

Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava

Fakulta strojní

**Optimalizace tvaru motocyklové přilby za účelem snížení
odporu vzduchu**

Optimizing Shape of Motorcycle Helmet to Reduce
Drag Force

Student:

Bc. Karel Koutek

Vedoucí diplomové práce:

Ing. Pavel Dresler Ph.D.

Datum odevzdání:

20.5.2019

Ostrava 2019

Zadání diplomové práce

Student: **Bc. Karel Koutek**

Studijní program: N2301 Strojní inženýrství

Studijní obor: 2301T003 Dopravní technika a technologie

Specializace: 20 Silniční doprava

Téma: **Optimalizace tvaru motocyklové přilby za účelem snížení odporu
vzduchu**
Optimizing Shape of Motorcycle Helmet to Reduce Drag Force

Jazyk vypracování: čeština

Zásady pro vypracování:

Cíl práce:

Cílem diplomové práce je optimalizace tvaru motocyklové přilby vedoucí ke snížení aerodynamického odporu vzduchu za využití metody reverzního inženýrství.

Postup řešení:

1. Úvod.
2. Teoretický rozbor současného stavu poznání z oblasti aerodynamiky.
3. Návrh metodiky řešení.
4. Aplikace metody reverzního inženýrství na vybranou motocyklovou přilbu.
5. Definice okrajových podmínek a tvorba výpočetního modelu.
6. Analýza výsledků a návrh úprav motocyklové přilby.
7. Vyhodnocení a doporučení.
8. Závěr.

Seznam doporučené odborné literatury:

HUCHO, Wolf-Heinrich. Aerodynamics of road vehicles: from fluid mechanics to vehicle engineering. 4th ed. Warrendale, PA: Society of Automotive Engineers, 1998. ISBN 978-0768000290.

DRÁBKOVÁ, Sylva. Mechanika tekutin [online]. Ostrava: Vysoká škola báňská - Technická univerzita, 2008. ISBN 978-80-248-1508-4.

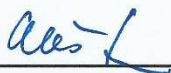
User Guide Manual for selected Software

Formální náležitosti a rozsah diplomové práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

Vedoucí diplomové práce: **Ing. Pavel Dresler**

Datum zadání: 21.12.2018

Datum odevzdání: 20.05.2019



doc. Ing. Aleš Slíva, Ph.D.
vedoucí katedry



prof. Ing. Ivo Hlavatý, Ph.D.
děkan fakulty

Prohlášení diplomanta

Prohlašuji, že jsem celou diplomovou práci včetně příloh vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a uvedl jsem všechny použité podklady a literaturu.

V Ostravě 20. 5. 2019

.....

Bc Karel Koutek

Prohlašuji, že

jsem byl seznámen s tím, že na moji diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., autorský zákon, zejména § 35 – užití díla v rámci občanských a náboženských obřadů, v rámci školních představení a užití díla školního a § 60 – školní dílo.

Beru na vědomí, že Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava (dále jen „VŠB-TUO“) má právo nevýdělečně ke své vnitřní potřebě diplomovou práci užít (§ 35 odst. 3).

Souhlasím s tím, že diplomová práce bude v elektronické podobě uložena v Ústřední knihovně VŠB-TUO k nahlédnutí a jeden výtisk bude uložen u vedoucího diplomové práce. Souhlasím s tím, že údaje o kvalifikační práci budou zveřejněny v informačním systému VŠB-TUO.

Bylo sjednáno, že s VŠB-TUO, v případě zájmu z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít dílo v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona.

Bylo sjednáno, že užít své dílo – diplomovou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem VŠB-TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB-TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše).

Beru na vědomí, že odevzdáním své práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů, bez ohledu na výsledek její obhajoby.

V Ostravě: 20.5.2019

.....

podpis

Bc Karel Koutek

Otrokovice, Nivy 1503, 765 02

Poděkování

Děkuji vedoucímu diplomové práce Ing. Pavlovi Dreslerovi, Ph.D. za jeho čas a ochotu poskytnout mi cenné rady a doporučení v průběhu zpracovávání diplomové práce.

Anotace diplomové práce

KOUTEK, K. *Optimalizace tvaru motocyklové přilby za účelem snížení odporu vzduchu*. Ostrava: Fakulta strojní, VŠB – Technická univerzita Ostrava, 2019, Diplomová práce, Vedoucí práce: Ing. Pavel Dresler, Ph.D.

Cílem této diplomové práce je pomocí metody reverzního inženýrství optimalizovat tvar motocyklové přilby za účelem snížení odporu vzduchu. V první části bude teoreticky popsána problematika mechaniky tekutin, především obtékání těles, aerodynamika a odpory vozidel proti pohybu. Druhá část práce se zaměří na optimalizaci tvaru reálné přilby pomocí metody reverzního inženýrství. Budou provedeny simulace jednotlivých úprav a následně jejich vyhodnocení s ohledem na nejvyšší zlepšení celkového odporu vzduchu motocyklové přilby.

Klíčová slova: přilba, Aerodynamika, simulace odporu vzduchu, SolidWorks, Star-CCM+

Annotation of master thesis

KOUTEK, K. *Optimizing Shape of Motorcycle Helmet to Reduce Drag Force*. Ostrava, Institute of Transport, Faculty of Mechanical Engineering, VŠB – Technical University of Ostrava, 2019, Master thesis, head: Ing. Pavel Dresler, Ph.D.

The aim of this master thesis is to use the reverse engineering method to optimize the shape of the motorcycle helmet to reduce drag force. The first part contains theoretically described matters of fluid mechanics, especially the body circumfluence, aerodynamics vehicle motion resistances. The second part of the thesis focuses on the optimization of the shape of the real helmet using the reverse engineering method. Simulations of individual adjustments will be made, followed by their evaluation with respect to the overall improvement in overall air resistance of motorcycle helmets.

Keywords: helmet, aerodynamics, simulation of air assistance, SolidWorks, Star-CCM +

OBSAH

Úvod	10
1 Teoretický rozbor řešené problematiky z oblasti aerodynamiky	11
1.1 Mechanika tekutin.....	12
1.2 Proudění tekutiny	14
1.3 Obtékání těles	21
1.4 Obtékání dopravních prostředků.....	28
2 Aerodynamika motocyklové přilby	32
2.1 Historie.....	32
2.2 Požadavky na bezpečnost	33
2.3 Aerodynamika motocyklové přilby	33
2.4 Návrh přilby.....	34
3 Návrh metodiky řešení.....	37
3.1 Tvorba geometrie modelu	37
3.2 Definice výpočetní oblasti	37
3.3 Výpočetní síť	38
3.4 Definice okrajových podmínek.....	38
3.5 Nastavení výpočtu.....	39
4 Aplikace metody reverzního inženýrství.....	41
4.1 Skenování přilby	41
5 Definice okrajových podmínek a tvorba výpočetního modelu.....	46
5.1 Import CAD dat	46
5.2 Definice výpočetní oblasti	47
6 Analýza výsledků a návrh úprav	50
6.1 Simulace motocyklové přilby	50
7 Vyhodnocení.....	61
7.1 Vyhodnocení simulací	61
8 Závěr.....	63

Seznam použitého značení a symbolů

CAD	Computer aided design
CFD	Computational fluid dynamics
Cx	Koeficient (součinitel) aerodynamického odporu
DIN	Deutsches Institut für Normung e. V.
DNS	Direct Numerical Simulation
DOT	U.S. Department of Transportation
ECE	Economic Commission for Europe
FIA	Fédération Internationale de l'Automobile
FMVSS	Federal Motor Vehicle Safety Standards
LES	Large Eddy Simulation
RANS	Reynolds Average Navier-Stokes
Re	Reynoldsovo číslo
USA	United States of America
ΔE_k	kinetická energie
ΔE_p	potenciální energie

ÚVOD

Práce se zabývá problematikou odporu vzduchu generovaným motocyklovou přilbou. Motorová vozidla jsou v dnešní době nedílnou součástí každodenního života. Požadavky na snížení odporu vozidel, tedy i spotřeby paliva, jsou pro budoucnost těchto vozidel klíčové. U automobilů se již řadu let cíleně snižuje vzdušný odpor vozidel, a to především se zaměřením na snižování součinitele odporu vzduchu, v motocyklovém průmyslu tomu není jinak.

V současnosti je aerodynamika velmi komplexní vědou zabývající se prouděním kapaliny otékající objekty, které jsou stacionární nebo pohybující se. Při návrhu řady produktů v automobilovém, leteckém nebo fluidním průmyslu je obor aerodynamiky významný při samotném návrhu budoucího tvaru.

Cílem této diplomové práce je zhodnotit současný stav sériově vyráběné motocyklové přilby se zaměřením na celkový odpor vzduch. Bude se hodnotit její celkový vzdušný odpor a provede se lokalizace kritických míst, které budou mít výrazný vliv na aerodynamiku přilby jako celku. Následně budou navrženy úpravy pro ošetření těchto kritických míst. Takto upravené modely přilby budou pomocí simulace proudění v programu Star-CCM+ změřeny a posouzeny na celkový vzdušný odpor. Následně bude provedena kombinace úprav, které povedou ke snížení celkového odporu vzduchu přilby.

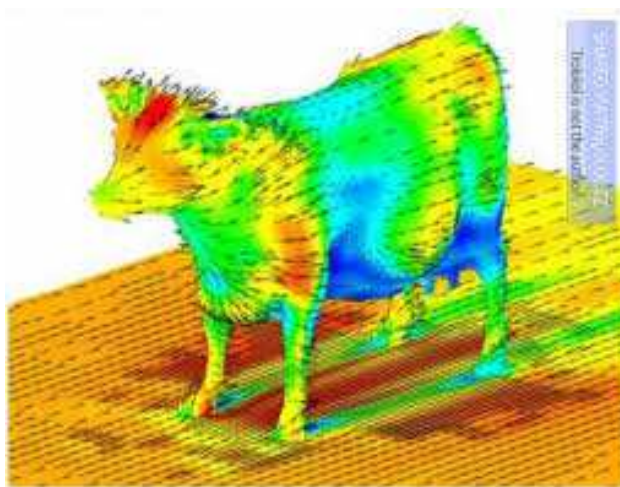
Konečným výsledkem bude návrh upravené přilby se změřeným celkovým odporem vzduchu a vyhodnocení úprav s ohledem na jejich přínos ke snížení celkového odporu vzduchu.

1 TEORETICKÝ ROZBOR ŘEŠENÉ PROBLEMATIKY Z OBLASTI AERODYNAMIKY

Aerodynamika je obor fyziky, speciálně mechaniky, zabývající se studiem pohybu plynů a jejich interakcí s pevnými objekty. Typickým příkladem je pohyb tekutiny kolem profilu křídla letadla. Při pohybu pevných látek v plynném prostředí jsou fyzikální principy jsou zcela identické. Na principu relativního pohybu se následně provádí analýza fyzikálních jevů. Většinou v případě, kdy je objekt v klidu a proudí kolem něj vzduch. Výměna referenčního stavu je aplikována v teoretické aerodynamice, která je základem většiny experimentálních metod, zejména aerodynamického tunelu. [16]

Aerodynamika je podoblast dynamiky kapalin a dynamiky plynů. Termín „aerodynamika“ je často používána jako synonymum pro dynamiku plynů s tím rozdílem, že „dynamika plynů“ je aplikována na studium pohybu všech plynů a není omezena pouze na vzduch. [16]

Studie aerodynamiky v moderním pojetí začaly v 18. století. Pozorování základních konceptů aerodynamiky jako např. aerodynamického odporu, byly však zaznamenány mnohem dříve. Z počátku se oboru aerodynamiky využívalo převážně v oblasti dosažení letu letadla těžšího než vzduch. Ten byl poprvé demonstrován bratry Wrighty v roce 1903. Od té doby využití aerodynamiky prostřednictvím matematické analýzy, empirických aproximací, experimentů v aerodynamických tunelech a počítačových simulací vytvořilo vědecký základ pro další vývoj letadel těžších než vzduch a mnoho dalších technologií. Současně směřování aerodynamiky se soustřeďuje na otázky týkající se vlivu stlačitelnosti vzduchu, turbulence a mezní vrstvy. [16]



Obrázek 1: ukázka CFD výpočtu aerodynamiky [5]

Dopravní prostředky a prvky s nimi spojené, např. motocyklové přilby, se pohybují v prostředí tvořeném vzduchem. Vzduch se fyzikálními vlastnostmi řadí mezi tekutiny a tvoří obal zeměkoule. Vzduch nemá zcela stálou konzistenci a jeho složení není vždy stejné. Dochází u něj ke změnám složení vlivem změny teploty a atmosférického tlaku. Nicméně i tak se dá procentuálně stanovit jeho složení (Tabulka 1). [3]

Tabulka 1: Složení vzduchu [3]

Hlavní plynná složka	Chemická značka	Suchý vzduch	Vlhký vzduch
		% objemu	% objemu
Dusík	N ₂	78,1	75,7
Kyslík	O ₂	20,9	20,3
Voda	H ₂ O	0	3,1
Argon	Ar	0,9	0,9

Další složky vzduchu tvoří v procentuálním objemu 1 %, proto je možné je zanedbat. Patří sem vzácné plyny, oxid uhličitý, neon, hélium, metan aj.). [3]

1.1 MECHANIKA TEKUTIN

Jedná se o část mechaniky, podobně jako je mechanika těles. Hlavním rozdílem těchto oblastí je pohyb molekul, u pevných těles mají molekuly vzájemné vazby pevné s velkým odporem vůči změnám tvaru. Zatímco molekuly tekutin mají mezi sebou daleko slabší vazby, a tudíž podléhají mnohem snáze změnám tvaru. Tekutiny nabývají vždy tvaru nádoby, ve které jsou uloženy. Tekutiny lze na základě reakce na změnu tlaku rozdělit na dvě základní skupiny: [3]

- **Stlačitelné tekutiny** – Jedná se o reálné kapaliny s vnitřním třením. Tyto kapaliny se dají stlačit. Vzájemné vazby mezi molekulami jsou relativně nízké, tyto tekutiny vyplňují celý objem nádoby, ve které se nachází. Jsou rozpínavé a podle stavu, ve kterém se nachází je můžeme rozdělit na páry a plyny. Jednotně je nazýváme vzdušniny.
- **Nestlačitelné tekutiny** – Jedná se o ideální kapaliny bez vnitřního tření. Tyto kapaliny se nedají stlačit a vazby mezi molekulami jsou výrazně silnější jak u

stlačitelných tekutin. Tyto tekutiny mají hustotu ve všech bodech konstantní, v tomto případě mluvíme o nulové objemové deformaci. [3]

1.1.1 HUSTOTA

Skutečná kapalina je definována hustotou, což je podíl hmotnosti vůči objemu u její elementární částice (Rovnice 1). V tomto stavu je kapalina v tlakové i teplotní rovnováze. [3]

Rovnice 1. Rovnice hustoty [3]

$$\rho = \frac{dm}{dV}$$

Kde:

ρ [kg·m⁻³] hustota

m [kg] hmotnost

V [m³] objem

1.1.2 VISKOZITA

Pohyb skutečné kapaliny je výrazně závislý na viskozitě. Viskozita souvisí s vnitřním třením proudícího vzduchu, což představuje sílu, která působí proti směru proudění částic vzduchu. V některých proudových polích jsou vlivy viskozity velmi malé a řešení výpočtů je mohou zanedbávat. Tyto aproximace se nazývají neviskózní proudy. Proudění vzduchu, u kterých není zanedbaný vliv viskozity se nazývají viskózní proudy. Obecně, viskozita vzduchu je míra tření mezi dvěma sousedními vrstvami proudícího plynu. [3]

Rovnice 2. Rovnice viskozity [3]

$$v = \frac{\eta}{\rho}$$

Kde:

η [Pa·s] dynamická viskozita

v [m²·s⁻¹] kinematická viskozita

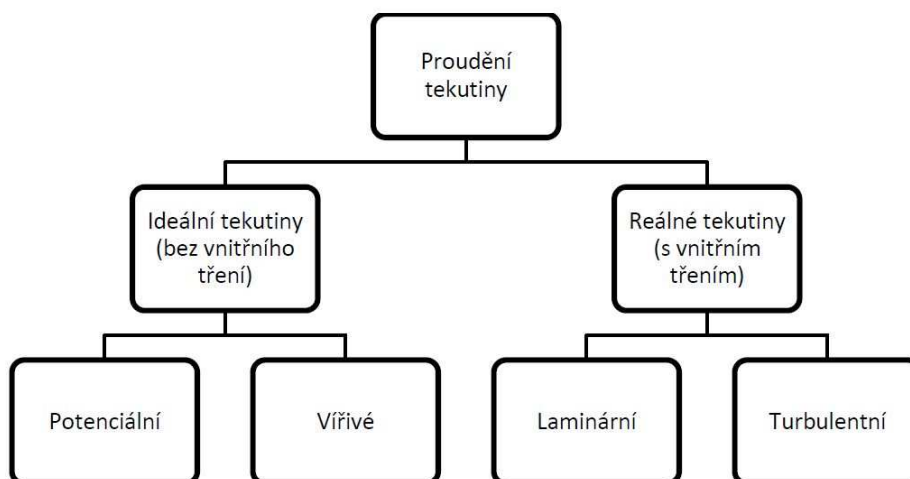
ρ [kg·m⁻³] hustota

1.2 PROUDĚNÍ TEKUTINY

Pro definování pohybu tekutiny kolem tělesa je nutné znát základní rozdělení proudění tekutin, a to jak z hlediska typu tekutiny, tak i prostředí, ve kterém se tekutina pohybuje. Z hlediska zkoumaného typu tekutiny dělíme tento obor na dvě odvětví:

- Hydrodynamika – zkoumaná látka je tekutina. Hlavní uplatnění má při vyšetřování proudění v potrubí nebo na volné hladině.
- Aerodynamika – zkoumanou látkou je plyn. Uplatnění v automobilovém, leteckém a stavebním průmyslu.

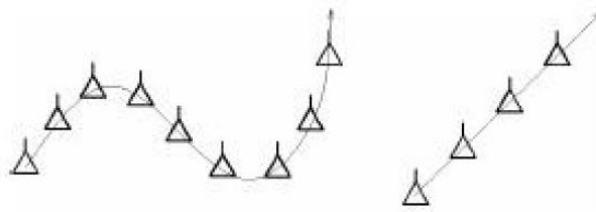
Proudění kapalin lze rozdělit dle několika kritérií (Obrázek 2). Hlavní rozdělení je z hlediska reálné či ideální kapaliny a následně z hlediska typu proudění. [8]



Obrázek 2. Rozdělení proudění tekutin podle fyzikálních vlastností [8]

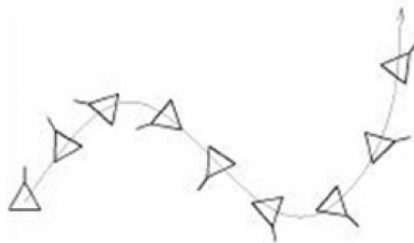
Proudění ideální tekutiny, neuvažuje se vnitřní tření v tekutině:

- Potenciální proudění – částice nerotuje kolem vlastní osy, pouze sleduje trajektorii svého pohybu. (Obrázek 3) [8]



Obrázek 3. Potenciální proudění [3]

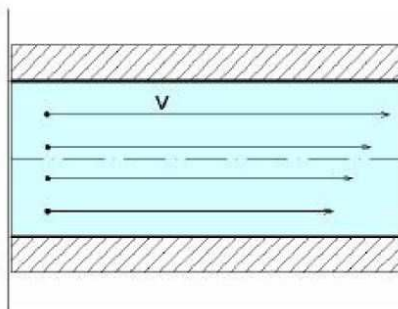
- Vířivé proudění – částice se pohybují po vlastní trajektorii pohybu a zároveň rotují kolem vlastní osy. (obrázek 4) [8]



Obrázek 4. Vířivé proudění [3]

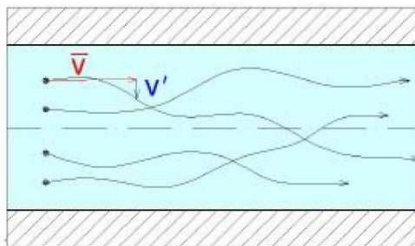
Prodění reálné tekutiny, uvažuje se vnitřní tření v tekutině:

- Laminární proudění – částic se pohybují po vrstvách, které jsou vzájemně rovnoběžné a neprotínají se. (Obrázek 5) [8]



Obrázek 5. Laminární proudění [6]

- Turbulentní proudění – částice se pohybují v celém průřezu, trajektorie částic se protínají. (Obrázek 6) [8]



Obrázek 6. Turbulentní proudění [6]

Přechod mezi laminárním a turbulentním prouděním je závislý na Reynoldsově čísle. Je tedy důležité znát základní pojmy jako jsou: [8]

- Reynoldsovo číslo
- Bernoulliho rovnice
- zákon zachování hmotnosti
- stavová rovnice

1.2.1 REYNOLDSOVO ČÍSLO

Reynoldsovo číslo je bezrozměrná veličina, která dává do souvislosti setrvačné síly a viskozitu, tedy odpor prostředí v důsledku vnitřního tření. Pomocí něj je možné určit, zda je proudění tekutiny laminární, nebo turbulentní. Čím je Reynoldsovo číslo vyšší, tím nižší je vliv třecích sil částic tekutiny na celkový odpor. Vztah pro určení Reynoldsova čísla je popsán níže. (Rovnice 3) Pokud se pohybuje hodnota vypočteného Reynoldsova čísla okolo kritické hodnoty, jedná se o přechodovou oblast. [7]

Rovnice 3. Výpočet Reynoldsova čísla [7]

$$Re = \frac{v_s d}{\nu}$$

Kde:

Re [-]	Reynoldsovo číslo
d [m]	hydraulický průměr potrubí
v_s [$m \cdot s^{-1}$]	střední hodnota rychlosti proudění kapaliny
ν [$m^2 \cdot s^{-1}$]	kinematická viskozita proudící kapaliny

Pro velké hodnoty Re je proudění turbulentní, pro nízké hodnoty je proudění laminární. Při Re blížící se nekonečnu je proudění potenciální. [13]

Hranice mezi těmito dvěma případy se označuje jako kritická hodnota Reynoldsova čísla. Tato hodnota je pro různé kapaliny a různé typy potrubí různá a zjišťuje se experimentálně. Kritická hodnota se obvykle pohybuje kolem hodnoty 2320. [13]

Pro proudění kapaliny v uzavřených profilech (potrubích) mluvíme o laminárním proudění jestliže $Re < 2320$, pro otevřená koryta se uvažuje laminární proudění $Re < 580$. Horní rozhraní je velmi nejednoznačné, záleží na tom, jakým způsobem a jakou rychlostí je rychlost proudění zvyšována. Při pozvolném zvyšování rychlosti a tlaku je možné pozorovat laminární proudění až do $Re = 13800$, v otevřených korytech do přibližně $Re = 3450$. Při větších hodnotách Re je proudění prakticky vždy turbulentní. Turbulentní proudění se při snižování rychlosti naopak zachová, pokud vzniklo pro $Re > 4000$. V intervalu $2320 < Re < 4000$ je tzv. přechodná oblast mezi laminárním a turbulentním prouděním. [13]

Má velký význam při studiu odporů, které vznikají prouděním kapaliny v potrubí i korytech nebo při obtékání těles. Podobně má Reynoldsovo číslo významný vliv na řadu dalších hydraulických veličin. [13]

Reynoldsovo číslo lze použít při testování nových letadel. Postavíme-li přesnou kopii testovaného stroje v měřítku 1:4 pak je třeba vynásobit rychlost obtékání vzduchem také čtyřikrát. S využitím Reynoldsova čísla můžeme však také simulovat obtékání testovaného stroje pomocí vody či jiné tekutiny. Důležité je, aby zůstal zachován poměr třecích a setrvačných sil objektu. Právě to nám umožňuje znalost Reynoldsova čísla. Těmito problémy se zabývá tzv. teorie podobnosti. [13]

1.2.2 BERNOULLIHO ROVNICE

Bernoulliho rovnice vyjadřuje zákon zachování energie pro proudění ideální kapaliny ve vodorovném potrubí. Když se ve zúženém místě zvětší rychlost kapaliny, získá větší kinetickou energii. Podle zákona zachování energie tato kinetická energie ΔE_k vznikne přeměnou z potenciální energie, která se kvůli tomu zmenší o ΔE_p . [12]

Rovnice 4. Rovnost kinetické a potenciální energie. [12]

$$\Delta E_k = \Delta E_p$$

Kde:

 ΔE_k [J] kinetická energie ΔE_p [J] potenciální energie

Uvažujeme-li, že trubice je vodorovná, nemůže jít o potenciální energii tíhovou. Ideální kapalina je nestlačitelná, proto nelze uvažovat ani potenciální energii pružnosti. U proudící kapaliny se jedná o změnu, která souvisí s tlakem proudící kapaliny, tedy se jedná o tlakovou potenciální energii. . [12]

Chceme-li zobecnit Bernoulliho rovnici i pro nevodorovnou trubici, musíme uvažovat i s tíhovou potenciální energií kapaliny. (Rovnice 5) . [12]

Rovnice 5. Bernoulliho rovnice. [12]

$$\frac{1}{2}\rho \cdot v^2 + p + \rho \cdot g \cdot h = konst.$$

Kde:

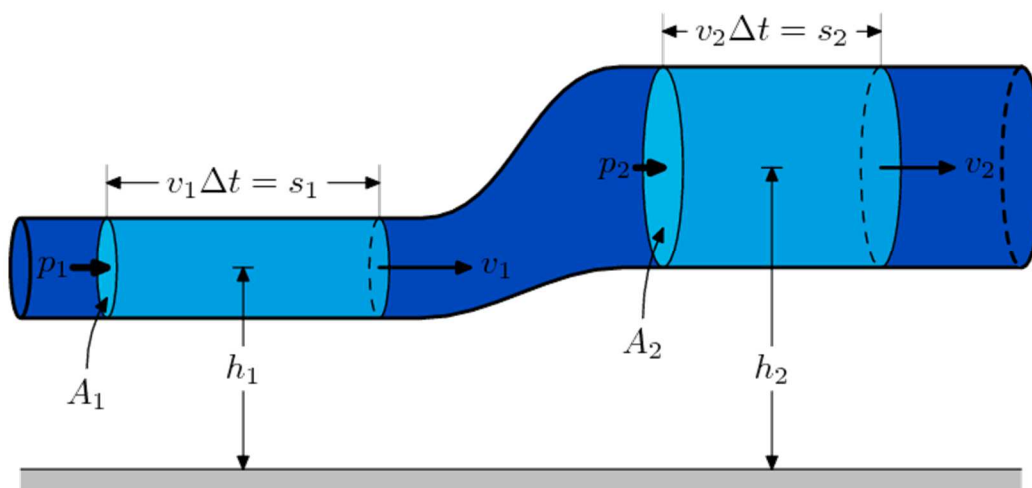
 ρ [kg·m⁻³] hustota kapaliny v [m·s⁻¹] rychlost proudění p [Pa] tlak g [m·s⁻²] gravitační (tíhové) zrychlení země h [m] výška sloupce kapaliny

První člen v Bernoulliho rovnici se nazývá dynamický tlak a představuje objemovou hustotu kinetické energie, druhý člen představuje tlakovou potenciální energii objemové jednotky kapaliny a třetí člen potenciální energii objemové jednotky kapaliny v silovém poli vnější konzervativní mechanické síly, v němž se kapalina nachází. Součet kinetické energie a potenciální energie (tlakové + vnější) je ve všech místech trubice stejný. [12]

1.2.3 ROVNICE KONTINUITY

Platí, že pokud na kapalinu v klidu působí tíhová síla, je ve stejné hloubce v každém bodě stejný tlak. Pokud je kapalina v pohybu tak tento vztah neplatí. Slovy můžeme Bernoulliho jev

popsat takto: v místě s větším průřezem má proudící kapalina větší tlak, ale menší rychlost, zatímco v místě s menším průřezem má menší tlak, ale větší rychlost. (Obrázek 7) [14]



Obrázek 7.: Popis rovnice kontinuity [14]

1.2.4 ZÁKON ZACHOVÁNÍ HYBNOSTI

Rozdíl mezi vstupující hmotnosti do kontrolního objemu a vystupující hmotnosti z kontrolního objemu je roven hmotnosti akumulující v kontrolním objemu. [3]

Rovnice 6. Zákon zachování hybnosti [3]

$$Q_v = v \cdot S = konst.$$

Kde:

Q_v [$m^3 \cdot s^{-1}$]	hmotnostní průtok
v [$m \cdot s^{-1}$]	rychlost proudění
S [m^2]	plocha průřezu potrubí

1.2.5 STAVOVÁ ROVNICE PLYNU

Stavovou rovnicí se v termodynamice označuje rovnice, která určuje vztah mezi jednotlivými stavovými veličinami charakterizujícími daný termodynamický systém. Stavová rovnice tedy popisuje makroskopický stav dané látky za určitých fyzikálních podmínek. [15]

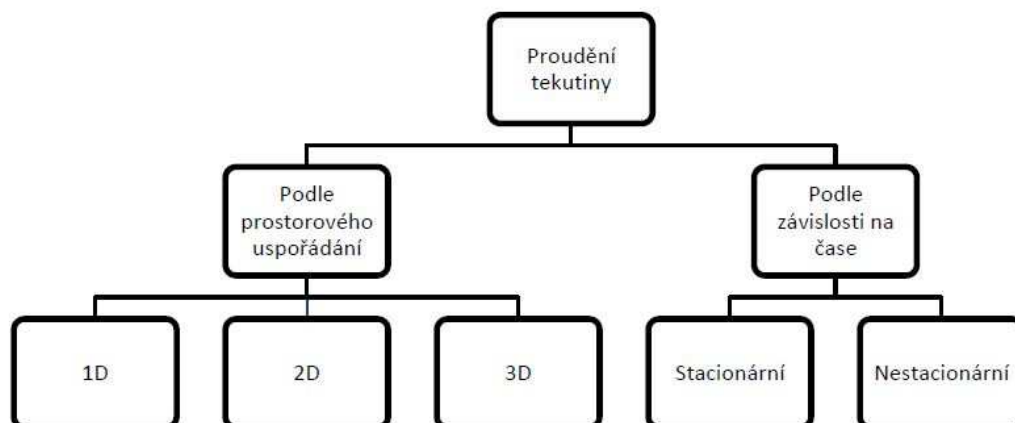
Rovnice 7. Stavová rovnice plynu [15]

$$p \cdot V = n \cdot R \cdot T$$

Kde:

p [Pa]	tlak plynu
V [m ³]	objem
n [mol]	látkové množství
R [J·K ⁻¹ ·mol ⁻¹]	molární plynová konstanta
T [K]	termodynamická teplota

Proudění tekutin lze dle kinematických hledisek rozdělit na systém zobrazený níže (Obrázek 8).



Obrázek 8. Rozdělení proudění tekutin dle kinematických hledisek [8]

Při rozdělení tekutin podle prostorového uspořádání uvažujeme, do jaké míry jsou veličiny proudění (například rychlost) závislé na své poloze:

- Prostorové (3D) proudění - rychlost proudění je závislá na poloze v prostoru.
- Rovinné (2D) proudění – rychlost proudění závisí na poloze v rovině (například osově symetrické proudění v potrubí).
- Proudění (1D) jednorozměrné – rychlost proudění je závislá na poloze na křivce (například v dlouhých potrubních systémech).

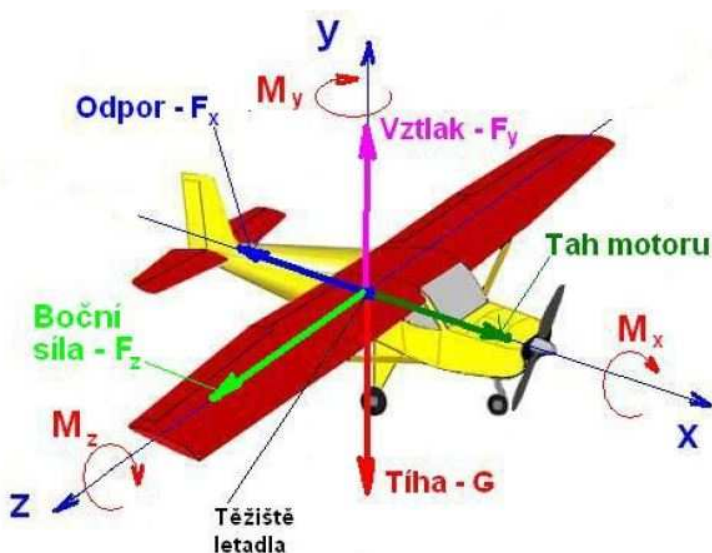
Proudění v závislosti na čase může být stacionární neboli ustálené. Při ustáleném proudění se veličiny (například rychlost) v čase nemění. Pokud daná veličina svou velikost v čase mění, jedná se o proudění neustálené, tedy nestacionární. [8]

1.3 OBTEKÁNÍ TĚLES

Na pohybující se těleso v prostředí vznikají odporové síly vlivem obtékání tělesa kapalinou nebo plynem. Zkoumání tohoto jevu probíhá zpravidla v aerodynamických tunelech na zmenšených modelech nebo na modelech skutečných rozměrů. Vzhledem k velké časové i finanční náročnosti takových testů se přechází stále častěji k numerickému modelování této problematiky pomocí výpočetní techniky. (Obrázek 9) [7]

Pokud se těleso pohybuje ve skutečné tekutině, působí na něj síla, jejíž výslednice se dá obecně rozdělit do tří složek [11]:

- F_x – Odpor proti pohybu
- F_y – Vztlaková síla
- F_z – Boční síla



Obrázek 9. Síly a momenty působící na obtékané těleso [7]

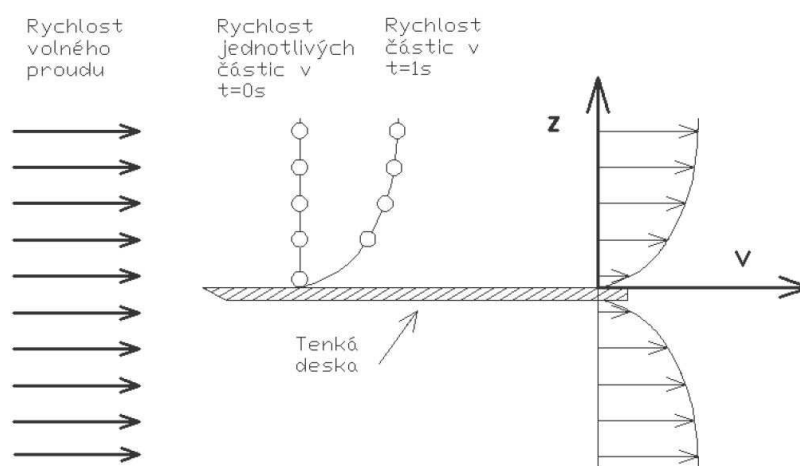
Stejně tak na těleso působí trojice momentů [7]:

- M_x – Moment klonivý
- M_y – Moment zatačivý
- M_z – Moment klopivý

Velikosti jednotlivých sil a momentů jsou závislé jak na podmínkách proudění, tak na tvaru a poloze obtékaného tělesa ke směru proudění. Pokud dojde k rovnoměrnému symetrickému obtékání, budou složky F_z , M_x a M_y rovny nule. [7]

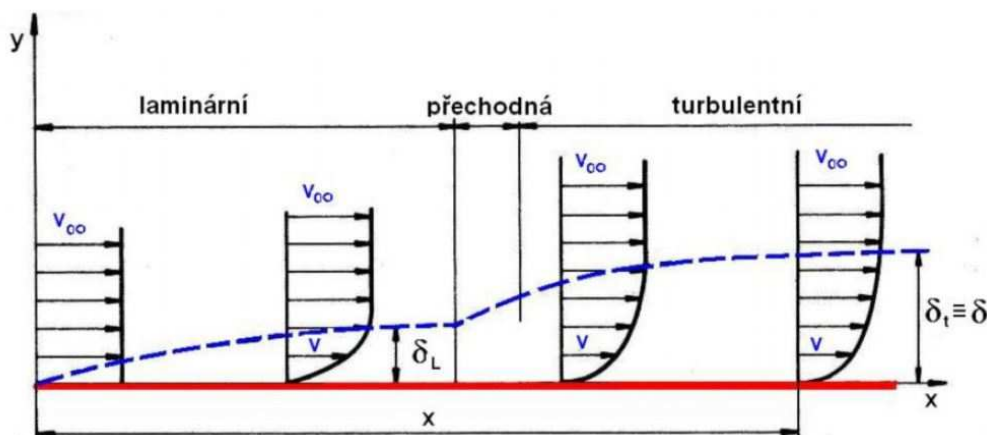
1.3.1 MEZNÍ VRSTVA

Mezní vrstva vzniká na povrchu každého obtékaného tělesa v reálném prostředí. Tloušťka mezní vrstvy roste se vzdáleností od počátku obtékaného tělesa. Při obtékání těles dochází ke zpomalování částic dotýkající se povrchu obtékaného tělesa, tyto částice zpomalují další částice v mezní vrstvě, a to má za následek vznik turbulentního proudění v této vrstvě. Rychlost uvnitř mezní vrstvy se mění od nulové hodnoty na povrchu tělesa, k rychlosti na vnějším okraji mezní vrstvy, kde není ovlivněna vazkostí. Vlivem ulpívání na povrchu obtékaného tělesa mají částice tekutiny nulovou rychlost. Rychlostní profil se tedy parabolicky zvětšuje úměrně s rostoucí vzdáleností od povrchu tělesa. (Obrázek 10) [11]



Obrázek 10: Parabolicky se zvyšující rychlost částic kapaliny [7]

Rychlostní průběh uvnitř vrstvy je určen dle podmínek laminárního nebo turbulentního proudění (Obrázek 11). Běžně na počátku obtékání tělesa je proudění laminární, ale s narůstající délkou tření kapaliny o povrch desky se laminární proudění přeměňuje na turbulentní. [7]



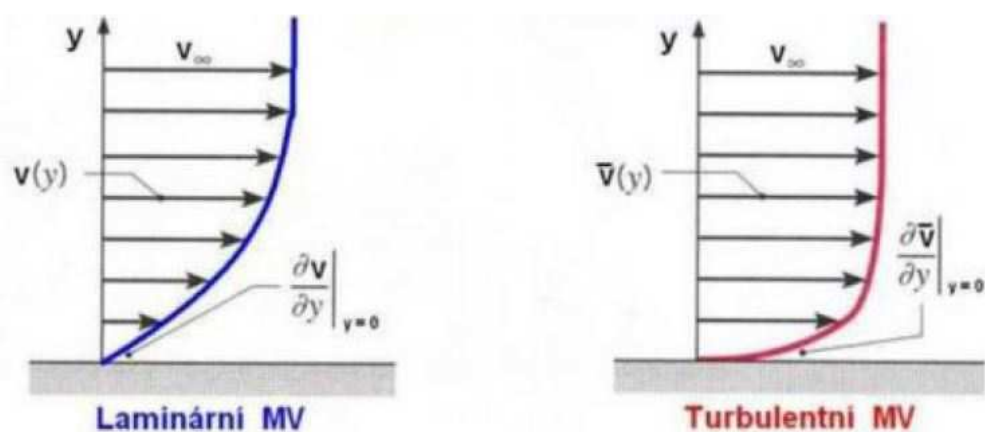
Obrázek 11: Vývoj mezní vrstvy při obtékání rovinné desky [7]

1.3.2 PROUDNICE

Proudnice popisuje pohyb dané částice tekutiny, např. vzduchu. Řada proudnic se spojuje do tzv. proudového svazku. Podle tvaru proudnic můžeme proudění rozdělit na laminární proudění, turbulentní proudění a mezní vrstvu. [7]

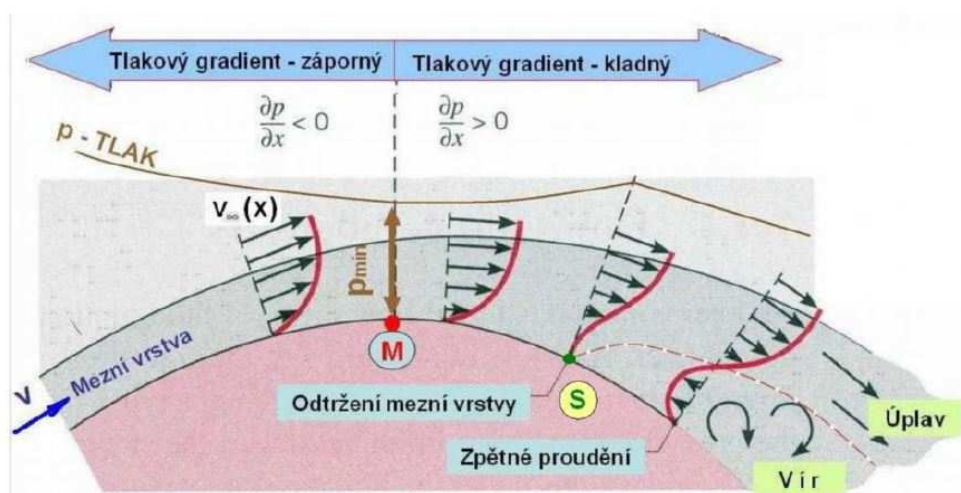
Laminární proudění (ustálené) – Proudnice jednotlivých částic tekutiny se pohybují navzájem přibližně rovnoběžně, jednotlivé dráhy částic se vzájemně nekříží.

Turbulentní proudění (vířivé) – Turbulentní proudění je proudění jednotlivých částic tekutiny, jejíž proudnice se navzájem promíchávají. Jednotlivé částice tekutiny vykonávají kromě posuvného pohybu i vlastní obecný pohyb, který způsobuje vznik vírů. Rychlost částic v jednotlivých místech turbulentního proudění je různá, tzn., že turbulentní proudění je nestacionární. K turbulentnímu proudění dochází při dosažení určité hodnoty Reynoldsova kritického čísla.[7]



Obrázek 12: Mezní vrstva laminárního a turbulentního proudění [7]

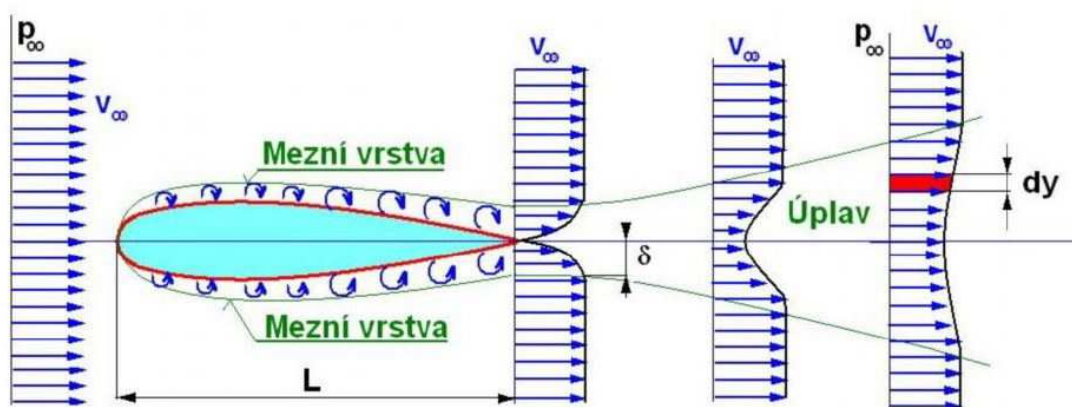
Během obtékání zaoblených těles dochází ke změně rychlosti na povrchu tělesa a mění se tlak. V oblasti rostoucího tlaku jsou částice tekutiny přibrzďovány vnitřním třením i větším tlakem, který na ně působí. (Obrázek 13) Rychlost v mezní vrstvě klesá až k nule. V bodě S se částice tekutiny zastaví a dochází k odtržení mezní vrstvy. V důsledku účinku kladného tlaku je proud u stěny směřován proti směru proudění. Promícháním se základním proudem dochází ke vzdálení pohybující se částice od stěny. Od bodu S je tím mezní vrstva rozdělována od tělesa a vzniká úplav. O místě odtržení rozhoduje tlakový gradient. Mezní vrstva se nikdy neodtrhne, při obtékání zakřivené stěny, v její první části tzn. náběžné ploše. [7]



Obrázek 13: Održení mezní vrstvy na zakřiveném povrchu [7]

1.3.3 ÚPLAV

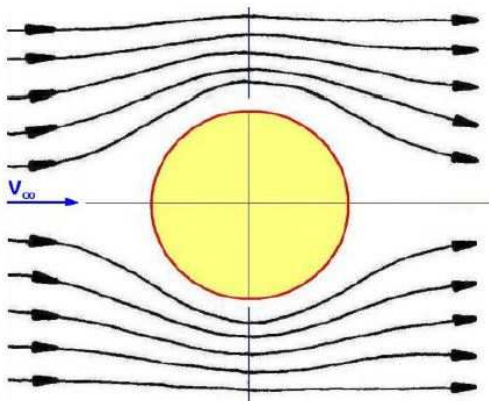
Mezní vrstva, která se na povrchu obtékaného tělesa vytvoří, se dá velmi zjednodušeně představit tak, že na horní i spodní straně vznikají vírová vlákna, při čemž smysl rotace vírových vláken na horním povrchu je opačný než na povrchu spodním. Vírová vlákna jsou proudící tekutinou unášena za těleso, kde zpomalené částice v mezní vrstvě a částice z odtrženého proudu vytvářejí za tělesem úplav. Tyto proudy vláken jsou znázorněny rychlostními profily v úplavu. Z obrázku je patrné, že s rostoucí vzdáleností od tělesa se přenosem impulzů mezi částicemi úplav rozšiřuje a vyplňuje. Když je těleso obtékáno bez odtržení mezní vrstvy, je úplav tvořen částicemi, které prošly mezi vrstvou tělesa a jejich rychlost je zmenšena. V úplavu nejsou zpětná proudění, je v něm jen pokračování spojených mezních vrstev. V tomto případě je tvar úplavu prakticky stejný jak pro laminární tak i turbulentní mezní vrstvu. V turbulentní mezní vrstvě lze očekávat rychlejší rozšiřování a vyrovnání úplavu. (Obrázek 14) [10]



Obrázek 14: Úplav za obtékaným tělesem [7]

1.3.4 ODPOR TĚLES

Proudnicí ideálního plynu (viskozita je nulová) obtékající těleso kopírují tvar tělesa, tedy proudové pole je symetrické okolo svislé i vodorovné osy. (Obrázek 15) Celkový odpor je proto nulový. [7]



Obrázek 15: Těleso obtékání ideální tekutinou [7]

U většiny těles, která jsou obtékána vzduchem, musíme uvažovat s reálnými rozměry. V takových případech se na celkovém konečném odporu podílí dvě složky. Je to složka třecího odporu (vlivu viskozity) a složka tlakového odporu, která je dána nerovnoměrným rozložením tlaku po povrchu tělesa. V závislosti na převládající složce odporu můžeme tělesa rozdělit do tří skupin [7]:

- Deskovitá, souběžná s proudem (odpor vnikem tření)
- Deskovitá, kolmá k proudu (odpor vnikem tlakového působení na desku)
- Spojitě zakřivená (kombinace obou předešlých případů)

Vztah pro odpor takových těles je stejný, pouze do něj vstupují jiné hodnoty v závislosti na skupině, do které těleso spadá. (Rovnice 8) [7]

Rovnice 8. Rovnice odporové síly [7]

$$F_x = c_x \cdot S \cdot \frac{v_\infty^2}{2} \cdot \rho$$

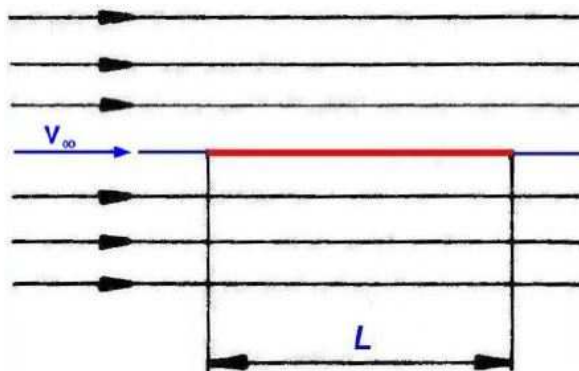
Kde:

F_x [N]	Odporová síla
c_x [-]	Součinitel celkového odporu

$S [m^2]$	Charakteristická plocha
$v_\infty [m \cdot s^{-2}]$	Rychlost nenarušeného proudu před obtékaným tělesem
$\rho [kg \cdot m^{-3}]$	Hustota tekutiny

Tělesa s dominantním třecím odporem

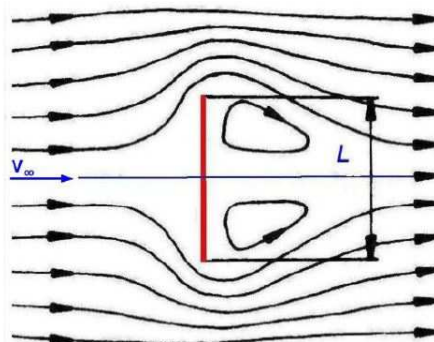
Při obtékání desky, která má shodný směr s proudnicí rychlostí, se uplatňuje v odporové síle především vliv třecího odporu. Součinitel odporu závisí na tvaru desky, Reynoldsově číslu, drsnosti povrchu a na turbulenci nabíhajícího proudu (Obrázek 16). [7]



Obrázek 16: Obtékání desky rovnoběžné s vektorem rychlosti [7]

Tělesa s dominantním tlakovým odporem

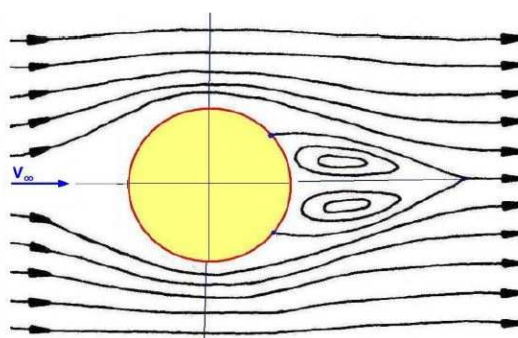
Při obtékání desky, která je kolmo na vektor rychlosti, dochází k odtržení proudnic na hranách desky, bod odtržení v tomto případě nemění svou polohu. Tlak před deskou je větší jak za deskou. Úplav je větší jak v případě desky souběžné s proudem částic. Součinitel odporu je závislý především na tvaru obtékaného tělesa a méně na Reynoldsově číslu. V tomto případě je celkový odpor tvořen především tlakovým odporem (Obrázek 17). [7]



Obrázek 17: Obtékání desky kolmé k vektoru rychlosti [7]

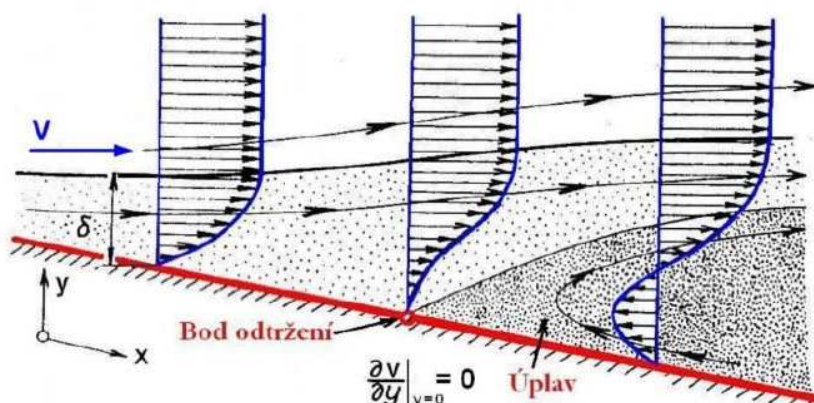
Obtékání zakřivených těles

Je typické, že proudící tekutina, při obtékání zakřivených těles v důsledku vyvolává odstředivé síly. Tyto síly nemusí sledovat povrch obtékaného tělesa, dochází odtržení mezní vrstvy a vzniká úplav. Rychlostní pole je v tomto případě nesymetrické, protože rychlost a tlak jsou vázány Bernoulliho rovnicí a rozložení tlaku je rovněž nesymetrické. Toto je příčinou tvarového odporu. V tomto případě se také uplatňuje vliv viskozity a vzniká i třecí odpor. Je obtížné stanovit podíl odporu tvarového a třecího, třecí součinitel je závislý na tvaru obtékaného tělesa a velikosti Reynoldsova čísla (Obrázek 18). [7]



Obrázek 18: Obtékání zakřivených těles [7]

Jak již bylo uvedeno, na zakřiveném povrchu dochází k odtržení mezní vrstvy, zpravidla tehdy, když tekutina proudí do míst s vyšším tlakem na zadní části tělesa. Tlakové a třecí síly působící proti pohybu částice jsou překonávány setrvačností částice tekutiny, její rychlost proto klesá, až v určitém místě na povrchu tělesa má rychlost nulovou. Rychlostní profil v tomto místě má inflexní bod. Za tímto bodem mají rychlosti opačný smysl, než je tomu u hlavního proudu. U stěny vzniká zpětné proudění (Obrázek 19). [7]



Obrázek 19: Schéma vývoje mezní vrstvy na tělese se zakřiveným tvarem [7]

1.4 OBTEKÁNÍ DOPRAVNÍCH PROSTŘEDKŮ

Problematika odporu vzduchu na dopravních prostředcích je stále se rozšiřující a zdokonalující se obor v automobilovém průmyslu. Výrobci motorových vozidel se problematice aerodynamiky výrazně věnují při samotném při vývoji. Hlavní důraz je kladen na zvyšování komfortu při jízdě ve vysokých rychlostech a celkovém snížení odporu vzduchu. To má za následek snížení jízdních odporů a tím snížení spotřeby paliva. [7]

Při určování odporové síly je nejdůležitější správně určit velikost součinitele odporu. Ten lze určit zpravidla třemi způsoby:

- Měření zmenšeného modelu v aerodynamickém tunelu
- Měření skutečného modelu v aerodynamického tunelu
- Pomocí CFD výpočtů

Silniční vozidla svým tvarem, při proudění vzduchu generují vztahové nebo přetlakové silové působení. Profil vozidel představuje zjednodušený profil leteckého křídla v podélném směru. Šířka je vůči délce vozidla nepodstatná proto se tyto vozidla považují za úzká. V důsledku toho má vzduch z oblasti podvozku tendenci proudit po bocích do oblasti s nižším tlakem. Vznikají tedy další vírové proudy po bocích vozidla a za vozidlem. Tyto proudy bývají označovány jako indukované a tvoří takzvaný indukovaný odpor. [7]

1.4.1 AERODYNAMICKÉ TUNELY

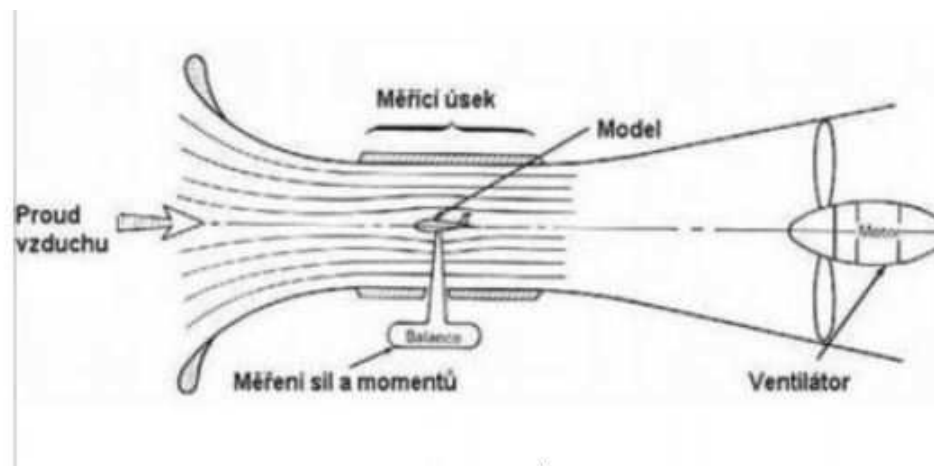
V aerodynamickém tunelu jsou vytvořeny podmínky, kde rychlost, směr proudění a teplota vzduchu jsou nezávislé na okolním prostředí. Tyto vlastnosti jsou kontrolovány a podle potřeby měněny. Při testování se převážně používají zmenšené modely reálného vozidla, ty nejsou tak přesné jak měření na skutečném vozidle. V aerodynamickém tunelu se zjišťují skutečné hodnoty součinitele odporu vzduchu, součinitele vztaku, tvaru rychlostního pole při obtékání vozidla a průběh statického tlaku na povrchu karoserie. [11]

Tunely lze rozdělit:

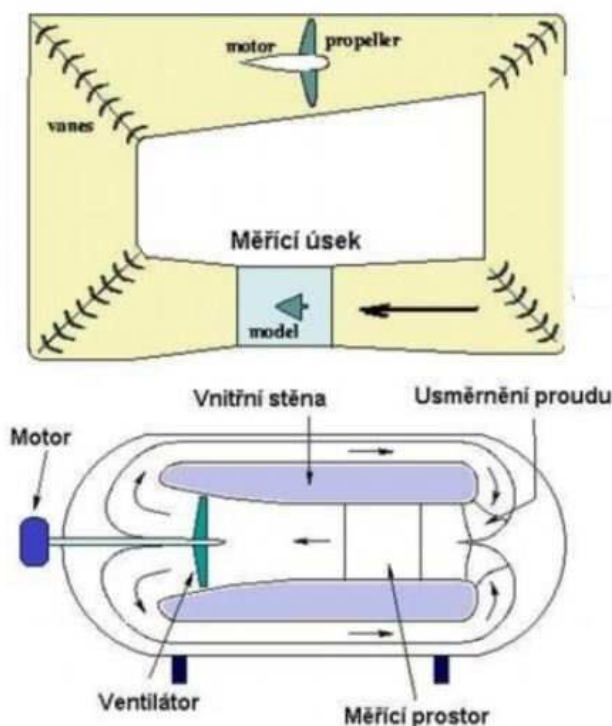
- Podle systému oběhu proudícího vzduchu
 - Tunely s uzavřeným oběhem proudícího vzduchu
 - Tunely s otevřeným oběhem proudícího vzduchu
- Podle rychlosti proudícího vzduchu

- Subsonické, rychlost proudění do 0,8 Mach
- Transsonické, rychlosti proudění 0,8 – 1,2 Mach
- Supersonické, rychlost proudění 1,2 – 5 Mach
- Hypersonické, rychlost proudění vyšší než 5 Mach
- Podle tlaku vzduchu
 - S atmosférickým tlakem vzduchu
 - S proměnným tlakem vzduchu
- Podle vlastností
 - Tlak vzduchu
 - Velikosti tunelu
 - Rychlost proudícího vzduchu
 - Systém oběhu proudícího vzduchu

Aerodynamické tunely jsou podle konstrukce a oběhu vzduchu rozděleny na dva typy. Otevřené (Obrázek 20) a uzavřené (Obrázek 21). [9]



Obrázek 20. Princip otevřeného aerodynamického tunelu [9]



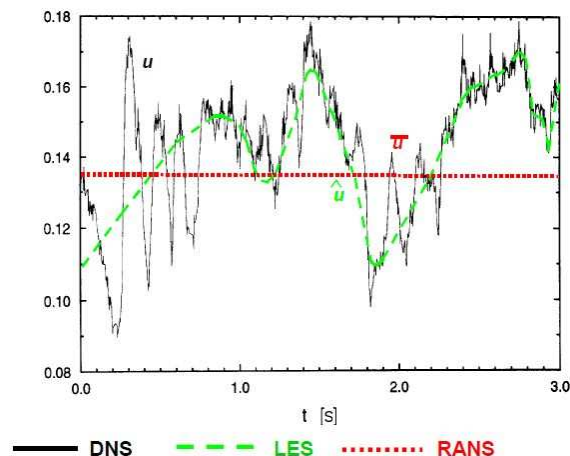
Obrázek 21. Uzavřený aerodynamický tunel [9]

1.4.2 NUMERICKÉ VÝPOČTY A SIMULACE

Pro zjištění výsledných hodnot odporu vzduchu existují různé metody. Buď se hodnoty získávají experimentálně, což je časově náročné a finančně nákladné, proto se v současnosti více využívá CFD (Computational Fluid Dynamics) simulací neboli matematicko-fyzikální numerické řešení proudění tekutin. Prvním krokem je vytvoření 3D modelu a poté jeho převedení na výpočtovou síť, podobně jako u metody konečných prvků. Hustota a kvalita vytvořené sítě má vliv na výsledek simulace a čas výpočtu. Kompromisem může být zhušťování sítě na kritických místech. Na plochách relativně rovných a souvislých může být síť méně hustá. [1]

Modelování turbulence je stále ve stádiu výzkumu a vývoje, který se neustále mění s pokrokem v matematickém, fyzikálním a technickém odvětví. Při numerické simulaci turbulentního proudění existují tři teoreticky odlišné přístupy, které vyplývají ze zjednodušujících modifikací výchozích rovnic popisujících proudění: [8]

- Metoda přímé simulace (DNS – Direct Numerical Simulation)
- Metoda velkých vírů (LES – Large Eddy Simulation)
- Metoda časového středování (RANS – Reynolds Average Navier-Stokes)



Obrázek 22. Metody modelování turbulence [8]

Metoda přímé simulace má velice vysoké nároky na výpočetní výkon, vyžaduje velmi jemnou síť modelu. Bývá velmi obtížné řešit úlohy touto metodou z důvodu nedostatku výpočetního výkonu. [8]

Matematické modelování velkých vírů nevyžaduje stejně jemnou síť jako metoda přímé simulace a malé víry se významně nepodílí na transportních jevech. Výpočetní výkon je dostačující na tuto metodu. [8]

Pro většinu inženýrských úloh turbulentního proudění zůstávají nejpoužívanějším nástrojem statistické modely turbulence, které jsou založeny na metodě časového (Reynoldsova) středování (RANS-Reynolds Averaged Navier-Stokes equations) veličin turbulentního proudění a na následující proceduře časového středování bilančních rovnic. [8]

2 AERODYNAMIKA MOTOCYKLOVÉ PŘILBY

Zatímco motocyklisté v celé Evropě musí nosit přilby, ve Spojených státech je bohatá historie zavádění a rušení povinnosti nošení přilby. Relativně nedávno (2012) byla ve státě Michigan opět zrušena obecná povinnost nosit motocyklové přilby. [6]

Kromě testů pádu mají normy stále mnoho dalších požadavků na přilbu. Například určité oblasti hlavy musí být zakryty nebo odkryty a musí být dodrženy minimální rozměry pro pozorovací úhel, nesmí být na přilbě žádné ostré hrany, pásek pod bradu má nastavitelnou délku a hledí podléhá rozsáhlým předpisům ohledně jeho optických a mechanických vlastností.[6]

2.1 HISTORIE

Již více než 100 let se na motocyklech nosí ochrana hlavy. Zpočátku byly používány lněné a kožené čepice jako ochrana proti větru, pak kožené přikrývky připomínající přilby a od konce šedesátých let integrální přilby. V roce 1958 byla v Německu přijata první norma pro zkoušení přileb pro řidiče podle DIN 4848. V roce 1975 byl tento standard nahrazen evropskou normou ECE-R 22.01, která je pravidelně revidována. V současné době platí ECE-R 22.05.[6]



Obrázek 23: Testování bezpečnosti přilby v roce 1927 firmou Bell ve státě Minnesota [6]

2.2 POŽADAVKY NA BEZPEČNOST

Kromě ECE-R 22.05 jsou rozšířeny tři další standardy pro motocyklové přilby. Pro registraci přileb v USA a v Austrálii, podmínky amerického DOT FMVSS 218, nebo pootevřeného AS 1698-1988. V Japonsku jsou motocyklové přilby schváleny podle JIS T 8133: 2000. Pro helmy používané v automobilových závodech vyžaduje FIA (Mezinárodní federace motoristického sportu) schválení v souladu s požadavky nadace Snell Foundation. Tato americká nadace zavedla standard helmy, standard Snell-SA2000, který klade nejvyšší nároky na ochranný efekt ve srovnání s ostatními. Existují také další zkušební předpisy FIA pro Formuli 1, které jsou neustále zlepšovány. Někteří hlavní výrobci helem vyvinuli také vlastní zkušební specifikace, které přesahují požadavky výše uvedených norem. [6]

Hlavní složkou zkoušky podle ECE-R 22.05 jsou pádové zkoušky. Přilba je testovaná při teplotě +50 ° C nebo -20 ° C a potom padá z výšky 3 m na různě tvarovaná ocelová tělesa. Helma obsahuje standardizovanou zkušební hlavu s triaxiálním akcelerometrem. Maximální zrychlení při nárazu nesmí překročit 275 g. Dalším měřítkem pravděpodobnosti poranění hlavy je hodnota HIC2, která se vypočítá z křivek zrychlení. Horní limit pro hodnotu HIC je 2400. [6]

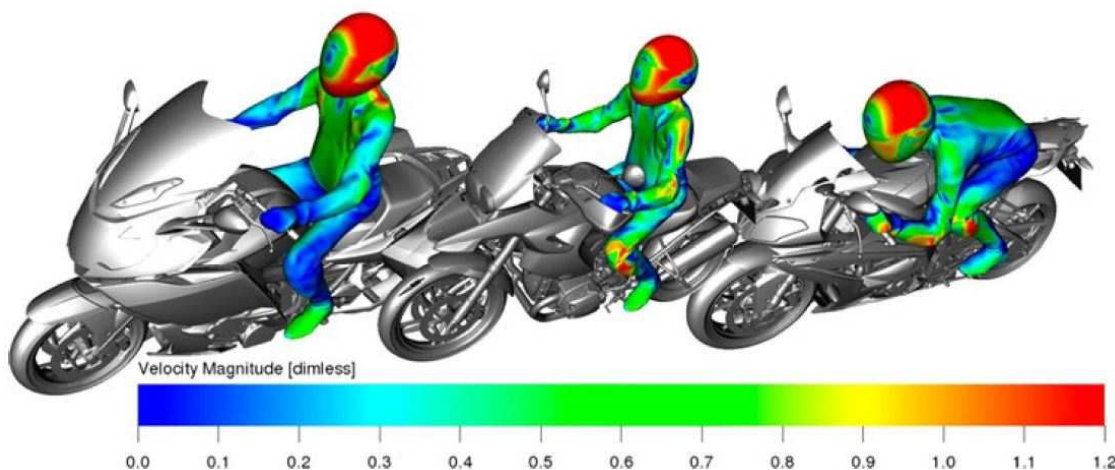
Zkušební body na skořepině přilby jsou popsány v ECE-R 22.05, zatímco ve standardu Snell mohou zkušební body v předepsaném rozsahu volně vybírat zkoušející. Standard Snell navíc testuje stejné body dvakrát nebo třikrát za sebou. [6]

2.3 AERODYNAMIKA MOTOCYKLOVÉ PŘILBY

Stejně tak jak u optimalizace tvaru karoserie motorových vozidel se řeší i aerodynamický odpor motocyklových přileb. Motocyklové přilby už samy o sobě mají nízký odpor vzduchu, nicméně se vývoj nových přileb ubírá trendem snižování tohoto odporu. Celkové odpory vzduchu C_x se v současnosti („Hucho – Aerodynamik des Automobils 2013“) pohybují v rozpětí $C_x = 0,30 \dots 0,36$. Pro srovnání s osobními vozy, u kterých jsou tyto hodnoty C_x : Škoda Fabia r.v. 2000, $C_x = 0,33$ (0,34), Favorit r.v. 1987, $C_x = 0,36$, Octavia RS = 0,29, Škoda Octavia Combi r.v. 2005, $C_x = 0,31$. Z těchto hodnot je zřejmé, že odpor vzduchu je srovnatelný s odpory osobních vozidel a zároveň jsou tyto hodnoty vcelku nízké. Proto nás bude zajímat aerodynamické chování přilby při vysokých rychlostech, ve kterých se projeví silové působení vyvolané profilem přilby a celkovým odporem vzduchu. [6]

Správná aerodynamika přilby je charakterizovaná nízkou boční silou, vyvolanou natočením boku přilby do směru jízdy. Každé natočení přilby z přímého směru jízdy, a tím změna směru proudu vzduchu obtékající přilbu, vyvolává vibrace („třepání“). Tyto vibrace mají za následek zvýšený hluk a otřesy přenášející se do hlavy jezdce, jedná se o nežádoucí vlivy. Správně aerodynamicky navržená přilba se chová neutrálně při přímém i nepřímém směru jízdy, který je souhlasný se směrem proudnic vzduchu. Při návrhu přilby nám problematiku aerodynamiku komplikují další faktory jako je úhel a vzdálenost přilby nad motocyklem, dále typ a tvar kapotáže motocykly a samotný účel dané přilby. [6]

Poloha přilby při jízdě je velmi důležitá, jelikož může vyvolávat vztlak nebo přítlak na hlavu jezdce. Vztlak přilby nastává v případě, že na přilbu působí síla odkloněná od krku jezdce a proud vzduchu vyvolává „vztlak“ přilby. V opačném případě, kdy přilba vyvolává přítlak, je častý u kapotovaných motocyklů, které svojí kapotáží směřují proud vzduchu na temeno přilby, a tudíž je tlak pod přilbou daleko nižší jak nad přilbou. [6]



Obrázek 24: Tlak působící na přilbu u rozdílné polohy na motocyklu [6]

Celkový odpor vzduchu přilby je ovlivněn jejím tvarem, směrem hlavního proudu vzduchu a strukturou povrchu přilby. [6]

2.4 NÁVRH PŘILBY

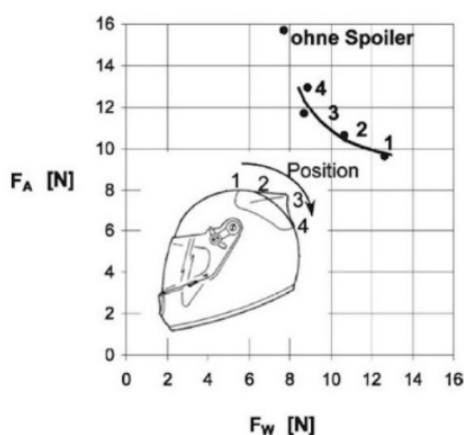
Aerodynamika přileb se již od 80' let minulého století řídí jednoduchými pravidly, při návrhu geometrie přilby. Přičemž obecně platí tyto tři pravidla: [6]

- Dostatečná vzdálenost dna přilby od ramen jezdce

- Nepříliš dlouhý a oválný tvar
- Nevytvářet velké hrany a spojlerly

2.4.1 SPOJLERY

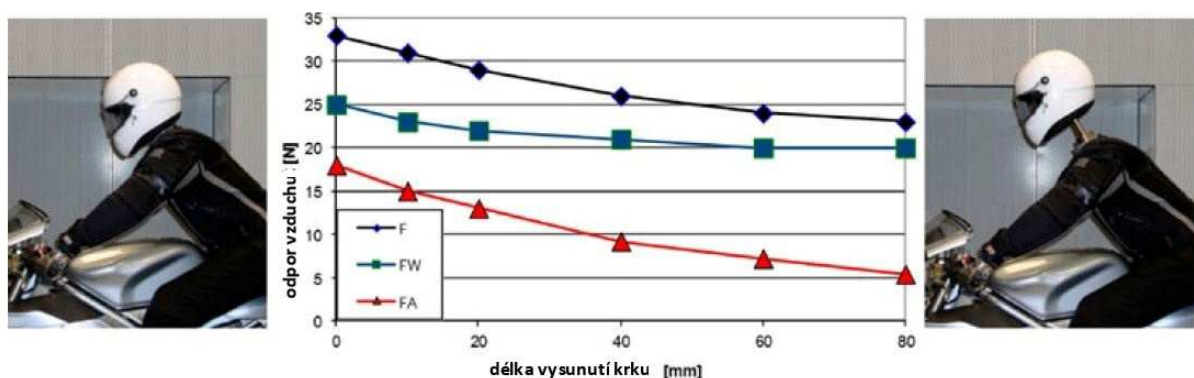
Spojlerly, stejně jak u závodních vozidel, zlepšují přitlačnou sílu a odtok vzduchu z přilby. U závodních přileb jsou spojlerly integrované ve tvaru skořepiny, zatímco u sériově vyráběných přileb tyto spojlerly slouží jako doplňky, které se na samotnou přilbu lepí. Spojler vyvolává přitlačnou sílu a zároveň zlepšuje obtékání motocyklu i jezdce. Příklad síly vyvozené spojlerem je na obrázku. Jednotlivé body 2-4 ukazují velikost působící síly v daných bodech. (Obrázek 25) [6]



Obrázek 25: Působení síly vyvolané spojlerem [6]

2.4.2 VLIV DÉLKY KRKU

Vliv vzdálenosti helmy od ramen má vliv na přitlačné síly. Čím je blíže přilba ramenou, tím je síla od přilby vyšší, zatímco v opačném případě je síla nízká. Je to způsobeno přilnutým prouděním kolem ramen a přilby. [6]



Obrázek 26: Vliv délky krku na síly vyvolané na přilbě [6]

2.4.3 POLOHA HLAVY JEZDCE

Síly působící na přilbu jsou výrazně ovlivněny tvarem kapotáže motocyklu. Proudící vzduch kolem jednotlivých typů motocyklu se výrazně liší, a proto je nutné, při návrhu přilby, uvažovat s budoucím použitím u dané kategorie motocyklu. Lze vidět vliv kapotáže na směr proudu vzduchu, který je odkláněn na přilbu (Obrázek 27). [6]



Obrázek 27: Vliv kapotáže na odklon proudu vzduchu na přilbu [6]

3 NÁVRH METODIKY ŘEŠENÍ

Hlavní výpočet bude prováděn v programu Star-CCM+. Cílem této kapitoly je popsat metodiku přípravy měřených dat, v tomto případě se jedná o přípravu modelu motocyklové přilby. Postup jednotlivých kroků je popsán níže.

- 3D sken reálné motocyklové přilby
- Vytvoření 3D modelu v programu SolidWorks
- Import CAD dat do programu Star-CCM+
- Definice okrajových podmínek
- Definice výpočtové sítě
- Volba výpočetního modelu
- Iniciační výpočet
- Detailní nastavení výpočtové sítě na modelu
- Provedení simulace
- Vyhodnocení simulace
- Návrh úprav přilby
- Simulace jednotlivých úprav
- Konečné vyhodnocení

3.1 TVORBA GEOMETRIE MODELU

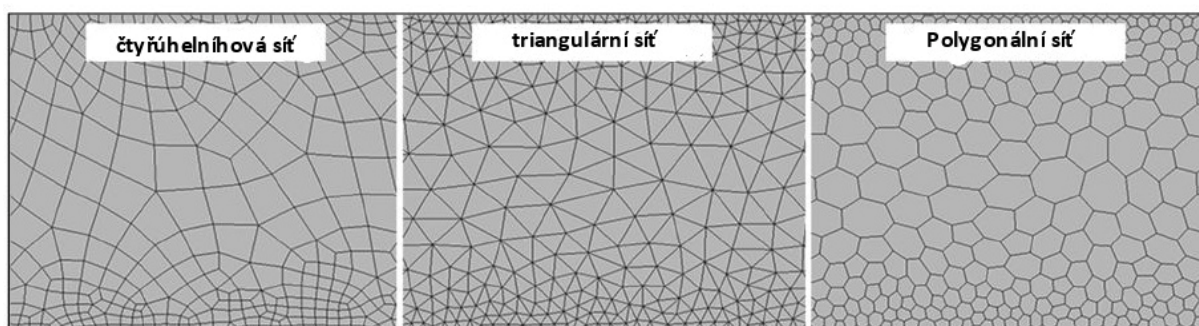
Geometrie bude získaná z 3D skenu a následně zpracovaná v programu SolidWorks. Po vytvoření nového modelu bude model exportován do programu Star-CCM+, kde se následně vytvoří vhodný aerodynamický tunel a vytvoří se tak geometrie simulačního modelu.

3.2 DEFINICE VÝPOČETNÍ OBLASTI

Pro výpočet simulace proudění v programu Star-CCM+ je nutné definovat výpočetní oblast, ve které se budou počítat pohyby částic tvořící proudění. Hlavním blokem pro tvorbu simulace je aerodynamický tunel našeho modelu, jeho rozměry musí splňovat podmínku překážkového poměru (Blockage ration) menší než 0,2 %. Tento poměr se určí jako poměr mezi velikostí čelní plochy ku průřezu výpočetní oblasti. Velikost výpočetní oblasti je určena pomocí empirických vzorců pro určení délky, šířky a výšky tunelu.

3.3 VÝPOČETNÍ SÍŤ

Výpočetní síť rozdělí plochu na jednotlivé buňky. Jejich tvar odpovídá typu výpočetní sítě. Pro 2D výpočetní síť jsou v programu Star-CCM+ vloženy funkce pro automatické vytvoření sítě. Typy těchto sítí jsou tři: Polygonální (polygonal mesh), triangulární (triangular mesh) a čtyřúhelníková (quadrilateral mesh). Buňky reprezentují jednotlivé výpočetní oblasti, ve kterých probíhá výpočet. Počtem a velikostí jednotlivých buněk je možné upravit kvalitu výpočtů simulace. Kvalita výpočetové sítě, a tedy i množství výpočtů jsou limitovány výpočetní technikou, proto se pro podrobnější výpočty používá zjemnění sítě pouze kolem řešeného modelu. Tvary jednotlivých sítí jsou znázorněny níže. (Obrázek 28)



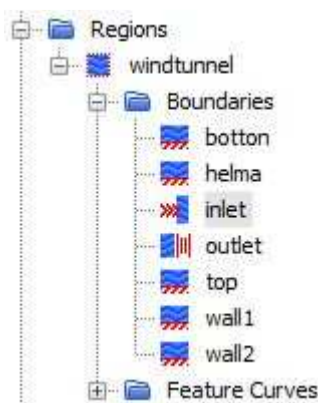
Obrázek 28. Typy výpočetních sítí programu Star-CCM+ [Autor]

3.4 DEFINICE OKRAJOVÝCH PODMÍNEK

Okrajové podmínky (Boundaries) jsou povrchy simulace ve 3D a ve 2D jsou to linie, které definují výpočetní oblasti (Regions). Každá plocha má v simulaci definovaný typ okrajové podmínky jako jsou např.:

- Stěna (Wall)
- Volný proud (Free Stream)
- Vstup hmotnostního toku (Mass Flow Inlet)
- Přesah sítě (Overset Mesh)
- Tlakový výstup (Pressure Outlet)
- Stagnační vstup (Stagnation Inlet)
- Symetrická rovina (Symmetry Plane)
- Vstupní rychlost (Velocity Inlet)

Ukázka zadání okrajových podmínek v programu Star-CCM+ je zobrazena níže. (Obrázek 29)



Obrázek 29. Definování okrajových podmínek v programu Star-CCM+ [Autor]

3.5 NASTAVENÍ VÝPOČTU

Výpočty se provádí v kartě Kontinua (Continua), kde se definuje výpočetní síť (Mesh Continuum) a výpočetní fyzikální model (Physic Continuum). Pro vytvoření výpočetové sítě v kartě Kontinuum je nutné předem převést plochy výpočetového modelu na plochy pro výpočet Kontinua. Na těchto plochách se následně definují jednotlivá nastavení popsaná níže.

- **Prostor:**
 - Osově symetrický (Axissymmetric)
 - Dvourozměrný (Two Dimensional)
 - Trojrozměrný (Three Dimensional)
- **Stěnová funkce All y+:** Tato funkce interpretuje výsledky v oblasti kolem stěny.
- **Proudící látka:**
 - Plyn (Gas) – V simulacích se užívá základního plynu, tedy vzduchu
 - Tekutina (Liquid) - Využívá se při simulaci kapalin, základní tekutina je voda
 - Pevná látka (Solid) – Simulace pevných látek, základem je hliník (Al)
- **Čas:**
 - Stacionární proudění (Steady) – není v čase proměnlivé
 - Nestacionární proudění (Unsteady) – rychlost proudění se v průběhu mění
- **Plyn (Gas):**
 - Ideální
 - Reálná
- **Druhy proudění:**
 - Přilnuté proudění (Coupled Flow)
 - Održené proudění (Segreded Flow)
- **Typy proudění:**

- Laminární
- Turbulentní
- **Metody výpočtu turbulentního proudění:**
 - Jednorovnicové
 - Spalart-Allmaras
 - Dvourovnicové
 - K-Epsilon
 - K-Omega
 - Reynolds Stress

4 APLIKACE METODY REVERZNÍHO INŽENÝRSTVÍ

Potřebný model pro simulaci bude získán na základě 3D skenu reálné motocyklové přilby, která poslouží jako podklad při modelaci přilby v programu SolidWorks.

4.1 SKENOVÁNÍ PŘILBY

Zvolenou přilbou je přilba integrální přilba Scorpion Astone GTB Exclusive Rosso 2011. Na přilbě nejsou žádná přídavná zařízení jako např.: intercom, spojler atd.



Obrázek 30: Přilba SCORPION Astone GTB Exclusive Rosso 2011 [Autor]

Pro získání 3D modelu přilby určeného k měření v programu STAR CCM+, bylo zapotřebí nejprve naskenovat reálnou přilbu. Sken přilby probíhal na SPŠ Zlín, a to pomocí 3D skenu.



Obrázek 31: Himalay PrecisSCAN H250 [2]

Před skenováním byla přilba očištěna a byly na ni nalepeny reflexní body. Tyto body slouží pro detekci polohy v prostotu měřící soustavy. Z polohy tří lokalizovaných bodů se při skenování určuje poloha čtvrtého bodu. Postupným nahrávání těchto bodů se vytváří 3D síť naší soustavy.



Obrázek 32: Polep přilby reflexními body [Autor]

Skenování sítě reflexních bodů na přilbě pro určení mapovací sítě v programu Vxelements expres 3D studio. (Obrázek 32)

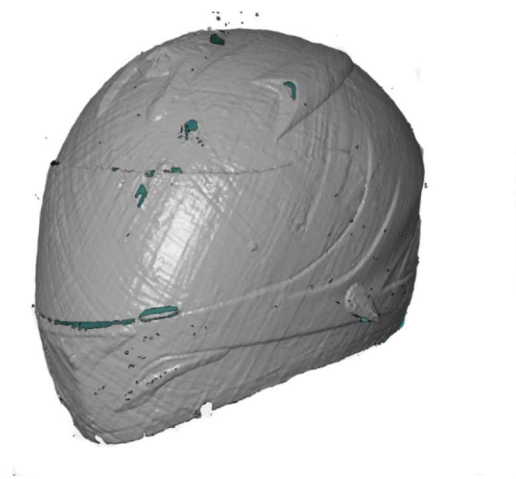
V dalším kroku byl na přilbu nanesen křídový prach, který zlepšil odrazivost laserového paprsku a bylo tak možné skenovat samotný tvar přilby. (Obrázek 33)



Obrázek 33: Nanesení křídového prachu pro zvýšení odrazivosti laseru [Autor]

4.1.1 VÝSLEDNÝ SKEN

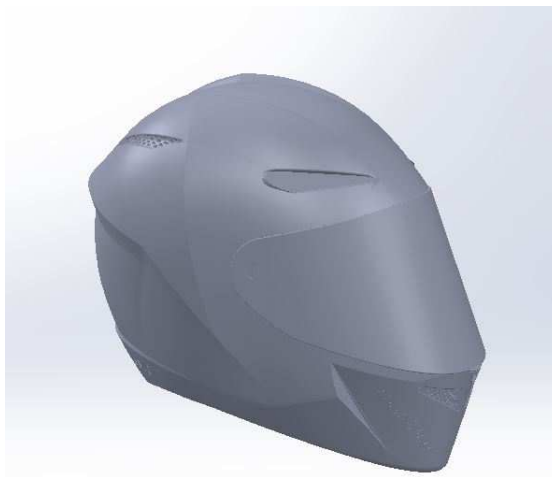
Sken přilby byl následně upraven v programu GOM Inspect 2018, pro odstranění nečistot a nastavení souřadného systému přilby. Výsledná úprava sítě skenu, který bude sloužit jako podklad k modelování přilby je zobrazen na obrázku (Obrázek 34). Jak je ze skenu patrné, struktura modelu není zcela ideální, proto je nutné přilbu vymodelovat a sken použít pouze jako šablonu při přípravě modelu nové přilby. Zachován bude tvar skořepiny a prolisy helmy.



Obrázek 34. Výsledný sken přilby [Autor]

4.1.2 ÚPRAVA MODELU

Získaný model pomocí 3D skenu je ve formátu, který program STAR-CCM+ nepodporuje. Proto bylo nutné vytvořit model v programu SolidWorks, který je podporován programem STAR-SSM+. Sken 3D modelu posloužil jako základní vodítko při tvorbě ploch nové přilby, tímto způsobem se zachovaly proporce a geometrie přilby. Nový model byl následně uložen ve formátu *.x_t, který je vhodný po simulaci v programu STAR-CCM+.

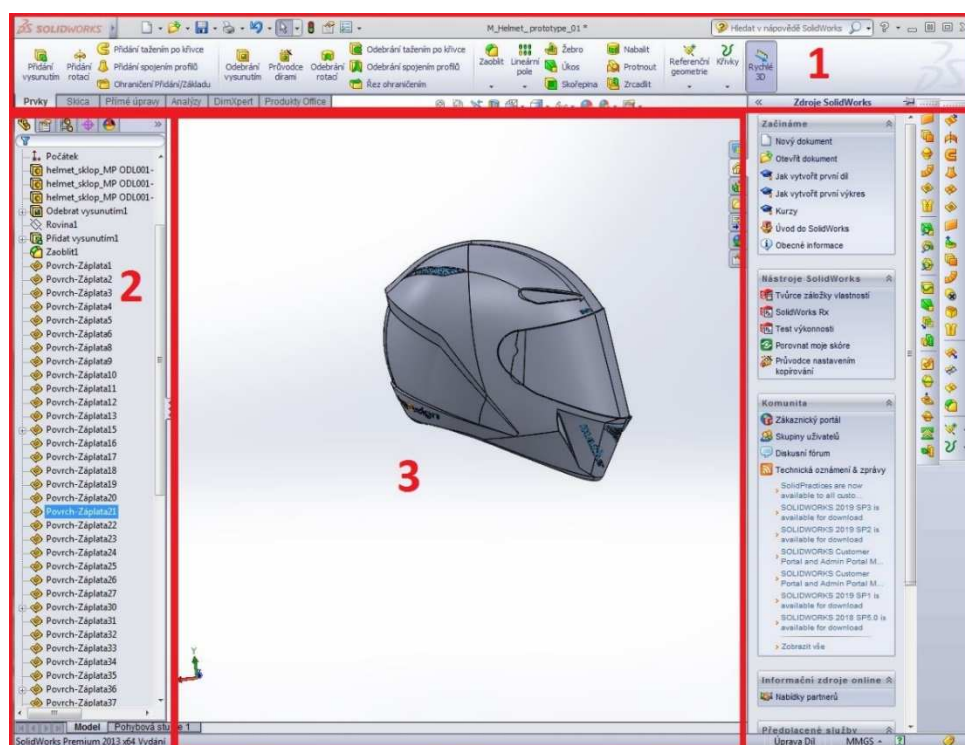


Obrázek 35. Model přilby vytvořený v programu SolidWorks [Autor]

4.1.3 PŘEDSTAVENÍ SOFTWARE SOLIDWORKS

SolidWorks je celosvětově používaný software pro modelování a úpravy 3D modelů, tvorbu 2D dokumentace, vizualizaci modelů a animaci sestavy dílů nebo jejich pohybu. Základní prvky v SolidWorks jsou součásti (anglicky Parts), ty se ukládají ve formátu *.

SLDPRT. Součásti se tvoří nejprve jako 2D náčrt (anglicky Sketch) jednoduchého modelu, který je následně ve 3D prostřední dotvořen. Z řady dílů se skládá sestava (anglicky Assembly) kde je dílům přiřazena poloha a díly jsou propojeny vzájemnými vazbami. Sestavy se ukládají ve formátu *. SLDASM. Součásti sestavy, i sestava jako taková, slouží jako podklad pro 2D výkresovou dokumentaci, ta se provádí v záložce Výkresy.



Obrázek 36: Rozhraní programu SolidWorks [autor]

Pro tvorbu modelu určeného pro simulaci bylo použito funkcí a modulů z programu SolidWorks. Jeho pracovní rozhraní je rozčleněno do tří základních sektorů (obrázek 24).

- Sektor č. 1 – Panel nástrojů, pro jednotlivé aplikace při tvorbě nebo úpravě modelu. Sdružuje v sobě funkce a příkazy určené vždy pro dané aplikace. Panel pro tvorbu prvků obsahuje jiné příkazy než panel pro tvorbu skic. V panelu pro tvorbu prvků nalezneme funkce pro tvorbu nebo úpravu těles či objemů. Při tvorbě sestavy jsou naopak dominantní funkce pro vkládání dílů, vytváření vazeb anebo nastavení mezí pohybu jednotlivých součástí sestavy.
- Sektor č. 2 – Tento sektor je v módu Prvek a Sestava stejný. Nachází se zde strom jednotlivých prvků objemů i ploch, ze kterých je sestava tvořena. Dále zde nalezneme strom užitých příkazů v daném modulu.

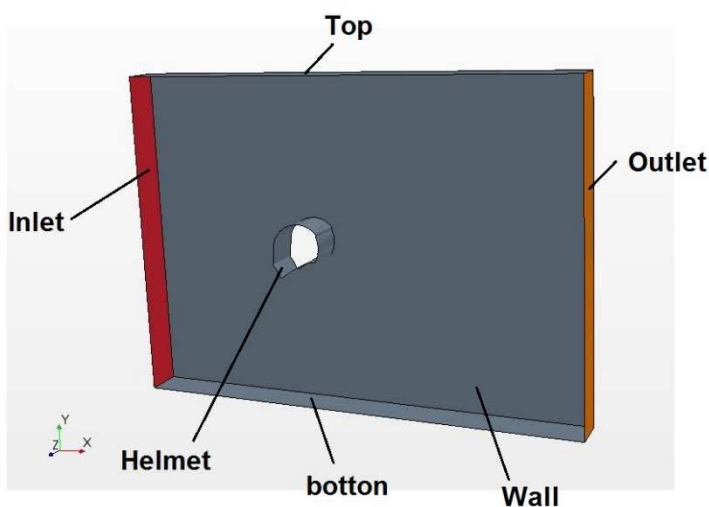
- Sektor č. 3 – Tento sektor zabírá největší plochu ve všech modulech. Jedná se pracovní plochu pro zadávání jednotlivých příkazů definovaných na modelu. Zobrazuje aktuální stav tvorby modelu či sestavy.

5 DEFINICE OKRAJOVÝCH PODMÍNEK A TVORBA VÝPOČETNÍHO MODELU

Pro definici okrajových podmínek je nejprve nutné vytvořit geometrický model aerodynamického tunelu s danou přilbou. V tomto případě se bude jednat o simulaci v aerodynamickém tunelu, kde se bude posuzovat 2D proudění kolem profilu přilby. Bude nastavena definice výpočetní polygonální sítě včetně mezní vrstvy. Dále se definuje rychlost a typ proudění a typ plynu, který bude proudit kolem objektu.

5.1 IMPORT CAD DAT

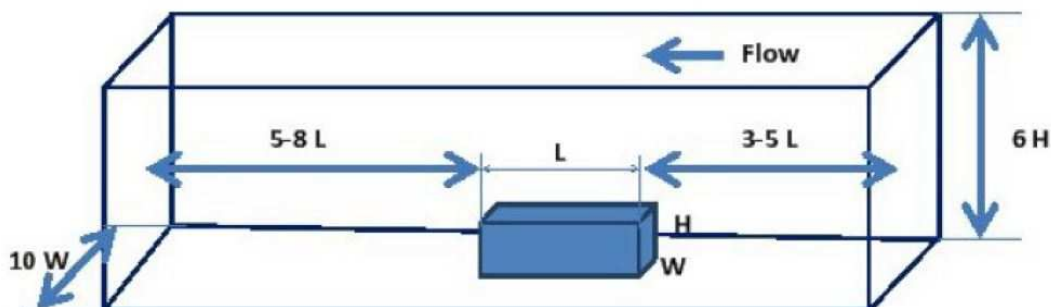
Profil testovaného modelu, v našem případě motocyklové přilby, se do software Star-CCM+ importuje anebo se přímo v programu vymodeluje. Profil motocyklové přilby je značně složitý, a ne zcela jednoduchý na zakótování, proto je v tomto případě výhodnější model pro simulaci importovat ve formátu *.x_t. Je nutné tyto data otestovat na kontrolu volných hran, k tomu slouží funkce „Free edges“. Tyto data modelu nahráváme do roviny XY tak, aby počátek soustavy ležel v tělese přilby. Následně je v software Star-CCM+ vymodelován aerodynamický tunel, ten se nejprve jako skica nakreslí v rovině xy a na konec se pomocí funkce „Extrude“ vysune na hodnotu odpovídající šířce přilby. Takto vytvořený model tunelu není zcela hotov. Dalším krokem je vytvoření referenční plochy přilby. Ta se získá jako průnik objemů větrného tunelu a přilby. Výsledkem je aerodynamický tunel s referenční plochou přilby. Všechny plochy pojmenujeme dle jejich významu jako např.: Inlet, Outlet, Top, Helmet aj. (Obrázek 37)



Obrázek 37. Geometrický model aerodynamického tunelu [Autor]

5.2 DEFINICE VÝPOČETNÍ OBLASTI

Pro definování rozměrů se řídíme pravidly z kapitoly 3.2., rozměry našeho větrného tunelu jsou odvozeny z empirických vzorců, které se odvíjejí z rozměrů přilby. (Obrázek 38)



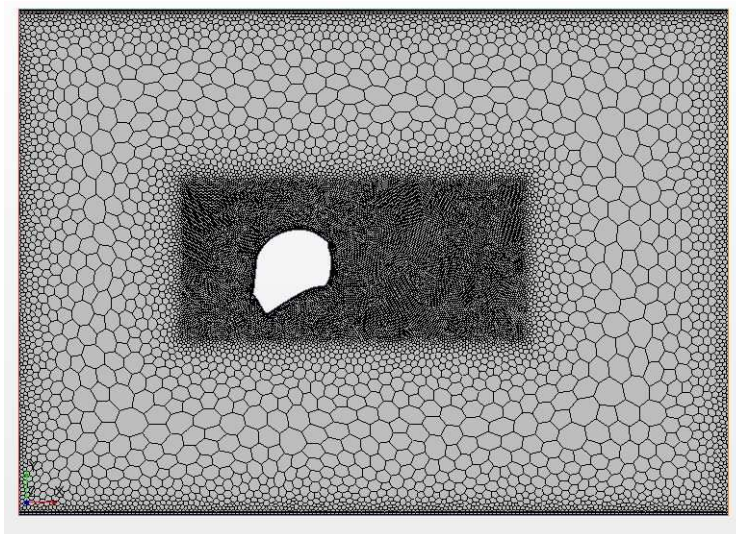
Obrázek 38. Základní rozměry aerodynamického tunelu [11]

Velikost našeho aerodynamického tunelu je odvozen od rozměrů přilby. Rozměry tunelu jsou tedy zvoleny takto:

- Motocyklová přilba
 - Šířka - 146 mm
 - Výška - 220 mm
 - Délka - 205 mm
- Aerodynamický tunel
 - Délka před přilbou - 717,5 mm
 - Délka za přilbou - 1 127,5 mm
 - Šířka tunelu - 730 mm
 - Výška tunelu - 660 mm

5.2.1 VÝPOČETNÍ SÍŤ

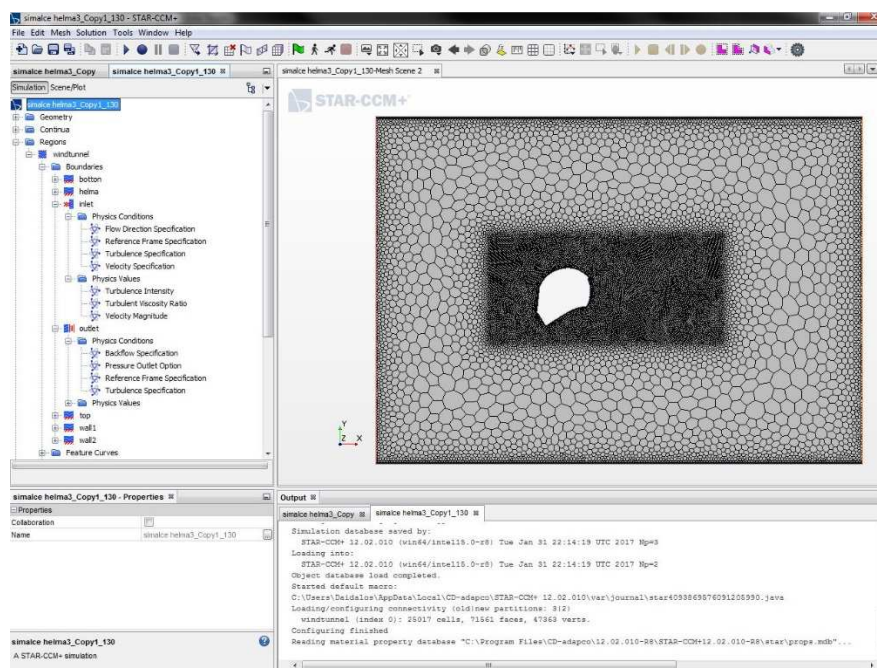
Pro výpočetní oblast neboli pro vytvoření sítě je nutné v programu Star-CCM+ v záložce Operations vytvořit plochy pro definování hranic výpočetní sítě. Tyto plochy získáme tak, že 3D model našeho aerodynamického tunelu převedeme na prvky. Tyto vytvořené prvky v kartě Parts, definují jednotlivé plochy v modelu. Dále se v kartě Operations zvolí možnost vytvořit 2D síť a nastavíme naše požadavky. Tedy polygonální síť o absolutní velikosti buňky 2 cm, mezní vrstva o velikosti 1 cm a počtu 5 prismatických vrstev. Dále se pomocí bloku kolem přilby vytvoří jemnější síť s absolutní velikostí buňky 5 mm. Takto vytvořená síť je zobrazena níže. (Obrázek 39)



Obrázek 39. Výpočetní polygonální síť [Autor]

5.2.2 OKRAJOVÉ PODMÍNKY

V kartě Regions v programu Star-CCM+ nalezneme složku Boundaries kde se nachází námi definované plochy, ty jsou pojmenovány dle svého účelu. Zde se nastavují okrajové podmínky modelu. Vstup větrného tunelu je označen jako Inlet a výstup je označen jako Outlet. Jednotlivé nastavení okrajových podmínek je patrné z obrázku níže. (Obrázek 40) Definice vstupu do tunelu je jako vstup proudu vzduchu (Velocity Inlet) a výstup z tunelu je definován jako výstup tlaku (Pressure Outlet).



Obrázek 40. Nastavení okrajových podmínek aerodynamického tunelu [Autor]

5.2.3 NASTAVENÍ MODELU

V dalším kroku se definují podmínky modelu. Ty byly zadány dle prostředí, ve kterém se motocyklové přilby pohybují. Popis prostředí je zobrazen v tabulce (Tabulka 2). Dále byl nastaven počet iterací, ten byl přepsán z původních 500 na 1200.

Tabulka 2. Popis nastavení fyzikálního modelu [Autor]

Parametr	Typ parametru
Proudění	Ustálené proudění (steady)
Typ média	Plyn (gas)
Typ proudění z hlediska konzistence	Nestlačitelné proudění (constant density)
Typ proudění z hlediska pohybu	turbulentního proudění
Typ turbulentního proudění	turbulentního proudění – K-epsilon
Rychlost proudění vzduchu	80 km/h

6 ANALÝZA VÝSLEDKŮ A NÁVRH ÚPRAV

Cílem této kapitoly je provést simulaci a vyhodnotit původní stav motocyklové přilby. Po popisu současného stavu a zjištění celkového odporu vzduchu se na modelu provede lokalizace kritických míst. Ta budou řešena s ohledem na snížení celkového odporu vzduchu.

Současný trend v úpravách motocyklové přilby je přidělování spojlerů do zadní části přilby. Spojlery začínají na temeni přilby a do značné míry kopírují tvar proudnic vytvářené za temenem přilby bez tohoto spojleru. Tvar takového spojleru je znázorněn na obrázku. (Obrázek 41) [6]



Obrázek 41. Ukázka spojleru motocyklové přilby [6]

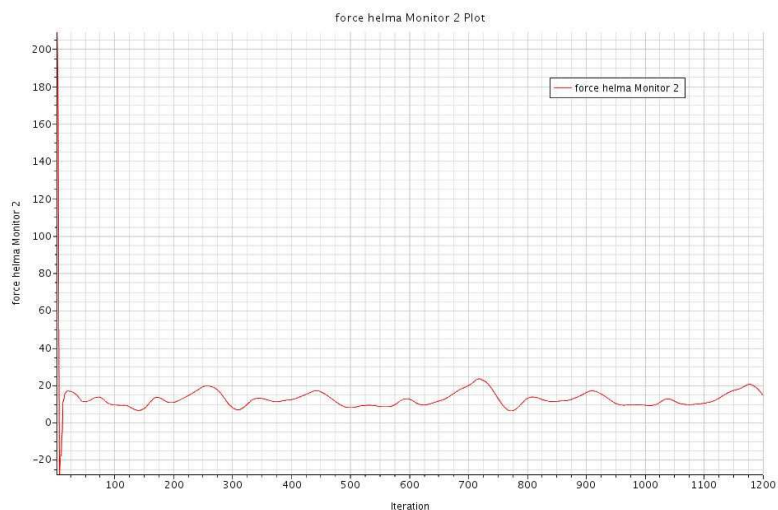
Po otestování několika variant spojlerů provedeme simulaci i nevhodné úpravy přilby. Tato simulace lépe prokáže vliv úpravy tvaru motocyklové přilby. Součástí této kapitoly budou i simulace jednotlivých kombinací navržených úprav. Závěrem bude provedeno vyhodnocení stávajícího stavu oproti úpravám a posouzení všech variant s ohledem na snížení celkového odporu vzduchu motocyklové přilby.

6.1 SIMULACE MOTOCYKLOVÉ PŘILBY

V definovaném aerodynamickém tunelu z kapitoly 5. provedeme simulaci motocyklové přilby bez jakýchkoliv úprav. Simulace byla nejprve provedena při rychlosti proudění 80 km/h. Poté byla provedla další měření vzdušného odporu přilby při rychlostech proudění 130 km/h a 180 km/h.

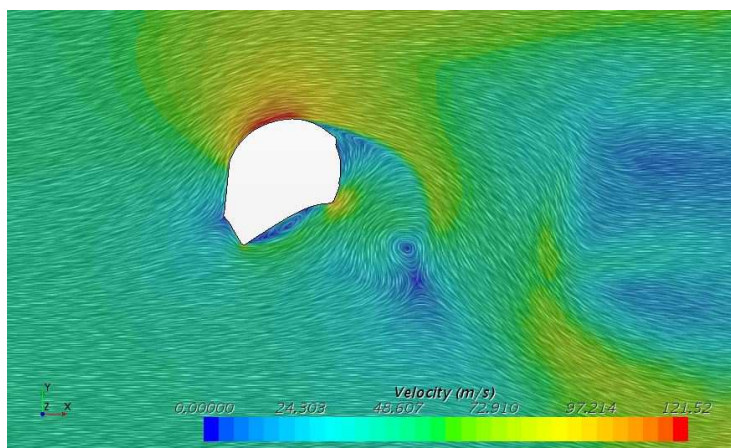
6.1.1 SIMULACE MOTOCYKLOVÉ PŘILBY BEZ ÚPRAV

Simulací byly zjištěny odporové síly pro dané rychlosti a také byly zaznamenány průběhy proudění kolem motocyklové přilby. (Obrázek 42) Z průběhů proudění kolem motocyklové přilby je patrné, že se jedná o proudění s Kármánovou vírovou stezkou. To znamená, že odporová síla je v každém okamžiku jiná. Pro možnost výpočtů provedeme aproximaci dat z ustálené části proudění.



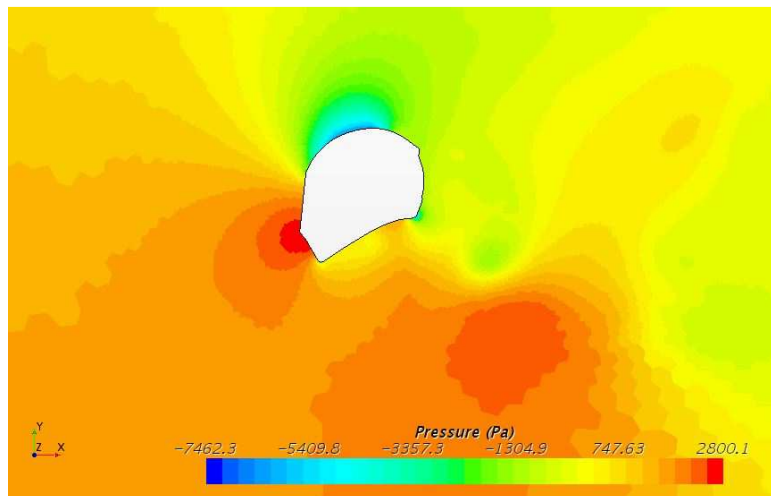
Obrázek 42. Průběh odporové síly na helmě při rychlosti proudění 80 km/h [Autor]

Z proudění na motocyklové přilbě bez úprav je patrné, že kritická místa jsou na temeni přilby a v prostoru za přilbou. (Obrázek 43) Na temeni vzniká proud vzduchu s výrazně vyšší rychlostí, zatím co v prostoru za helmou má proudění vzduchu skoro nulovou rychlost. V oblasti za přilbou tak vzniká podtlak a tím se zvyšuje celkový vzdušný odpor přilby.



Obrázek 43. Rychlost proudění kolem motocyklové přilby [Autor]

Tlakové poměry na motocyklové přilbě znázorňuje obrázek. (Obrázek 44)



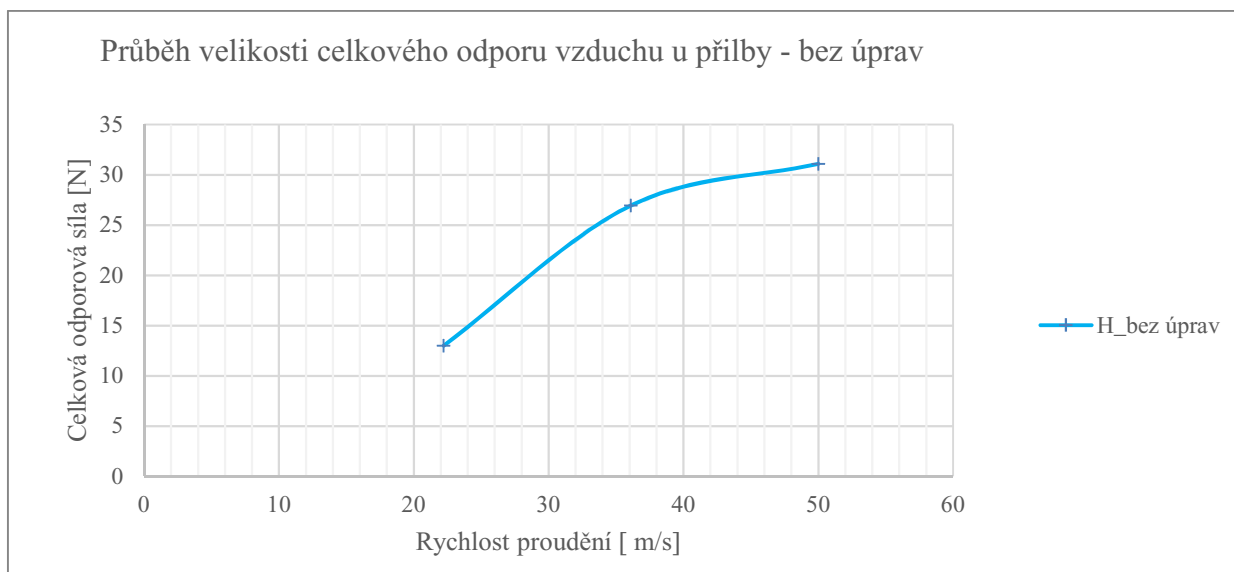
Obrázek 44. Talkové působení kolem neupravené motocyklové přilby [Autor]

Výpočtem z programu Star-CCM+ byly zjištěny celkové odporové síly v daných rychlostech. Hodnoty vzdušných odporů jsou uvedeny v tabulce. (Tabulka 3)

Tabulka 3. Síly odporu vzduchu u motocyklové přilby bez úprav [Autor]

Rychlost proudění [m/s]	22,22	36,11	50,00
H_bez úprav [N]	13,005	26,950	31,093

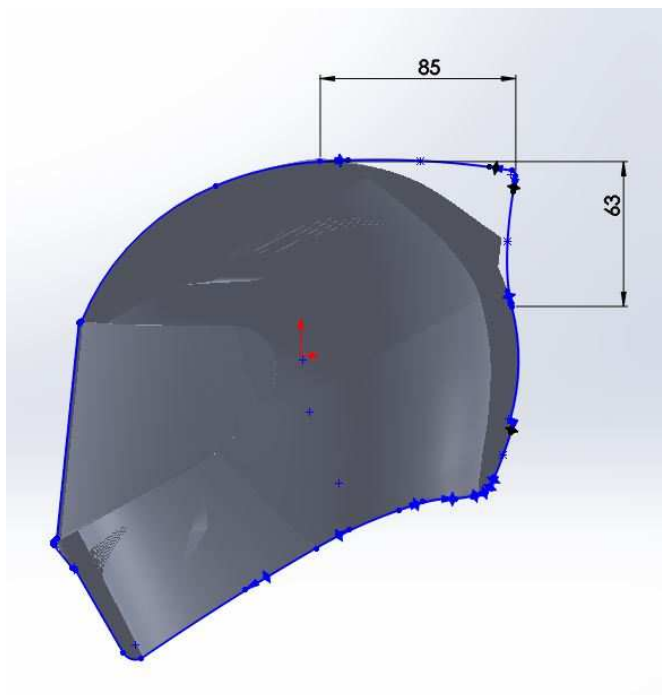
Průběh závislost celkového odporu vzduchu na rychlosti proudění na motocyklové přilbě bez úprav znázorňuje Graf. (Graf 1)



Graf 1. Průběh celkového odporu vzduchu u přilby bez úprav [autor]

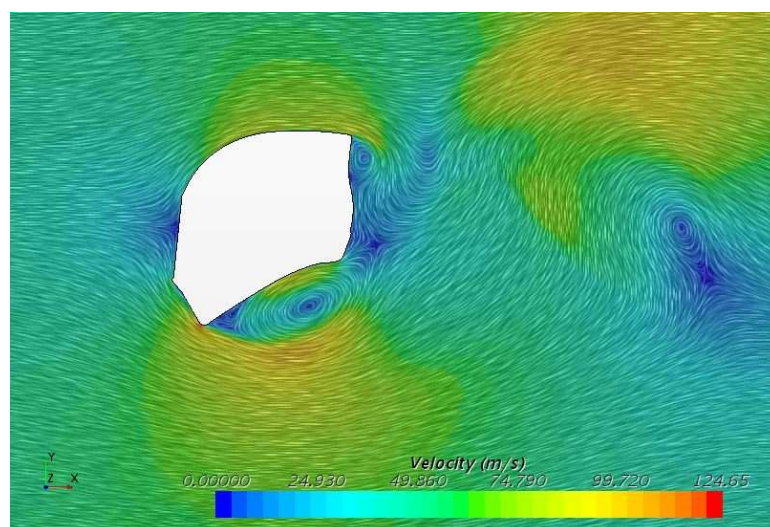
6.1.2 PŘILBA SE SPOJLEREM 85 MM

První úpravou je přidání spojleru o délce 85 mm a výšce 63 mm, rádius zaoblení hran je 2 mm. Jedná se o relativně malý spojler, a to z toho důvodu, že nepřesahuje profil přilby v kolmém směru. Profil spojleru je zobrazen na obrázku. (Obrázek 45)



Obrázek 45. Spojler délky 85 mm a výškou 63 mm [Autor]

Proudění kolem upravené motocyklové přilby se spojlerem 85 mm je oproti přilbě bez úprav horší. Tento stav zobrazuje obrázek a níže uvedené výpočty.

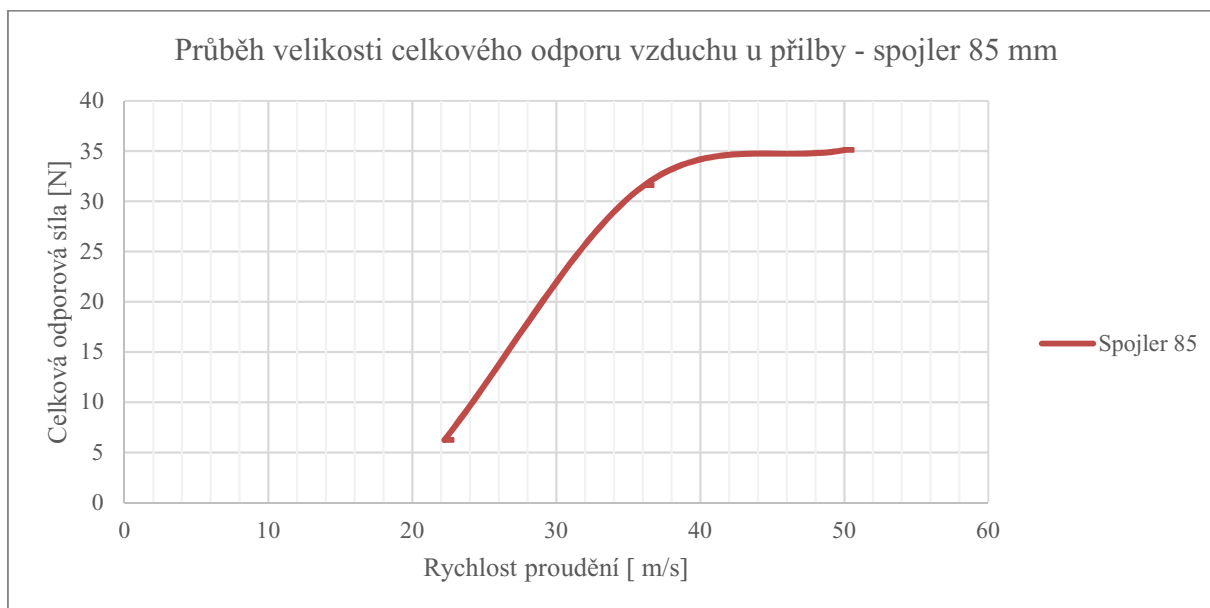


Obrázek 46. Rychlost proudění kolem přilby se spojlerem 85 mm [autor]

Hodnoty odporové síly v daných rychlostech zobrazuje tabulka. (Tabulka 4) Průběh odporové síly je zobrazen v grafu (Graf 2)

Tabulka 4. Odporové síly vzduchu u přilby se spojlerem 85 mm [Autor]

Rychlost proudění [m/s]	22,22	36,11	50,00
Spojler 85 mm [N]	6,235	31,608	35,099



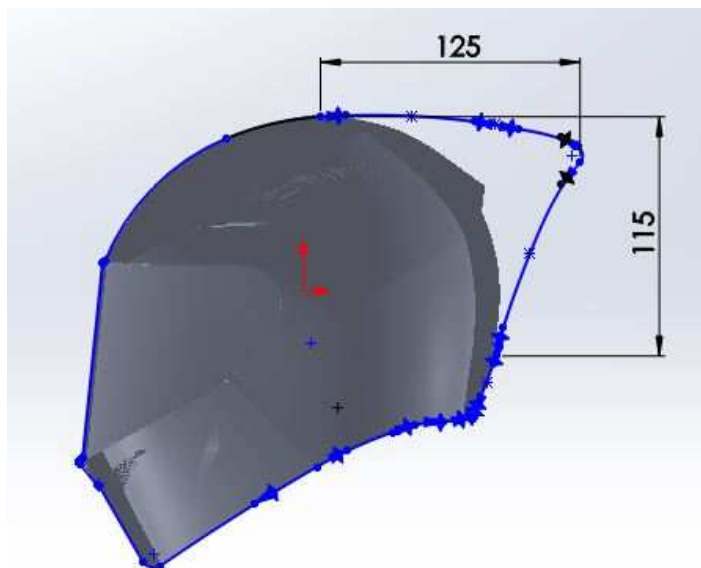
Graf 2. Průběh celkového odporu vzduchu u přilby se spojlerem 85 mm [autor]

Z této simulace vyplývá že přidání spojleru o délce 85 mm nemá význam. Z proudění kolem přilby je patrné že plocha, kde se vytváří zpomalený proud vzduchu se zvětšila, tedy se tím i zvýšila celková odporová síla vzduchu. Pro snížení této síly byla navržena úprava a provedena simulace.

6.1.3 PŘILBA SE SPOJLEREM 125 MM

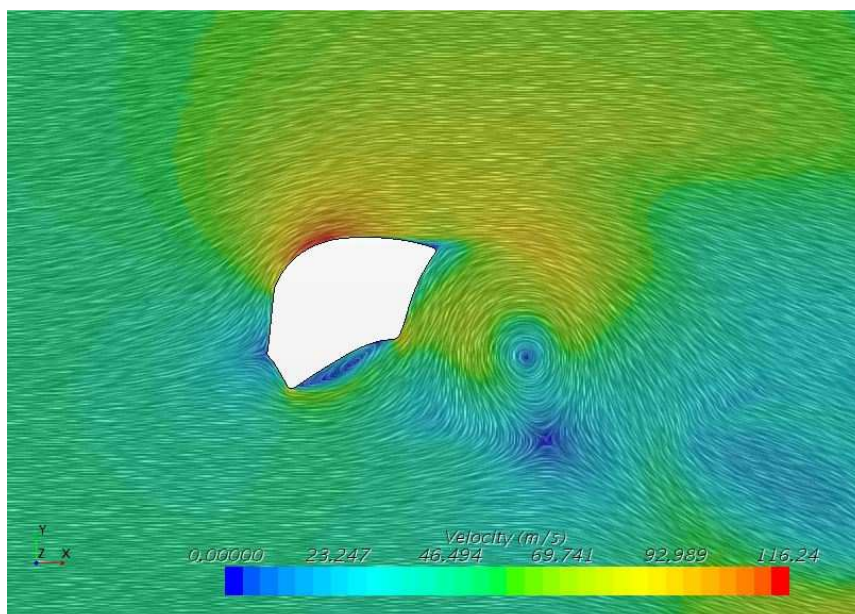
Další úprava je spojler s výrazně delším profilem. Cílem bylo tímto spojlerem vytvořit profil přilby podobný kapce. S tímto spojlerem by měla být menší plocha za přilbou, kde se bude vytvářet proudění s nízkou rychlostí. Délka delšího spojleru je 125 mm a výška je 115 mm, rádius zaoblení na konci spojleru je 5 mm. Tento spojler je značně velký a jeho užití bude limitující s ohledem na pozici jezdce na motocyklu.

Profil přilby se spojlerem o délce 125 mm je znázorněn na obrázku níže. (Obrázek 47)



Obrázek 47. Spojler délky 125 mm a výškou 115 mm [Autor]

Proudění kolem upravené motocyklové přilby se spojlerem 125 mm je oproti přilby bez úprav lepší. Tento stav zobrazuje obrázek a níže uvedené výpočty. (Obrázek 48)

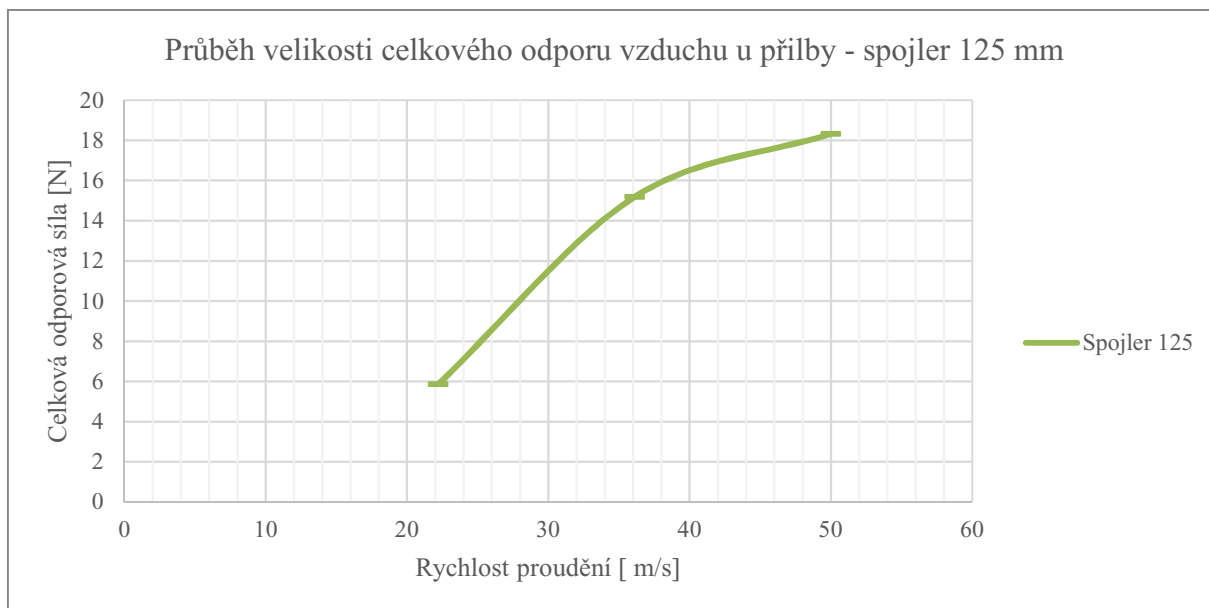


Obrázek 48. Rychlost proudění kolem přilby se spojlerem 125 mm [autor]

Hodnoty odporové síly v daných rychlostech zobrazuje tabulka. (Tabulka 5) Průběh odporové síly je zobrazen v grafu. (Graf 3)

Tabulka 5. Odporové síly vzduchu u přilby se spojlerem 125 mm [Autor]

Rychlost proudění [m/s]	22,22	36,11	50,00
Spojler 125 mm [N]	5,866	15,182	18,324



Graf 3. Průběh celkového odporu vzduchu u přilby se spojlerem 125 mm [autor]

Z této simulace vyplývá že přidání spojleru o délce 125 mm má výrazně lepší vlastnosti než původní stav. Z proudění kolem přilby je patrné, že plocha kde, se vytváří zpomalený proud vzduchu se výrazně zmenšila, tedy se tím i snížila celková odporová síla vzduchu. Rozdíl mezi vzdušným odporem, mezi původní přilbou a přilbou se spojlerem s délkou 125 mm, je skoro poloviční. Tato úprava má tedy výrazný pozitivní vliv a aerodynamiku motocyklové přilby.

Nicméně z konstrukčního hlediska je spojler značně velký a tím je i omezené jeho užití v závislosti na poloze hlavy jezdce při jízdě na různých typech motocyklů.

6.1.4 PŘILBA S ČELNÍM ŠTÍTKEM 50 MM

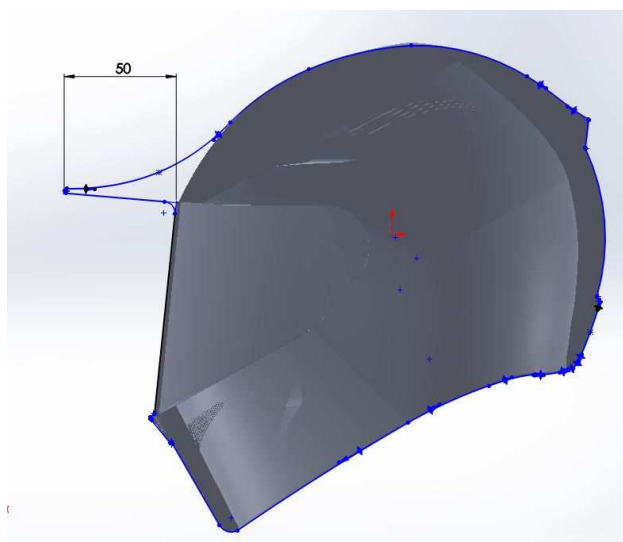
Jedna ze zajímavých úprav tvaru přilby z hlediska aerodynamiky je přidání čelního štítu, který slouží jako sluneční clona. Tato úprava se využívá u přileb určených pro pohyb v terénu, nebo u cestovních integrálních přileb. Logicky se jeví tato úprava jako aerodynamicky nevhodná, a proto bylo zajímavé ji otestovat pomocí simulace. Zkoumáno bylo, jak moc tato úprava zhorší celkový odpor vzduchu přilby.

Ukázka sluneční clony je uvedena níže na obrázku. (Obrázek 49)



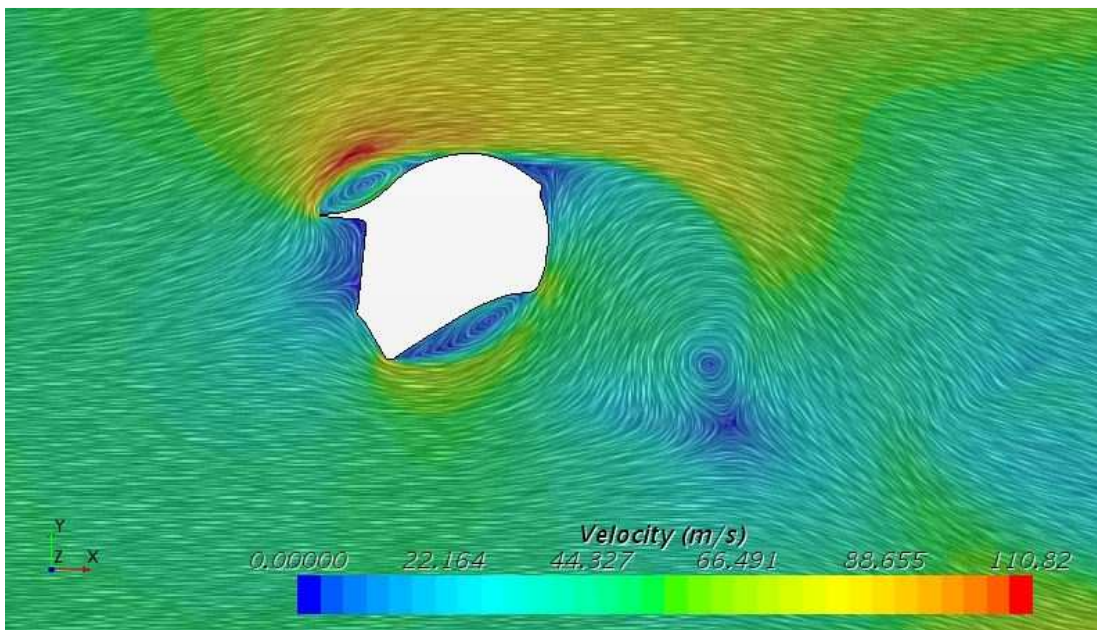
Obrázek 49. Ukázka sluneční clony motocyklové přilby [4]

Délka čelního štítku je 50 mm a rádius zaoblení na konci je 2 mm. Profil přilby s čelním štítkem o délce 50 mm je znázorněn na obrázku níže. (Obrázek 50) Hlavním problémem této úpravy je vytvoření turbulentního proudění hned nad štítkem, kde se na hraně štítku odtrhne proud vzduchu a v prostoru nad štítkem se vytvoří vír. Na čelní ploše přilby se vytvořila větší plocha s proudem vzduchu s malou rychlostí proudění. Zatímco v zadní části přilby se zmenší plocha proudu s nízkou rychlostí proudění.



Obrázek 50. Čelní štítek délky 50 mm [Autor]

Proudění kolem takto upravené motocyklové přilby s čelním štítkem 50 mm je oproti přilby bez úprav značně horší. Tento stav zobrazuje obrázek a níže uvedené výpočty. (Obrázek 51)

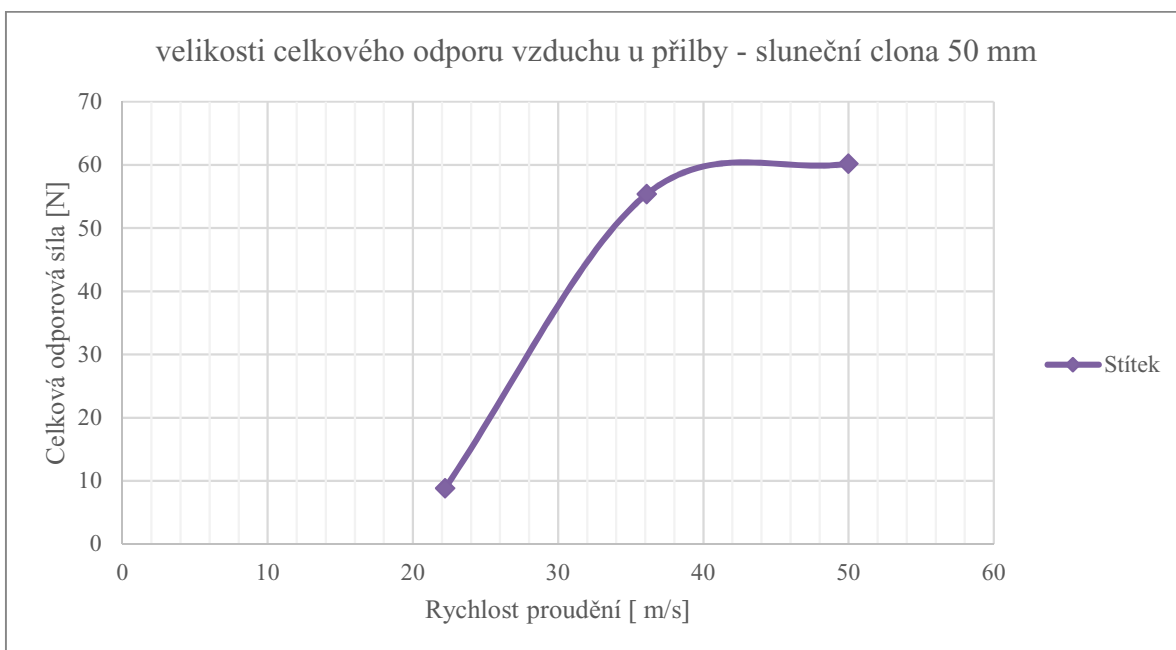


Obrázek 51. Rychlost proudění kolem přilby se sluneční clonou 50 mm [autor]

Hodnoty odporové síly v daných rychlostech zobrazuje tabulka. (Tabulka 6) Průběh odporové síly je zobrazen v grafu. (Graf 3)

Tabulka 6. Odporové síly vzduchu u přilby se sluneční clonou 50 mm [Autor]

Rychlost proudění [m/s]	22,22	36,11	50,00
štítek [N]	8,860	55,385	60,204



Graf 4. Průběh celkového odporu vzduchu u přilby se sluneční clonou 50 mm [autor]

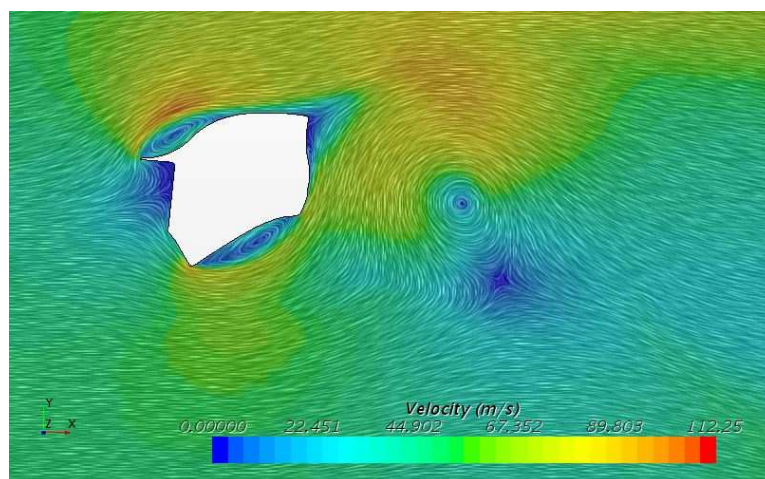
Výsledek simulace vyšla dle očekávání. Přilba s touto úpravou je výrazně horší z hlediska celkového odporu vzduchu. Při rychlosti proudění vzduchu 180 km/h je odpor této přilby 60,204 [N] což je skoro dvojnásobek odporu vzduchu oproti přilbě bez úprav ve stejné rychlosti proudění.

6.1.5 KOMBINACE VARIANT ÚPRAV

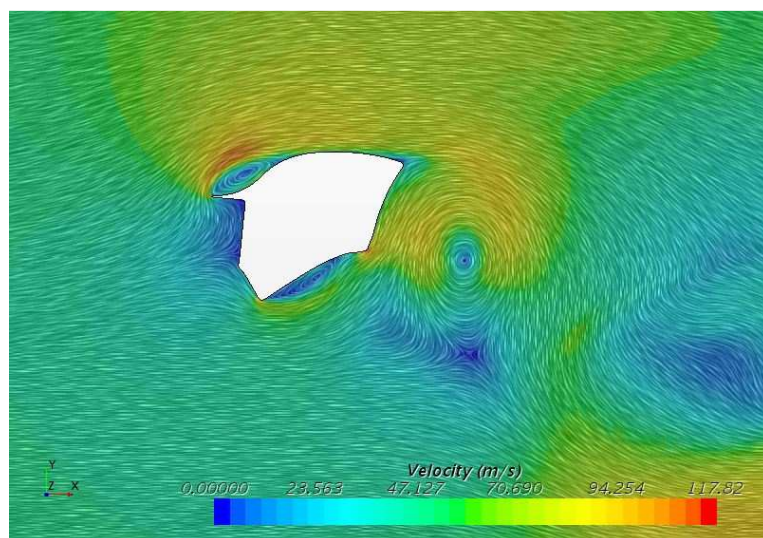
Výše uvedené úpravy byly pro další simulace vzájemně zkombinovány:

- Přilba se spojlerem 85 mm a čelním štítkem 50 mm
- Přilba se spojlerem 125 mm a čelním štítkem 50 mm

Proudění vzduchu kolem přilby s kombinací daných úprav jsou zobrazeny níže na obrázcích. (Obrázek 52) (Obrázek 53)



Obrázek 52. Rychlost proudění – přilba se sluneční clonou a spojlerem 85 mm [autor]

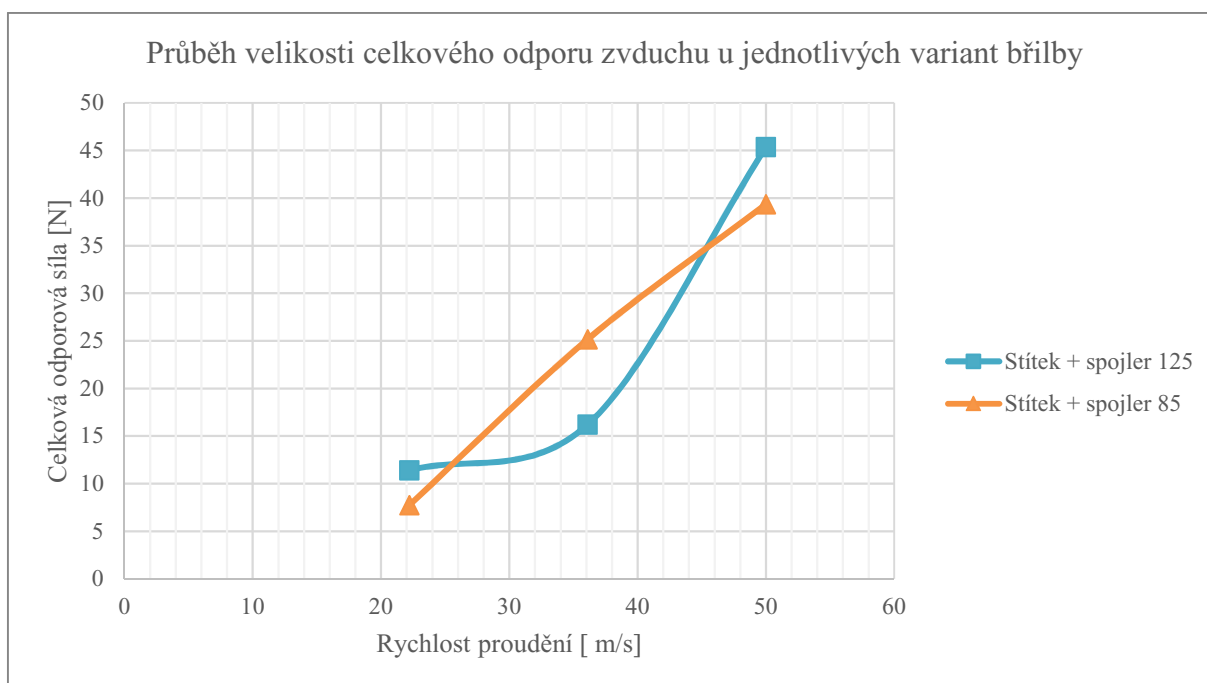


Obrázek 53. Rychlost proudění – přilba se sluneční clonou a spojlerem 125 mm [autor]

Hodnoty odporové síly v daných rychlostech zobrazuje tabulka. (Tabulka 7) Průběh odporové síly pro obě kombinace je zobrazena v grafu. (Graf 4)

Tabulka 7. Odporové síly vzduchu u kombinace sluneční clony a spojlerů [Autor]

Rychlost proudění [m/s]	22,22	36,11	50,00
Stítek + spojler 85 mm [N]	7,751	25,165	39,373
Stítek + spojler 125 mm [N]	11,412	16,224	45,371



Graf 5. Průběh celkového odporu vzduchu u kombinací sluneční clony a spojlerů [autor]

7 VYHODNOCENÍ

Na začátku byla provedena simulace sériové přilby. Simulace byly provedeny pro tři rychlosti proudění (80 km/h, 130 km/h, 180 km/h) tím byl získán průběh vývoje vzdušné odporové síly pro danou přilbu. Dále byly navrženy tři úpravy ve formě dvou spojlerů s rozdílnou délkou a čelním štítkem. U spojlerů bylo očekáváno zlepšení vlastností přilby, a to se i potvrdilo. U čelního štítu bylo očekáváno zhoršení vlastností, to se prokázalo. Navíc při rychlosti proudění 180 km/h byla hodnota odporu vzduchu skoro dvojnásobná, oproti původní přilbě. Na konec byly provedly kombinace jednotlivých navržených úprav. Tyto kombinace se prokázaly jako nepřínosné, nicméně vlastnosti těchto dvou kombinací byly výrazně lepší jak odpor přilby pouze s čelním štítkem.

7.1 VYHODNOCENÍ SIMULACÍ

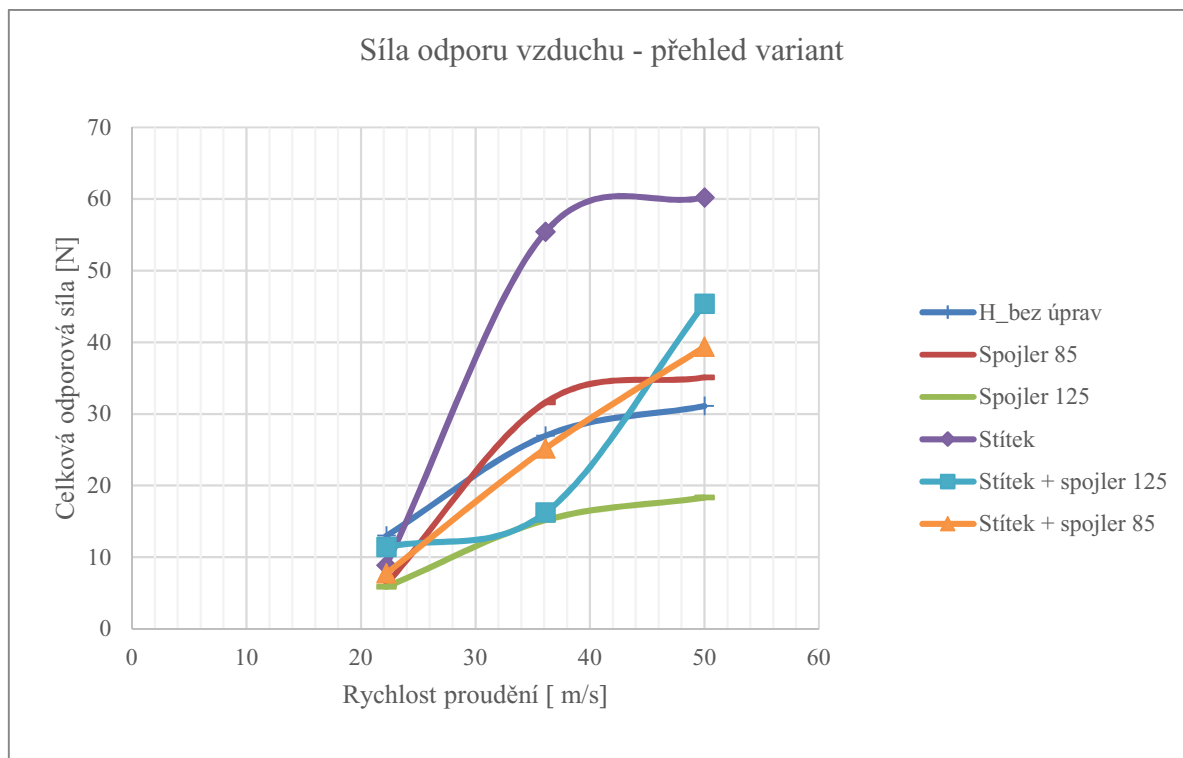
Porovnání všech simulací je zobrazeno níže v tabulce (Tabulka 8) a graficky jsou zobrazeny všechny simulace v grafu. (Graf 5)

Tabulka 8. Celkové porovnání všech výsledků simulací [Autor]

Rychlost proudění	[m/s]	22,22	36,11	50,00
H_ bez úprav	[N]	13,005	26,950	31,093
Spojler 85 mm		6,235	31,608	35,099
Spojler 125 mm		5,866	15,182	18,324
Štítek		8,860	55,385	60,204
Štítek + spojler 85 mm		7,751	25,165	39,373
Štítek + spojler 125 mm		11,412	16,224	45,371

Jak je patrné z tabulky, nejlepších výsledků se dosáhlo při úpravě se spojlerem o délce 125 mm. Tato přilba dosáhla při všech rychlostech proudění nejnižší odporovou sílu vzduchu. Jako další vhodná varianta se ukázala přilba bez úprav. Dá se tedy tvrdit, že hlavní zlepšení aerodynamiky této přilby bylo způsobeno prodloužením spojleru nad hodnotu 85 mm. Jako nejhorší se prokázala varianta s čelním štítkem. Tento výsledek byl očekávaný. Při posledních dvou simulacích se zkoumal vliv kombinací čelního štítu s jednotlivými spojlery. Tyto simulace se projeví jako nepřínosné vzhledem k původnímu tvaru přilby, naopak se kladně projeví jako možnost zlepšení aerodynamiky u přilb s čelním štítkem. Obě kombinace měly výrazně nižší odpor vzduchu než samotná přilba s čelním štítkem.

V grafu níže jsou znázorněny průběhy odporové síly vzduchu pro jednotlivé varianty přilby. (Graf 5)



Graf 6. Průběh celkového odporu vzduchu u kombinací sluneční clony a spojlerů [autor]

8 ZÁVĚR

Cílem diplomové práce bylo pomocí metody reverzního inženýrství zjistit odpor vzduchu u vybrané motocyklové přilby. Dále bylo cílem porovnat a vyhodnotit navržené úpravy tvaru motocyklové přilby tak, aby se odpor vzduchu snížil.

Prvním krokem tedy bylo provedení 3D skenu reálné, sériově vyráběné přilby. Konstrukce modelu, který se dá použít v programu Star-CCM+, byla provedena v programu SolidWorks. V tomto programu byl vytvořen model přilby, který vychází ze 3D skenu. Následně byl model exportován ve formátu *.x_t, který je vhodný pro import do programu Star-CCM+.

V programu Star-CCM+ byl vytvořen simulační model pro daný model přilby. Byla vytvořena polygonální výpočetní síť, byly vytvořeny okrajové podmínky výpočtu a definoval se typ proudění, typ plynu a rychlost proudění vzduchu v simulačním modelu. Simulace se prováděly pro tři různé rychlosti proudění. Nejprve se provedla simulace pro rychlost proudění 80 km/h, dále pro 130 km/h a na konec 180 km/h.

Z této simulace se zjistil charakter proudění kolem přilby, definovaly se kritická místa na přilbě, která vytváří turbulentní proudění a následně byly navrženy možné úpravy.

Pro navržené úpravy se provedly simulace proudění a následně se provedly simulace i pro možnou kombinaci jednotlivých úprav. Všechny měření byly vyhodnoceny a zaznamenány.

Jako optimální úprava tvaru motocyklové přilby vyšla varianta přilby se spojlerem o délce 125 mm, tato varianta má nejnižší celkový odpor vzduchu. Při simulaci pro rychlost proudění 180 km/h byla hodnota odporu vzduchu skoro poloviční oproti odporu vzduchu přilby bez úprav.

POUŽITÉ INFORMAČNÍ ZDROJE

- [1] Brož, V.: Aerodynamika nízkých rychlostí, skripta ČVUT Praha 2001, ISBN 80-01-02347-8, 182 s.
- [2] 3d Scanners and 3d Scanning Technology | 3D Digital Corp. 3d Scanners and 3d Scanning Technology | 3D Digital Corp [online]. Copyright © 2018 [cit. 15.05.2019]. Dostupné z: <http://3ddigitalcorp.com/>
- [3] DRÁBKOVÁ, Sylva a kol. Mechanika tekutin, Ostrava: VŠB TU, 2007, 257 s., ISBN 978-80-248-1508-4
- [4] Full face helmets Pista GP R – Motorcycle helmets AGV (Official Website). [online]. Copyright © 2019 Dainese S.p.A Via Louvigny, 35 [cit. 15.05.2019]. Dostupné z: <https://www.agv.com/row/en/full-face/pista-gp-r/>
- [5] Gdyby ktoś się zastanawiał, tak wygląda aerodynamika krowy - Ministerstwo śmiesznych obrazków - KWEJK.pl. Ministerstwo memów, zdjęć i innych śmiesznych obrazków - KWEJK.pl [online]. Dostupné z: <https://kwejk.pl/obrazek/3189801/gdyby-ktos-sie-zastanawial-tak-wyglada-aerodynamika-krowy.html>
- [6] HUCHO, Wolf-Heinrich. Aerodynamics of road vehicles: from fluid mechanics to vehicle engineering. 4th ed. Warrendale, PA: Society of Automotive Engineers, c1998. ISBN 07-680-0029-7.
- [7] JANALÍK, Jaroslav, Obtékání a odpor těles, 1. vyd. Ostrava: VŠB TU, 2008, 108 s., ISBN 978-80-248-1911-2
- [8] KOZUBKOVÁ, Milada, Modelování proudění tekutin, FLUENT, CFX. 1. Vyd. Ostrava: VŠB TU, 2008, 153 s., Učební text
- [9] MAŠTOVSKÝ, O.: Hydromechanika. SNTL Praha 1956, 1963
- [10] MATOUŠEK VÁCLAV- P_ednáška VUT- Obtékání tuhého povrchu a pevné_ástice v kapalin_ [online]. Poslední revize 17.4. 2011. Dostupné z: <http://hydraulika.fsv.cvut.cz/users/matousek/downloads/web_HY3V_12_Obtekani_a_pevne_castice_v_kapaline.pdf>

- [11] OROUČKA, K, látky znečišťující ovzduší, Ostrava: VŠB TU, 2001, ISBN 80-248-0011.
- [12] Příspěvatelé Wikipedie, Bernoulliho rovnice [online], Wikipedie: Otevřená encyklopedie, c2019, Datum poslední revize 14. 01. 2019, 14:41 UTC, [citováno 16. 05. 2019] https://cs.wikipedia.org/w/index.php?title=Bernoulliho_rovnice&oldid=16858319
- [13] Příspěvatelé Wikipedie, Reynoldsovo číslo [online], Wikipedie: Otevřená encyklopedie, c2018, Datum poslední revize 4. 08. 2018, 11:00 UTC, [citováno 16. 05. 2019] https://cs.wikipedia.org/w/index.php?title=Reynoldsovo_%C4%8D%C3%ADslo&oldid=16288548
- [14] Příspěvatelé Wikipedie, Rovnice kontinuity [online], Wikipedie: Otevřená encyklopedie, c2019, Datum poslední revize 24. 02. 2019, 18:28 UTC, [citováno 16. 05. 2019] https://cs.wikipedia.org/w/index.php?title=Rovnice_kontinuity&oldid=16981768
- [15] Příspěvatelé Wikipedie, Stavová rovnice [online], Wikipedie: Otevřená encyklopedie, c2018, Datum poslední revize 21. 09. 2018, 11:21 UTC, [citováno 16. 05. 2019] https://cs.wikipedia.org/w/index.php?title=Stavov%C3%A1_rovnice&oldid=16476588
- [16] Wikipedie: Otevřená encyklopedie: Aerodynamika [online]. c2019 [citováno 16. 05. 2019]. Dostupný z: <https://cs.wikipedia.org/w/index.php?title=Aerodynamika&oldid=17043734>

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obrázek 1: ukázka CFD výpočtu aerodynamiky [5].....	11
Obrázek 2. Rozdělení proudění tekutin podle fyzikálních vlastností [8]	14
Obrázek 3. Potenciální proudění [3].....	15
Obrázek 4. Vířivé proudění [3].....	15
Obrázek 5. Laminární proudění [6]	15
Obrázek 6. Turbulentní proudění [6].....	16
Obrázek 7.: Popis rovnice kontinuity [14].....	19
Obrázek 8. Rozdělení proudění tekutin dle kinematických hledisek [8].....	20
Obrázek 9. Síly a momenty působící na obtékané těleso [7].....	21
Obrázek 10: Parabolicky se zvyšující rychlost částic kapaliny [7]	22
Obrázek 11: Vývoj mezní vrstvy při obtékání rovinné desky [7]	22
Obrázek 12: Mezní vrstva laminárního a turbulentního proudění [7].....	23
Obrázek 13: Odtržení mezní vrstvy na zakřiveném povrchu [7].....	24
Obrázek 14: Úplav za obtékaným tělesem [7].....	24
Obrázek 15: Těleso obtékání ideální tekutinou [7]	25
Obrázek 16: Obtékání desky rovnoběžné s vektorem rychlosti [7].....	26
Obrázek 17: Obtékání desky kolmé k vektoru rychlosti [7].....	26
Obrázek 18: Obtékání zakřivených těles [7]	27
Obrázek 19: Schéma vývoje mezní vrstvy na tělese se zakřiveným tvarem [7]	27
Obrázek 20. Princip otevřeného aerodynamického tunelu [9]	29
Obrázek 21. Uzavřený aerodynamické tunel [9]	30
Obrázek 22. Metody modelování turbulence [8].....	31
Obrázek 23: Testování bezpečnosti přilby v roce 1927 firmou Bell ve státě Minnesota [6] ...	32
Obrázek 24: Tlak působící na přilbu u rozdílné polohy na motocyklu [6].....	34
Obrázek 25: Působení síly vyvolané spojlerem [6]	35
Obrázek 26: Vliv délky krku na síly vyvolané na přilbě [6]	35
Obrázek 27: Vliv kapotáže na odklon proudu vzduchu na přilbu [6]	36
Obrázek 28. Typy výpočetních sítí programu Star-CCM+ [Autor]	38
Obrázek 29. Definování okrajových podmínek v programu Star-CCM+ [Autor]	39
Obrázek 30: Přilba SCORPION Astone GTB Exclusive Rosso 2011 [Autor]	41
Obrázek 31: Himalay PrecisSCAN H250 [2].....	41
Obrázek 32: Polep přilby reflexními body [Autor]	42

Obrázek 33: Nanesení křídového prachu pro zvýšení odrazivosti laseru [Autor].....	42
Obrázek 34. Výsledný sken přilby [Autor]	43
Obrázek 35. Model přilby vytvořený v programu SolidWorks [Autor].....	43
Obrázek 36: Rozhraní programu SolidWorks [autor]	44
Obrázek 37. Geometrický model aerodynamického tunelu [Autor]	46
Obrázek 38. Základní rozměry aerodynamického tunelu [11].....	47
Obrázek 39. Výpočetní polygonální síť [Autor]	48
Obrázek 40. Nastavení okrajových podmínek aerodynamického tunelu [Autor]	48
Obrázek 41. Ukázka spojleru motocyklové přilby [6]	50
Obrázek 42. Průběh odporové síly na helmě při rychlosti proudění 80 km/h [Autor].....	51
Obrázek 43. Rychlost proudění kolem motocyklové přilby [Autor].....	51
Obrázek 44. Talkové působení kolem neupravené motocyklové přilby [Autor]	52
Obrázek 45. Spojler délky 85 mm a výškou 63 mm [Autor]	53
Obrázek 46. Rychlost proudění kolem přilby se spojlerem 85 mm [autor]	53
Obrázek 47. Spojler délky 125 mm a výškou 115 mm [Autor]	55
Obrázek 48. Rychlost proudění kolem přilby se spojlerem 125 mm [autor]	55
Obrázek 49. Ukázka sluneční clony motocyklové přilby [4].....	57
Obrázek 50. Čelní štítek délky 50 mm [Autor]	57
Obrázek 51. Rychlost proudění kolem přilby se sluneční clonou 50 mm [autor].....	58
Obrázek 52. Rychlost proudění – přilba se sluneční clonou a spojlerem 85 mm [autor].....	59
Obrázek 53. Rychlost proudění – přilba se sluneční clonou a spojlerem 125 mm [autor].....	59

SEZNAM TABULEK

Tabulka 1: Složení vzduchu [3].....	12
Tabulka 2. Popis nastavení fyzikálního modelu [Autor].....	49
Tabulka 3. Síly odporu vzduchu u motocyklové přilby bez úprav [Autor].....	52
Tabulka 4. Odporové síly vzduchu u přilby se spojlerem 85 mm [Autor].....	54
Tabulka 5. Odporové síly vzduchu u přilby se spojlerem 125 mm [Autor].....	55
Tabulka 6. Odporové síly vzduchu u přilby se sluneční clonou 50 mm [Autor]	58
Tabulka 7. Odporové síly vzduchu u kombinace sluneční clony a spojlerů [Autor]	60
Tabulka 8. Celkové porovnání všech výsledků simulací [Autor]	61

SEZNAM GRAFŮ

Graf 1. Průběh celkového odporu vzduchu u přilby bez úprav [autor]	52
Graf 2. Průběh celkového odporu vzduchu u přilby se spojlerem 85 mm [autor]	54
Graf 3. Průběh celkového odporu vzduchu u přilby se spojlerem 125 mm [autor]	56
Graf 4. Průběh celkového odporu vzduchu u přilby se sluneční clonou 50 mm [autor]	58
Graf 5. Průběh celkového odporu vzduchu u kombinací sluneční clony a spojlerů [autor]	60
Graf 6. Průběh celkového odporu vzduchu u kombinací sluneční clony a spojlerů [autor]	62

SEZNAM ROVNIC

Rovnice 1. Rovnice hustoty [3]	13
Rovnice 2. Rovnice viskozity [3]	13
Rovnice 3. Výpočet Reynoldsova čísla [7]	16
Rovnice 4. Rovnost kinetické a potenciální energie. [12]	18
Rovnice 5. Bernoulliho rovnice. [12]	18
Rovnice 6. Zákon zachování hybnosti [3]	19
Rovnice 7. Stavová rovnice plynu [15]	19
Rovnice 8. Rovnice odporové síly [7]	25

PŘÍLOHY (ELEKTRONICKY)

Příloha 1. Simulace obtékání pro rychlost $22,22 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ v programu STAR-CCM+
Příloha 1. Simulace obtékání pro rychlost $36,11 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ v programu STAR-CCM+
Příloha 1. Simulace obtékání pro rychlost $50,00 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ v programu STAR-CCM+