

České vysoké učení technické v Praze

Fakulta strojní

Ústav automobilů, spalovacích motorů a kolejových vozidel

Ověření CFD simulací v aerodynamickém tunelu

Bakalářská práce

Vypracoval: Lukáš Pacoň

Vedoucí bakalářské práce: Ing. Nikita Astraverkhau

Rok: 2016

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Pacoň** Jméno: **Lukáš** Osobní číslo: **408550**
Fakulta/ústav: **Fakulta strojní**
Zadávající katedra/ústav: **Ústav automobilů, spalovacích motorů a kolejových vozidel**
Studijní program: **Strojirenství**
Studijní obor: **Konstruování podporované počítačem**

II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce:

Ověření CFD simulaci v aerodynamickém tunelu

Název bakalářské práce anglicky:

CFD Simulation Validation Tests in Wind Tunnel

Pokyny pro vypracování:

- Navrhněte postup validačních testů v aerodynamickém tunelu pro přitlačné křídlo vozu Formula Student - Zrealizujte měření přitlačného křídla vozu Formula Student - Měření vyhodnotte a navrhněte úpravy výpočtového modelu

Seznam doporučené literatury:

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) bakalářské práce:

Ing. Nikita Astraverkhau

Jméno a pracoviště konzultanta(ky) bakalářské práce:

Datum zadání bakalářské práce: **18.04.2016**

Termín odevzdání bakalářské práce: **30.06.2016**

Platnost zadání bakalářské práce:

Podpis vedoucí(ho) práce

Podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

Podpis děkana(ky)

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

22.4.2016

Datum převzetí zadání

Pacoň

Podpis studenta(ky)

Anotační záznam

Jméno autora: Lukáš Pacoň

Název bakalářské práce: Ověření CFD simulací v aerodynamickém tunelu

Název bakalářské práce v anglickém jazyce: CFD simulations verification in wind tunnel

Rozsah práce:

49 stran

1 tabulka

34 obrázků

Akademický rok: 2015/2016

Ústav: 12 120 Ústav automobilů, spalovacích motorů a kolejových vozidel

Studijní program: B2341 Strojírenství

Vedoucí práce: Ing. Nikita Astraverkhau

Klíčová slova: Formula Student, aerodynamika, větrný tunel, CFD, ověření, měření, přítlak, křídlo

Key words: Formula student, aerodynamics, wind tunnel, CFD, verification, measurement, downforce, wing

Abstrakt:

Tématem této bakalářské práce je návrh a provedení měření v aerodynamickém tunelu na zvoleném modelu. Návrh vhodného modelu pro měření. Provedení simulací shodného modelu v CFD programu StarCCM+ a následně porovnání obou metod. Zjištění přesnosti CFD simulací a navržení úpravy simulací.

Abstract:

The purpose of this bachelor work is the design and measurement in wind tunnel of the test model. Design of the convenient testing model. Simulate similar model with test model in the CFD program and comparison of both methods. Find out precision of simulations and suggest appropriate changes in CFD model.

Čestné prohlášení

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci na téma „Ověření CFD simulací v aerodynamickém tunelu“ vypracoval samostatně s použitím odborné literatury a pramenů, uvedených v seznamu zdrojů, jenž tvoří poslední kapitolu této práce.

V Praze dne

Lukáš Pacoň

Poděkování

Děkuji Ing. Nikitovi Astraverkhau za vedení mé bakalářské práce, konzultace a cenné připomínky při jejím zpracování.

Dále děkuji členům týmu CTU CarTech za veškerou pomoc a také za příležitost, které se mi dostalo.

Obsah

1	Úvod	10
1.1	Formula Student/SAE	12
2	Stav minulý	13
3	Ostatní provedená měření	13
3.1	Měření na tlumičích vozu na letišti	13
3.2	Měření tlakovou sítí	14
4	Cíl práce	16
5	Tunel	16
5.1	Aerodynamické tunely	17
5.1.1	Otevřené aerodynamické tunely	17
5.1.2	Uzavřené aerodynamické tunely	18
5.2	Parametry tunelu pro experiment	20
6	Volba vhodného modelu	21
6.1	Velikost modelu	21
6.2	Celý vůz	21
6.3	Zmenšený model celého vozu	21
6.3.1	Machovo číslo	21
6.3.2	Reynoldsovo číslo	22
6.4	Část vozu	22
7	Přítlačné křídlo	22
7.1	Vlastnosti přítlačného křídla	22
7.2	Geometrie křídla	23
7.1	Koeficienty	24
7.1.1	Součinitel vztlaku	25
7.1.2	Součinitel odporu	25
7.2	Testovací křídlo	26
7.2.1	Profil	26
7.3	Křídlo	27
7.4	Uchycení modelu	28
8	Měřené parametry	28
9	CFD simulace	29

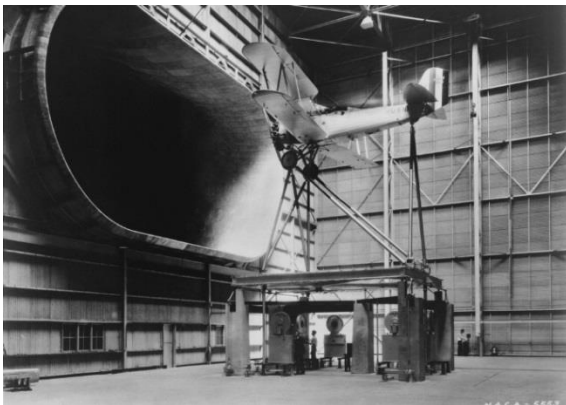
9.1	Parametry simulace.....	29
9.1.1	All y^+ Wall Treatment.....	29
9.1.2	Cell Quality Remediation.....	30
9.1.3	Vzduch.....	30
9.1.4	Gradients.....	30
9.1.5	Ideální plyn.....	30
9.1.6	Reynolds – Averaged Navier Stokes.....	31
9.1.7	Segregated Flow.....	31
9.1.8	Spalart-Allmaras.....	31
9.1.9	Steady.....	33
9.1.10	Three Dimensional.....	33
9.1.11	Turbulent.....	33
9.1.12	Navier – Stokes.....	33
9.2	Simulovaný tunel.....	35
9.3	Síť.....	36
10	Vyhodnocení měření v tunelu.....	39
11	Vyhodnocení CFD simulace.....	41
12	Porovnání výsledků měření.....	42
13	Úprava fyzikálního modelu simulace.....	43
13.1	K-epsilon.....	43
13.2	K-omega.....	45
14	Závěr.....	46
15	Použitá literatura.....	47

Seznam použitých veličin

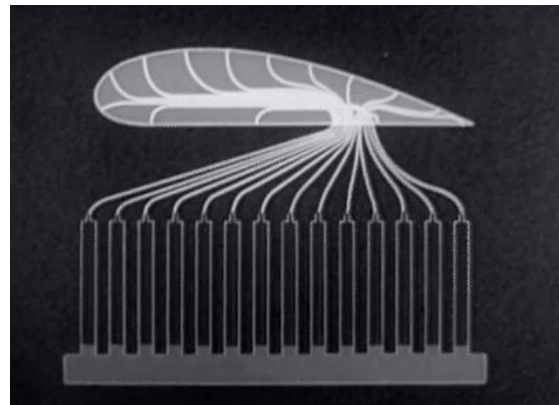
Symbol	Význam	Jednotky
F	Síla	[N]
ρ	Hustota	[kg/m ³]
c	Koeficient vzlaku, odporu	[1]
S	Čelní plocha	[m ²]
v	Rychlost	[m/s]
λ	Štíhlost křídla	[1]
g	Gravitační zrychlení	[m/s ²]
h	Výška	[m]
p	Tlak	[Pa]
π	Ludolfovo číslo	[1]
A	Průřez	[m ²]
\dot{V}	Objemový tok	[m ³ /s]
c_p	Koeficient tlaku	[1]
q	Dynamický tlak	[Pa]
F _y , L	Vztlaková síla	[N]
l	Délka	[m]
R_e	Reynoldsovo číslo	[1]
μ	Dynamická viskozita	[Pa.s]
ν	Kinematická viskozita	[m ² /s]
u ⁺	Bezrozměrná rychlost	[1]
y ⁺	Bezrozměrná vzdálenost	[1]
y	Kolmá vzdálenost	[m]
u	Rychlost	[m/s]
τ	Smykové napětí	[Pa]
κ	Karmánova konstanta	[1]
P	Výkon	[W]
M	Moment	[Nm]
V	Objem	[m ³]
O	Odpor	[N]
f	Odpor valením	[1]
a	Zrychlení	[m/s ²]

1 Úvod

Aerodynamika je oborem fyziky, zabývá se studiem plynů a jejich interakcí s pevnými objekty. Historie aerodynamiky začíná již v 18. století. V roce 1738 formuluje Daniel Bernoulli ve své knize Hydrodinamica zásadní rovnici, dnes známou jako Bernoulliho rovnice. V roce 1799 vyvinul George Cayley první koncept moderního letadla, popsal tak základní veličiny letu – vztlak, tah, odpor a hmotnost. 17. prosince 1903 se bratři Wrightové poprvé se svým letadlem vznesli k obloze. První aerodynamický tunel vznikl v roce 1871 (obr 1.) [1]. Ze začátku se vývoj soustředil na porozumění základním fyzikálním jevům (obr 2). Se zdokonalující se technikou se pochopitelně rozšiřovaly možnosti použití a využití aerodynamických tunelů. Dnešní tunely se stále potýkají s řadou nedostatků např. limitní délkou a šířkou, nebo aproximací pohybující se vozovky.

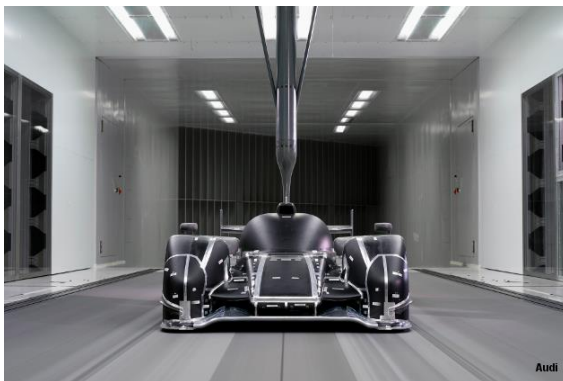


Obr. 1 – Letadlo v aerodynamickém tunelu [1]



Obr. 2 – Měření tlaků na profilu [1]

Nově postavené aerodynamické tunely (obr. 4) však poskytují prostor pro opakovatelné měření a i s řadou chyb jsou velmi přesné a poskytují tak reálný obraz o stavu proudění. Největší nevýhodou aerodynamických tunelů tak zůstává jejich vysoká pořizovací cena a obrovské provozní náklady.

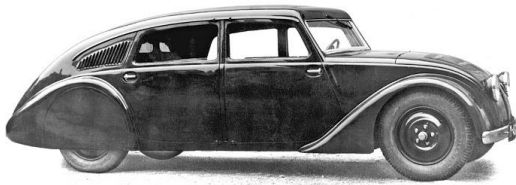


Obr. 3 – Vůz Audi pro závody 24LeMans



Obr. 4 – Ferrari aerodynamický tunel

Enzo Ferrari prohlásil, že aerodynamika je pro lidi, kteří neumí postavit motor. Dnes už víme, jak velmi se mýlil. Prakticky všechna moderní závodní i osobní auta musí brát ohled na aerodynamiku (obr. 3). U osobních aut se kvůli spotřebě paliva hledí převážně na odporovou sílu vozu. Naopak u závodních aut je důležitější přitlačná síla. Koeficient odporu C_x je u osobních silničních vozů okolo 0,3, naopak u vozů Formule 1 (obr. 7) dosahuje až 1. Prvním vozem vyvíjeným s ohledem na aerodynamiku byla Tatra T77 (obr. 5) s výborným $C_x = 0,21$. O 80 let později je sériovým osobním automobilem s nejmenším C_x Tesla Model S (obr. 6.). Hodnota $C_x = 0,24$ je horší, než 80 let stará Tatra.



Obr. 5 – Tatra T77. $C_x=0,21$. Rok 1935 [2]



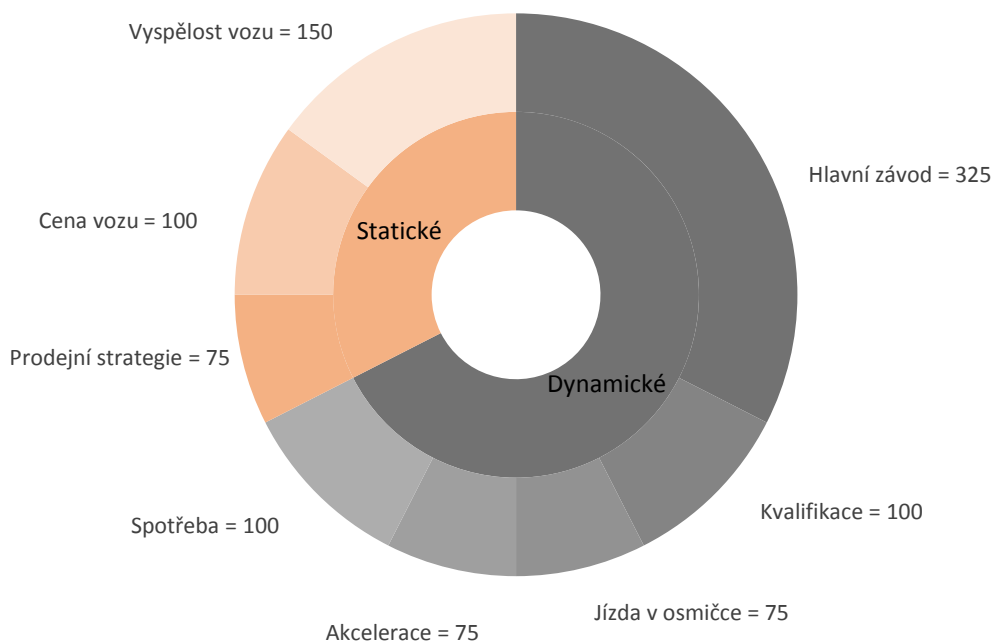
Obr. 6 – Tesla Model S. $C_x=0,24$. Rok 2014 [3]



Obr. 7 – McLaren F1. $C_x=0,97$. [4]

1.1 Formula Student/SAE

Formula Student je soutěž založená v roce 1978. Jejím cílem je připravit studenty technických škol pro praxi. Soutěž je založená na myšlence fiktivní firmy, která poptává návrh a výrobu lehkého formulového vozu pro neprofesionálního závodníka v 1000 kusech. Nejedná se ovšem pouze o závody s dynamickými disciplínami. Důležitou součástí jsou také disciplíny statické. Závod tak zahrnuje celkem 8 disciplín.



Graf 1 – Bodové hodnocení soutěže Formula Student [5]

V soutěži se účastní více než 600 týmů z celého světa a tým CTU CarTech je aktuálně (1. 3. 2016) na 25. místě [6].



Obr. 8 – 2. místo na závodech v České Republice

2 Stav minulý

V rámci disciplíny EDR (Engineering Design Report) jsme na závodech nuceni dokazovat, že rozumíme našemu vozu po technické stránce a tak musíme dokazovat i věrohodnost našich CFD simulací. V rámci prezentace aerodynamické skupiny je to jedna z klíčových entit hodnocení. V současné době je většina aut vybavená aerodynamickými prvky, avšak velmi často se jednotlivé týmy rozcházejí v hodnotách přítlaku a odporu, které jejich vozy produkují. Je pochopitelné, že se pak nabízí otázka na validaci CFD simulací. Týmy, které nedokážou předložit měření, popřípadě jiný důkaz o správnosti prezentovaných hodnot přichází o značnou část hodnocení. Je také nutné podotknout, že aerodynamické prvky se vyskytují na našich vozech od FS. 05 (sezóna 2013). Tým tedy dosud proto trávil více času laděním, výrobou a učením se s aerodynamickými prvky. Na složitější měření tak nezbývalo mnoho času.

3 Ostatní provedená měření

3.1 Měření na tlumičích vozu na letišti

Měření probíhá na letišti. Vůz se pohybuje konstantní rychlostí a porovnává se stlačením tlumičů při jízdě, vůči stlačením na nepohybujícím se voze. Stlačení je měřeno potenciometrem, který je

instalován na každém tlumiči na voze. Toto měření poskytovalo velmi přibližnou představu o správnosti simulací, postupem času bylo nutné přijít se sofistikovanější metodou.

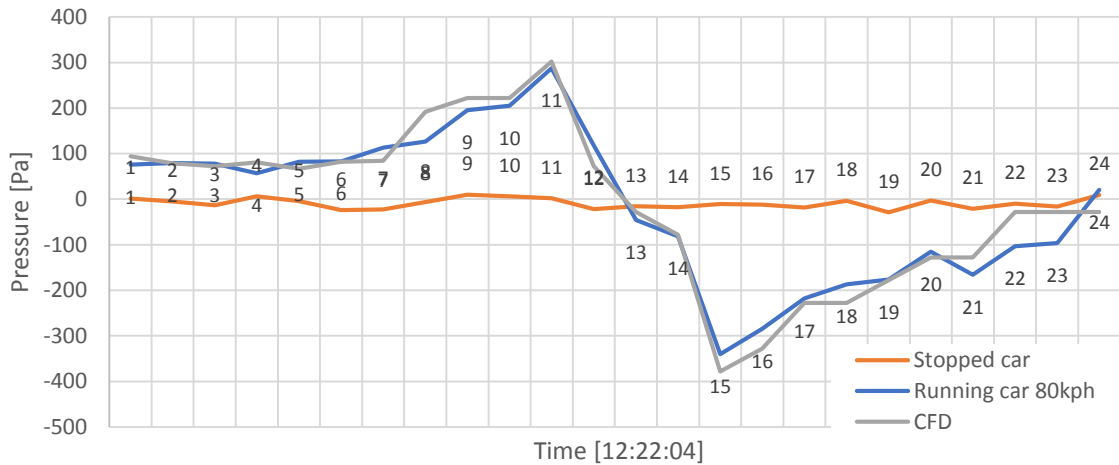


Obr. 9 – Testování s vozem FS. 06

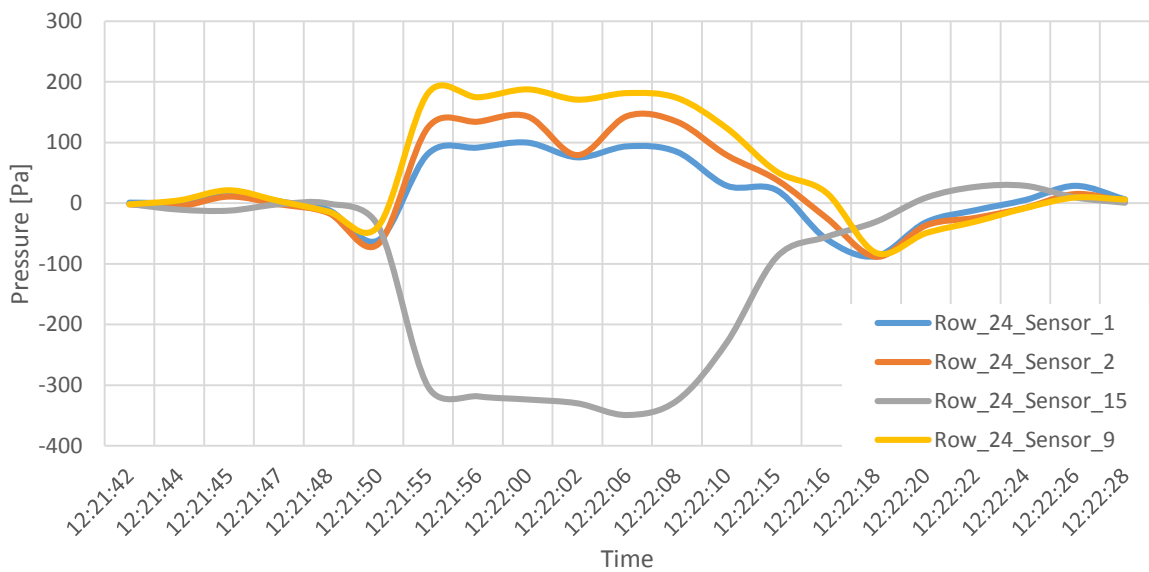
3.2 Měření tlakovou sítí

V rámci spolupráce s Ústavem mechaniky tekutin FS ČVUT jsme provedli měření tlaků na povrchu vozu FS. 07. Toto měření je založeno na pokrytí vozu snímači tlaku. Vůz absolvuje několik jízd, během jízd jsou data z tlaků ukládána do paměti. Následně je možné naměřené tlaky porovnat s hodnotami tlaků, které jsme spočítali v CFD simulaci. Tato metoda tak nabízí velmi přesný obraz o rozložení tlaků na vozidle, což je velká výhoda oproti měření v tunelu, které nám poskytovalo pouze jeden údaj o přítlačné síle a odporové síle. Graf 2 znázorňuje tlakový pásek s 24 snímači, který byl nalepen na první klapce na zadním křídle. Zobrazuje rozložení tlaků na stojícím voze, tlak je na celém profilu konstantní a odpovídá atmosférickému tlaku. Dále zobrazuje tlaky na voze při rychlosti 80km/h. Jasná jsou patrná místa, kde pásek přechází přes náběžnou hranu profilu. Poslední zobrazená křivka v grafu zobrazuje výsledky CFD simulace.

Graf 3 zobrazuje jízdu formule v čase. Do 12:21:50 auto stojí a poté se dává do pohybu. Sensory umístěné pod náběžnou hranou profilu indikují podtlak. Sensory umístěné nad náběžnou hranou indikují přetlak. To je ve shodě s principy fungování leteckých profilů.



Graf 2 – Distribuce tlaků podél profilu první klapky na zadním křídle



Graf 3 – Naměřené hodnoty ze čtyř senzorů během jedné jízdy na první klapce na zadním křídle



Obr. 10 – Vůz FS. 07 s tlakovými senzory

4 Cíl práce

Navrhnout vhodný model pro ověření simulací s ohledem na limity tunelu. Model vyrobit a zrealizovat měření. Druhým cílem je ověřit na základě měření, jak přesné jsou CFD simulace a nastavené fyzikální modely v aerodynamickém tunelu v porovnání s CDS simulacemi. Provést vyhodnocení měření a simulací a popřípadě navrhnout změny ve fyzikálním modelu CFD simulace, aby lépe odpovídal skutečnosti.

5 Tunel

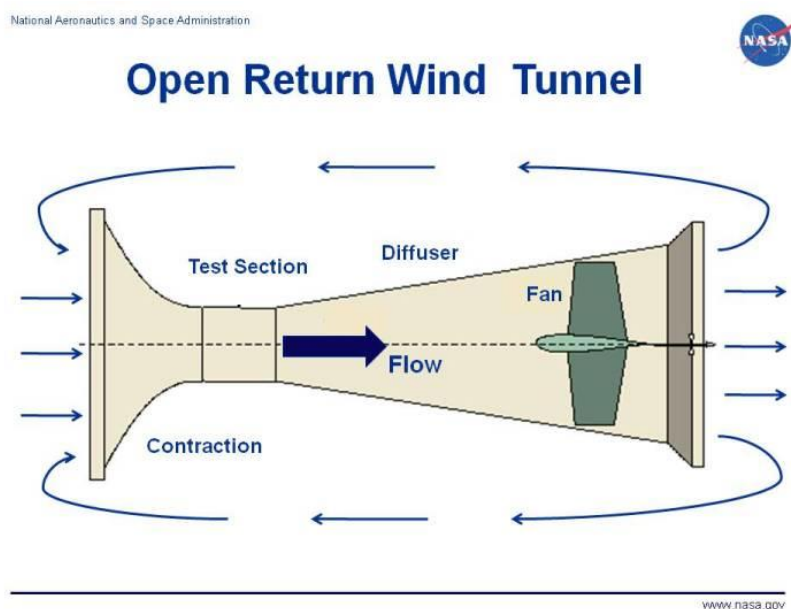
Měření probíhalo ve Výzkumném a zkušebním leteckém ústavu. V rámci programu LM201106 – Aerodynamické tunely, který je součástí programu Velkých infrastruktur se mi podařilo domluvit 3 dny měření v nízko rychlostním aerodynamickém tunelu. Veškeré náklady tak pokrylo Ministerstvo školství mládeže a tělovýchovy.

5.1 Aerodynamické tunely

Aerodynamické tunely jsou stavby s velkými pořizovacími a provozními náklady. Výkony větších tunelů jsou v řádu megawattů. Nabízí se základní rozdělení tunelů – otevřené, uzavřené, pro letecké účely, pro vozidla. Rozdíly jsou jak v dosahovaných rychlostech, tak především ve vybavení. Je žádoucí, aby tunely pro měření vozidel byly vybaveny pohybující se podlahou, odsáváním mezní vrstvy. Oba dva typy tunelů pak pro přesnější výsledky mohou disponovat chlazením protékajícího vzduchu. V uzavřeném tunelu cirkuluje vzduch neustále dokola, takový tunel je dražší, ale náklady na provoz jsou nižší.

5.1.1 Otevřené aerodynamické tunely

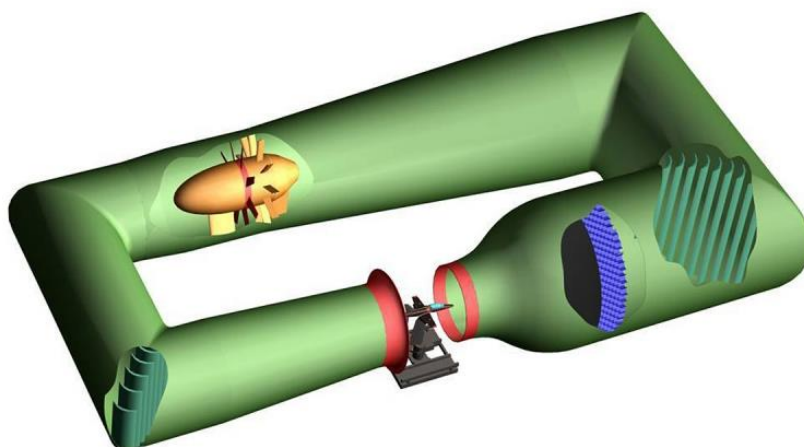
Otevřený aerodynamický tunel (obr. 11), také nazýván Eiffelův tunel, podle francouzského inženýra. Tento typ tunelu je nejjednodušší na výstavu a zároveň nejlevnější. Ovšem provozní náklady jsou oproti uzavřeným tunelům vyšší. Výhodou je, že se v uzavřeném okruhu nehromadí například kouř, použitý při vizualizaci proudění. Tunel je také výrazněji ovlivňován okolním prostředím a sám prostředí ovlivňuje například zvýšeným hlukem ventilátoru, který musí neustále urychlovat vzduch proudící skrz. V otevřeném tunelu prochází vzduch skrz testovací sekci a vzduch je nasáván z prostoru okolo tunelu.



Obr. 11 – Vůz FS. 07 s tlakovými senzory [7]

5.1.2 Uzavřené aerodynamické tunely

Většina moderních aerodynamických tunelů je konstruována jako tunely s uzavřenými okruhy (obr. 12). A to z důvodu nezávislosti na okolním prostředí, nižší hlučnosti a lepší kontroly kvality proudícího vzduchu. Mezi nevýhody patří především vyšší náklady na výstavu, hromadění kouře a oteplování proudícího vzduchu. Uzavřené tunely jsou často vybaveny chlazením, které pomáhá kompenzovat oteplení způsobené třením vzduchu o stěny tunelu. Před vstupem do testovacího prostoru se aerodynamický tunel zužuje. Tato tryska urychluje proud vzduchu na potřebnou rychlost. Důvodem pro nižší rychlost v tunelu jsou nižší ztráty. Proudí-li vzduch pomaleji, ztráty jsou menší a vzduch je urychlen až na vstupu do měřicího prostoru. Po výstupu z měřicího prostoru je v difuzoru zase zpomalen. Před tryskou můžeme často nalézt usměrňovače proudění, které mají podobu voštin a mají za cíl zbavit vzduch turbulencí.

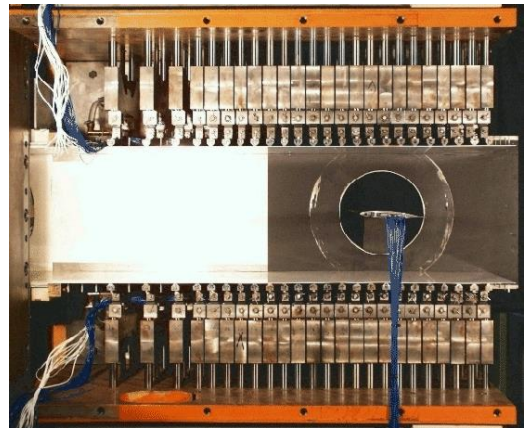


Obr. 12 – Vůz FS. 07 s tlakovými senzory [8]

Měřicí prostor tunelů může mít více podob. Nejideálnější by bylo mít velký uzavřený měřicí prostor, takové uspořádání je velmi nákladné, proto se přistupuje ke kompromisům. Měřicí prostor tunelu se realizuje buď jako otevřený, kdy okruh je uzavřen a měřicí prostor je spojen s okolím. Další možností je využít tzv. drážkovanou stěnu (obr. 13), kde je určité procento měřicího prostoru otevřeno (cca 30%) a vzduch, který je stlačen modelem tak může odcházet pryč.



Obr. 13 – Tunel s drážkovanou stěnou [9]



Obr. 14 – Tunel přizpůsobivou stěnou [10]

Nejpokročilejší možností je tunel s přizpůsobivou stěnou. Stěny testovacího prostoru se dokážou přizpůsobit modelu a vylepšit tak přesnost měření a lépe simulovat proudící vzduch (obr. 14).



Obr. 15 – Moderní aerodynamický tunel pro měření vozidel [11]

Z principu jsou tak aerodynamické tunely obrovské stavby s velkými náklady na provoz a údržbu. To je také jeden z důvodů, proč se na území ČR vyskytují pouze menší tunely. Současný největší tunel v ČR se nachází ve VZLU s průměrem 3m a je určen pro letecké aplikace.

5.2 Parametry tunelu pro experiment

Otevřený atmosférický aerodynamický tunel s nepřerušovaným chodem (1,8m LSWT):

- tunel pro měření aerodynamických charakteristik modelů a kalibraci sond,
- kruhový měřicí prostor o průměru 1,8 m a délce 1,75 m,
- maximální rychlost 55 m/s,
- max. odchylka místní rychlosti od střední rychlosti menší než 0,5 %,
- charakteristická intenzita turbulence 0,5 %.



Obr. 16 – Letecký aerodynamický tunel ve VZLU[12]

6 Volba vhodného modelu

6.1 Velikost modelu

Aby měření bylo zatíženo co nejmenší chybou, je nutné dodržet několik parametrů. Objekt v tunelu nesmí být omezován stěnami samotného tunelu, proto čelní plocha modelu nesmí zabírat více než 8% z čelní plochy tunelu.

6.2 Celý vůz

Jako nejlepší se pochopitelně jeví změřit v tunelu plnohodnotný vůz, který se bude, anebo se účastnil závodů Formula Student. Ovšem z rozměrových a manipulačních důvodů toto nebylo možné. Potřebovali bychom řádově větší tunel, ideálně s pochybující se vozovkou, která by zaručila rotaci kol a napodobila jev známý jako ground effect. Zároveň by bylo nezbytností zajistit odpovídající váhy a měřicí aparaturu, určenou k měření objektů s hmotností okolo 200kg. Tato možnost nebyla možná z důvodu malého průměru tunelu.

6.3 Zmenšený model celého vozu

Běžně se v letectví měří zmenšené modely. U našeho vozu nastává při zmenšení problém se složitostí geometrie. Musíme si uvědomit, že je nutné dosáhnout stejného Reynoldsova čísla při měření zmenšeného modelu. Z toho vyplývá, že je nutné v našich podmínkách zvednout rychlost v tunelu na převrácenou hodnotu měřítka modelu. V tunelu bychom byli schopni měřit model našeho vozu v měřítku 1:3 a menší, abychom vyhověli podmínce maximální čelní plochy modelu. Stanovená rychlost simulací je 15m/s. Je to rychlost, při které se vůz nejčastěji pohybuje na závodní dráze. Pakliže bychom chtěli měřit model 1:5, museli bychom pětinasobně zvednout rychlost proudícího vzduchu. Dostáváme se tak na rychlost 75m/s, kterou avšak nejsme schopni zaručit technickými limity tunelu. Jako jediné měřitelné měřítko tak vyšel model 1:3. Takový model by bylo možné použít. Problém ovšem vyvstal z jiného hlediska, ekonomického. Reálný vůz má na délku 3m. Museli bychom být schopni vyrobit model s délkou 1m, rotujícími koly a ideálně sestrojít systém s pohyblivou vozovkou. Zmenšené modely jsou také zatíženy chybou, která vyplývá z podstaty zmenšování. Mezní vrstva na zmenšeném modelu pak neodpovídá skutečnosti.

6.3.1 Machovo číslo

Machovo číslo udává poměr rychlosti pohybu tělesa prostředím k rychlosti šíření zvuku ve stejném prostředí. Podobnostní číslo je bezrozměrné. Používá se v letectví jako ukazatel rychlosti letu. Machovo číslo se mění například při změně tlaku, teploty anebo vlhkosti. Na

úrovni moře tak Machovu číslu 1 odpovídá rychlost 1225 km/h. Kdežto ve stratosféře 1050 km/h [10].

$$M = \frac{v}{c} \quad (6.1)$$

v ... rychlost tělesa

c ... rychlost zvuku

6.3.2 Reynoldsovo číslo

Reynoldsovo číslo dává poměr setrvačných a vazkých sil v tekutině. Je bezrozměrné a je to jedno z nejzákladnějších podobnostních čísel používaných v mechanice tekutin.

$$Re = \frac{\rho v d}{\mu} \quad (6.2)$$

ρ ... hustota kapaliny

v ... rychlost

d ... charakteristický rozměr

μ ... dynamická viskozita kapaliny

6.4 Část vozu

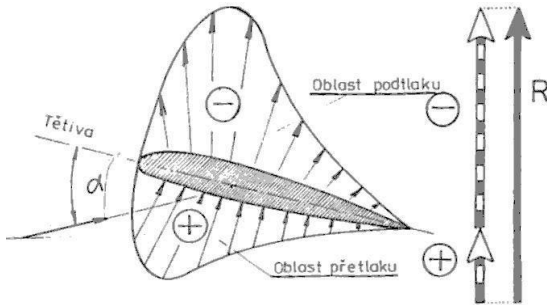
Jako kompromis mezi měřením celého vozu a měřením zmenšeného modelu se nabízí pouze měření určité části reálného vozu. V tomto případě jsem se rozhodl změřit zadní křídlo vozu FS. 05. Křídlo na voze FS. 05 má 1500mm šířku. To by se do tunelu nevešlo, a proto bylo zkráceno na rozměr 700mm. Křídlo si tedy zachovalo všechny své původní rozměry, pouze šířka byla změněna.

7 Přítlačné křídlo

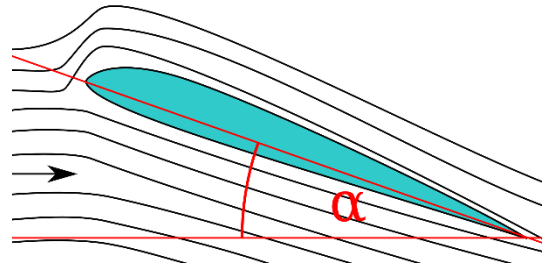
7.1 Vlastnosti přítlačného křídla

Hlavní funkcí křídla je vytvářet vztlak resp. přítlak. To je zapříčiněno rozdílným rozložením tlaků podél profilu. Vzduch na horní straně profilu musí urazit za stejnou dobu delší dráhu, než vzduch na spodní straně profilu. Z toho vyplývá, že tlak na horní straně profilu bude nižší. Tuto závislost můžeme při zanedbání ztratit vyjádřit z Bernoulliho rovnice.

$$g h + \frac{p}{\rho} + \frac{v^2}{2} = konst \quad (7.1)$$



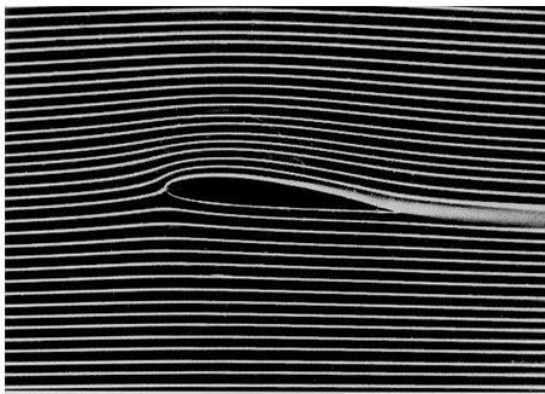
Obr. 17 – Rozložení tlaku na leteckém profilu [13]



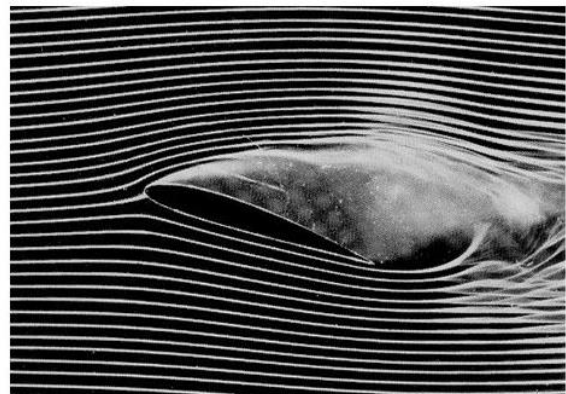
Obr. 18 – Úhel náběhu α [14]

Velikost sil, které na profil působí, závisí na jeho natočení. Mezním stavem natočení profilu je odtržení proudu vzduchu od profilu. To má za následek ztrátu vzlaku a zvýšení odporu. Vztah pro odporovou sílu je následující.

$$F = \frac{1}{2} C_x S_x \rho v^2 \quad (7.2)$$



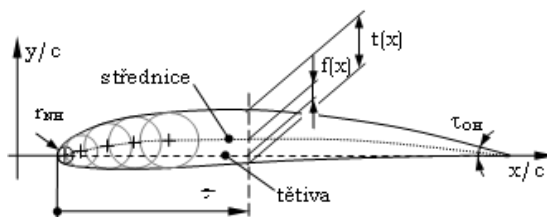
Obr. 19 – Obtékaný profil [15]



Obr. 20 – Odtřžení proudu vzduchu od profilu [16]

7.2 Geometrie křídla

Křídlo začíná a končí náběžnou resp. odtokovou hranou. Umístíme-li do profilu vepsané kružnice a jejich středy proložíme křivku, dostaneme střednici profilu. Tětiva profilu je přímka spojující náběžnou a odtokovou hranu profilu. Maximální tloušťka profilu je průměr největší kružnice do profilu vepsané. Maximální prohnutí profilu je hodnota největší vzdálenosti střednice od tětivy[17].



Obr. 21 – Geometrie profilu [18]

7.1 Koeficienty

Koeficient vztlaku a odporu hraje velmi důležitou roli při prvotním návrhu křídla. Jsou to základní koeficienty, které činí rozdíl mezi inženýrským přístupem k návrhu a prostým zkoušením a hledáním. Představme si letadlo (obr. 22). V tomto případě W směřuje vertikálně dolů. L vertikálně nahoru kolmo k rychlosti větru.

Chceme-li udržet letadlo v letu pak

$$L = W \quad (7.3)$$

Pro stály let bez zrychlení

$$T = D \quad (7.4)$$

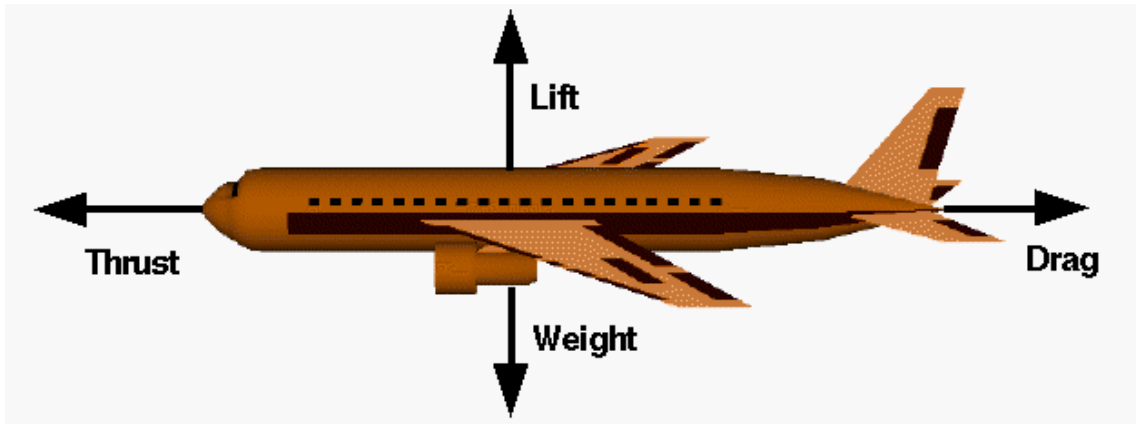
Ukazatelem účinnosti křídla je poměr vztlaku k odporu, tedy

$$\frac{L}{D} = \frac{C_L}{C_D} \quad (7.5)$$

Na křídlo můžeme pohlížet také jako na aerodynamickou páku. Pro případ

$$\frac{L}{D} = 10 \quad (7.6)$$

to znamená, že na jeden newton tahu vynaloženého k překonání jednoho newtonu odporu dokáže křídlo zvednout 10 newtonů.



Obr. 22 – Letoun v letu [19]

7.1.1 Součinitel vztlaku

Je bezrozměrné číslo, které v aerodynamice vyjadřuje souvislost mezi tvarem, sklonem a vlastnostmi tekutiny. Součinitel vztlaku tak obsahuje kompletní závislosti tvaru objektu vzhledem k vztlaku.

$$C_L = \frac{L}{\frac{1}{2}\rho v^2 S} \quad (7.6)$$

7.1.2 Součinitel odporu

Je bezrozměrné číslo, které v aerodynamice vyjadřuje souvislost mezi tvarem, sklonem a vlastnostmi tekutiny. Součinitel vztlaku tak obsahuje kompletní závislosti tvaru objektu vzhledem k odporu.

$$C_D = \frac{D}{\frac{1}{2}\rho v^2 S} \quad (7.7)$$

Krychle

$$C_D = 1,05 \quad (7.8)$$

Koule

$$C_D = 0,5 \quad (7.9)$$

Kapkovitý tvar

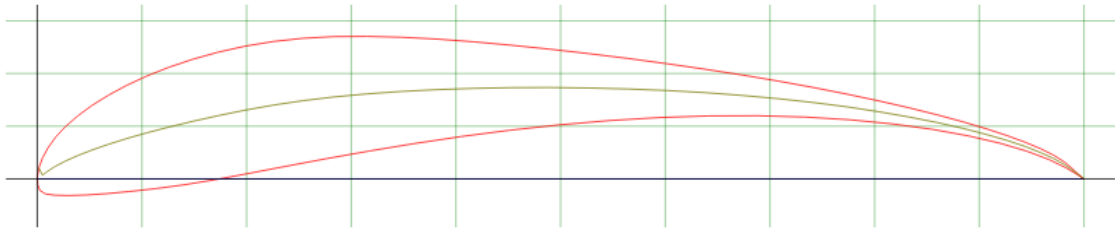
$$C_D = 0,04$$

(7.10)

7.2 Testovací křídlo

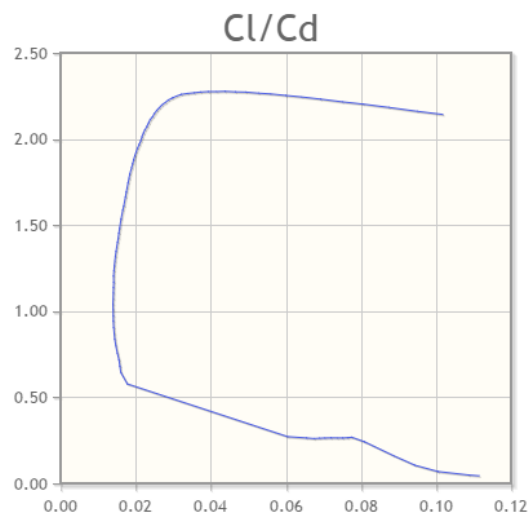
7.2.1 Profil

Křídlo vyrobené pro testování v tunelu odpovídá parametrům křídla z vozu FS. 05 v konfiguraci hlavní profil a jedna klapka. Oba dva profily byly převzaty z databáze Illinoiské univerzity, kde se nalézají pod typovým označením S1223. Profil je vhodný pro nízké rychlosti a nízká Reynoldsova čísla. V našem případě se nejčastěji pohybujeme při Reynoldsově čísle 500 000.



Obr. 23 – Profil S 1223 [20]

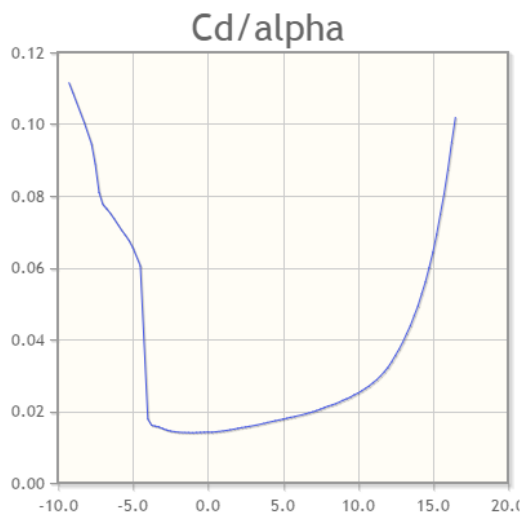
Správná volba profilu křídla je zásadním parametrem při návrhu. Musíme vzít v úvahu rychlost, ve které se bude vůz pohybovat, v případě vozu Formula Student je průměrná rychlost okolo 55km/h. Z čehož vyplívá, že je nutné zvolit profil pro nízká Reynoldsova čísla. V tomto rozmezí je nutné najít profil, který poskytne výhodný poměr C_l/C_d , neboť to značí jeho účinnost.



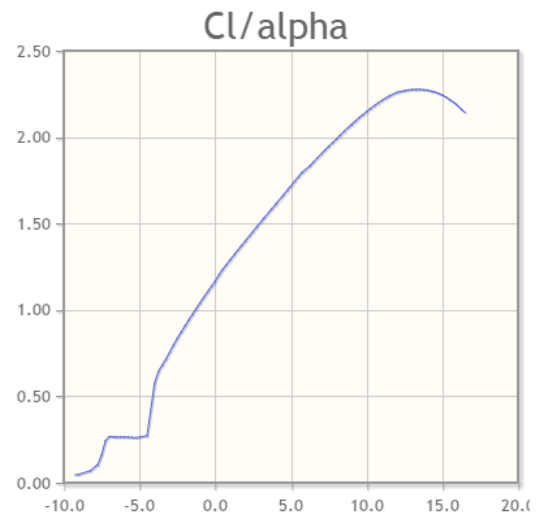
Graf 4 – C_l/C_d profilu S1223 [21]

7.3 Křídlo

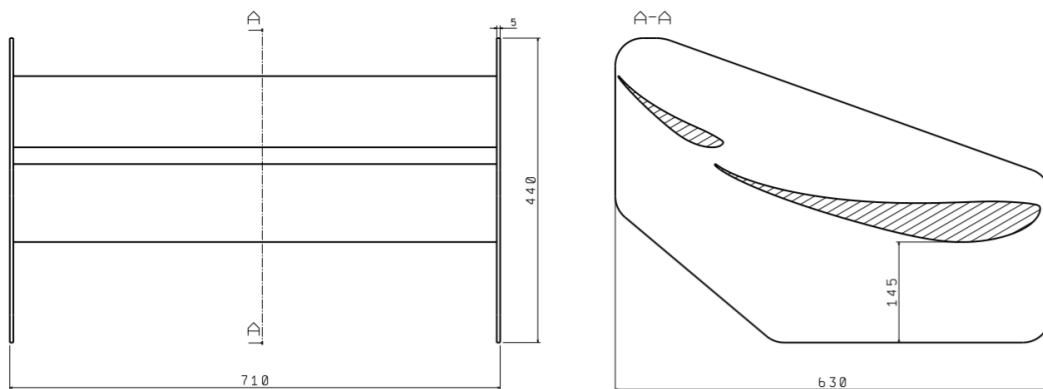
Při samotném navrhování křídla je nutné najít vhodný úhel náběhu α . Graf X a Y nám udává vztah mezi koeficientem odporu resp. koeficientem přitlaku a úhlem náběhu α . Je nutné zvolit takový úhel náběhu, který zaručí správnou funkci křídla i při mezních stavech, jako je brždění popřípadě akcelerace. Klopení vozu anglicky také pitch v těchto stavech může dosáhnout $2,5^\circ$. Maximální C_L tedy C_{Lmax} je profil schopen dosáhnout při úhlu náběhu 12° a minimální C_D tedy C_{Dmin} při 0° . Je tedy nutné zvolit kompromisní úhel náběhu a to s cílem na maximální přitlak, minimální odpor a s dostatečnou rezervou na pokrytí špičkových stavů vozu. V tomto případě jsme volili 8° . Úhel náběhu klapky vychází z CFD simulací. Při 8° natočení hlavního profilu se iterační metodou hledá vhodný úhel náběhu klapky.



Graf 5 – C_d/α [21]



Graf 6 – C_l/α [21]



Obr. 23 – Výkres testovacího křídla

7.4 Uchycení modelu

Model testovaného křídla byl k aerodynamickým vahám připevněn pomocí rámu. Tento rám byl následně změřen sám a v rámci korekcí byl odečten od výsledného měření. Vliv rámu na měřený objekt jsou patrné a nezanedbatelné.

rychlost [m/s]	přítlak [N]	odpor [N]
4,067346	0,018164	-0,422407
5,995816	-0,01764	-0,97687
8,075713	-0,090203	-1,837685
10,033008	0,027325	-2,835484
12,020986	-0,014741	-4,107628
13,989941	0,060578	-5,556146
15,99148	0,009244	-7,324738
17,962932	-0,001901	-9,295472
19,897988	0,217156	-11,46449
21,948114	0,363899	-13,93617

8 Měřené parametry

- Přítlak pouze hlavního profilu – úhel náběhu 8° rychlosti 10, 15, 20, 25 m/s
- Přítlak v základní poloze (odpor) – hlavní profil 8° klapka 30° (pro srovnání s CFD) pro rychlost od 4 m/s do 26 m/s po 2 m/s (4 m/s)
- Zjištění meze odtržení proudnic na hlavním profilu (natočení hlavního profilu) pro rychlost 15 m/s



Obr. 25 – Uchycení testovacího křídla v tunelu

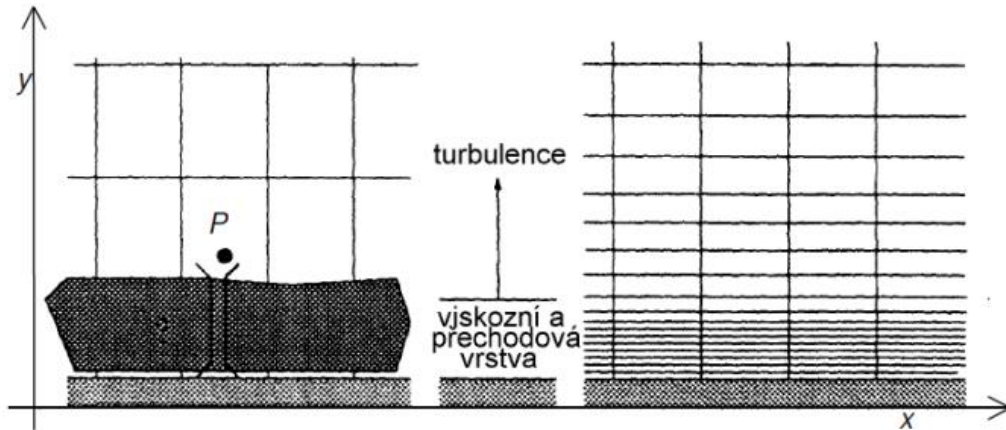
9 CFD simulace

Pro veškeré aerodynamické výpočty v rámci CTU CarTech používáme software StarCCM+ od společnosti CD-Adapco. CFD (Computational Fluid Dynamics) je výpočetní metoda, která umožňuje modelovat proudění kapalin a plynů. Pomocí numerické analýzy a algoritmů jsme schopni vyřešit a analyzovat chování tekutiny. V CFD simulaci je prostor proudění rozdělen na určitý počet diskrétních bodů, což nám vytváří síť. Těmto diskrétním bodům se pak říká síťové body. Vlastnosti tekutiny jsou počítány vždy a pouze v jednotlivých síťových bodech.[22]

9.1 Parametry simulace

9.1.1 All y^+ Wall Treatment

Pro modelování proudění velmi blízko stěny lze zvolit ze dvou způsobů. Buď pomocí stěnové funkce, což jsou empirické vztahy, které překlenou viskózní a přechodovou vrstvu. Anebo podrobným vymodelováním samotného proudění u stěny. Zvolil jsem první postup, neboť je výpočtově méně náročnější. Model se vybírá podle hodnot y^+ . Můžeme zvolit low y^+ , high y^+ , all y^+ . All y^+ nabízí nejflexibilnější použití a je vhodný pro většinu turbulentních modelů. [23]



Obr. 26 – Mezní vrstva stěnovou funkcí [22]

Obr. 27 – Modelovaná mezní vrstva [22]

9.1.2 Cell Quality Remediation

Tento modul dovoluje vyřešit buňky s nekvalitní sítí. Model identifikuje špatné buňky výběrem předdefinovaných kritérií jako je roztažení a natočení. Jakmile jsou buňky a jejich sousední buňky označeny, jsou tyto části sítě přepočítané a opravené.

9.1.3 Vzduch

Model plynu reprezentuje čistý vzduch.

9.1.4 Gradienty

Model gradientu je používán ve více částech výpočetního modelu v rámci řešení transportní rovnice

9.1.5 Ideální plyn

Model ideálního plynu pracuje na základě vyjádření hustoty jako funkci teploty a tlaku.

$$\rho = \frac{p_{abs}}{RT} \quad (9.1)$$

kde

ρ ... hustota

p_{abs} ... absolutní tlak

R ... plynová konstanta

T ... teplota

9.1.6 Reynolds – Averaged Navier Stokes

Turbulence je náhodný pohyb částic tekutiny. Takové proudění obsahuje různě velké víry. Velké víry obsahují většinu energie a postupně se rozpadávají na menší. Nejmenší víry se pak mění v teplo. Modely turbulence jsou nutné z důvodu toho, že většina inženýrských aplikací je turbulentní. Volba turbulentního modelu je závislá na problémech, který řešíme, žádný model není univerzální. Navier-Stokesova rovnice může být řešena v CFD přímo, ale to je velmi numericky náročné. Ve většině případů to naštěstí není nutné. Existují modely, které řeší pouze část turbulentního spektra např. Metoda velkých víru anebo právě Reynolds-Averaged Navier Stokes (RANS). Poslední jmenovaná metoda je nejčastěji používaná, nabízí neekonomičtější přístup z hlediska výpočetních nároků [25].

9.1.7 Segregated Flow

Tento model řeší rovnice hybnosti popořadě, vždy jednu pro každou dimenzi. Oproti modelu Coupled Flow, který řeší rovnici zachování hmoty, hybnosti a energie, potřebuje menší nároky na výpočetní výkon.

9.1.8 Spalart-Allmaras

Je model s jedinou rovnicí, který využívá Boussinesquovu hypotézu a řeší transportní rovnici pro turbulentní viskozitu. Boussinesquova hypotéza říká, že Reynoldsova napětí jsou úměrná středním gradientům rychlosti. Jako konstantu úměrnosti pak používá turbulentní viskozitu. Model Spalart-Allmaras řeší pouze jednu dodatečnou transportní rovnici, kdežto pro modely k- ϵ a k- ω řeší dvě transportní rovnice, jak pro kinetickou energii, tak pro disipaci energie.

Turbulentní model Spalart-Allmaras je popsán následovně[28]:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \hat{v}}{\partial t} + u_j \frac{\partial \hat{v}}{\partial x_j} = c_{b1}(1 - f_{t2})\hat{S}\hat{v} - \left[c_{w1}f_w - \frac{c_{b1}}{K^2}f_{t2} \right] \left(\frac{\hat{v}}{d} \right)^2 \\ + \frac{1}{\sigma} \left[\frac{\partial}{\partial x_j} \left((v + \hat{v}) \frac{\partial \hat{v}}{\partial x_j} \right) + c_{b2} \frac{\partial \hat{v}}{\partial x_i} \frac{\partial \hat{v}}{\partial x_i} \right] \end{aligned} \quad (9.1.8.1)$$

turbulentní viskozita je dána vztahem

$$\mu_t = \rho \hat{v} f_{v1} \quad (9.1.8.2)$$

kde

$$f_{v1} = \frac{X^3}{X^3 c_{v1}^3} \quad (9.1.8.3)$$

$$X = \frac{\hat{v}}{v} \quad (9.1.8.4)$$

a ρ jest byti hustotou, $\nu = \mu/\rho$ je kinematická viskozita a μ je dynamická viskozita.

Dále

$$\hat{S} = \Omega + \frac{\hat{v}}{K^2 d^2} f_{v2} \quad (9.1.8.5)$$

kde Ω je velikost vířivosti, d je vzdálenost od síťového bodu k nejbližší stěně

$$\Omega = \sqrt{2W_{ij}W_{ij}} \quad (9.1.8.6)$$

a také

$$f_{v2} = 1 - \frac{X}{1 + X f_{v1}} \quad (9.1.8.7)$$

$$f_w = g \left[\frac{1 + c_{w3}^6}{g^6 + c_{w3}^6} \right]^{\frac{1}{6}} \quad (9.1.8.8)$$

$$g = r + c_{w2}(r^6 - r) \quad (9.1.8.9)$$

$$r = \min \left[\frac{\hat{v}}{\hat{S} K^2 d^2}, 10 \right] \quad (9.1.8.10)$$

$$f_{t2} = c_{t3} \exp(-c_{t4} X^2) \quad (9.1.8.11)$$

$$W_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} - \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \quad (9.1.8.12)$$

Okrajové podmínky jsou

$$\hat{v}_{wall} = 0 \quad \hat{v}_{farfield} = 3v \text{ až } 5v$$

Konstanty jsou

$$c_{b1} = 0,1355 \quad \sigma = \frac{2}{3} \quad c_{b2} = 0,622 \quad K = 0,41$$

$$c_{w2} = 0,3 \quad c_{w3} = 2 \quad c_{v1} = 7,1 \quad c_{t3} = 1,2 \quad c_{t4} = 0,5$$

$$c_{w1} = \frac{c_{b1}}{K^2} + \frac{1+c_{b2}}{\sigma}$$

9.1.9 Steady

Tento model je používán pro všechna ustálená proudění. Znamená to, že fyzikální význam času je zanedbáván.

9.1.10 Three Dimensional

Model navržený pro tři rozměrové sítě a výpočty.

9.1.11 Turbulent

Turbulentní model simulace

9.1.12 Navier – Stokes

Na tyto rovnice můžeme pohlížet jako na aplikaci Newtonova druhého zákona.

$$F_x = ma_x \quad (9.2)$$

V rovnici (9.2) budeme brát v úvahu pouze směr X. F_x je součtem všech sil působících na element XX. Například na plochu abcd působí pouze stříhové namáhání

$$\tau_{yx} dx dz. \quad (9.3)$$

Plocha efgh je od plochy abcd vzdálena dy , proto

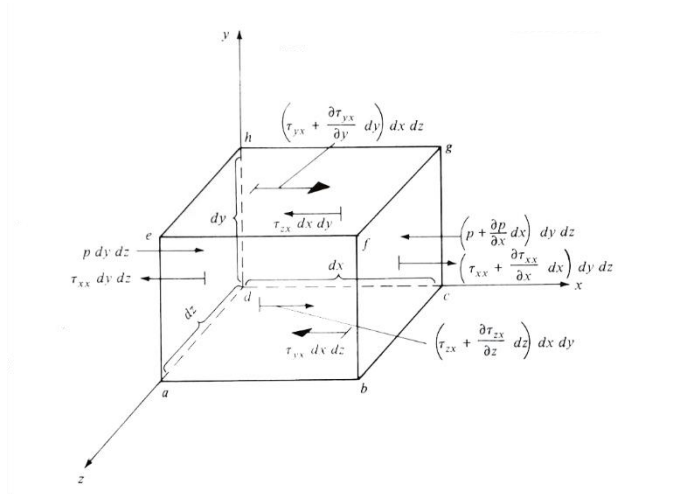
$$\left(\tau_{yx} + \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial y} dy \right) dx dz. \quad (9.4)$$

Na plochu adhe, která je kolmá k ose x působí pouze tlaková síla $p dy dz$, která vždy směřuje dovnitř elementu a $\tau_{xx} dy dz$, který je orientován opačně než osa x. Pro plochu bcgf pak tedy

$$\left(p + \frac{\partial p}{\partial x} dx \right) dy dz \quad (9.5)$$

a také

$$\left(\tau_{xx} + \frac{\partial \tau_{xx}}{\partial x} dx \right) dy dz. \quad (9.6)$$



Obr. 28 – Tekutinový element [10]

Vrátíme se k rovnici (9.2) z rovnic (9.3) až (9.6) můžeme vyjádřit:

$$\begin{aligned} F_x = & \left[p - \left(p + \frac{\partial p}{\partial x} dx \right) \right] dy dz + \left[\left(\tau_{xx} + \frac{\partial \tau_{xx}}{\partial x} dx \right) - \tau_{xx} \right] dy dz \\ & + \left[\left(\tau_{yx} + \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial y} dy \right) - \tau_{yx} \right] dx dz \\ & + \left[\left(\tau_{zx} + \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial z} dz \right) - \tau_{zx} \right] dx dy \end{aligned} \quad (9.7)$$

a nebo

$$F_x = \left(-\frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial z} \right) dx dy dz \quad (9.8)$$

Rovnice (10.8) představuje levou stranu rovnice (9.2). Hmotnost z pravé strany rovnice je rovna

$$m = \rho dx dy dz \quad (9.9)$$

A zrychlení elementu je derivace rychlosti podle času

$$a_x = \frac{Du}{Dt} \quad (9.10)$$

Kombinací rovnic (9.2),(9.7) až (9.10) dostáváme rovnici (9.11)

$$\rho \frac{Du}{Dt} = -\frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial z} \quad (9.11)$$

která vyjadřuje x složku momentové rovnice pro viskózní tok. Stejně tak dostaneme rovnice pro složku y a z, tedy

$$\rho \frac{Dv}{Dt} = -\frac{\partial p}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zy}}{\partial z} \quad (9.12)$$

$$\rho \frac{Dw}{Dt} = -\frac{\partial p}{\partial z} + \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zy}}{\partial z} \quad (9.13)$$

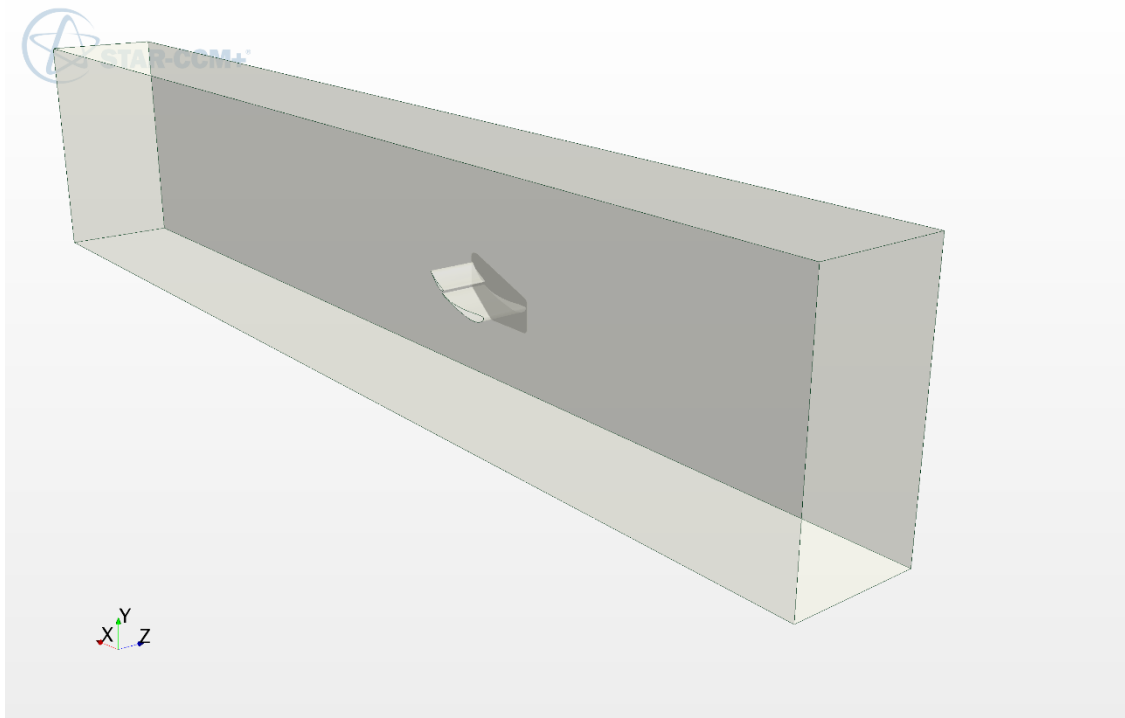
Rovnice (9.11) až (9.13) jsou skalární rovnice nazývané Navier-Stokesovy rovnice. Tyto rovnice jsou vždy řešeny dohromady s rovnicí kontinuity (9.14)

$$\frac{\partial p}{\partial t} + \nabla \cdot \rho V = 0 \quad (9.14)$$

Tyto rovnice stačí pro řešení nestlačitelného proudění. Pro stlačitelné proudění je nutné přidat ještě energetickou rovnici.

9.2 Simulovaný tunel

Při simulaci dějů v proudění je logika těles opačná. Pevná tělesa jsou dutá a prostor, kterým proudí tekutina je vyplněn. Tunel má rozměry 10m x 2m x 1m. Simuluje se polovina křídla, neboť křídlo je symetrické.



Obr. 29 – simulovaný tunel v programu StarCCM+

9.3 Síť

Pro stavbu sítě používáme mnohostěnové buňky. Hlavní výhodou mnohostěnových buněk je přítomnost velkého počtu sousedících buněk. Díky tomu můžeme mnohem lépe aproximovat gradientní stavy. I v případě buněk podél stěn a v rozích má buňka vždy alespoň pár sousedních. Tyto buňky jsou také méně citlivé a lépe zvládající natahování a deformaci, oproti čtyřbokým a tříbokým buňkám. Ve výsledku tak mnohostěnové buňky potřebují přibližně čtyřikrát menší počet samotných buněk k dosažení stejné přesnosti jako u čtyřbokých buněk [19]. Blízko u povrchu tělesa počítáme s mezní vrstvou, proto byla vytvořena vrstva z hranolových buněk angl. prism layer. Tato vrstva je důležitá pro přesný výpočet a jeho správnou konvergenci.

Jako řešič stacionárního turbulentního proudění pro nestlačitelnou tekutinu jsme použili Spallart-Allmaras model. Který je dán pouze jedinou rovnicí. Tento turbulentní model vyžaduje, aby stěnová funkce y^+ , neboli wall y^+ byla buď velmi blízko 1 anebo vyšší než 30. Wall y^+ je bezrozměrná vzdálenost definovaná takto [21]

$$y^+ = \frac{u_* y}{\nu} \quad (9.15)$$

kde

u_* ... rychlost tření

y ... vzdálenost od zdi

ν ... kinematická viskozita

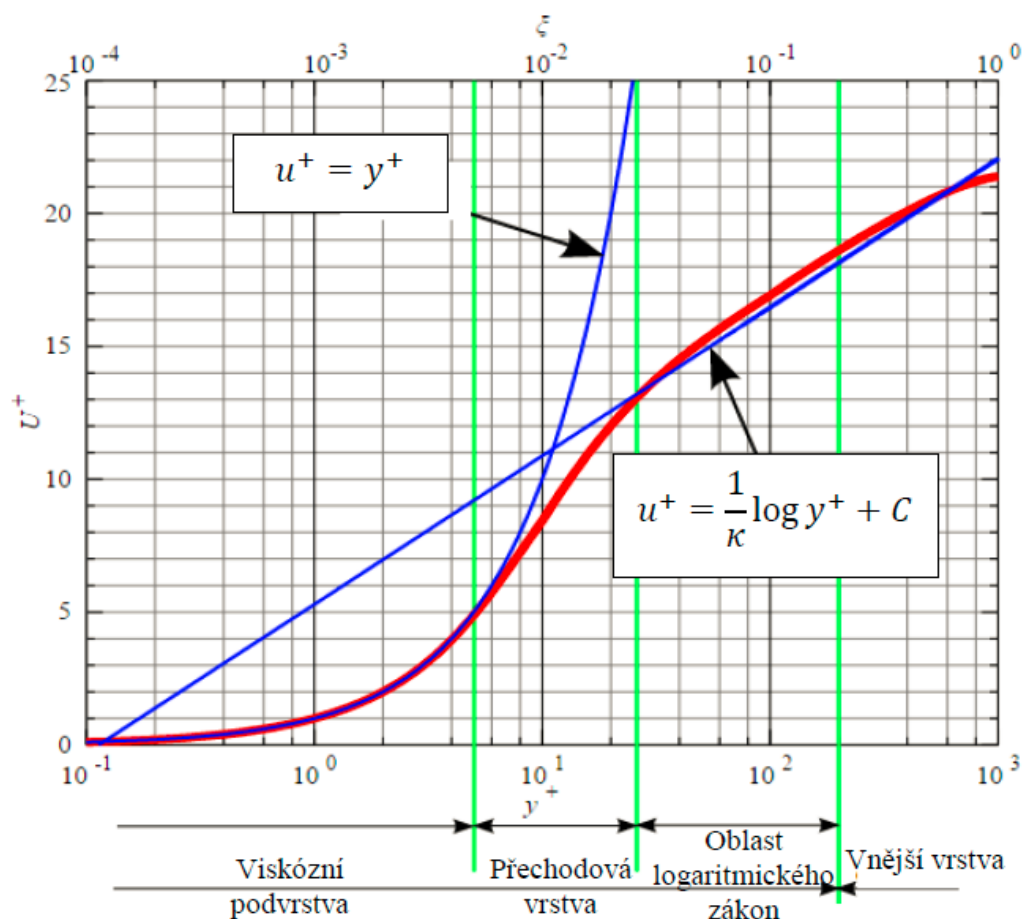
Oblast blízko stěny lze rozdělit na tři části. Nejbližší ke stěně se nachází viskózní podvrstva, dále pak přechodová vrstva a poslední je plně vyvinutá turbulentní vrstva, nebo-li vrstva s platností logaritmického zákona. Podle logaritmického zákona pro y^+ blízka 1 se nacházíme ve viskózní podvrstvě, ve které se veškeré namáhání projevuje pouze jako viskózní tření tedy

$$u^+ = y^+ \quad (9.16)$$

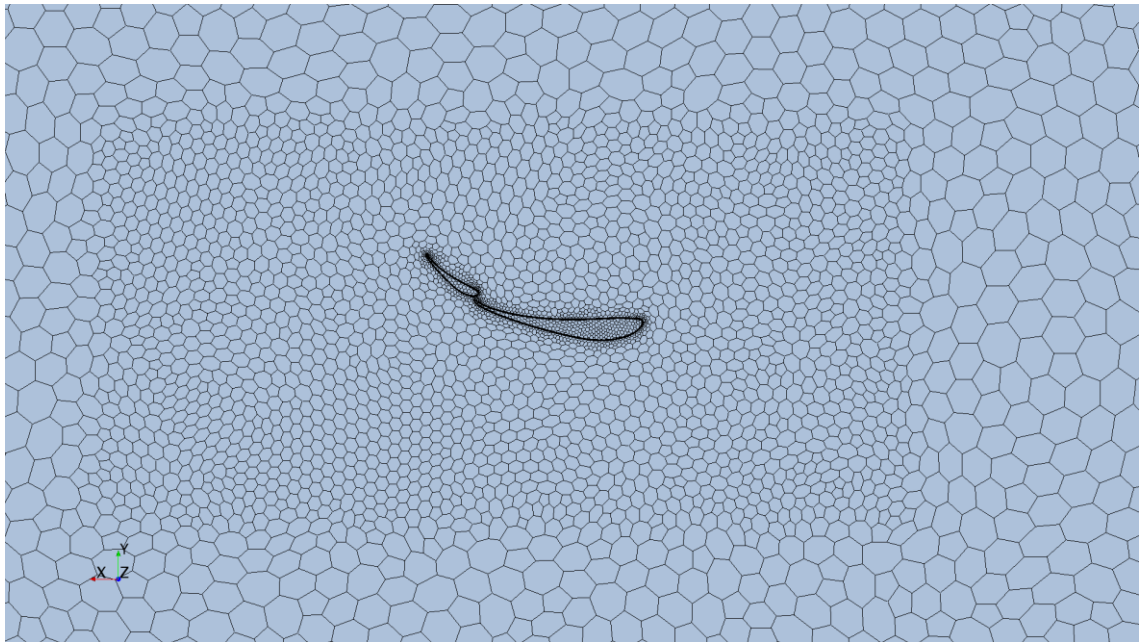
kde

y^+ ... je bezrozměrná vzdálenost od hranice objektu

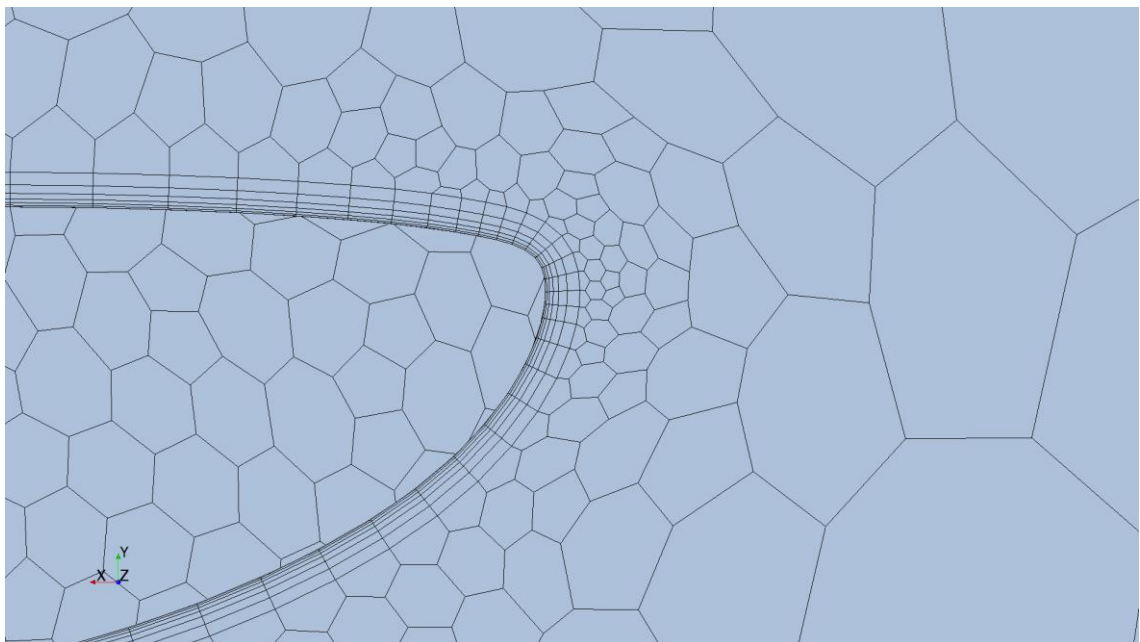
u^+ ... je bezrozměrná rychlost



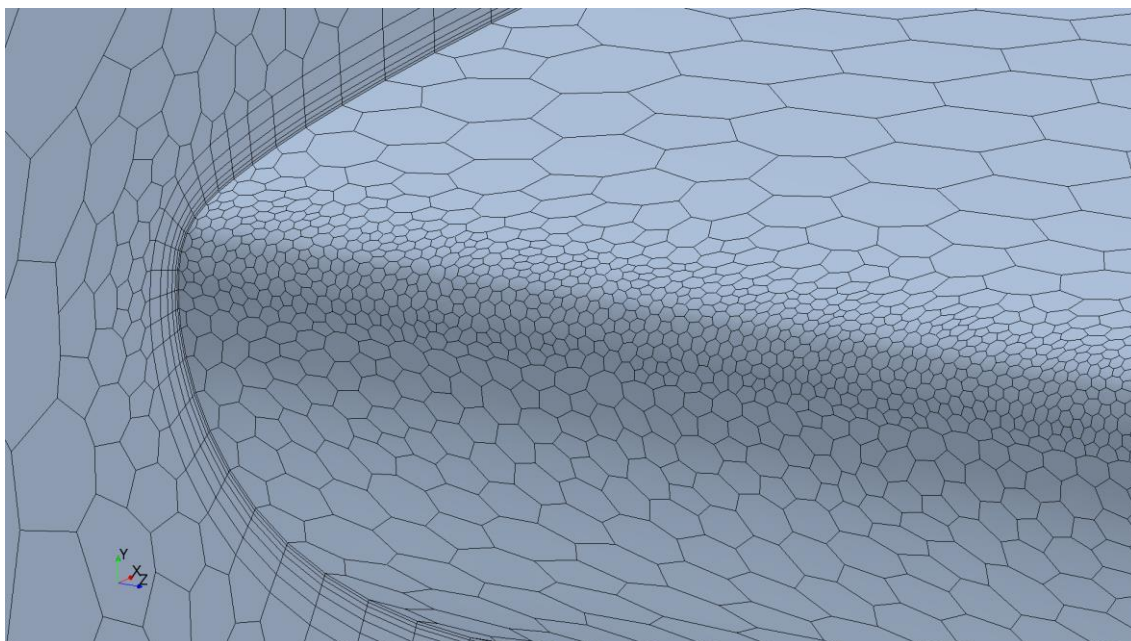
Obr. 30 – Logaritmický zákon proudění u stěny [24]



Obr. 31 – Síť okolo křídla

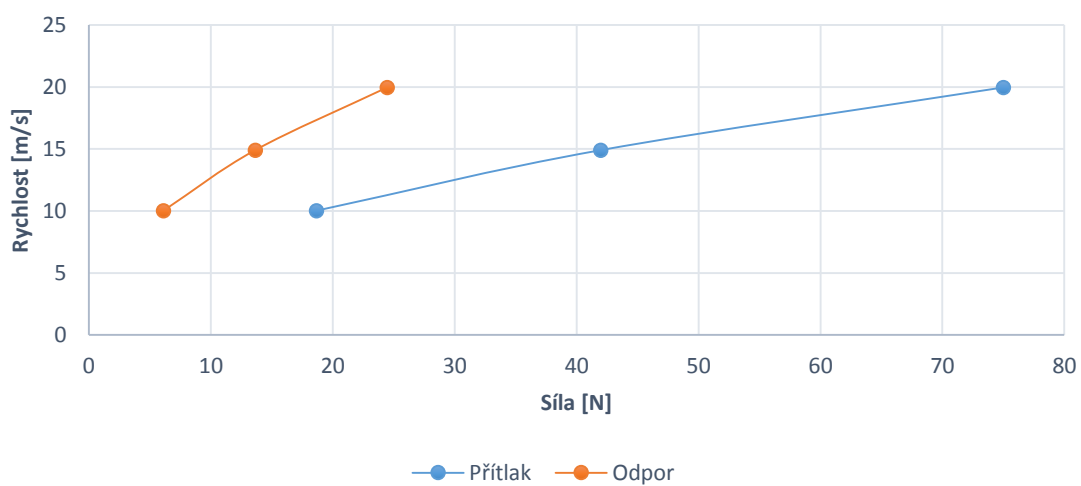


Obr. 32 – Detail síť okolo křídla

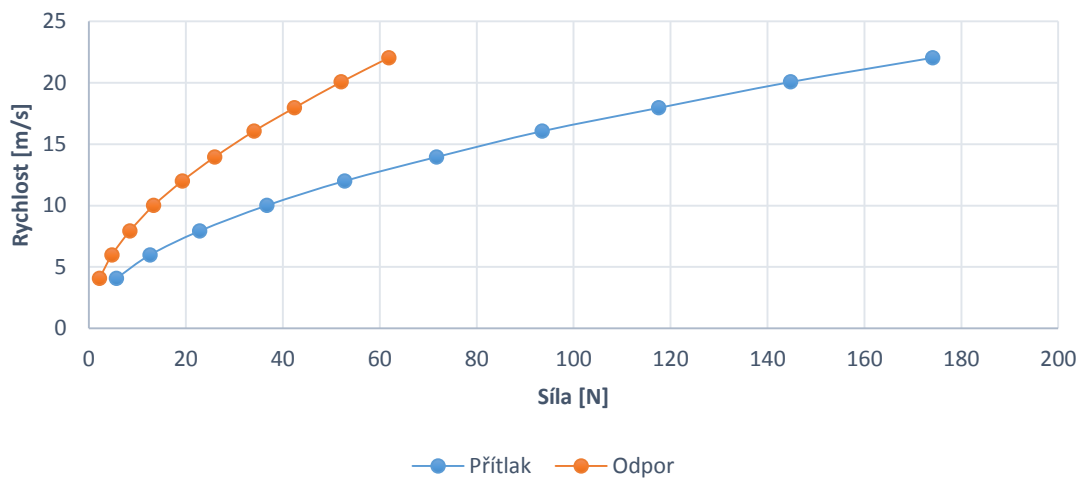


Obr. 33 – Detail sítě náběžné hrany

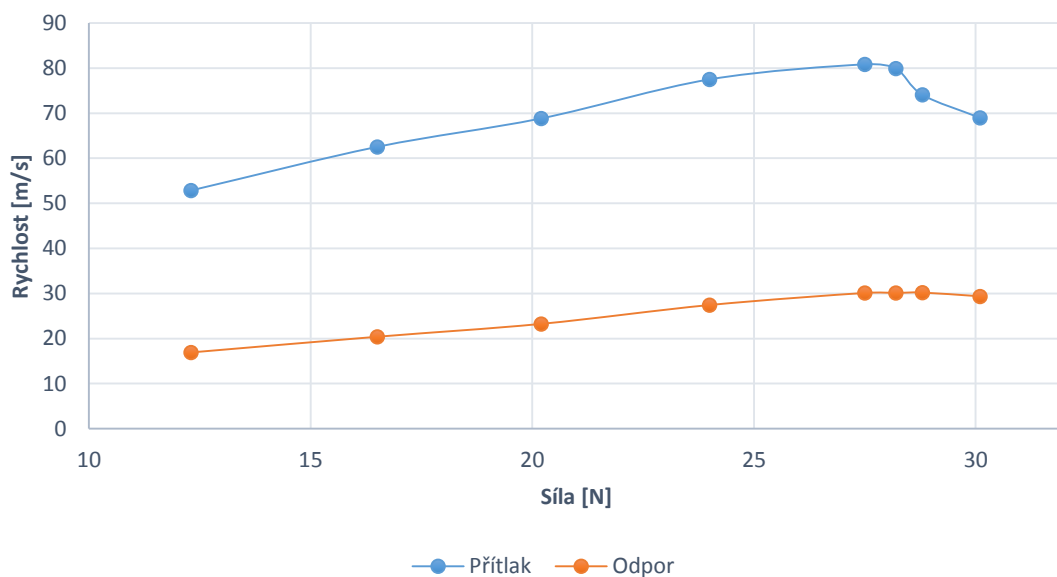
10 Vyhodnocení měření v tunelu



Graf 7 -Přítlak pouze hlavního profilu – úhel náběhu 8° rychlosti 10, 15, 20, 25 m/s

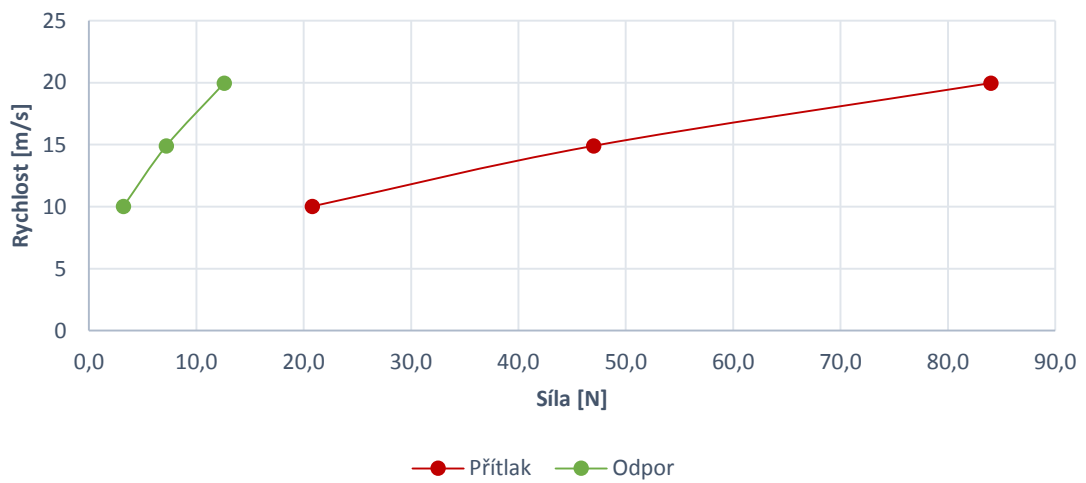


Graf 8 - Přítlak v základní poloze (odpor) – hlavní profil 8° klapka 30° pro rychlost od 4 m/s do 26 m/s po 4 m/s

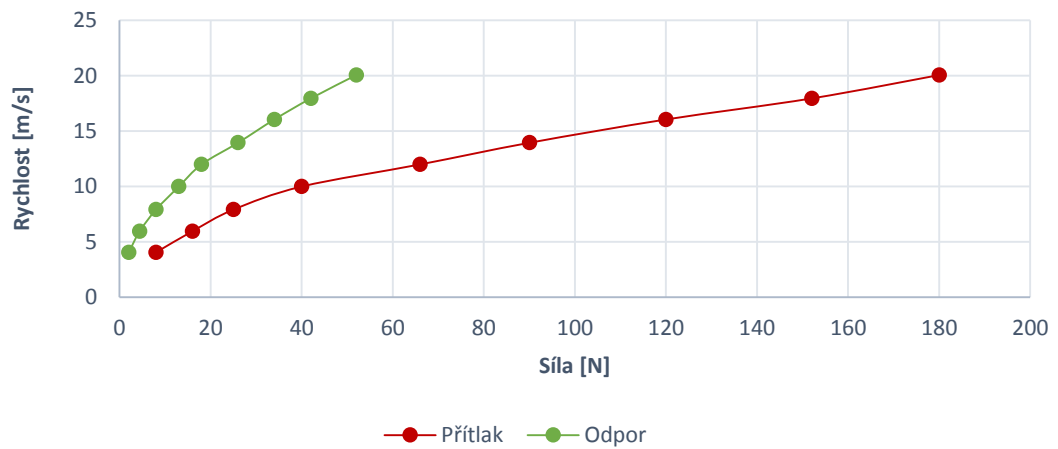


Graf 9 - Zjištění meze odtržení proudnic na hlavním profilu (natočení hlavního profilu) pro rychlost 15 m/s

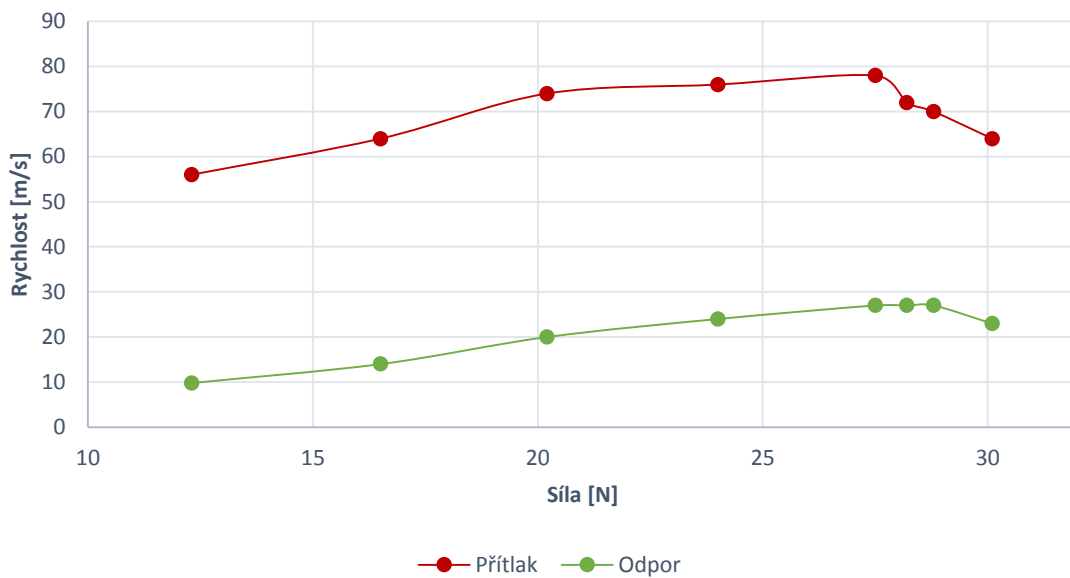
11 Vyhodnocení CFD simulace



Graf 10 - Přítlak pouze hlavního profilu – úhel náběhu 8° rychlosti 10, 15, 20, 25 m/s

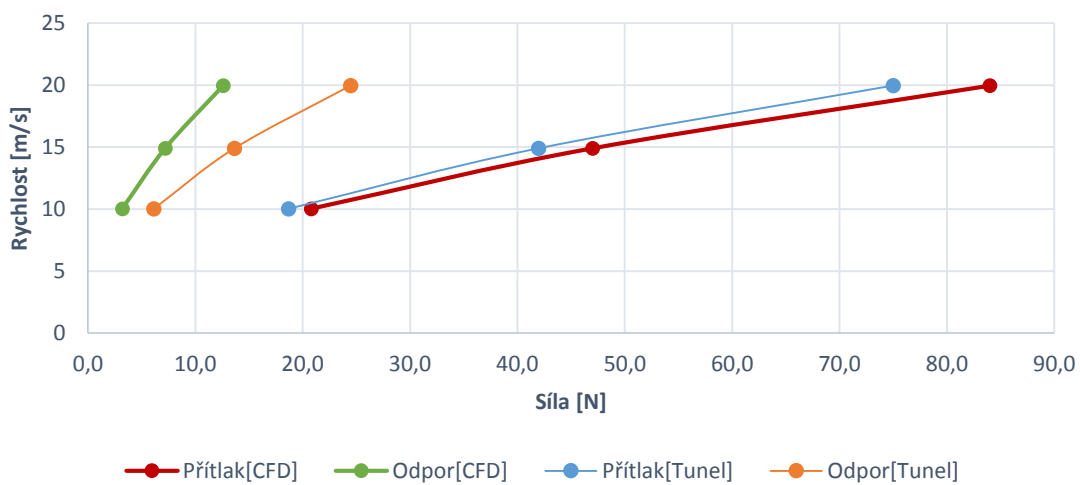


Graf 11 - Přítlak v základní poloze (odpor) – hlavní profil 8° klapka 30° pro rychlost od 4 m/s do 26 m/s po 4 m/s

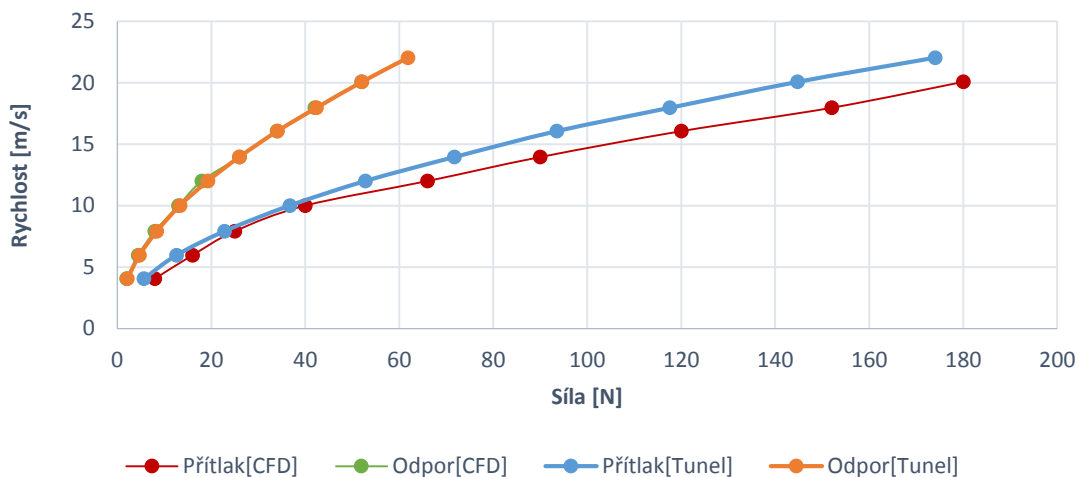


Graf 12 - Zjištění meze odtržení proudnic na hlavním profilu (natočení hlavního profilu) pro rychlost 15 m/s

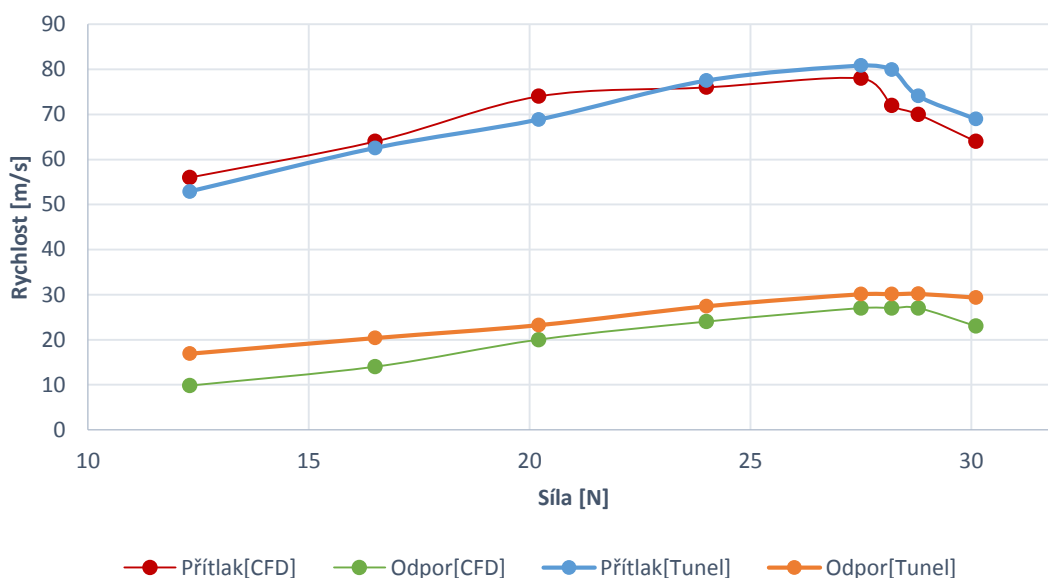
12 Porovnání výsledků měření



Graf 13 -Přítlak pouze hlavního profilu – úhel náběhu 8° rychlosti 10, 15, 20, 25 m/s



Graf 14 - Přítlak v základní poloze (odpor) – hlavní profil 8° klapka 30° pro rychlost od 4 m/s do 26 m/s po 4 m/s



Graf 15 - Zjištění meze odtržení proudnic na hlavním profilu (natočení hlavního profilu) pro rychlost 15 m/s

13 Úprava fyzikálního modelu simulace

V rámci zpřesnění simulací vůči modelu se nabízí otázka na výměnu parametrů simulace. Zejména jsem se rozhodl vyměnit model turbulence Spalart-Allmaras za K-epsilon a K-omega a ideální plyn za reálný. Zbylé parametry zůstaly stejné.

13.1 K-epsilon

Dvourovnicový model turbulence, řešen dvěma transportními rovnicemi. Tento model je v průmyslové aplikaci CFD výpočtů nejrozšířenější a to i přes to, že při velkých gradientech nedává přesné výsledky. Rovnice se řeší pro Reynoldsova napětí pomocí turbulentní viskozity

podle Boussinesquovy hypotézy. Transportní rovnice jsou řešeny pro k a ε . Rovnice tedy jsou [29]:

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_j k)}{\partial x_j} = P - \varepsilon \rho + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + \rho L_k \quad (13.1)$$

$$\frac{\partial(\rho \varepsilon)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_j \varepsilon)}{\partial x_j} = C_{\varepsilon 1} f_1 \frac{\varepsilon}{k} P - C_{\varepsilon 2} f_2 \frac{\rho \varepsilon^2}{k} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + \rho L_\varepsilon \quad (13.2)$$

kde

$$P = \tau_{ij} \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \quad (13.3)$$

$$\tau_{ij} = \mu_t \left(2S_{ij} - \frac{2\partial u_k}{3\partial x_j} \delta_{ij} \right) - \frac{2}{3} \rho k \delta_{ij} \quad (13.4)$$

$$S_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \quad (13.5)$$

a turbulentní viskozita je

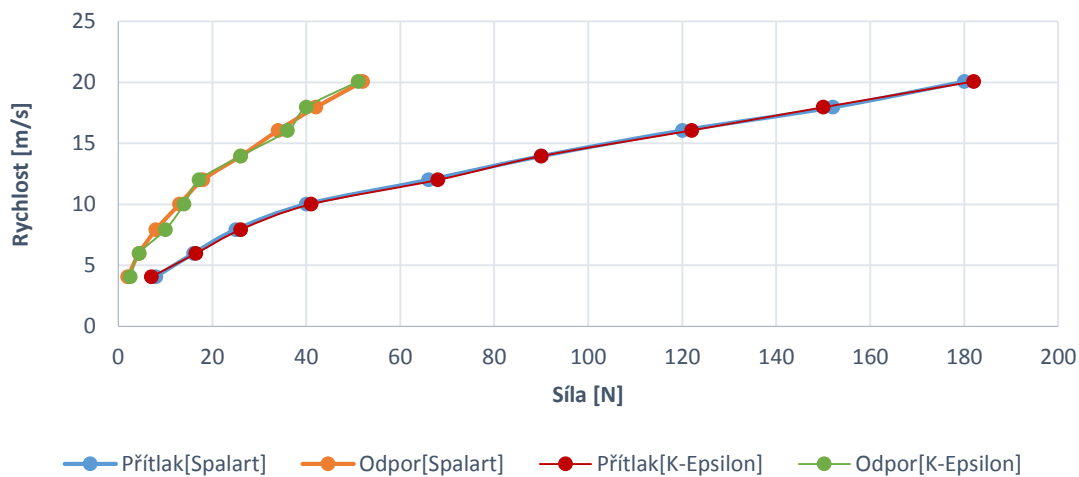
$$\mu_t = C_\mu f_\mu \frac{\rho k^2}{\varepsilon} \quad (13.6)$$

Okrajové podmínky

$$k_{wall} = 0 \quad \varepsilon_{wall} = 0$$

Výpočtové konstanty

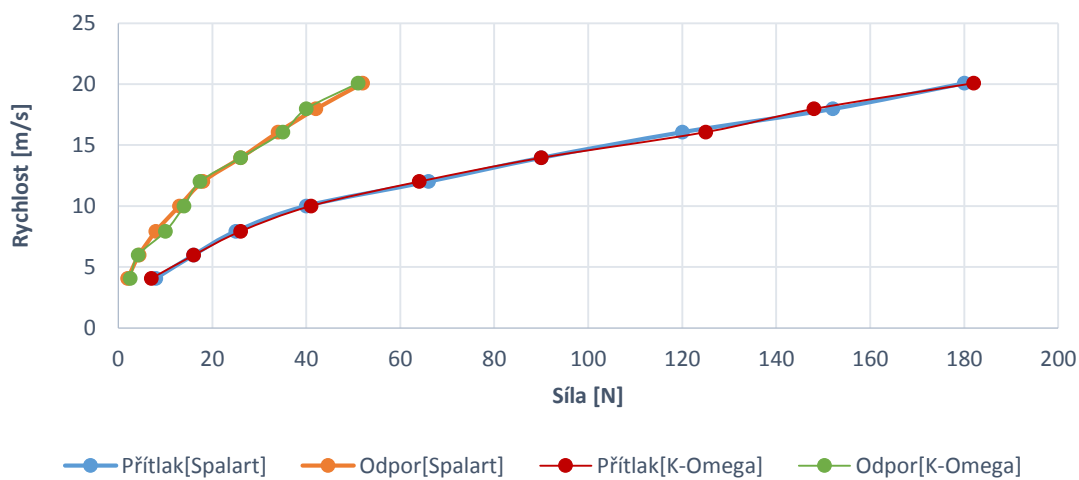
$$\begin{aligned} \sigma_k &= 0 & \sigma_\varepsilon &= 1,3 & C_\mu &= 0,09 & C_{\varepsilon 1} &= 1,35 & C_{\varepsilon 2} &= 1,80 \\ f_1 &= 1 & f_2 &= 1 - \frac{0,4}{1,8} e^{-\frac{Re_T^2}{36}} & Re_T &= \frac{\rho k^2}{\mu \varepsilon} & f_\mu &= 1 - e^{-0,0115d+} \end{aligned}$$



Graf 16 – Porovnání modelů turbulence Spalart-Allmaras vs. K- ϵ pro přítlak v základní poloze (odpor) – hlavní profil 8° klapka 30°

13.2 K-omega

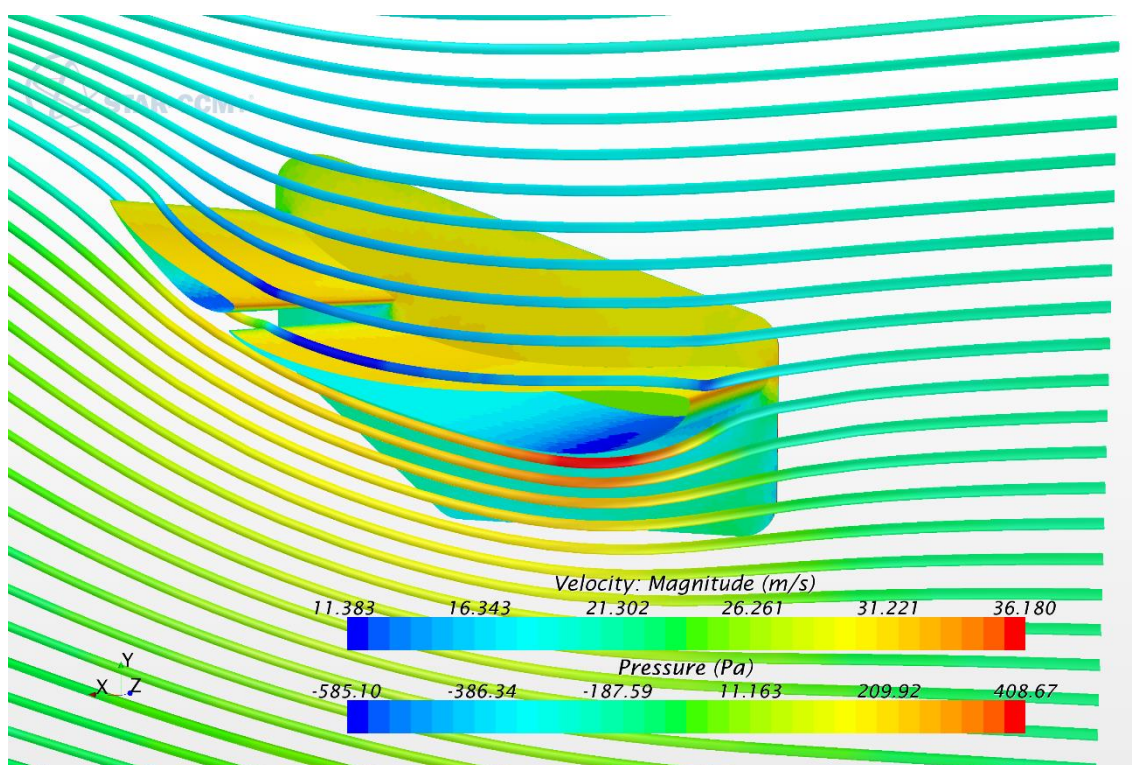
Stejně jako k-epsilon je k-omega dvourovnicový model. Rovnice pro ω má oproti rovnici pro ϵ několik rozdílů. Je řešitelná s méně podmínkami, dosahuje lepších výsledků při výpočtech tlakového spádu a mezní vrstvy.



Graf 17 – Porovnání modelů turbulence Spalart-Allmaras vs. K- Ω pro přítlak v základní poloze (odpor) – hlavní profil 8° klapka 30°

14 Závěr

Z měření vyplívá, že v případě měření pouze hlavní profil, dochází k odchylce v měření odporové síly. Kdy největší odchylka je při největší měřené rychlosti 20m/s a odchylka činí 10N. Odchylka při měření přítlakové síly je také 10N, avšak na větším měřeném rozsahu. Při měření přítlaku v základní poloze jsou hodnoty odporových sil takřka totožné, avšak ve vyšších rychlostech dochází k nepřesnostem v přítlačné síle. Tato nepřesnost může být dána chybou měření, nedostatečnou hustotou sítě při simulaci, fyzikálním modelem simulace atd. V případě zjišťování meze odtržení proudnic od profilu můžeme konstatovat, že hodnota, kdy dojde k odtržení je velmi podobná, jak u CFD, tak u měření v tunelu. Porovnáme li různé fyzikální modely, dojdeme k závěru, že odlišnost v našem případě je minimální. Zajímavější by bylo porovnat tyto fyzikální modely simulací na složitějším modelu například voze Formula Student.



Obr. 34 – Grafické znázornění výpočtu

15 Použitá literatura

1. BAALS, Donald, William CORLISS. Wind Tunnels of NASA. Washington: NASA, 1981. NAS 1.21:440
2. Tatra T77 [online]. [cit. 29. 4. 2016]. Dostupné z: <http://www.tatra-club.com/graphics/msgboard/11308/full/1933-tatra77.jpg>
3. Tesla Model S [online]. [cit. 29. 4. 2016] Dostupné z: <http://www.seriouswheels.com/pics-2012/r-z-0-9/2012-Tesla-Model-S-Studio-4-1280x960.jpg>
4. McLaren F1 [online]. [cit. 29. 4. 2016]. Dostupné z: <http://cdn.johnywheels.com/2015/10/20/vodafone McLaren Mercedes F1 car-l-8848e05900615200.jpg>
5. Rules: Formula SAE [online]. SAE International, 2016. [cit. 6. 6. 2016]. Dostupné z: http://students.sae.org/cds/formulaseries/rules/2016_fsae_rules.pdf
6. Formula Student Combustion - World Ranking List [online]. Fs-Mazur, 2016. [cit. 6. 6. 2016] Dostupné z: <http://mazur-events.de/fs-world/C/>
7. NASA - Otevřený aerodynamický tunel [online]. [cit. 25. 5. 2016]. Dostupné z: <https://www.grc.nasa.gov/www/k-12/airplane/Images/tunoret.jpg>
8. Uzavřený aerodynamický tunel [online]. [cit. 1. 5. 2016]. Dostupné z: <http://www.vzlu.cz/images/thumbs3/aerodynamika-mereni-nrt13-20150409141847.jpg>
9. Tunel s drážkovanou stěnou [online]. [cit. 1. 5. 2016]. Dostupné z: <http://allamericanracers.com/facility/aerodynamics.html>
10. Tunel s přizpůsobivou stěnou [online]. [cit. 10. 5. 2016].
11. Mercedes-Benz [online]. [cit. 1. 5. 2016]. Dostupné z: http://s1.cdn.autoevolution.com/images/news/mercedes-benz-opens-new-aeroacoustic-wind-tunnel-66459_1.jpg
12. Tunel 3m VZLU [online]. [cit. 10. 5. 2016]. Dostupné z: <http://www.dis.cz/deliver/vzlu-new/images/thumbs2/1-26.jpg>
13. Rozložení tlaků na leteckém profilu [online]. [cit. 10. 5. 2016]. Dostupné z: <http://www.laazatec.cz/images/telo2004/pruvodce/procleti4.jpg>
14. Úhel náběhu křídla [online]. [cit. 10. 5. 2016]. Dostupné z: http://www.surmagico.cl/alulas/angulo_ataque.jpg

15. Křídlo v tunelu [online]. [cit 10. 5. 2016]. Dostupné z:
<http://physik.uibk.ac.at/physik1e/wings.pdf>
16. Křídlo v tunelu [online]. [cit 10. 5. 2016]. Dostupné z:
<http://physik.uibk.ac.at/physik1e/wings.pdf>
17. ANDERSON, John. Fundamentals of Aerodynamics, Columbus: McGraw-Hill Education, 2009. ISBN 978-1259129919
18. Geometrie profilu [online]. [cit 13. 5. 2016]. Dostupné z:
http://www.slavetind.cz/stavba/konstrukce/kridlo/obrazky/Profil1_2.jpg
19. Letou v letu [online]. [cit 13. 5. 2016]. Dostupné z: <http://www.grc.nasa.gov/WWW/K-12/airplane/Animation/airmot/Images/smot.gif>
20. Profil S1223 [online]. [cit 16. 5. 2016]. Dostupné z:
<http://airfoiltools.com/airfoil/details?airfoil=s1223-il>
21. Grafy profilu S1223 [online]. [cit 18. 5. 2016]. Dostupné z:
<http://airfoiltools.com/airfoil/details?airfoil=s1223-il>
22. KOZUBKOVÁ, Milada a Sylva DRÁBKOVÁ. Numerické modelování proudění FLUENT I. Ostrava: Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava, 2003, 115 s. ISBN 80-248-0525-1.
23. STAR CCM+ Polyhedral Mesh [online]. CD-Adapco Manual. Dostupné z:
https://stevedocs.cd-adapco.com/starccmplus_latest_en/index.html#page/STARCCMP%2FGUID-B8098081-75D7-4A30-B0EC-5C1691B8D304%3Den%3D.html%23
24. Log of the wall [online]. [cit. 21. 5. 2016] Dostupné z: http://www.cfd-online.com/W/images/6/6a/Img_lawOfTheWall_whiteBG.png
25. KATZ, J. Race Car Aerodynamics, Massachusetts: Bentley Publishers, 1995. ISBN 978-0-8376-0142-7
26. NASA - Wing Geometry,
<http://www.grc.nasa.gov/WWW/k-12/airplane/geom.html> [online: 20. 6. 2016]
27. VLČEK, Petr. Modelování turbulentního proudění, Praha: České vysoké učení technické v Praze, Fakulta strojní, 2010. Dostupné z:
<http://chps.fsid.cvut.cz/pt/2013/pdf/3509.pdf> [online: 15. 6. 2016]
28. Spalart- Allmaras Turbulence Model – Langley Research Center – NASA [online]. [cit. 21. 5. 2016]. Dostupné z: <http://turbmodels.larc.nasa.gov/spalart.html>
29. K-epsilon Turbulence Model – Langley Research Center – NASA [online]. [cit. 21. 5. 2016]. Dostupné z: <http://turbmodels.larc.nasa.gov/ke-chien.html>

