal performance of engine cylinder Fins: Effect of fin geometry and fin material. *Materials Today: Proceedings* [online]. 2022, 49, 1590-1598 [cit. 2024-05-05]. ISSN 22147853. Dostupné z: [doi:10.1016/j.matpr.2021.07.416](https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.07.416)
- [30] WIRSKI, Krzysztof a Adam PIECHNA. Comprehensive CFD Aerodynamic Simulation of a Sport Motorcycle. *Energies* [online]. 2022, 15(16) [cit. 2024-05-04]. ISSN 1996-1073. Dostupné z: [doi:10.3390/en15165920](https://doi.org/10.3390/en15165920)

## Citovaná literatura

- [31] CAMERON, Kevin. CYCLE WORLD. What Do MotoGP Winglets Do? [online]. 2020 [cit. 2024-05-04]. Dostupné z: <https://www.cycleworld.com/story/motorcycle-racing/what-do-motogp-winglets-do/>
- [32] OKRUHARI.CZ. TECHNIKA MOTOCYKLU - křídélka - rychlejší nebo ne? [online]. 2016 [cit. 2024-05-04]. Dostupné z: <https://www.okruhari.cz/technika/technika-motocyklu-kridelka-rychlejsi-nebo-ne-/>
- [33] FUKA, Vladimír. UNIVERZITA KARLOVA V PRAZE MATEMATICKO-FYZIKÁLNÍ FAKULTA. Modelování proudění ve vysokém rozlišení. 1. 2006, 70 s. Dostupné také z: [https://dspace.cuni.cz/bitstream/handle/20.500.11956/7704/DPTX\\_\\_2004\\_\\_1\\_\\_11320\\_\\_NSZZ016\\_\\_214923\\_\\_0\\_\\_41983.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://dspace.cuni.cz/bitstream/handle/20.500.11956/7704/DPTX__2004__1__11320__NSZZ016__214923__0__41983.pdf?sequence=1&isAllowed=y)
- [34] All there is to know about different mesh types in CFD! [online]. [cit. 2024-05-08]. Dostupné z: <https://www.manchestercfd.co.uk/post/all-there-is-to-know-about-different-mesh-types-in-cfd>
- [35] MENTER, F.R. ANSYS. Best Practice: Scale-Resolving Simulations in ANSYS CFD. 2.00. 2015. Dostupné také z: [https://cfd.grs.de/sites/default/files/downloads/ansys/ANSYS\\_\\_BPG-SRS-2.01.pdf](https://cfd.grs.de/sites/default/files/downloads/ansys/ANSYS__BPG-SRS-2.01.pdf)
- [36] LANFRIT, Marco. Best practice guidelines for handling Automotive External Aerodynamics with FLUENT [online]. Darmstadt/Germany, 2005, 14 [cit. 2024-05-09]. Dostupné z: <https://drive.google.com/file/d/0B9wOrrFpsUb3d1YydGpDYW9ReTg/edit?resourcekey=0-Q24uoWYFf4PflgS1T5HDOg>
- [37] LAUSOVÁ, Lenka, Ivan KOLOŠ a Vladimíra MICHALCOVÁ. Comparison of 2D Grid Simulations for Flow Past Cylinder at High Reynolds Numbers. Civil and Environmental Engineering [online]. 2019, 15(1), 70-78 [cit. 2024-05-07]. ISSN 2199-6512. Dostupné z: doi:10.2478/cee-2019-0010
- [38] AHMED, S., G. RAMM a G. FALTIN. Some Salient Features Of The Time-Averaged Ground Vehicle Wake. International Congress & Exposition, Detroit, Michigan. 1984, 34.
- [39] Ahmed body [online]. 2015 [cit. 2024-05-08]. Dostupné z: [https://www.cfd-online.com/Wiki/Ahmed\\_body](https://www.cfd-online.com/Wiki/Ahmed_body)
- [40] SIRIUS CFD. Part 3a - ANSYS Fluent for Vehicle Aerodynamics. In: Youtube.com [online]. 2012 [cit. 2024-05-14]. Dostupné z: [https://www.youtube.com/watch?v=p\\_1eostB3WY&t=4s](https://www.youtube.com/watch?v=p_1eostB3WY&t=4s)
- [41] MENTER, F. Zonal Two Equation k-w Turbulence Models For Aerodynamic Flows. 23rd Fluid Dynamics, Plasmadynamics, and Lasers Conference [online]. Reston, Virginia: American Institute of Aeronautics and Astronautics, 1993, - [cit. 2024-05-14]. Dostupné z: doi:10.2514/6.1993-2906
- [42] Regresní a korelační analýza [online]. [cit. 2024-05-14]. Dostupné z: [https://www.fd.cvut.cz/departament/k611/pedagog/k611tho\\_\\_soubory/0\\_\\_regrese.pdf](https://www.fd.cvut.cz/departament/k611/pedagog/k611tho__soubory/0__regrese.pdf)

## Seznam obrázků

Obrázek 1 – znázornění charakteristické délky na motocyklu .....	9
Obrázek 2 – Příklady sítě; vlevo mapa – 2D síť, vpravo králík – 3D síť [8] [9].....	14
Obrázek 3 – Příklad prizmatické vrstvy [11].....	14
Obrázek 4 – Kawagutiho numerická analýza obtékání válce [17] .....	17
Obrázek 5 – Vizualizace proudění vzduchu okolo leteckého motoru [21].....	18
Obrázek 6 – Vizualizace rychlosti proudění do válce motoru [24].....	21
Obrázek 7 – Rychlost proudění výfukových plynů ve výfuku [26].....	21
Obrázek 9 – Porovnání geometrie žebrování válce s teplotní charakteristikou [29].....	22
Obrázek 10 – Vizualizace turbulentního proudění díky CFD simulaci [30].....	23
Obrázek 11 – Vizualizace proudění okolo wingletu neboli „křídélka“ kapotáže [31] .....	24
Obrázek 12 – Postup CFD simulace .....	25
Obrázek 13 – Nejčastější typy sítí [34].....	27
Obrázek 14 – Výčet všech možných simulačních metod pro simulování proudění tekutin v softwaru Ansys Fluent.....	29
Obrázek 15 – Geometrie pro vyřešení benchmarkového obtékání vzduchu okolo kruhu [37].....	30
Obrázek 16 – Detail sítě pro 2D úlohu obtékání kruhu; Udávané měřítko je v metrech	31
Obrázek 17 – Rozměry tělesa tzv. Ahmed body ze tří různých pohledů; Udávané hodnoty jsou v milimetrech [39].....	33
Obrázek 18 – Rozměry prostoru pro simulaci proudění okolo zkoumaného tělesa.....	34
Obrázek 19 – Přejít na prizmatické vrstvy na podlahu .....	35
Obrázek 20 – Zobrazení sítě okolo zkoumaného tělesa .....	35
Obrázek 21 – Kontury rychlosti obtékaného vzduchu okolo zkoumaného tělesa .....	37
Obrázek 22 – Detail kontur rychlosti obtékaného vzduchu okolo tělesa.....	38
Obrázek 23 – Blokové schéma postupu praktické části práce .....	39
Obrázek 24 – Příklad mračna bodů naměřených scannerem Leica .....	40
Obrázek 25 – Postup řezání kapotáží za účelem vymodelování 3D tělesa .....	41
Obrázek 26 – Nepřesnosti na profilu kapotáže v mm.....	42
Obrázek 27 – Model motocyklu pro CFD simulace 1 .....	43
Obrázek 28 - Model motocyklu v měřítku 1 : 5 .....	43
Obrázek 29 – Motocykl CTU Lions EVO 2.0 .....	44
Obrázek 30 – Podmínky experimentu na aerodynamických vahách ve větrném tunelu	45
Obrázek 31 – Velikost simulačního prostoru pro obtékání vzduchu modelu motocyklu .....	46
Obrázek 32 – Zobrazení sítě okolo modelu motocyklu v měřítku 1 : 1 .....	48

## Seznam obrázků a tabulek

---

Obrázek 33 – Vizualizace rychlosti proudícího vzduchu okolo modelu motocyklu v měřítku 1 : 1, 10 m/s .....	54
Obrázek 34 – Vizualizace rychlosti proudícího vzduchu okolo modelu motocyklu v měřítku 1 : 5, 50 m/s .....	54
Obrázek 35 – Detail kontur obtékaného vzduchu v závislosti na rychlosti pro model 1 : 1, 36 km/h.....	55
Obrázek 36 – Tlakové kontury zobrazené na modelu motocyklu v měřítku 1 : 1 .....	56
Obrázek 37 – Zobrazení tlakových kontur ze simulační metody $k - \varepsilon$ Realizable .....	59
Obrázek 38 - Zobrazení tlakových kontur ze simulační metody $k - \omega$ SST .....	59
Obrázek 39 – Detail zobrazení úplavu za větrným štítem pomocí proudnic; metoda $k - \varepsilon$ Realizable, $v = 50ms$ .....	60
Obrázek 40 – Zobrazení rychlostí proudícího vzduchu za modelem motocyklu na řezech ve vzdálenosti 1 m.....	61

## Seznam grafů

Graf 1 – Zobrazení naměřených dat ve větrném tunelu proložených parabolou.....	12
Graf 2 – Porovnání hodnot z experimentu a CFD simulací.....	50
Graf 3 – Výsledné hodnoty simulací pro shodné hodnoty Re pro simulační metodu $k - \omega$ SST .....	52
Graf 4 – Výsledné hodnoty simulací pro shodné hodnoty Re při simulačním modelu $k - \varepsilon$ Realizable.....	53
Graf 5 – Výsledné hodnoty simulací pro rychlosti do 50 m/s proložené kvadratickou regresí z exp. měření .....	57
Graf 6 – Výsledné hodnoty simulací vyhodnocené pro km/h .....	57

## Seznam Tabulek

Tabulka 1 – Výpočet hodnoty Re pro model motocyklu v měřítku 1 : 5 a 1 : 1 .....	10
Tabulka 2 – Naměřená data na aerodynamických vahách .....	11
Tabulka 3 – Geometrie prostoru 2D úlohy.....	31
Tabulka 4 – Základní parametry simulace [37].....	32
Tabulka 5 – Porovnání hodnot [37] .....	32
Tabulka 6 – Základní parametry simulace [39].....	36
Tabulka 7 – Seznam provedených CFD simulací pro modely SST $k - \omega$ a $k - \varepsilon$ Realizable .....	45
Tabulka 8 – Rozměry modelů motocyklu pro CFD analýzu.....	47
Tabulka 9 – Nastavení základních parametrů simulací [13] .....	48
Tabulka 10 – Porovnání hodnot koeficientu kvadratické regrese a koeficientu spolehlivosti .....	51
Tabulka 11 - výpočty Re pro různé velikosti modelu .....	52

Tabulka 12 – Porovnání hodnot koeficientu kvadratické regrese a koeficientu spolehlivosti z experimentálního měření s provedenými simulacemi ..... 58

Tabulka 13 – Porovnání hodnot  $c_x$  pro oba simulační modely a experimentu ..... 62

## Seznam příloh

1. Data naměřená na modelu motocyklu v měřítku 1 : 5 ve větrném tunelu
2. Data vyhodnocená z CFD simulací