TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI
Fakulta strojní

Návrh aerodynamických prvků pro studentskou formuli

Bakalářská práce

Studijní program: B2301 – Strojní inženýrství
Studijní obor: 2301R000 – Strojní inženýrství

Autor práce: **Jan Bayer**
Vedoucí práce: doc. Ing. Václav Dvořák, Ph.D.

Liberec 2018

TECHNICAL UNIVERSITY OF LIBEREC
Faculty of Mechanical Engineering

Design of aerodynamic elements for student formulas

Bachelor thesis

Study programme: B2301 – Mechanical Engineering
Study branch: 2301R000 – Mechanical Engineering

Author: **Jan Bayer**
Supervisor: doc. Ing. Václav Dvořák, Ph.D.

Liberec 2018

Technická univerzita v Liberci
Fakulta strojní
Akademický rok: **2017/2018**

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení:	**Jan Bayer**
Osobní číslo:	**S15000028**
Studijní program:	**B2301 Strojní inženýrství**
Studijní obor:	**Strojní inženýrství**
Název tématu:	**Návrh aerodynamických prvků pro studentskou formuli**
Zadávající katedra:	**Katedra energetických zařízení**

Zásady pro vypracování:

1. Proveďte rešerši soutěžních pravidel pro vozidla Formule Student/SAE, proveďte rešerši literatury o aerodynamice vozidel.
2. Proveďte koncepční návrh zvoleného aerodynamického prvku.
3. Analyzujte silovou rovnováhu na vozidle a navrhněte adekvátní tvar zvoleného prvku.
4. Zvolenou metodou proveďte analýzu aerodynamických vlastností a odhad zlepšení výkonů vozidla při použití nového prvku.
5. Formulujte závěry.
6. V seznamu literatury uveďte alespoň 10 zdrojů.

Rozsah grafických prací:	**10 stran**
Rozsah pracovní zprávy:	**30 stran**
Forma zpracování bakalářské práce:	**tištěná**

Seznam odborné literatury:

[1] **Fryšták, L.,** *Návrh přítlačných křídel pro vůz formule Student / SAE, bakalářská práce*. **VUT Brno, 2014.**

[2] **Noskievič, J. a kol.,** *Mechanika tekutin.* **SNTL, 1987.**

Vedoucí bakalářské práce:	**doc. Ing. Václav Dvořák, Ph.D.** Katedra energetických zařízení

Datum zadání bakalářské práce:	**1. března 2018**
Termín odevzdání bakalářské práce:	**1. září 2019**

Technická univerzita v Liberci · 7a ·

L.S.

prof. Dr. Ing. Petr Lenfeld
děkan

doc. Ing. Václav Dvořák, Ph.D.
vedoucí katedry

V Liberci dne 6. března 2018

Prohlášení

Byl jsem seznámen s tím, že na mou bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., o právu autorském, zejména § 60 – školní dílo.

Beru na vědomí, že Technická univerzita v Liberci (TUL) nezasahuje do mých autorských práv užitím mé bakalářské práce pro vnitřní potřebu TUL.

Užiji-li bakalářskou práci nebo poskytnu-li licenci k jejímu využití, jsem si vědom povinnosti informovat o této skutečnosti TUL; v tomto případě má TUL právo ode mne požadovat úhradu nákladů, které vynaložila na vytvoření díla, až do jejich skutečné výše.

Bakalářskou práci jsem vypracoval samostatně s použitím uvedené literatury a na základě konzultací s vedoucím mé bakalářské práce a konzultantem.

Současně čestně prohlašuji, že tištěná verze práce se shoduje s elektronickou verzí, vloženou do IS STAG.

Datum: 3. 7. 2018

Podpis: Bay

Abstrakt

Tato bakalářská práce se zabývá návrhem aerodynamických prvků pro tým FS TUL Racing. V teoretické části jsou popsány vlastnosti reálných tekutin, silové působení na těleso v proudu reálné tekutiny a vlastnosti leteckých profilů a křídel. Na závěr této části jsou zmíněny vlivy na dynamiku vozidel. V praktické částí je navrhnut dvouprvkový profil zadního křídla, který je následně analyzován pomocí 2D CFD analýzy pro tři rychlosti a pět úhlů náběhu. Výsledky této analýzy jsou využity pro řešení rovnováhy předního a zadního křídla na vozidle. Z navržených rozměrů je vyhotoven 3D CAD model sestavy kompletního křídla. Ve zbytku práce jsou zmíněny efekty aerodynamických prvků na vozidlo, konkrétně přidaná hmotnost, silové zatížení křídla a rovnoměrný pohyb vozu při zatáčení.

Klíčová slova:

FSAE, Formula Student, letecký profil, křídlo, CFD, vozidlo, aerodynamika

Abstract

This bachelor thesis deals with a design of aerodynamic elements for the FS TUL Racing team. The theoretical part describes the properties of a real fluid, force effects on the body in the flow of a real fluid and the properties of airfoils and wings. At the end of the theoretical part, effects on vehicle dynamics are mentioned. The practical part describes a design process of a two-piece profile of the rear wing, which is subsequently analyzed by a 2D CFD analysis for three values of speed and five angles of attack. The results of this analysis are used to solve the equilibrium of the front and rear wing of the vehicle. A 3D CAD model of a complete wing assembly is designed from the proposed dimensions. In the rest of the work, the effects of aerodynamic elements on the vehicle are mentioned, namely the added weight, forces acting on the wing and a uniform motion of the car when cornering.

Keywords:

FSAE, Formula Student, airfoil, wing, CFD, vehicle, aerodynamics

Poděkování

Chtěl bych poděkovat svému vedoucímu doc. Ing. Václavu Dvořákovi, Ph.D. za odborné vedení, za pomoc a vstřícnost při řešení této práce. Dále bych chtěl poděkovat Ing. Tomáši Kořínkovi za cenné rady a za jeho trpělivost.

Poděkování patří i mé rodině, která mě po celou dobu studia vytrvale podporuje.

Rád bych také v neposlední řadě poděkoval přítelkyni za velkou dávku trpělivosti a za konzultace v oblasti gramatické korekce.

Obsah

Seznam obrázků a grafů

Seznam tabulek

Seznam zkratek a značek

FSAE		Formula Society of Automotive Engineers
CFD		Computational Fluid Dynamics
m	(kg)	hmotnost
V	(m^3)	objem
v	($\mathrm{m}^3 \cdot \mathrm{kg}^{-1}$)	měrný objem
ρ	($\mathrm{kg} \cdot \mathrm{m}^{-3}$)	hustota
p	(Pa)	normálový tlak
F	(N)	síla
S	(m^2)	plocha, také referenční plocha
T	(K)	termodynamická teplota
ϑ	(°C)	teplota
η	($\mathrm{N} \cdot \mathrm{s} \cdot \mathrm{m}^{-2}$)	dynamická viskozita
ν	($\mathrm{m}^2 \cdot \mathrm{s}^{-1}$)	kinematická viskozita
v	($\mathrm{m} \cdot \mathrm{s}^{-1}$)	rychlost proudění
v_∞, V_∞	($\mathrm{m} \cdot \mathrm{s}^{-1}$)	rychlost nenarušeného proudu tekutiny
l	(m)	charakteristický rozměr
a	($\mathrm{m} \cdot \mathrm{s}^{-1}$)	rychlost zvuku
Re	(1)	Reynoldsovo číslo
Ma	(1)	Machovo číslo
τ	(Pa)	smykové (tečné) napětí
R	(N)	výsledná síla
s	(m)	souřadnice povrchu tělesa
L	(N)	vztlak
D	(N)	odpor
N	(N)	normálová síla, složka kolmá k tětivě tělesa
A	(N)	axiální síla, složka rovnoběžná s tětivou tělesa
α	(°)	úhel náběhu
q_∞	(Pa)	dynamický tlak
C_L (c_l)	(1)	koeficient vztlaku (v závorce pro 2D profil)
C_D (c_d)	(1)	koeficient odporu (v závorce pro 2D profil)
C_N (c_n)	(1)	koeficient normálové síly (v závorce pro 2D profil)
C_A (c_a)	(1)	koeficient axiální síly (v závorce pro 2D profil)
C_M (c_m)	(1)	koeficient momentu sil (v závorce pro 2D profil)
x_{cp}	(m)	vzdálenost působiště aerodynamických sil
c	(m)	délka tětivy tělesa či profilu

NH		náběžná hrana
OH		odtoková hrana
$\mathit{Æ}$	(1)	koeficient poměru stran
λ	(1)	koeficient zkosení
C_{D0}	(1)	koeficient odporu při nulovém vztlaku
C_{DI}	(1)	indukovaný odpor
h	(m)	výška bočnice
b	(m)	rozpětí křídla
e	(1)	Oswaldova konstanta
$\mu_{x,y}$	(1)	součinitel obvodové (x) nebo příčné (y) síly
μ_v (φ)	(1)	součinitel adheze
μ_s	(1)	součinitel tření
a	($\mathrm{m \cdot s^{-2}}$)	zrychlení
G	(N)	tíha
f	(1)	součinitel odporu valení
e	(m)	rameno valivého odporu
P	(W)	výkon
O_V	(N)	valivý odpor
T_R	(N)	trakční síla
r_d	(m)	dynamický poloměr kola
r	(m)	poloměr kola
g	($\mathrm{m \cdot s^{-2}}$)	tíhové zrychlení
R_F, R_R	(N)	kolmá reakce mezi vozovkou a kolem

1 Úvod

Tým FS TUL Racing se účastní již druhým rokem soutěže Formula Student/SAE. Pro druhý vůz tedy bylo výzvou navrhnout, vyrobit a stanovit efekty aerodynamických prvků, které napomohou k lepším výkonům nového vozu. Autor je členem týmu FS TUL Racing a rozhodl se právě věnovat v této práci těmto aerodynamickým prvkům.

Mezi aerodynamické prvky lze řadit např. přední či zadní přítlačné křídlo nebo podlahu s difuzory (angl. undertray). Jejich přínosem je zejména zvýšení přítlaku či vylepšení rozložení tlaku okolo vozu. Hlavním negativem převážně přítlačných křídel je zvyšování odporu a to úměrně s přítlakem. Je proto vhodné umisťovat tyto prvky na vozy s dostatečným výkonem pro překonání těchto odporů. Pro přítlačná křídla se v soutěži Formula Student/SAE využívají letecké profily pro nízká Reynoldsova čísla a vysoký vztlak. Jen tak lze využít potenciál přítlačných křídel na maximum. Neméně důležité je také rozmístění aerodynamických prvků na vozidle, jelikož při špatném rozvržení hrozí, že se sice dosáhne požadovaného přítlaku, ale vozidlo bude v určitých chvílích značně nestabilní až neovladatelné.

Tato práce si tedy dává za cíl navrhnout potřebný aerodynamický prvek, analyzovat jeho vlastnosti a získaná data využít pro odhadnutí efektů na vozidlo. Analýza navrženého prvku je provedena pomocí výpočtu 2D CFD (Computational Fluid Dynamics). Díky tomu lze analyzovat potřebné vlastnosti v poměrně krátkém časovém okamžiku a za velmi malé náklady oproti testování např. v aerodynamickém tunelu. Nevýhodou je, že někdy výsledky neodpovídají realitě, a tak je nutné tyto výsledky porovnat s experimentem. I díky částečné idealizaci úloh v těchto analýzách je vhodné tyto výsledky brát s určitou rezervou, jelikož by bylo velmi obtížné zahrnout všechny vlivy působící na vozidlo při závodu na trati.

ANSYS Fluent je komerční software, který poskytuje prostředí pro CFD výpočty metodou konečných objemů. V kompletním balíku ANSYS Workbench dává k dispozici i nástroj pro úpravu geometrie DesignModeler a pro tvorbu sítě Meshing. Díky celkovému propojení i s výpočetními technikami z oblasti mechanismů či pružnosti a pevnosti má tento software širokou uživatelskou základnu.

Pro řešení rovnováhy vozu a odhadu efektů jsou využity nástroje klasické vektorové mechaniky aplikované na mechaniku vozidel. Tato metoda také obsahuje určitou dávku idealizace a nepokrývá naprosto všechny vlivy působící na vozidlo. I tak je ale možné alespoň přibližně stanovit efekty aerodynamických prvků na vozidlo.

Navržený a vyrobený aerodynamický prvek bude následně využit na závodech Formula SAE Italy 2018 v italském Varano de' Melegari, kde se naplno projeví jeho efekty v reálných podmínkách.

2 Soutěž Formula Student/SAE

Formula SAE je konstrukční soutěž původem z USA pro studenty vysokých škol. Hlavní koncept soutěže je zkonstruovat a postavit závodní vůz ve stylu monopostu[1], který je nutné následně obhájit na závodech. Obhájit se musí jak jeho konstrukce, tak i celková cena výroby vozu a teoretický marketingový a podnikatelský záměr. V neposlední řadě se s vozem závodí ve čtyřech dynamických disciplínách – Skidpad, Acceleration, Autocross a Endurance.

Studenti si musí sami zajistit konstrukci, výrobu, ale i marketing svého vlastního projektu, protože shánění sponzorů a peněžních zdrojů je taktéž na nich. S tím se pojí i to, že projektu se věnují ve svém volném čase a bez jakéhokoliv nároku na odměnu.

Soutěž se dále dělí na kategorii vozů se spalovacím motorem, s elektrickým pohonem a kategorii autonomních vozidel. Tyto kategorie spolu na závodech nesoutěží vzhledem k naprosto rozdílné konstrukci a částečně jiným pravidlům dané kategorie. Tato práce bude zaměřena hlavně na kategorii vozů se spalovacím motorem.

2.1 Pravidla soutěže

Středobodem celé soutěže jsou pravidla. Na soutěžích v Evropě jsou využívána buďto pravidla soutěže Formula SAE[2] nebo pravidla soutěže Formula Student Germany[3]. Předmětem obou sad těchto pravidel je víceméně to samé. Určují se zde jak formální náležitosti soutěže, celková organizace soutěže, tak zejména pravidla a omezení konstrukce vzhledem k bezpečnosti účastníků. Dodržování těchto pravidel je na závodech přísně kontrolováno a samotná konstrukce je zvlášť zkontrolována při tzv. Technical Inspection.

Technická inspekce či přejímka se dělí na Mechanical Inspection, Tilt Table Test, Noise Test a Brake Test. Při Mechanical Inspection se zkoumá, zda-li je všechno na autě dle pravidel a zda něco nechybí. Při Tilt Table Test se vozidlo naklopí na plošině na daný úhel a sleduje se, jestli neteče nějaká kapalina z vozidla a jestli vůz drží při daném naklopení stabilitu. Noise Test zjišťuje, jestli je dodržen hlukový limit vozidla při daných otáčkách motoru. V neposlední řadě Brake Test zjišťuje, jestli při prudkém zabrzdění dochází k prokluzu všech čtyř kol.

Pokud vůz selže při jakékoliv z těchto kontrol, tak je možnost potřebné nedostatky opravit a pokusit se znovu projít danou kontrolu až do doby, kdy se celá

[1] *Je to jednomístný sportovní či závodní automobil obvykle s otevřenou kabinou a nekrytými koly*[1].

technická inspekce organizátory ukončí. Poté už není možné se s vozem zúčastnit dynamických disciplín. Pokud vůz projde všemi kontrolami, nalepí se na kapotu inspekční nálepka.

Pravidla pro umístění aerodynamických prvků budou dále vysvětlena v kapitole 3.

2.2 Historie soutěže

Historie soutěže sahá až na počátek 80. let 20. století. Ještě před tím, v roce 1979, se studenti z University of Houston rozhodli na základě naučného článku z časopisu Popular Mechanics pořádat soutěž SAE Mini-Indy, kde bylo za úkol postavit vůz podobný vozům Indy série. Těchto závodů se zúčastnilo celkem 11 týmů a výhercem se stala The University of Texas v El Paso. Stejnou soutěž chtěl Dr. William Shapton znovu zopakovat, avšak marně. Soutěž SAE Mini-Indy se už dále nekonala.

V roce 1980 se studentská pobočka SAE na University of Texas (Austin) v čele s Prof. Matthewsem rozhodla pokračovat v podobných soutěžích, ale chtěli změnit koncept tak, aby soutěž byla spíše soutěží inženýrskou než soutěží řidičů. Studenti tedy navrhli potřebná bezpečnostní a soutěžní pravidla a následně Prof. Matthews zajistil podporu u organizace SAE a vymyslel název Formula SAE. V následujícím roce už vedení studentské pobočky SAE zorganizovalo první závody.[4]

Prvních závodů pořádaných na University of Texas (Austin) se zúčastnily pouze čtyři týmy. Soutěžilo se v dynamických disciplínách jako akcelerace, ovladatelnost, zkouška spolehlivosti a úspora paliva.

V letech 1982-1984 byly závody stále pořádány na University of Texas (Austin). V průběhu let došlo k obměnám pravidel, např. byla zavedena nutnost vybavit vůz nezávislým zavěšením všech kol nebo byla zavedena časová penalizace pro vůz, kterému se v zatáčce odlepilo kolo od země. Na závodech v letech 1983 se také poprvé objevil vůz s kevlarovým monokokem.

V roce 1988 nově přibyla kategorie vozů s pohonem na methanol (M85) a poté, v roce 1989, se zavedlo pravidlo charakteristické pro tuto soutěž, že vůz nesmí být starší než dva roky. Hlavním důvodem je to, aby si všichni studenti prošli konstrukční fází nového vozu. Toto pravidlo se později zpřísnilo na jeden rok.

V roce 1990 se na závodech objevil unikátní vůz podobný vozu Jima Halla 1970 Chaparral 2J, který byl vybaven dvěma ventilátory, jenž odsávaly z pod auta vzduch a vytvářely tak přítlak nezávislý na rychlosti. Tyto prvky byly později zakázány.

První tým z Evropy, který se zúčastnil severoamerické soutěže Formula SAE byl z The University of Leeds v roce 1997, což mimo jiné přitáhlo větší zájem neamerických týmů o tuto soutěž. V návaznosti na to, v roce 1998, vznikla ve Spojeném království soutěž Formula Student za podpory SAE a Institution of Mechanical Engineers (IMechE)[5].

V Evropě došlo dále ke vzniku dalších soutěží. Jsou to například Formula Student Germany, Formula Student Czech Republic nebo Formula SAE Italy. S postupem času se zavedla i nová kategorie vozů s elektrickým pohonem a kategorie autonomních vozů.

2.3 FS TUL Racing

Tým FS TUL Racing vznikl okolo roku 2015, přičemž vývoj postupně probíhal až do roku 2017 (ještě pod jménem Student Formula TUL), kdy se tým zúčastnil se svým vozem Eliška (obrázek 2.1) prvního závodu Formula SAE Italy 2017. Dále se tým zúčastnil závodu Formula Student Czech Republic 2017 a Baltic Open Bohemia 2017.

Po první sezóně týmu bylo nutné kvůli pravidlům sestrojit vůz nový. Proto vznikl koncept vozu Markétka (obrázek 2.2), který poslouží na sezónu 2018. Na novém voze budou umístěny přední i zadní přítlačná křídla a speciální podlaha s difuzory. Návrhem zadního přítlačného křídla se bude zabývat i tato práce.

Tým je světovém hodnocení aktuálně na 314. pozici mezi vozy se spalovacím motorem[6].

Obrázek 2.1: Vůz Eliška[7]

Obrázek 2.2: Koncept Markétka

3 Pravidla pro aerodynamické prvky

Pravidlům všeobecně už byla v této práci věnována kapitola 2.1 a nyní by bylo vhodné uvést přímo pravidla určující možné rozměry a polohu aerodynamických prvků na vozidle. Pro výčet těchto pravidel byly vybrány pravidla Formula SAE[2]. Jak pravidla Formula SAE, tak i pravidla Formula Student přistupují k této problematice téměř identicky, tudíž zde výběr nehraje roli.

V pravidlech Formula SAE se celkové problematice aerodynamických prvků věnuje kapitola 2 na str. 22 a kapitola 9 na str. 65.

V kapitole 2 s názvem General Design Requirements je pouze jedno pravidlo, které se týká aerodynamických prvků, a to T2.1 Vehicle Configuration. Hlavním bodem je, že vozidlo musí mít nezakrytá kola a otevřený kokpit a kola nesmí ležet na jedné přímce. Ve zkratce v bodech následuje definice toho, co znamená, že vůz má mít nezakrytá kola:

- Vrchních 180 stupňů kola musí být vidět při pohledu shora.
- Celá kola musí být vidět zboku.
- Nic se nesmí nacházet v „Keep-out“ zóně, kterou ohraničují dvě vertikální roviny vzdálené od průměru kola 75 mm dopředu a dozadu, viz. obrázek 3.1 v kombinaci s pravidly v kapitole 9 (zelená barva).

Kapitola 9 s názvem Aerodynamic Devices je věnována pouze aerodynamickým prvkům. Znovu ve zkratce v bodech jsou zmíněna podstatná pravidla:

(a) Přední zóna. Žádný prvek nesmí:

  - Být dál než 700 mm dopředu od přední části předních kol.
  - Být širší než vzdálenost vnějších bočnic předních kol (měřeno ve výšce osy kola).
  - Při pohledu zpředu zasahovat do pohledu na část kol, která je 250 mm nad zemí.

(b) Zadní zóna. Žádný prvek nesmí být:

  - Dál než 250 mm dozadu od zadní části zadních kol.
  - Dál vpředu než přední strana opěrky bez polstrování. Opěrka musí být na svojí nejzadnější pozici.

- Širší než vzdálenost vnitřních bočnic zadních kol (měřeno ve výšce osy kola).

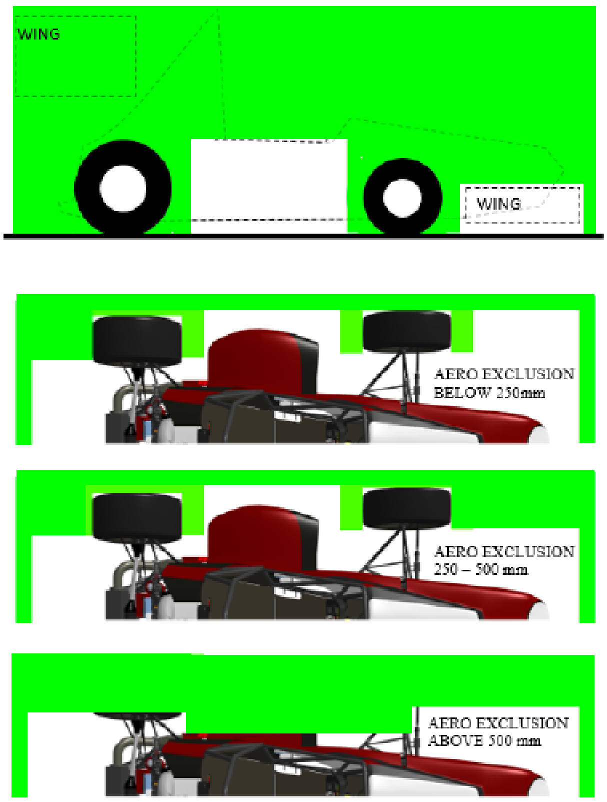
(c) Obecně nesmí být žádný prvek výš než 1.2 m od země (měřeno bez řidiče ve vozidle).

(d) Mezi osami přední a zadní nápravy do výšky 500 mm od země je aerodynamický prvek omezen v šířce spojnice vnějších bočnic předního a zadního kola (měřeno ve výšce osy kola). Nad výškou 500 mm je zóna zmenšena na 400 mm na obě strany od celkové osy vozidla. Toto pravidlo zároveň neplatí pro aerodynamické prvky příslušné zadní zóně.

(e) Všechny hrany, které mohou přijít do kontaktu s chodcem musí mít radius 5 mm pro horizontální hrany a 3 mm pro vertikální hrany. Tato úprava musí být napevno připevněna.

(f) Je zakázáno použití výkonových prvků pro dosažení přítlaku, jako např. ventilátorů.

(g) Aerodynamické prvky by měly být dostatečně tuhé, při pohybu vozidla by neměly kmitat, ani se nějak výrazně deformovat.



Obrázek 3.1: Shrnutí pravidel v obrázku. Zelená barva vyznačuje zakázanou oblast.[2]

4 Aerodynamika

4.1 Fyzikální vlastnosti tekutin

4.1.1 Stavové veličiny

U tekutin se určují stavové veličiny, mezi které patří především tlak, termodynamická teplota a hustota (či měrný objem)[8].

Hustota

Hustota ρ $(\mathrm{kg \cdot m^{-3}})$ je definována jako podíl hmotnosti Δm (kg) a objemu ΔV $(\mathrm{m^3})$. Měrný objem v $(\mathrm{m^3 \cdot kg^{-1}})$ je pak převrácená hodnota hustoty.

$$\rho = \lim_{\Delta V \to 0} \frac{\Delta m}{\Delta V} = \frac{dm}{dV} \tag{4.1}$$

$$v = \frac{1}{\rho} \tag{4.2}$$

Tlak

Tlak p $(\mathrm{Pa = N \cdot m^{-3}})$ je, dle kinetické teorie plynů, silový účinek působící na jednotku plochy stěny v tekutině způsobený nárazy molekul za jejich kinetického pohybu. V makroskopickém měřítku je tlak definován jako elementární normálová síla $d\mathbf{F}_n$ (N) působící na elementární plochu dS $(\mathrm{m^2})$[9]:

$$p = \frac{|d\mathbf{F}_n|}{|d\mathbf{A}|} = \frac{dF}{dS}. \tag{4.3}$$

Termodynamická teplota

Termodynamická teplota T (K) je v kinetické teorii plynů považována za míru kinetické energie molekul. Ve fenomenologické termodynamice je pak definována jako intenzitní veličina společná látce měřené a látce teploměrné[9]. Pro přepočet do Celsiovy stupnice se využívá vztah:

$$\vartheta = T - 273{,}15. \qquad (^\circ\mathrm{C}) \tag{4.4}$$

4.1.2 Podobnostní čísla

Reynoldsovo číslo

Reynoldsovo číslo udává poměr síly setrvačné a síly třecí[8]

$$\frac{F_s}{F_t} \sim \frac{\rho}{\eta} l v = \frac{vl}{\nu} = Re, \qquad (1) \tag{4.5}$$

kde ρ $(\mathrm{kg \cdot m^{-3}})$ je hustota, η $(\mathrm{N \cdot s \cdot m^{-2}})$ je dynamická viskozita, l (m) je charakteristický rozměr, v $(\mathrm{m \cdot s^{-1}})$ je rychlost proudění a ν $(\mathrm{m^2 \cdot s^{-1}})$ je kinematická viskozita.

Machovo číslo

Machovo číslo je poměr sil setrvačných a kompresních:

$$\frac{F_s}{F_d} \sim \frac{\rho l^2 v^2}{\rho l^2 a^2} = \left(\frac{v}{a}\right)^2,$$

$$Ma = \sqrt{\left(\frac{v}{a}\right)^2} = \frac{v}{a}, \qquad (1) \tag{4.6}$$

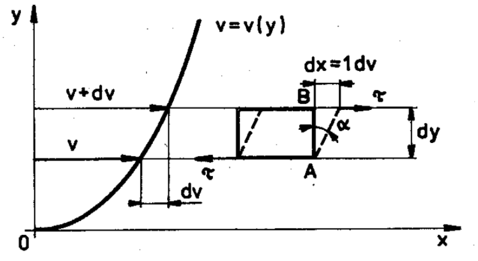
kde ρ $(\mathrm{kg \cdot m^{-3}})$ je hustota, l (m) je charakteristický rozměr, v $(\mathrm{m \cdot s^{-1}})$ je rychlost proudění a a $(\mathrm{m \cdot s^{-1}})$ je rychlost zvuku.

4.1.3 Viskozita

Viskozita tekutin se projevuje při proudění skutečných tekutin. Projevuje se odporem proti pohybu částic tekutin.V roce 1687 Isaac Newton dle experimentálního pozorování uvedl první formulaci viskozity tekutin a dodnes stále platí. Při představě proudění ve vodorovném směru na desce se proud pohybuje po vrstvách o tloušťce dy (obrázek 4.1), kdy na desce je rychlost nulová a postupně vzrůstá směrem od desky až do rychlosti volného proudu[8]. Mezi vrstvami působí smykové síly, které jsou důsledkem smykového napětí τ dle Newtona:

$$\tau = \eta \frac{\mathrm{d}v}{\mathrm{d}y}, \qquad (\mathrm{Pa}) \tag{4.7}$$

kde η $(\mathrm{N \cdot s \cdot m^{-2}})$ je dynamická viskozita a $\frac{\mathrm{d}v}{\mathrm{d}y}$ je gradient rychlosti.



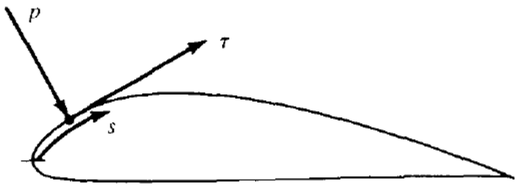
Obrázek 4.1: Rychlostní profil vazké tekutiny[8]

4.2 Silové působení

Jediné dva zdroje, které tvoří veškeré silové působení na těleso v proudu vzduchu, jsou (viz. obrázek 4.2)[10]:

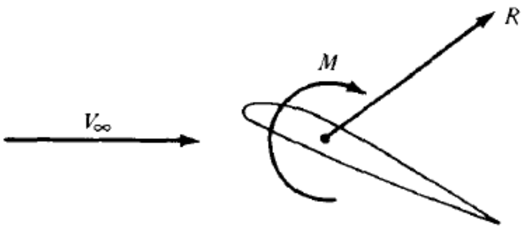
1. průběh normálového napětí přes povrch tělesa

2. průběh tečného napětí přes povrch tělesa

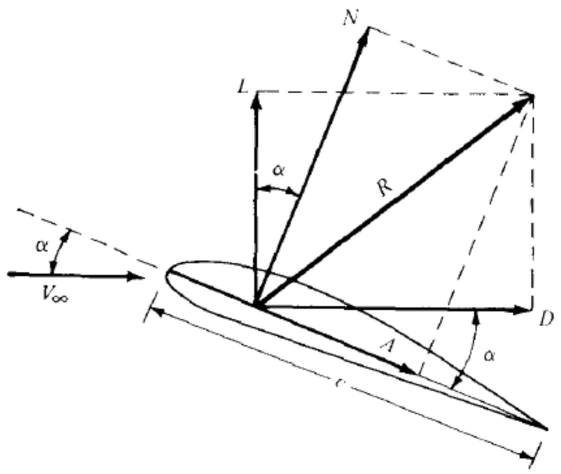


Obrázek 4.2: s značí souřadnici povrchu tělesa, $p(s)$ normálové napětí, $\tau(s)$ tečné napětí[10]

Pokud by byly tyto dva průběhy napětí zintegrovány po celém povrchu tělesa, vyšla by výsledná síla R a výsledný moment M působící na těleso (obrázek 4.3).



Obrázek 4.3: Výsledná síla R, moment M a rychlost nenarušeného proudu V_∞[10]



Obrázek 4.4: Rozklad na složky[10]

Výsledná síla R může být rozdělena na složky:

- L – vztlak (angl. lift), složka kolmá na rychlost nenarušeného proudu V_∞
- D – odpor (angl. drag), složka rovnoběžná s rychlostí nenarušeného proudu V_∞

nebo na složky:

- N – normálová síla, složka kolmá k tětivě tělesa[1]
- A – axiální síla, složka rovnoběžná s tětivou tělesa

Mezi tětivou c a rychlostí V_∞ je definován úhel náběhu α. Jelikož mezi L a N a mezi D a A je také úhel α, lze napsat vztahy mezi jednotlivými složkami:

$$L = N\cos\alpha - A\sin\alpha \tag{4.8}$$

$$D = N\sin\alpha + A\cos\alpha \tag{4.9}$$

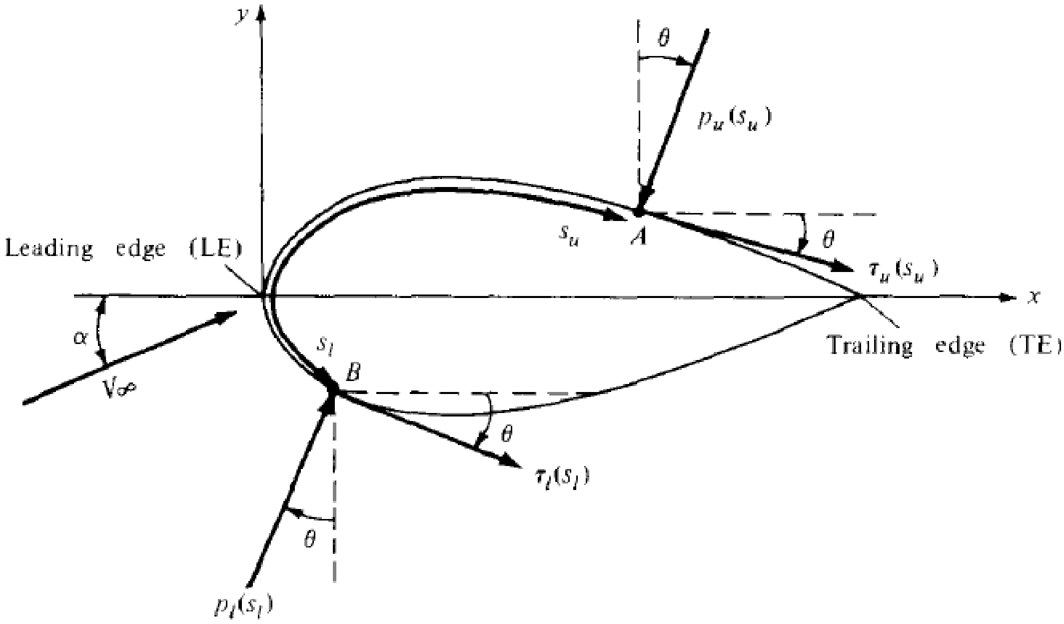
Nyní by bylo vhodné popsat blíže integraci nastíněnou na začátku této kapitoly. K názorné ilustraci slouží obrázek 4.5. Na obrázku jsou vyznačeny dva body A a B. V bodě A je souřadnice s_u (angl. upper) a jí příslušné normálové napětí $p_u(s_u)$ a tečné napětí $\tau_u(s_u)$. V bodě B je zase souřadnice s_l (angl. lower) a jí příslušné normálové napětí $p_l(s_l)$ a tečné napětí $\tau_l(s_l)$. Složky těchto napětí lze rozložit pomocí úhlu θ do os souřadného systému xy umístěného do náběžné hrany tělesa. Kladný směr úhlu θ je zaveden dle směru pohybu hodinových ručiček. Toto 2D těleso lze následně uvažovat jako průřez 3D tělesa s nekonečným rozpětím. Pokud bude uvažováno jednotkové rozpětí takového tělesa, poté $dS = ds \cdot 1$ (obrázek 4.6). Následně lze pomocí obou obrázků 4.5 a 4.6 sestavit rovnice rovnováhy pro infinitezimální plochu dS:

[1]tětiva tělesa či profilu (angl. chord) je spojnice náběžné hrany a odtokové hrany tělesa

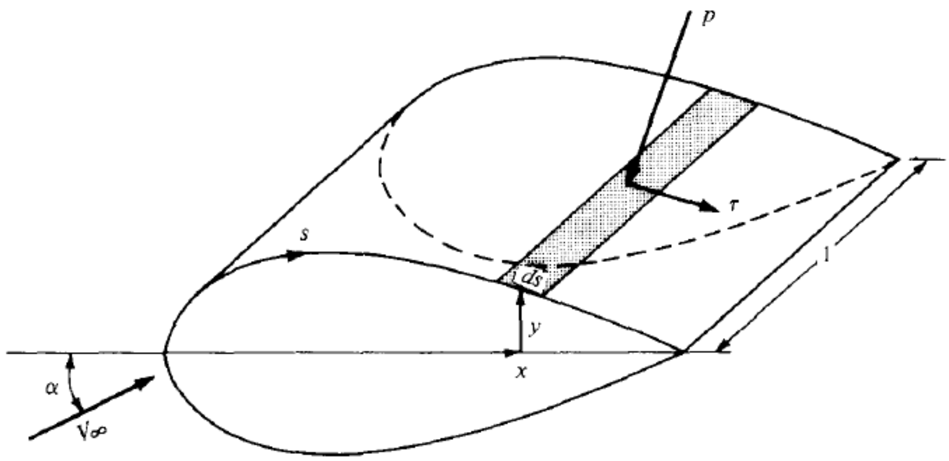
$$dN'_u = -p_u ds_u \cos\theta - \tau_u ds_u \sin\theta \tag{4.10}$$
$$dA'_u = -p_u ds_u \sin\theta + \tau_u ds_u \cos\theta \tag{4.11}$$

Analogicky pro spodní stranu:

$$dN'_l = p_l ds_l \cos\theta - \tau_l ds_l \sin\theta \tag{4.12}$$
$$dA'_l = p_l ds_l \sin\theta + \tau_l ds_l \cos\theta \tag{4.13}$$



Obrázek 4.5: Integrace přes povrch tělesa[10][2]



Obrázek 4.6: Integrace přes povrch tělesa s jednotkovým rozpětím[10]

[2]český ekvivalent pro *leading edge* je náběžná hrana a pro *trailing edge* je odtoková hrana

Celkové síly působící na jednotkové rozpětí N' a A' lze nyní získat integrací rovnic 4.10 – 4.13 od náběžné hrany (NH) po odtokovou hranu (OH):

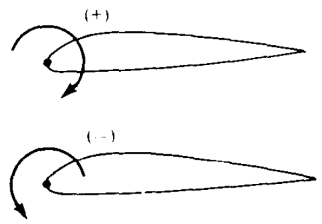
$$N' = \int_{NH}^{OH} (-p_u ds_u \cos\theta - \tau_u ds_u \sin\theta) + \int_{NH}^{OH} (p_l ds_l \cos\theta - \tau_l ds_l \sin\theta) \tag{4.14}$$

$$A' = \int_{NH}^{OH} (-p_u ds_u \sin\theta + \tau_u ds_u \cos\theta) + \int_{NH}^{OH} (p_l ds_l \sin\theta + \tau_l ds_l \cos\theta) \tag{4.15}$$

Tyto síly lze zpětně dosadit do rovnic 4.8 a 4.9 pro získání vztlaku a odporu tělesa.

K danému bodu na průřezu je možné vypočítat výsledný moment sil z předchozích kroků. Pro toto odvození je vybrána např. náběžná hrana jako bod otáčení. Dle konvence je zaveden směr otáčení hodinových ručiček jako kladný směr výsledného momentu sil (obrázek 4.7). K výpočtu momentu jsou využity vztahy 4.10 – 4.13:

$$dM'_u = (p_u \cos\theta + \tau_u \sin\theta) x ds_u + (-p_u \sin\theta + \tau_u \cos\theta) y ds_u \tag{4.16}$$
$$dM'_l = (-p_l \cos\theta + \tau_l \sin\theta) x ds_l + (p_l \sin\theta + \tau_l \cos\theta) y ds_l \tag{4.17}$$



Obrázek 4.7: Zavedená konvence pro moment sil[10]

Výsledný moment je pak získán integrací rovnic 4.16 a 4.17 od náběžné hrany (NH) po odtokovou hranu (OH):

$$M'_{NH} = \int_{NH}^{OH} \left[(p_u \cos\theta + \tau_u \sin\theta)\, x - (p_u \sin\theta - \tau_u \cos\theta) y\right] ds_u +$$

$$+ \int_{NH}^{OH} \left[(-p_l \cos\theta + \tau_l \sin\theta)\, x - (p_l \sin\theta + \tau_l \cos\theta) y\right] ds_l \tag{4.18}$$

Ke shrnutí je vhodné uvést, že v rovnicích 4.14, 4.15 a 4.18 jsou pro dané zkoumané těleso už známé funkce $\theta(s)$, $x(s)$ a $y(s)$. Zbývá tedy už pouze stanovit (buďto pomocí experimentu nebo teoreticky) závislosti $p(s)$ a $\tau(s)$.

4.3 Bezrozměrné koeficienty

Obecně v mechanice tekutin je výhodné zavést bezrozměrné koeficienty pro popis obtékání těles. Nejdříve je definován dynamický tlak:

$$q_\infty \equiv \frac{1}{2}\rho_\infty V_\infty^2, \qquad \text{(Pa)} \tag{4.19}$$

kde ρ_∞ $(\mathrm{kg \cdot m^{-3}})$ je hustota nenarušeného proudu a V_∞ $(\mathrm{m \cdot s^{-1}})$ je rychlost nenarušeného proudu. Poté, pokud se zavede S $(\mathrm{m^2})$ jako referenční plocha a $l(m)$ jako referenční délka, lze napsat sérii bezrozměrných koeficientů do tabulky 4.1. Je zároveň vhodné rozlišovat velká a malá písmena ve značení jednotlivých koeficientů, neboť velkým písmenem C se myslí daný koeficient pro 3D tělesa konečných rozměrů a malým písmenem c se myslí daný koeficient 2D tělesa s nekonečným (jednotkovým) rozpětím. Pro koeficienty 2D těles tedy platí, že $S = l \cdot 1 = l$.

Tabulka 4.1: Tabulka bezrozměrných koeficientů

Koeficient vztlaku	$C_L \equiv \dfrac{L}{q_\infty S}$	(1)
Koeficient odporu	$C_D \equiv \dfrac{D}{q_\infty S}$	(1)
Koeficient normálové síly	$C_N \equiv \dfrac{N}{q_\infty S}$	(1)
Koeficient axiální síly	$C_A \equiv \dfrac{A}{q_\infty S}$	(1)
Koeficient momentu sil	$C_M \equiv \dfrac{M}{q_\infty Sl}$	(1)

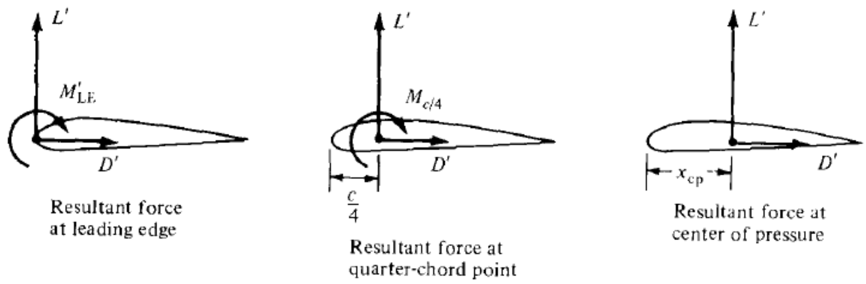
4.4 Působiště sil

Dle rovnice 4.18 působí výsledný moment sil okolo náběžné hrany. Pokud bude uvažována už přímo výsledná síla R' nebo složky N' a A', je nutné je umístit do takového bodu, ve kterém vytvářejí identický výsledný moment sil. Sílu A' tedy umístíme na tětivu profilu a sílu N' do vzdálenosti x_{cp} od náběžné hrany. Síla N' pak vytváří moment:

$$M'_{LE} = -(x_{cp})N'. \tag{4.20}$$

Záporné znaménko je zde kvůli konvenci, protože síla N' na rameni x_{cp} působí proti zavedenému směru výsledného momentu sil. Ve vzdálenosti x_{cp} od náběžné hrany se nachází na tětivě působiště aerodynamických sil (angl. center of pressure). Výsledný moment sil k tomuto bodu je nulový. Moment k bodu vzdálenému $c/4$

(aerodynamický střed) od náběžné hrany je při změně úhlu náběhu α konstantní. Působiště aerodynamických sil může někdy splynout s aerodynamickým středem. Všechny tyto možnosti jsou v obrázku 4.8.



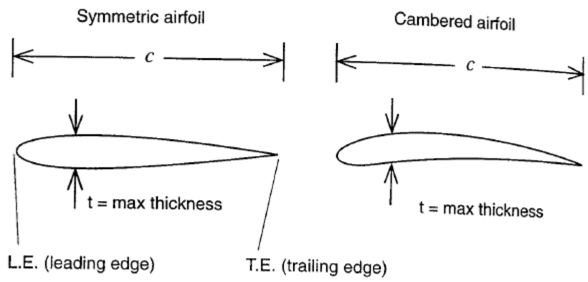
Obrázek 4.8: Umístění aerodynamických sil na tělese[10]

5 Křídla

5.1 Letecké profily

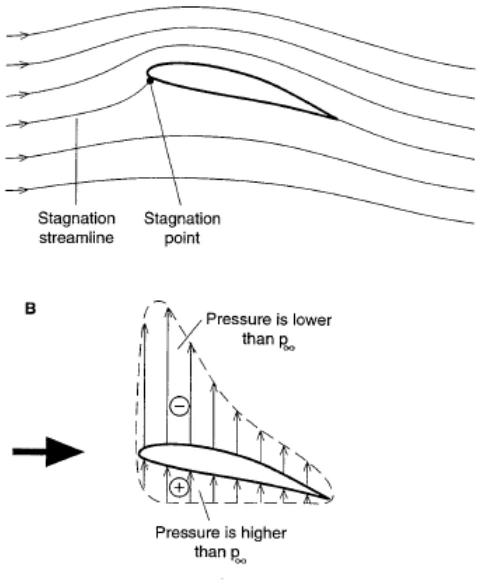
V předchozí kapitole 4 byla vysvětlena podstata silového působení při obtékání na obecném kapkovitém tvaru. Nyní bude zmíněno několik typických vlastností pro letecký profil, který lze uvažovat jako křídlo s nekonečným rozpětím[11].

Základní názvosloví je popsáno v obrázku 5.1. Je možné tedy definovat profily symetrické (angl. symmetric) a profily prohnuté (angl. cambered). Dále lze definovat délku tětivy c, která je spojnicí náběžné hrany (angl. leading edge) a odtokové hrany (angl. trailing edge), a maximální tloušťku profilu t (angl. max thickness):



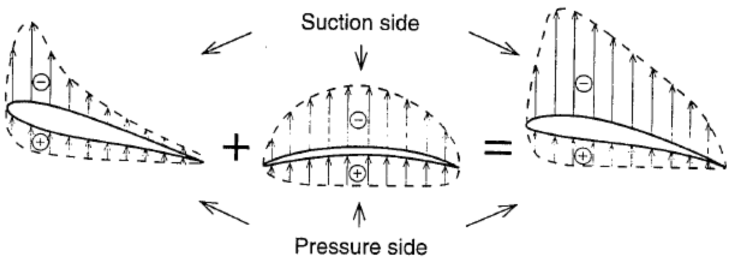
Obrázek 5.1: Názvosloví[11]

Průběh tlaku okolo profilu je přímý důsledek průběhu rychlosti v blízkosti profilu. K zobrazení tohoto vztahu slouží obrázek 5.2, kde nejdříve jsou znázorněny proudnice a bod stagnace, kde je rychlost nulová, a tudíž, dle Bernoulliho rovnice, je zde celkový tlak maximální. Pokud se bude sledovat rychlost částice tekutiny lehce nad bodem stagnace, zjistíme, že částice rychle zpomalí, což znamená tedy velký tlak okolo bodu stagnace, částice dojde až k náběžné hraně, kde se naopak velmi urychlí opačným směrem, což způsobí radikální pokles tlaku.

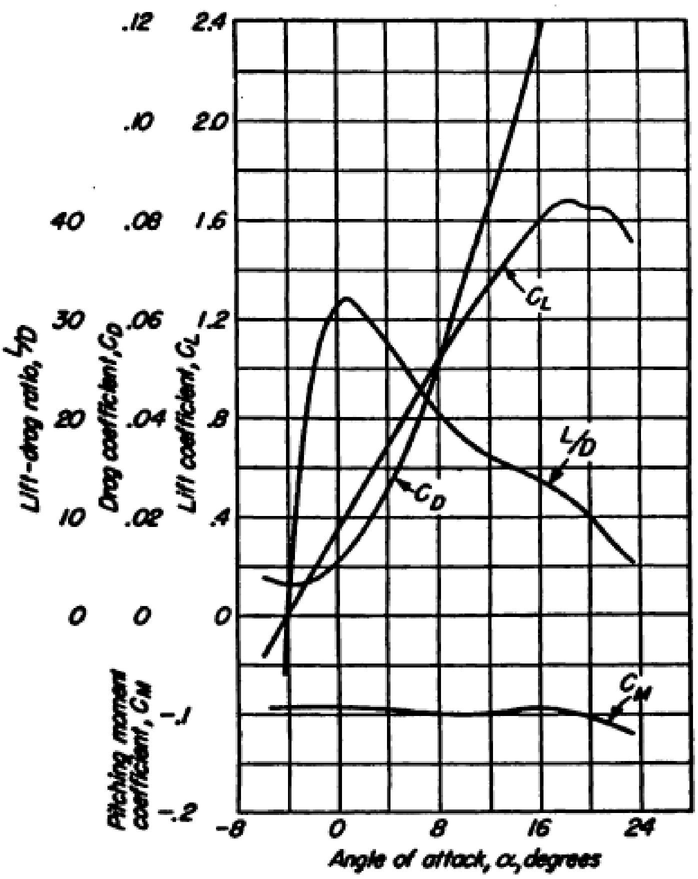


Obrázek 5.2: Vztah mezi rychlostí a tlakem v blízkosti profilu[11]

Vliv geometrie profilu na rozložení tlaku lze vidět na obrázku 5.3. U symetrického profilu při daném úhlu náběhu α je zřetelný vrchol tlaku u náběžné hrany. U prohnutého profilu s $\alpha = 0$ ° je zase vidět rovnoměrné rozložení tlaku okolo profilu. Pokud se tyto dva tvary zkombinují, vznikne požadované rozložení tlaku okolo profilu. Díky tomuto zjištění lze popisovat letecké profily pomocí rozložení tloušťky přes profil a dodatečného prohnutí.



Obrázek 5.3: Vliv geometrie na průběh tlaku[11]



Obrázek 5.4: Typické průběhy bezrozměrných koeficientů[12]

Pro letecké profily lze taktéž definovat koeficienty c_l,c_d,c_m a poměr c_l/c_d. Jejich typické průběhy jsou na obrázku 5.4.

5.1.1 Vztlak

Vztlak na leteckém profilu nejdříve lineárně stoupá s úhlem náběhu, a poté dochází k odtržení mezní vrstvy na profilu a ke sklonu křivky c_l. Při odtržení mezní vrstvy dojde k poklesu vztlaku a nárůstu odporu. U úzkých dojde dochází k prudkému odtržení mezní vrstvy spíše na přední části profilu u náběžné hrany a u tlustších prohnutých profilů dojde k postupnému odtržení u odtokové hrany.

Pro profily, které jsou symetrické, platí, že pro $\alpha = 0°$ je $c_l = 0$. Naopak pro profily prohnuté platí, že při $\alpha = 0°$ je $c_l > 0$.

5.1.2 Odpor

Celkový odpor profilu lze rozdělit na odpor třecí a odpor tlakový.

Třecí odpor převažuje ve chvílích, kdy je mezní vrstva neodtržena a na celém profilu se postupně od náběžné hrany vyvíjí laminární mezní vrstva do turbulentní mezní vrstvy, která má větší tloušťku. S rostoucí tloušťkou mezní vrstvy vzrůstá i třecí odpor[11].

Odpor tlakový vzniká ve chvíli, kdy dojde k odtržení mezní vrstvy. Tento odpor je v zásadě větší než třecí a dochází při něm k poklesu vztlaku a dalšímu nárůstu odporu.

5.2 Křídla konečného rozpětí

Doposud byly všechny vlastnosti popisovány na křídle nekonečného rozpětí, kdy se zanedbávají vlivy konců křídel. Pro křídla konečného rozměru lze tedy definovat koeficient poměru stran (angl. aspect ratio):

$$Æ\!R = \frac{b^2}{S}, \tag{5.1}$$

kde b (m) je rozpětí křídla a S (m^2) je plocha půdorysu křídla. Dále lze definovat zkosení křídla:

$$\lambda = \frac{c_t}{c_0}, \tag{5.2}$$

kde c_t (m) je délka tětivy na konci křídla a c_0 (m) je délka tětivy u kořene křídla. Dále už budou popsány zejména křídla s půdorysem ve tvaru obdélníku. To znamená, že $\lambda = 1$.

Jak Katz[11] píše, dochází u křídel k tomu, že na koncích křídel proudí vzduch z vysokotlaké částí křídla do nízkotlaké a vytváří tak dva silné víry na koncích křídel (obrázek 5.5). Tyto víry s sebou strhávají částečně i proudící vzduch přes křídlo. Tak dochází k postupnému poklesu vztlaku od kořene ke koncům křídel a s tím se zároveň objevuje nová složka odporu – indukovaný odpor. Tento jev je více zřetelný u křídel s nízkým koeficientem poměru stran $Æ\!R$. Pro celkový koeficient odporu křídel s konečným rozpětím C_D tedy platí:

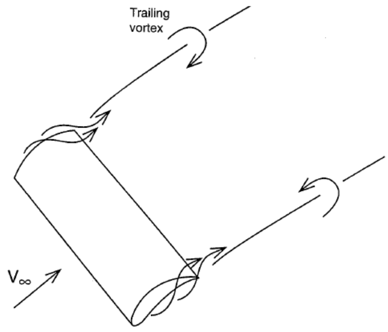
$$C_D = C_{D0} + C_{DI} = C_{D0} + \frac{1}{\pi Æ\!R e} C_L^2, \tag{5.3}$$

kde C_{D0} je koeficient odporu při nulovém vztlaku a skládá se z odporu třecího a tlakového, C_{DI} je odpor indukovaný, C_L je koeficient vztlaku křídla a e (1) je Oswaldova konstanta, která dosahuje pro křídlo eliptického půdorysu hodnotu 1, pro obdélníkový půdorys pak hodnotu 0,7[13].

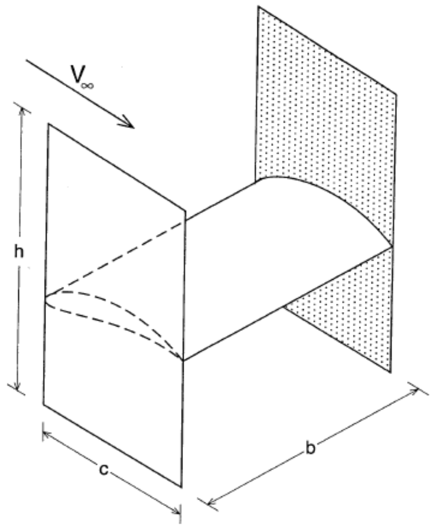
Pro částečné potlačení indukovaného odporu je možné umístit na oba konce křídel bočnice a tím omezit vznik vírů. Přibližně lze vypočítat vliv tak, že dojde ke zvětšení koeficientu poměru stran:

$$Æ\!R = Æ\!R_{aktualni} \left(1 + 1{,}9\frac{h}{b}\right), \tag{5.4}$$

kde $Æ\!R_{aktualni}$ je koeficient poměru stran bez bočnic, h (m) je výška bočnice a b (m) je rozpětí křídla (obrázek 5.6).



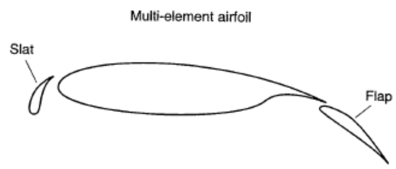
Obrázek 5.5: Víry na koncích křídla[11]



Obrázek 5.6: Umístění bočnic[11]

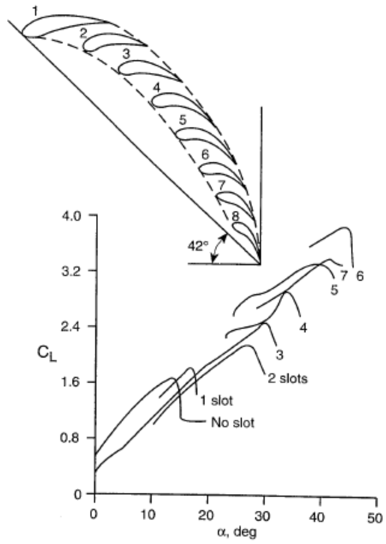
5.3 Křídla pro vysoký vztlak

Generovat největší vztlak lze např. zvětšením půdorysu křídla, zvětšením prohnutí křídla, přídavnou tryskou nebo přidáním slotů či klapek (více-prvkové profily). Pokud je plocha křídla omezena pravidly, využívá se zejména právě slotů a klapek (obrázek 5.7).



Obrázek 5.7: Křídlo s klapkou a slotem[11]

Podstatou více-prvkových profilů je, že dochází k oddálení odtržení mezní vrstvy a zároveň ke zvětšení vztlaku[11]. Na obrázku 5.8 je rozložen letecký profil RAF 19 na menší profily, které byly poté experimentálně otestovány. Bylo zjištěno, že s postupným rozkládáním se zvyšuje i maximální koeficient vztlaku. Katz uvádí, že lze dosáhnout více-prvkovým profilem koeficientu vztlaku c_l až 5 pro 2D profil. Pro křídlo konečného rozpětí bude tato hodnota nižší.

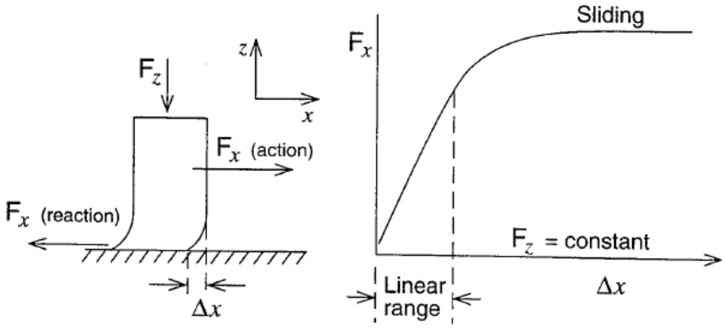


Obrázek 5.8: Profil RAF 19 rozložen na více-prvkový profil[11]

6 Vliv křídel na dynamiku vozidla

Pro dostatečné pochopení vlivu křídel na dynamiku vozidla je nutné popsat chování pneumatik, neboť pneumatiky jsou jediný kontakt vozidla se zemí.

Ideální k popisu pneumatiky je obrázek 6.1. Jedná se o experiment, kdy na vysoce pružný materiál, jako je pryž, působí přítlačná síla F_z a posuvná síla F_x se svoji reakcí. Vpravo poté je graf závislosti této posuvné síly na smyku Δx. Je zde vidět, že závislost je zpočátku lineární, poté přestává být lineární a dojde ke skluzu pryže po podložce.



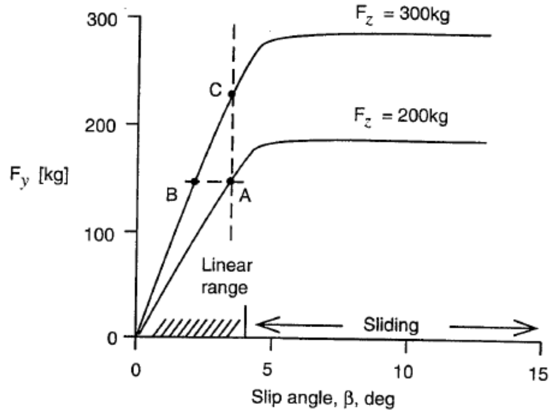
Obrázek 6.1: Deformace pryže při smyku[11]

Lze definovat bezrozměrný součinitel obvodové síly:

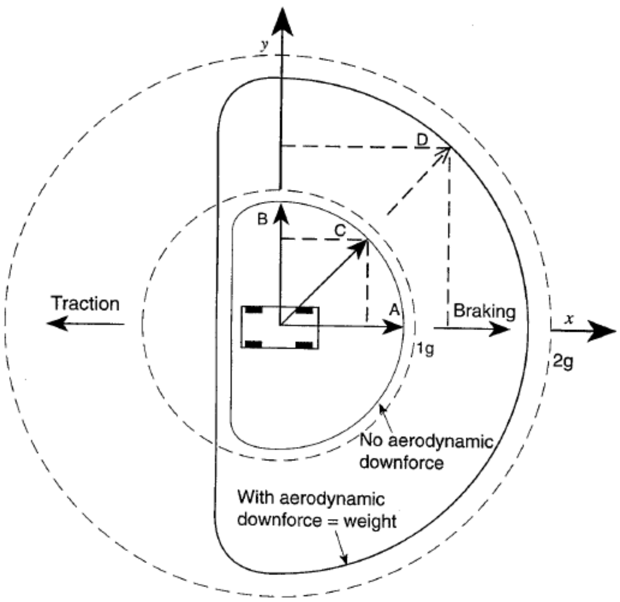
$$\mu_x = \frac{F_x}{F_z}, \tag{6.1}$$

kde lze zaměnit index x za y a vznikl by tak součinitel příčné síly. Běžněji užívané jsou pak konkrétní hodnoty, a to součinitel adheze a součinitel tření. Součinitel adheze, značený jako μ_v (někdy také φ), určuje hodnotu maximální obvodové síly F_x (nebo příčné F_y), kterou je schopné valící se kolo přenést. Součinitel tření, značený jako μ_s, určuje hodnotu maximální tečné síly F_x (nebo příčné F_y), kterou je schopné kolo přenést při čistém skluzu.

Pokud se křídlo kolem vodorovné osy převrátí, získá se tak místo vztlaku přítlak. Tento přítlak bude zvyšovat přítlačnou sílu F_z, což bude mít za následek jednak zmenšení smyku pneumatiky při stejné obvodové síle F_x (nebo příčné F_y), tak i zvýšení možné obvodové síly F_x (nebo příčné F_y) při stejné hodnotě smyku (obrázek 6.2). Maximální sílu či přetížení ve všech směrech pohybu lze pak zobrazit jako polární diagram vztažený k vozidlu (obrázek 6.3). Zde je vidět, že největšího efektu se dosáhne při zatáčení, při brzdění a při kombinaci obou dvou stavů.



Obrázek 6.2: Vliv zvýšení přítlačné síly F_z[11]



Obrázek 6.3: Polární diagram[11]

7 Návrh zadního křídla vozu týmu FS TUL Racing

V této práci byl proveden návrh zadního křídla. Na začátku byly stanoveny prostorové možnosti na novém voze dle pravidel v kapitole 3. Vznikl tak CAD model obálky ohraničující maximální rozměry. Z těchto rozměrů byl určen přibližný rozsah délky tětivy celkového profilu $c = 0{,}5 - 0{,}7\ \mathrm{m}$. Rychlost vozu pro návrh byla stanovena na rozsah $v = 30 - 80\ \mathrm{km \cdot h^{-1}}$, neboť v tomto rozsahu lze ze zkušenosti rychlost našeho vozu předpokládat. Lze tak vypočítat rozsah Reynoldsova čísla:

$$Re_1 = \frac{v_1 c_1}{\nu} = 275\ 646{,}12,$$
$$Re_2 = \frac{v_2 c_2}{\nu} = 1\ 029\ 078{,}83,$$

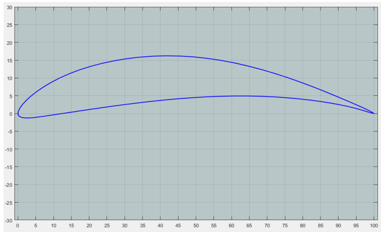
kde suchý vzduch o $t = 20\ \mathrm{^\circ C}$ má kinematickou viskozitu $\nu = 15{,}116{\cdot}10^{-6}\ \mathrm{m^2 \cdot s^{-1}}$[14].

Bylo zvoleno, že výsledné křídlo bude dvouprvkové, a tudíž se využije efektu zvýšeného přítlaku zmíněném v kapitole 5.3. Oba prvky křídla budou tvořeny stejným profilem.

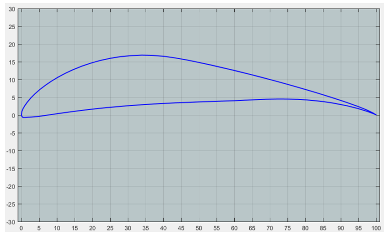
Výběr profilu byl proveden v databázi profilů UIUC[15], kde byly vybrány tři profily (obrázek 7.1) pro nízké rychlosti a vysoký vztlak. Tyto profily byly následně porovnány. Sledován byl zejména koeficient vztlaku c_l v závislosti na úhlu náběhu α. Pro porovnání byla provedena analýza v programu XFOIL, resp. v jeho vydání XFLR5 v. 6.39. Výsledky pro $Re = 500\ 000$ jsou zobrazeny v grafu 7.1. Je zde vidět, že profil Wortmann FX 74-CL5-140 je schopen dosáhnout při větším úhlu náběhu většího koeficientu vztlaku než zbývající dva profily. Tento profil je však obtížně vyrobitelný díky úzké části u odtokové hrany. Proto byl vybrán profil Chuch Hollinger CH 10-48-13, který vykazuje po předchozím profilu stále výborné hodnoty koeficientu c_l.

Jelikož celé křídlo s tímto profilem bude konstruováno jako uhlíkový kompozit ze dvou polovin – vrchní a spodní, bylo nutné pro dostatečnou tuhost upravit profil radiusem R2 na odtokové hraně.

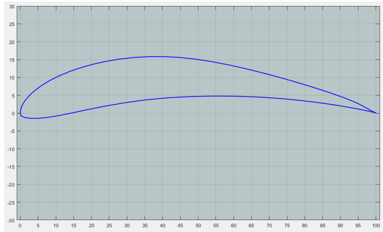
Pro samotný návrh dvouprvkového profilu bylo využito zkušeností McBeatha[16], který dle jeho experimentů doporučuje ustanovit tětivu klapky přibližně 40° od tětivy hlavního profilu, dále ustanovit délku tětivy klapky tak, aby tvořila 30 % celkové tětivy profilu, a zachovat konvergenci mezery mezi hlavním profilem a klapkou. Tato mezera by měla mít na výšku 3,8 % délky celkové tětivy a šířku 5,2 % délky celkové tětivy. Dále, dle jeho doporučení, lze jednoduše stanovit celkové rozměry tak, že se vypočítá maximální rychlost vozu, tato hodnota se sníží a takto ušetřený zbytkový výkon se pohltí odporem čistě zadního křídla (při zanedbání odporu předního křídla).



(a) Chuch Hollinger CH 10-48-13



(b) Wortmann FX 74-CL5-140



(c) Eppler E423

Obrázek 7.1: Letecké profily pro nízké rychlosti a vysoký vztlak

Sestaví se tedy pohybová rovnice vozu se zahrnutím odporu vzduchu a valivým odporem. Odpor stoupání vzhledem ke charakteru tratí je zanedbán:

$$ma = F - \frac{1}{2}\rho c_d S v^2 - Gf, \tag{7.1}$$

kde m je hmotnost vozidla, a je zrychlení vozidla, F je hnací síla, ρ je hustota suchého vzduchu při 20°, c_d je koeficient odporu vozidla, S je plocha čelního průřezu vozidla, v je rychlost vozidla, G je tíha vozidla a f je koeficient valivého odporu. Pro maximální rychlost bude $a = 0$, a zároveň se rovnice vynásobí rychlostí v:

$$0 = P - \frac{1}{2}\rho c_d S v^3 - Gfv, \tag{7.2}$$

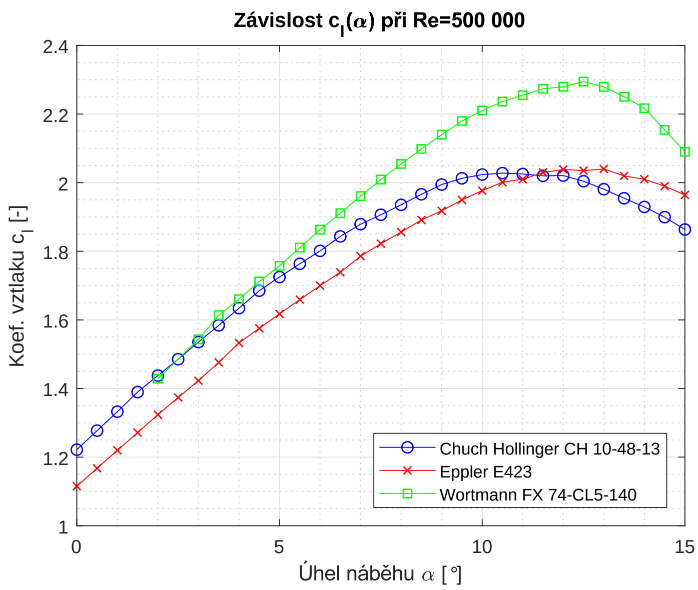
kde P je maximální výkon vozidla. Do vztahu dosadíme hodnoty $P = 63{,}1$ kW (hodnoty pro upravený motor Suzuki GSX-R 600), $\rho = 1{,}1887\ \mathrm{kg \cdot m^{-3}}$, $c_d = 0{,}84$ (dle experimentů ostatních týmů[17][18], jelikož tvary vozů Formula Student/SAE jsou velmi podobné), $S = 0{,}862\ \mathrm{m^2}$, $G = 2452{,}5$ N při předpokládané hmotnosti $m = 250$ kg a $f = 0{,}015$ (přibližně pro kontakt pneumatika – asfalt[19]):

$$v = 187{,}887\ \mathrm{km/h}. \tag{7.3}$$

Tuto hodnotu lze snížit na $v = 120$ km/h. Dosazením lze vypočítat výkony:

$$P_{potrebny} = 17{,}17\ \mathrm{kW}, \tag{7.4}$$

$$P_{zbytkovy} = P - P_{potrebny} = 45{,}93\ \mathrm{kW}. \tag{7.5}$$



Graf 7.1: Závislost $c_l(\alpha)$ pro jednotlivé profily

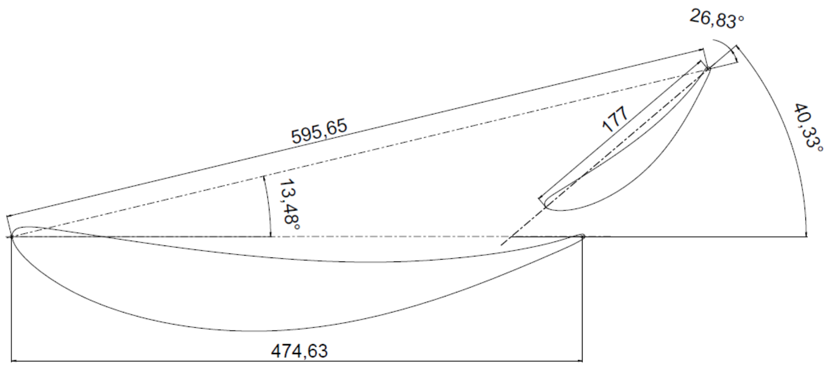
Výkon $P_{zbytkovy}$ pak lze pohltit odporem zadního křídla.

Rozpětí křídla se uvažovalo dle zástavbových možností $b = 960$ mm a délka tětivy přibližně $c = 600$ mm. Maximální koeficient odporu takového křídla je pak:

$$c_{d-max} = \frac{P_{zbytkovy}}{\frac{1}{2}\rho b c v^3} = 3{,}622, \tag{7.6}$$

což je poměrně velký koeficient odporu, kterého s největší pravděpodobností při tomto návrhu nebude dosaženo.

Vytvořený dvou-prvkový profil je na obrázku 7.2.



Obrázek 7.2: Výsledný dvou-prvkový profil

8 Analýza řešení

Navržený dvouprvkový profil byl analyzován pomocí 2D CFD výpočtu v prostředí ANSYS Fluent 18.2. V ANSYS Meshing byla vytvořena blokově strukturovaná čtyřúhelníková síť (obrázek 8.1 a 8.2). Byla zvolena doména ve tvaru písmene C, přičemž délka prostoru za profilem odpovídá $17c$ a radius okolo profilu $10c$. Výška buňky u stěny profilu je přibližně 7 mm, což by mělo odpovídat $y_+ \approx 1$. Celkový počet buněk je 180 570.

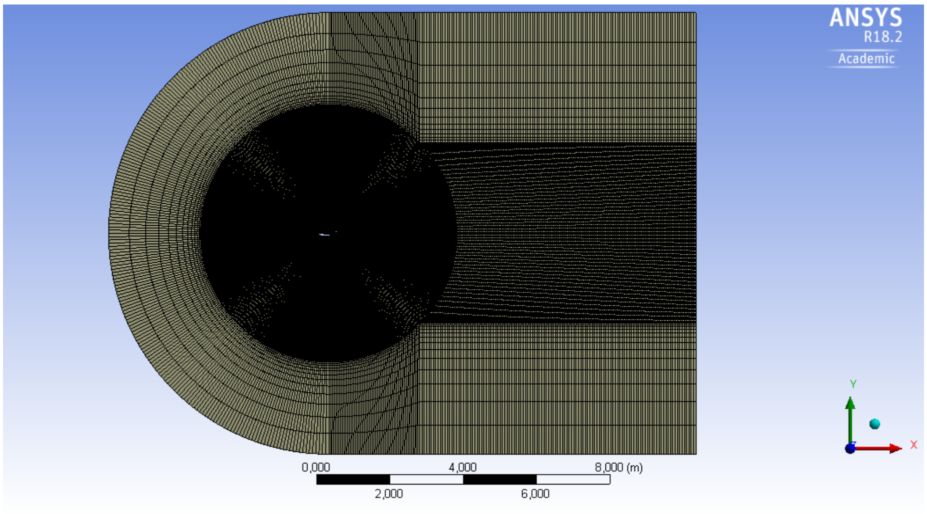
Návrh byl analyzován při třech rychlostech 30, 50 a 80 $\mathrm{km \cdot h^{-1}}$ a pěti úhlech náběhu 12°, 13°, 13,5°, 14° a 15°. Výpočet byl prováděn pro viskózní nestlačitelnou tekutinu, jelikož pro všechny rychlosti je Machovo číslo $M \ll 1$. Model turbulence byl zvolen k-ω SST. Okrajové podmínky byly stanoveny dle obrázku 8.3, tj. rychlostní podmínka na vstupu proudění a tlaková podmínka na výstupu. Na stěně profilu je rychlost $v = 0\ \mathrm{m \cdot s^{-1}}$. Úhel náběhu byl upravován složkově ve vstupní rychlostní okrajové podmínce.

Jelikož řešení pro stacionární výpočet nekonvergovalo ani v jednom z případů, byl zvolen postup takový, že inicializace byla provedena jako stacionární výpočet až po určitou hodnotu rezidua, a poté byl řešič přepnut do transientního režimu, kde pro daný časový krok oscilovaly hodnoty kolem hodnoty řešení. Pro urychlení celkového procesu byl napsán skript v jazyce SCHEME.

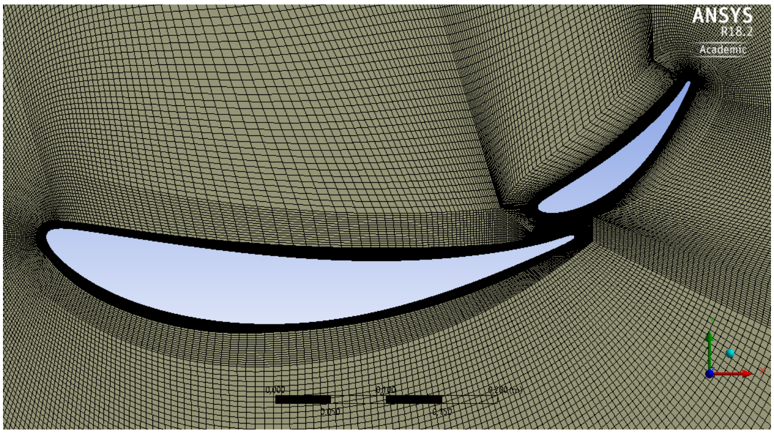
Pro případ úhlu náběhu 13,5° a rychlost 50 $\mathrm{km \cdot h^{-1}}$ je na obrázku 8.4 vidět odtrhávání mezní vrstvy přibližně v půlce druhého profilu a v průběhu času dochází k odtrhávání víru na odtokové hraně. Na obrázku 8.5 jsou kontury celkového tlaku pro stejný případ. Další obrázky jsou uvedeny v příloze A.

Hodnota y_+ je podél celého profilu přibližně rovna 1 (graf 8.2). Koeficienty c_d, c_d a $c_{m(c/4)}$ byly stanoveny z průběhů těchto hodnot v závislosti na časovém kroku transientního výpočtu jako průměr posledních dvou amplitud. Konkrétně tedy pro tento případ $c_l = -2{,}8172287$, $c_d = 0{,}0875429$ a $c_{m(c/4)} = -0{,}4978839$.

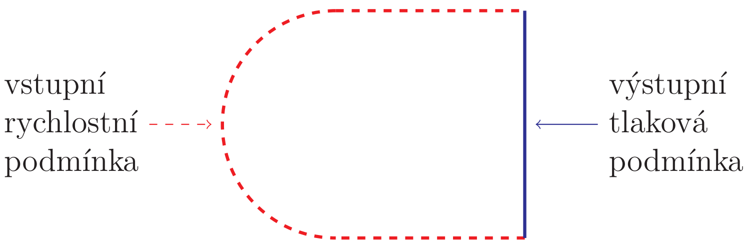
Pro ostatní případy je postup identický a jejich výsledky jsou shrnuty v tabulce 8.1. Z výsledných dat je zřejmé, že koeficient vztlaku c_l stoupá s úhlem náběhu α (kromě případu $v_\infty = 80\ \mathrm{km \cdot h^{-1}}$, $\alpha = 15°$) a koeficient momentu $c_{m(c/4)}$ je přibližně konstantní se změnou úhlu náběhu. Tyto data odpovídají i typickým průběhům z obrázku 5.4. Koeficient odporu c_d avšak netvoří žádný jasný průběh, ani neodpovídá typickému průběhu z obrázku 5.4, a vyvstává zde otázka, zdali jsou tyto hodnoty správné. Nicméně výsledky analýzy vycházejí alespoň řádově totožně v porovnání s výsledky experimentů s profily pro vysoký přítlak a nízké Reynoldsovo číslo[20], kde je např. pro profil S1223 při $\alpha = 14°$ a $Re = 200\,000$ uvedeno $c_l = 2{,}14$ a $c_d = 0{,}043$. Stále je však nutné pro potvrzení výsledků analýzy provést validaci



Obrázek 8.1: Strukturovaná čtyřúhelníková síť

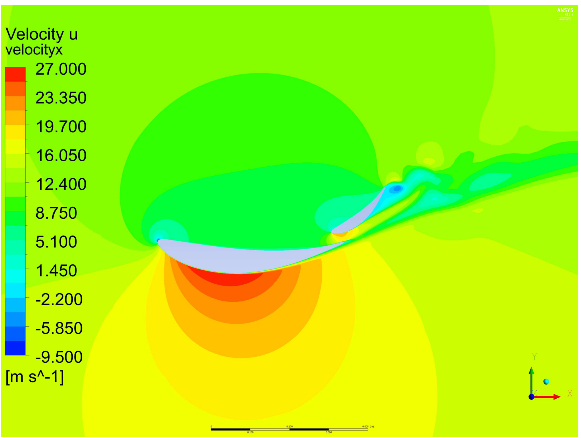


Obrázek 8.2: Strukturovaná čtyřúhelníková síť – detail

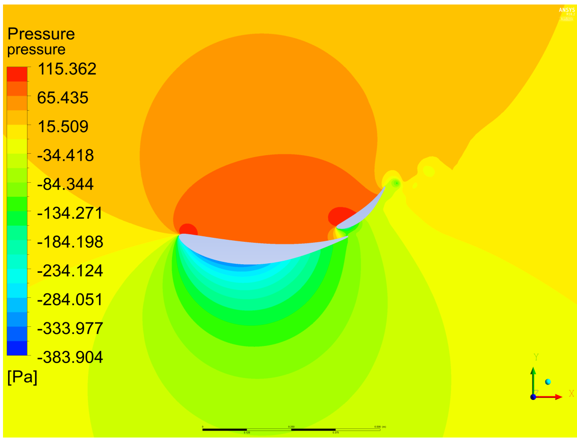


Obrázek 8.3: Okrajové podmínky

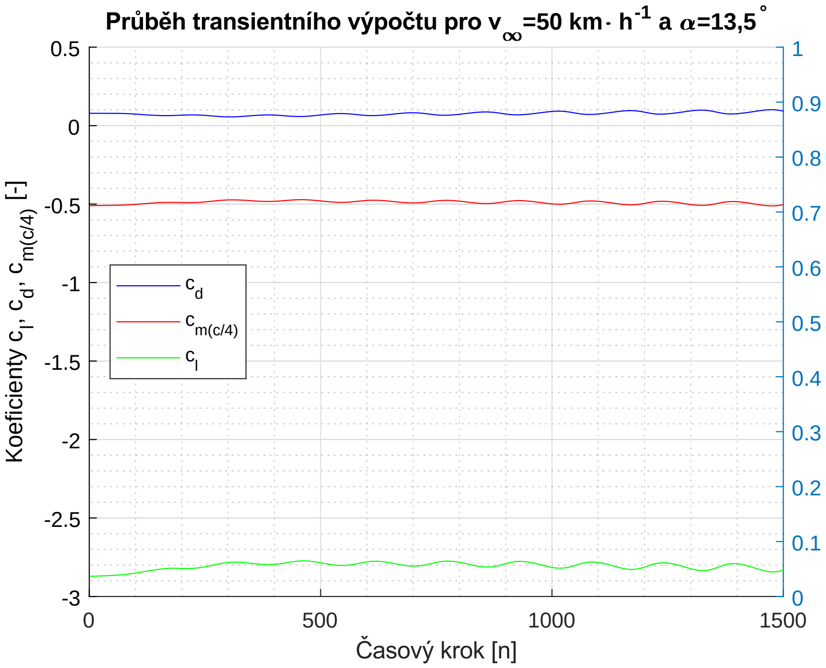
např. otestováním reálného modelu v aerodynamickém tunelu.



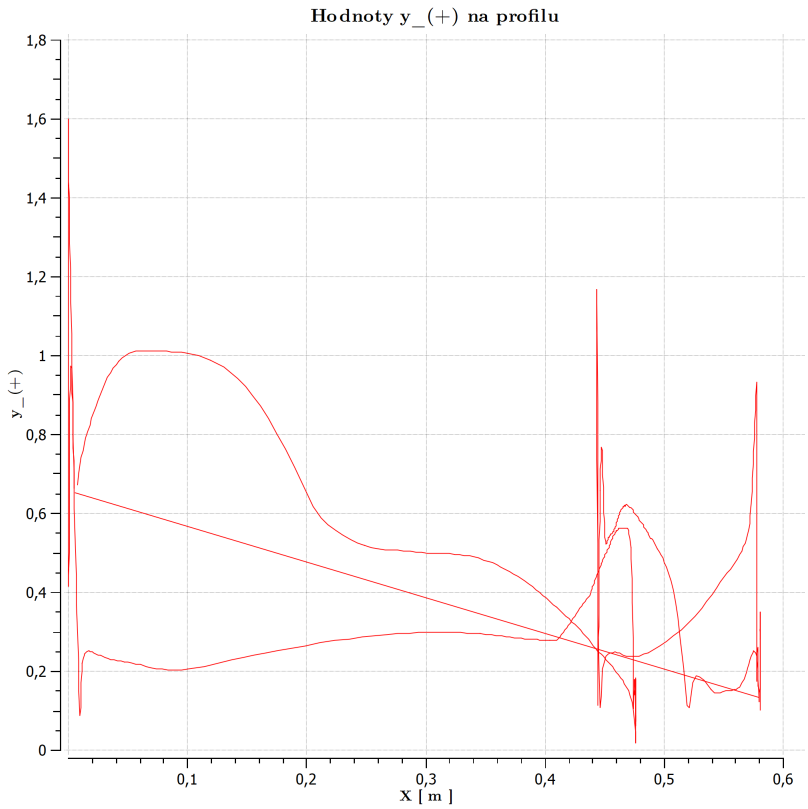
Obrázek 8.4: Rychlost ve směru osy x v čase $t = 0{,}048$ s, $v_\infty = 50\ \mathrm{km \cdot h^{-1}}$, $\alpha = 13{,}5°$



Obrázek 8.5: Celkový tlak p v čase $t = 0{,}048$ s, $v_\infty = 50\ \mathrm{km \cdot h^{-1}}$, $\alpha = 13{,}5°$



Graf 8.1: Průběh koeficientů c_l, c_d, $c_{m(c/4)}$ v závislosti na časovém kroku



Graf 8.2: Průběh y_+ na celkovém profilu pro případ $\alpha = 13{,}5°$ a $v_\infty = 50\ \text{km} \cdot \text{h}^{-1}$

Tabulka 8.1: Výsledky analýzy

			$v_\infty = 30\ \mathrm{km \cdot h^{-1}}$		
α	12°	13°	13,5°	14°	15°
c_l	-2,6595832	-2,7146264	-2,7756824	-2,8053583	-2,8833596
c_d	0,0786704	0,0715146	0,0904743	0,0858531	0,0983607
$c_{m(c/4)}$	-0,4921789	-0,4781190	-0,4893755	-0,4812635	-0,4818497
			$v_\infty = 50\ \mathrm{km \cdot h^{-1}}$		
α	12°	13°	13,5°	14°	15°
c_l	-2,6815091	-2,7706221	-2,8172287	-2,8460145	-2,9152474
c_d	0,0680570	0,0825267	0,0875429	0,0851651	0,0858013
$c_{m(c/4)}$	-0,4925903	-0,4964036	-0,4978839	-0,4909243	-0,4834330
			$v_\infty = 80\ \mathrm{km \cdot h^{-1}}$		
α	12°	13°	13,5°	14°	15°
c_l	-2,8073024	-2,8251050	-2,8290219	-2,8684859	-2,8614528
c_d	0,0821252	0,0932202	0,0916333	0,0936775	0,0836986
$c_{m(c/4)}$	-0,5330140	-0,5159674	-0,5034715	-0,5011919	-0,4705691

9 Konstrukce řešení

Z výsledných rozměrů zadního křídla byl vytvořen 3D CAD model (obrázek 9.1). Na obě strany zadního křídla jsou připevněny bočnice, jejichž tvar je dán designovým návrhem celého nového vozu. Tyto bočnice vylepšují výsledný koeficient vztlaku C_L. Konkrétně lze vypočítat nový koeficient poměru stran dle rovnice 5.4:

$$\text{Æ} = \text{Æ}_{aktualni}\left(1 + 1{,}9\frac{h}{b}\right) = 3{,}04, \tag{9.1}$$

kde $\text{Æ}_{aktualni} = \frac{b}{c} = 1{,}612$, $h = 447{,}9$ mm, $b = 960$ mm a $c = 595{,}65$ mm.

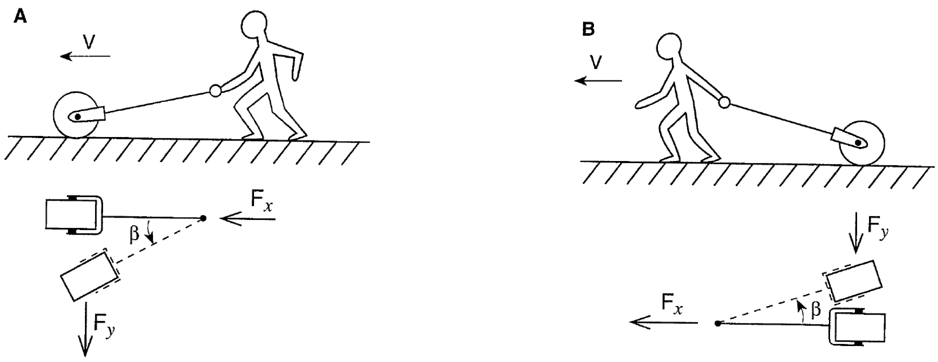
Materiál pro celé křídlo i s bočnicemi je zvolen uhlíkový kompozit. Bočnice jsou připevněny ke křídlu pěti šrouby M6 pomocí vložek z ocelového plechu s přivařenými maticemi M6. Na dolním profilu křídla je vytvořeno vybrání pro držáky, které jsou taktéž z uhlíkového kompozitu. Tyto držáky jsou ke spodní části křídla přilepeny. Křídlo je pak uchyceno k rámu pomocí šesti ocelových trubek ⌀12x1,5 s kloubovými oky. Mezi dvěma trubkami se ještě nachází přivařená vzpěra, která zajistí, aby se křídlo nepohybovalo do stran. Kloubová oka jsou pak připevněna k rámu a ke křídlu dvanácti šrouby M8.

Celá konstrukce je tvořena zejména s ohledem na rychlost, jednoduchost a cenu výroby.

Obrázek 9.1: Render 3D CAD modelu sestavy

10 Silové působení na vůz

Pro plné pochopení vlivu všech sil působících na vůz, včetně sil aerodynamických, je nutné sestavit rovnice rovnováhy pro daný vůz. Rozložení sil na voze má právě značný vliv na to, jak se bude vůz chovat za jízdy. Špatným rozložením aerodynamických sil lze totiž napáchat více škody než užitku. Pokud bude působiště aerodynamických sil umístěno před těžištěm, tak při bočním vychýlení dojde k přetáčivosti, či úplnému přetočení (obrázek 10.1a). Naopak, pokud je působiště aerodynamických sil za těžištěm, tak při bočním vychýlení dojde zase k návratu do původní polohy (obrázek 10.1b). Nutno podotknout, že záleží na konkrétní vzdálenosti těžiště od působiště aerodynamických sil, protože pokud je vůz velmi stabilní (působiště je daleko vzadu od těžiště), tak zase vznikají obtíže se zatáčením. Tyto jevy lze však nejsnáze pozorovat při vysoké rychlosti[11].



(a) Nestabilní případ

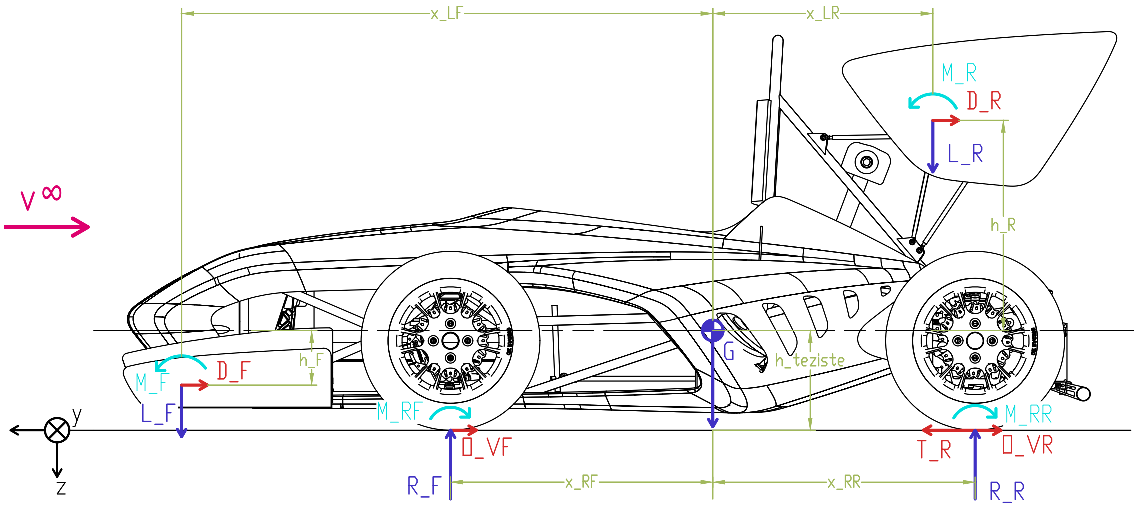
(b) Stabilní případ

Obrázek 10.1: Stabilita vozu[11]

10.1 Rovnováha sil

Pro sestavení rovnic statické rovnováhy byl uvažován stav vozu při rovnoměrném přímočarém pohybu. Ze silového působení zde jsou zavedeny aerodynamické síly a momenty M_F, L_F, D_F, M_R, L_R a D_R, a zároveň tíhová síla G. Jako interakce mezi vozovkou a pneumatikami jsou zde zavedeny síly reakční R_F a R_R, dále momenty valivého odporu M_{RF}, M_{RR} a síly valivého odporu O_{VF} a O_{VR}. Trakční síla od zadního kola je T_R. Aerodynamické působení na samotný vůz zde není uvedeno, jelikož nebyla prováděna analýza samotného vozu. Odpor stoupání je vzhledem k charakteristikám závodních tratí zanedbán. Jak jsou jednotlivé síly či momenty zavedeny je zřejmé z obrázku 10.2. Jsou zde zároveň uvedeny vzdálenosti jednotlivých působišť (x_{LF}, x_{LR}, x_{RF}, x_{RR}, h_F, h_R a $h_{teziste}$) pro sestavení momentové rovnováhy.

Při sestavení rovnic statické rovnováhy bude v tomto případě nejdůležitější získat hodnoty C_{LF} v závislosti na C_{LR}, pokud bude umístěno působiště zavedených aerodynamických sil právě do těžiště.



Obrázek 10.2: Zavedení působících sil a reakcí[1]

.

Byly sestaveny tedy tři rovnice rovnováhy:

$$\sum F_x = 0 : -D_F - O_{VF} - O_{VR} + T_R - D_R = 0, \tag{10.1}$$

$$\sum F_z = 0 : L_F - R_F + G - R_R + L_R = 0, \tag{10.2}$$

$$\sum M_{teziste} = 0 : -M_F - L_F x_{LF} - D_F h_F + R_F x_{RF} - O_{VF} h_{teziste} + M_{RF} + \\ + T_R h_{teziste} - R_R x_{LR} - O_{VR} h_{teziste} + M_{RR} - M_R + L_R x_{LR} + D_R h_R = 0. \tag{10.3}$$

[1]Symbol značí polohu těžiště, které se nachází uprostřed rozvoru i rozchodu ve výšce $h_{teziste} = 290$ mm (dle CAD dat)

Dále je potřeba napsat vztahy pro síly a momenty:

$$G = mg \tag{10.4}$$
$$L_F = \frac{1}{2}\rho v_\infty^2 S_F C_{LF}, \tag{10.5}$$
$$D_F = \frac{1}{2}\rho v_\infty^2 S_F C_{DF}, \tag{10.6}$$
$$M_F = \frac{1}{2}\rho v_\infty^2 S_F c_F C_{MF}, \tag{10.7}$$
$$L_R = \frac{1}{2}\rho v_\infty^2 S_R C_{LR}, \tag{10.8}$$
$$D_R = \frac{1}{2}\rho v_\infty^2 S_R C_{DR}, \tag{10.9}$$
$$M_R = \frac{1}{2}\rho v_\infty^2 S_R c_R C_{MR}, \tag{10.10}$$
$$O_{VF} = fR_F, \tag{10.11}$$
$$O_{VR} = fR_R, \tag{10.12}$$
$$M_{RF} = eR_F, \tag{10.13}$$
$$M_{RR} = eR_R, \tag{10.14}$$

kde je hustota vzduchu $\rho = 1{,}1887\ \mathrm{kg \cdot m^{-3}}$, $m = 250$ kg je předpokládaná hmotnost vozu dle CAD dat, $g = 9{,}81\ \mathrm{m \cdot s^{-2}}$ je tíhové zrychlení, e je rameno valivého odporu, v_∞ je rychlost volného proudu vzduchu či vozu, S_F je půdorys předního křídla a S_R je půdorys zadního křídla, c_F je délka tětivy předního křídla a c_R je délka tětivy zadního křídla. Koeficienty vztlaku, odporu a momentu jsou označeny pro přední křídlo jako C_{LF}, C_{DF}, C_{MF} a pro zadní C_{LR}, C_{DR}, C_{MR}. Součinitel valivého odporu f lze pro kombinaci pneumatika – asfalt ustanovit na 0,015[19].

Pro součinitel valivého odporu platí:

$$f = \frac{e}{r_d}, \tag{10.15}$$

kde r_d je dynamický poloměr kola, který lze uvažovat jako $r_d = 0{,}94r = 241{,}58$ mm. Poloměr kola s pneumatikami týmu FS TUL Racing je $r = 257$ mm. Rameno valivého odporu je tedy poté $e = fr_d = 3{,}6237$ mm.

V kapitole 8 byl analyzován pouze 2D profil, čímž byly získány hodnoty pro křídlo s nekonečným (jednotkovým) rozpětím. Rovnováha vozu je už ale řešena s křídly s konečným rozpětím. Koeficient vztlaku c_l bude uvažován jako C_L, i když reálně bude $C_L < c_l$. Koeficient momentu taktéž bude uvažován jako $c_m = C_M$. K odporu c_d je vhodné přičíst indukovaný odpor dle rovnice 5.3, kde $C_{D0} = c_d$ a Oswaldova konstanta e bude pro křídlo s obdélníkovým průřezem 0,7[13].

Jelikož není v této práci jakkoliv řešen návrh předního křídla, lze mu alespoň částečně přisoudit některé parametry z analýzy zadního křídla. Předpokládá se tedy, že délky tětiv předního a zadního křídla jsou totožné. Rozpětí předního křídla je $b_F = 1330$ mm při uvažovaném obdélníkovém půdorysu. Koeficienty momentu a odporu 2D profilu jsou stejné a pro stručnost jsou ve výpočtech v této kapitole nejprve uvažovány jako $c_m = -0{,}5$ a $c_d = 0{,}08$, aby výsledný vztah byl závislý pouze na jedné proměnné.

Potřebné rozměry jsou:

$$x_{RF} = x_{RR} = 762{,}5 \text{ mm}, \tag{10.16}$$

$$x_{LF} = 1535{,}15 \text{ mm}, \tag{10.17}$$

$$x_{LR} = 665{,}26 \text{ mm}, \tag{10.18}$$

$$h_F = 158{,}88 \text{ mm}, \tag{10.19}$$

$$h_R = 643{,}92 \text{ mm}, \tag{10.20}$$

$$h_{teziste} = 290 \text{ mm}. \tag{10.21}$$

Zbývá ještě zavést podmínku:

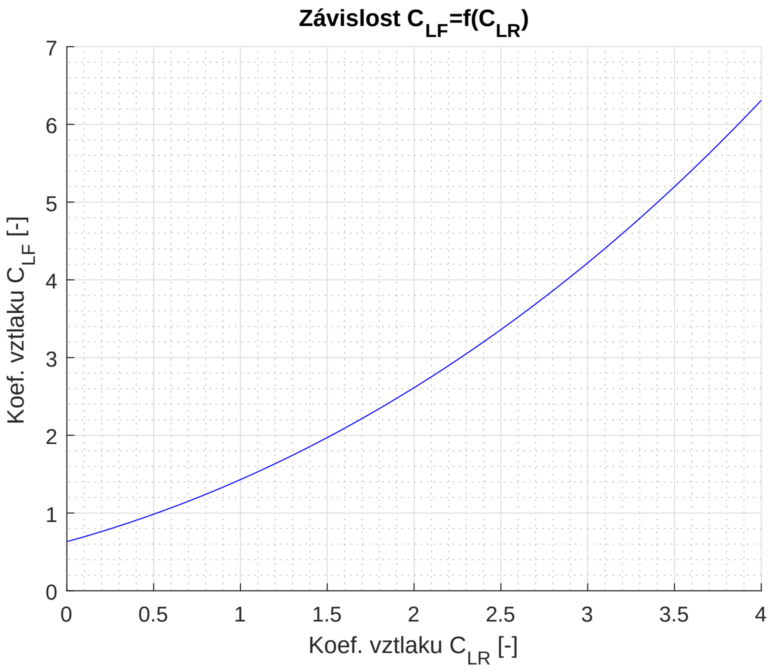
$$R_F = R_R = R, \tag{10.22}$$

pak lze do rovnice 10.3 dosadit za R_F a R_R z rovnice 10.2. Do rovnice 10.3 lze dále dosadit za T_r z rovnice 9.1. Dosadí se i rovnice 10.4 až 10.21. Po úpravách a vyčíslení vychází vztah pro $v_\infty = 50 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$:

$$-0{,}006669 \cdot C_{LF}^2 + 0{,}520510 \cdot C_{LF} - (0{,}089553 \cdot C_{LR}^2 + 0{,}314947 \cdot C_{LR} + 0{,}326269) = 0 \tag{10.23}$$

do kterého lze dosadit za C_{LR} hodnoty výsledků c_l z tabulky 8.1. Tato závislost je vykreslena v grafu 10.1.

V tabulce 10.1 jsou pak zahrnuty i měnící se hodnoty c_d, c_l, v_∞ a konstantní $c_m = -0{,}5$ z tabulky 8.1. V obou případech je vidět, že pro umístění působiště aerodynamických sil do těžiště je potřeba vyvinout předním křídlem poměrně větší přítlak než křídlem zadním. Nicméně pokud se takového přítlaku nedosáhne, bude se působiště aerodynamických sil nacházet vzadu od těžiště, což v rozumné míře nemusí způsobit potíže.



Graf 10.1: Závislost $C_{LF} = f(C_{LR})$ s konstantním koeficientem odporu $C_{D0} = 0{,}08$ a $C_M = -0{,}5$ pro obě křídla, rychlost $v_\infty = 50\ \ \mathrm{km} \cdot \mathrm{h}^{-1}$

Tabulka 10.1: Hodnoty nastavení C_{LF} v závislosti na C_{LR}, C_D0 a v_∞ se vstupními daty z tabulky 8.1

			$v_\infty = 30\ \ \mathrm{km} \cdot \mathrm{h}^{-1}$		
α	12°	13°	13,5°	14°	15°
C_{LR}	-2,6595832	-2,7146264	-2,7756824	-2,8053583	-2,8833596
C_{LF}	-3,7935435	-3,8795397	-4,0044132	-4,0514163	-4,2025814
			$v_\infty = 50\ \ \mathrm{km} \cdot \mathrm{h}^{-1}$		
α	12°	13°	13,5°	14°	15°
C_{LR}	-2,6815091	-2,7706221	-2,8172287	-2,8460145	-2,9152474
C_{LF}	-3,6456300	-3,8125571	-3,8987483	-3,9468349	-4,0706639
			$v_\infty = 80\ \ \mathrm{km} \cdot \mathrm{h}^{-1}$		
α	12°	13°	13,5°	14°	15°
C_{LR}	-2,8073024	-2,8251050	-2,8290219	-2,8684859	-2,8614528
C_{LF}	-3,8159764	-3,8585059	-3,8637261	-3,9353489	-3,9125856

11 Efekty řešení

11.1 Přidaná hmotnost

I když je většina zadního křídla tvořena uhlíkovým kompozitem, je hmotnost dle CAD dat rovna přibližně $m \approx 12{,}42$ kg. Tato hmotnost sice zvyšuje přítlak na pneumatiky, ale zároveň zvyšuje setrvačnou hmotnost, tj. pro dané zrychlení je potřeba větší síla dle druhého Newtonova zákona:

$$\mathbf{F} = m\mathbf{a}. \tag{11.1}$$

11.2 Přítlak, odpor a rychlost

Doposud zde byly uvedeny převážně hodnoty koeficientů bez hodnot přítlaku a odporu působícího na vůz. Tyto hodnoty shrnuje tabulka 11.1, kde je uvažováno zadní křídlo z návrhu v kapitole 7, přední křídlo z přibližného návrhu z kapitoly 10.1 a sumace těchto hodnot.

11.3 Zatáčení

V kapitole 6 byl zmiňován vliv na zatáčení pomocí polárního diagramu na obrázku 6.3. Lze tedy uvažovat modelový příklad vozu při rovnoměrném pohybu do zatáčky, na který působí pouze dostředivá síla a reakce mezi pneumatikami a vozovkou. Je možné psát rovnici:

$$\varphi F_z = \frac{v^2}{r} m, \tag{11.2}$$

kde φ je součinitel adheze (pro pneumatiky FS TUL Racing lze stanovit dle výrobce $\varphi = 2{,}1$), F_z je síla ve směru osy z (viz. rovnováha sil v kapitole 10.1), v je rychlost vozu, r je poloměr zatáčení a m je hmotnost vozu ($m = 250$ kg). Za F_z se dosadí:

$$F_z = mg + \frac{1}{2}\rho v^2 S |C_{LR}|. \tag{11.3}$$

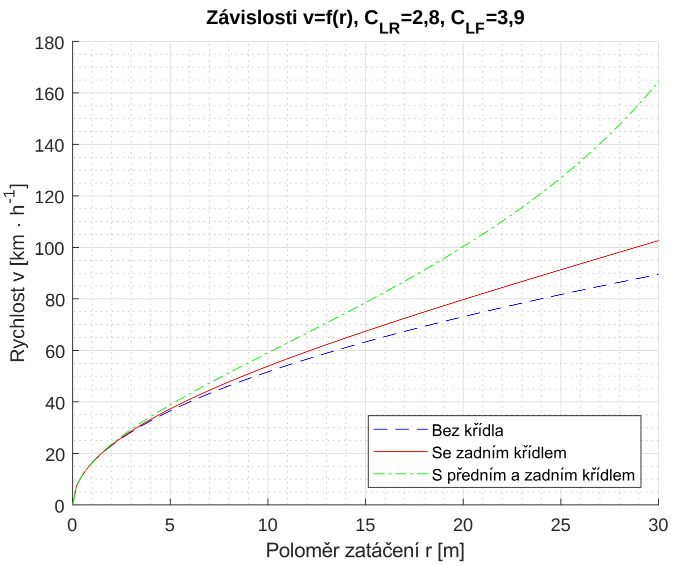
Po dosazení se vyjádří rychlost v:

$$v = \sqrt{\frac{mg}{\frac{m}{r\varphi} - \frac{1}{2}\rho S\, |C_{LR}|}}. \tag{11.4}$$

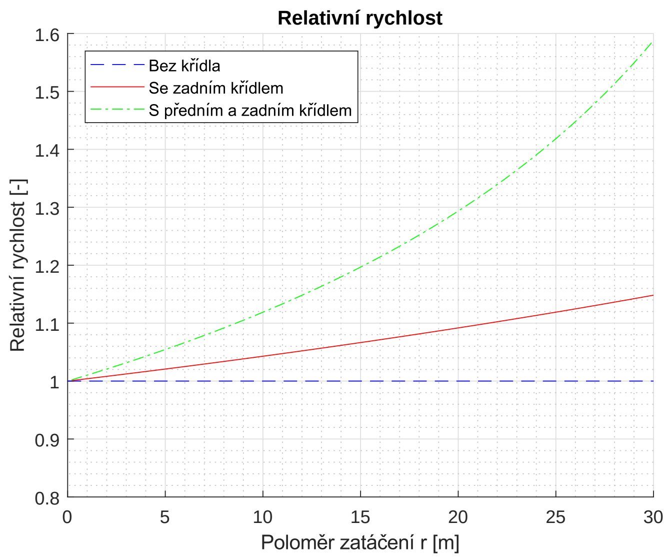
Tabulka 11.1: Shrnutí působícího přítlaku a odporu

			$v_\infty = 30\ \mathrm{km \cdot h^{-1}}$		
α	12°	13°	13,5°	14°	15°
L_R (N)	62,7705212	64,0696310	65,5106514	66,2110525	68,0520109
L_F (N)	124,0416787	126,8535892	130,9367164	132,4736288	137,4164405
$\sum L$ (N)	186,8122000	190,9232201	196,4473678	198,6846813	205,4684514
D_R (N)	26,8284342	27,7038770	29,3347954	29,8104371	31,6721610
D_F (N)	98,4010571	102,5610148	109,7366721	112,1069699	120,8244186
$\sum D$ (N)	125,2294913	130,2648918	139,0714675	141,9174070	152,4965796
			$v_\infty = 50\ \mathrm{km \cdot h^{-1}}$		
α	12°	13°	13,5°	14°	15°
L_R (N])	175,8000234	181,6422812	184,6978149	186,5850150	191,1239313
L_F (N)	331,1255186	346,2871847	354,1157589	358,4833760	369,7305284
$\sum L$ (N)	506,9255419	527,9294659	538,8135737	545,0683910	560,8544597
D_R (N)	74,9760435	80,6892719	83,5720693	85,0148652	88,9681132
D_F (N)	252,0189416	276,3615618	289,1111738	295,8735564	314,2952066
$\sum D$ (N)	326,9949851	357,0508337	372,6832431	380,8884216	403,2633198
			$v_\infty = 80\ \mathrm{km \cdot h^{-1}}$		
α	12°	13°	13,5°	14°	15°
L_R (N])	471,1604367	474,1483160	474,8057045	481,4291005	480,2487081
L_F (N)	887,2902433	897,1791953	898,3930067	915,0467188	909,7537898
$\sum L$ (N)	1358,4506800	1371,3275113	1373,1987112	1396,4758193	1390,0024978
D_R (N)	211,6335916	216,0130227	216,3026662	222,2904980	219,6039940
D_F (N)	708,6273661	726,6626568	728,2025296	755,1285384	744,3489506
$\sum D$ (N)	920,2609577	942,6756795	944,5051958	977,4190364	963,9529447

Pokud se bude pro tento příklad uvažovat konstantní koeficient vztlaku $C_{LR} \approx -2{,}8$ dle předchozí analýzy, lze rovnici 11.4 znázornit v grafu 11.1, kde je vidět, že vůz se zadním přítlačným křídlem může jet v dané zatáčce rychleji než vůz bez křídla. Pokud se připočte přítlak modelového předního křídla z kapitoly 10.1, kde vztlaku zadního křídla $C_{LR} \approx -2{,}82$ odpovídá hodnota předního křídla $C_{LF} \approx -3{,}9$, je tento efekt ještě větší. Jak lze vidět, největšího efektu lze dosáhnout při vysokých rychlostech. V grafu 11.2 je ten samý jev zobrazen relativně pro lepší názornost.



Graf 11.1: Porovnání vozu s křídly a bez křídla



Graf 11.2: Porovnání vozu s křídly a bez křídla – relativně

12 Závěr

Cílem této bakalářské práce bylo provést rešerši soutěžních pravidel a literatury věnující se aerodynamice vozidel. Dále bylo cílem provést návrh a analýzu zvoleného aerodynamického prvku a odhadnutí efektů na vozidlo. Všechny tyto části zároveň korespondovaly s požadavky týmu FS TUL Racing a jejich novým vozem.

Teoretická část práce se na začátku věnovala popisu reálné tekutiny a silovému působení na těleso v proudu takovéto tekutiny. Dále byly zmíněny vlastnosti profilů, křídel konečného rozpětí a křídel pro vysoký vztlak, resp. přítlak. V neposlední řadě byly uvedeny důsledky zvýšeného přítlaku na vozidlo. Zde je vhodné vyzdvihnout, že největší efekt má zvýšený přítlak při zatáčení, brzdění a kombinaci obou těchto případů.

V praktické části si autor vybral pro návrh zadní křídlo. Jako profil byl použit dvouprvkový profil složený ze dvou leteckých profilů pro nízká Reynoldsova čísla a vysoký vztlak, resp. přítlak. Tato konfigurace byla dle pravidel vyhotovena i do 3D CAD modelu kompletního křídla, které je možné umístit na nový vůz.

Navržený dvouprvkový profil byl analyzován 2D CFD výpočtem v ANSYS Fluent pro pět úhlů náběhu a tři rychlosti proudění. Výsledky této analýzy řádově odpovídají publikovaným experimentálním výsledkům pro jednoduché letecké profily pro nízká Reynoldsova čísla a vysoký vztlak, resp. přítlak. Výsledky byly dále využity pro stanovení rovnováhy vozidla. Z rovnic rovnováhy a doplňujících vztahů byla stanovena závislost koeficientu vztlaku předního křídla na koeficientu vztlaku zadního křídla. Z výsledků vyplynulo, že koeficient přítlaku předního křídla musí být přibližně 1,4x větší než koeficient přítlaku zadního křídla, aby těžiště splynulo s působištěm aerodynamických sil.

Byly analyzovány celkem tři efekty, a to přidaná hmotnost, silové zatížení od odporu a vztlaku a vliv zvýšeného přítlaku na rovnoměrný pohyb do zatáčky. Přidaná hmotnost činila přibližně $m \approx 12{,}42$ kg a zvyšuje setrvačnou hmotnost. Silová zatížení od odporu a vztlaku lze využít pro nadimenzování celé sestavy. Při rovnoměrném pohybu do zatáčky bylo zřejmé, že vyšší přítlak zvyšuje maximální rychlost, kterou se vůz může pohybovat do zatáčky s daným poloměrem. Tento jev byl více markantní se zvyšující se rychlostí.

Pro potvrzení výsledků z 2D CFD výpočtu je nutné je validovat s experimentálně zjištěnými hodnotami navrženého dvouprvkového profilu nejlépe v aerodynamickém tunelu.

Tato práce by měla pro tým FS TUL Racing působit jako vstup do problematiky aerodynamických prvků a jejich vlivů na vozidlo. Lze jednak pokračovat v návrhu zadního křídla, provést optimalizaci tvaru s ohledem na maximální přítlak a minimální odpor. Lze se také vydat směrem experimentálním a provést validaci výsledků. Na druhou stranu je také možné začít s vývojem jiných aerodynamických prvků např. detailním návrhem předního křídla či podlahy s difuzory. Další výzvou je i analýza kompletního vozu ať už výpočtově pomocí CFD nebo experimentálně. Jen tak lze vhodně zachytit a analyzovat souhru všech aerodynamických prvků spolu s karosérií či tvarem rámu.

Použitá literatura

[1] Monopost. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2018-06-07]. Dostupné z: https://cs.wikipedia.org/wiki/Monopost

[2] *2017-18 Formula SAE Rules* [online]. , 175 [cit. 2017-10-09]. Dostupné z: http://www.fsaeonline.com/content/2017-18%20fsae%20rules%209.2.16a.pdf

[3] *Formula Student Rules 2018* [online]. , 130 [cit. 2018-06-05]. Dostupné z: https://www.formulastudent.de/uploads/media/FS-Rules_2018_V1.1.pdf

[4] Formula SAE. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2017-10-09]. Dostupné z: https://en.wikipedia.org/wiki/Formula_SAE

[5] FSAE History. *FSAE Online* [online]. [cit. 2017-10-09]. Dostupné z: https://www.fsaeonline.com/page.aspx?pageid=c4c5195a-60c0-46aa-acbf-2958ef545b72

[6] *Formula Student Combustion - World Ranking List* [online]. [cit. 2018-06-06]. Dostupné z: https://mazur-events.de/fs-world/C/

[7] Saturday Photos. In: *FS Czech SMUGMUG* [online]. 2017 [cit. 2018-06-06]. Dostupné z: https://fsczech.smugmug.com/Photo/2017/Saturday/i-FM86mhM/A

[8] NOSKIEVIČ, Jaromír. *Mechanika tekutin*. Bratislava: Alfa, 1987.

[9] NOŽIČKA, Jiří. *Mechanika tekutin*. Praha: Vydavatelství ČVUT, 2004. ISBN 80-01-02865-8.

[10] ANDERSON, John D. *Fundamentals of aerodynamics*. 2nd ed. New York: McGraw-Hill, c1991. ISBN 0070016798.

[11] KATZ, Joseph. *Race car aerodynamics: designing for speed*. 1995. Cambridge, MA, USA: R. Bentley, c1995. ISBN 0837601428.

[12] ABBOTT, Ira H. A. a Albert E. von DOENHOFF. *Theory of Wing Sections: Including a Summary of Airfoil Data*. New York: MgGraw-Hill, 1949.

[13] Induced Drag Coefficient. *NASA Glenn Research Center* [online]. Cleveland, Ohio [cit. 2018-06-30]. Dostupné z: https://www.grc.nasa.gov/WWW/k-12/VirtualAero/BottleRocket/airplane/induced.html

[14] PETŘÍKOVÁ, Markéta a Pavel KRYŠTŮFEK. *Tabulky a diagramy pro termodynamiku*. šesté vydání. Liberec: Technická univerzita v Liberci, 2016. ISBN 978-80-7494-272-3.

[15] *UIUC Airfoil Coordinates Database* [online]. Urbana-Champaign, 2018 [cit. 2018-06-18]. Dostupné z: http://m-selig.ae.illinois.edu/ads/coord_database.html

[16] MCBEATH, Simon. *Competition car aerodynamics*. Newbury Park, Calif., USA: Haynes North America, 2006. ISBN 1844252302.

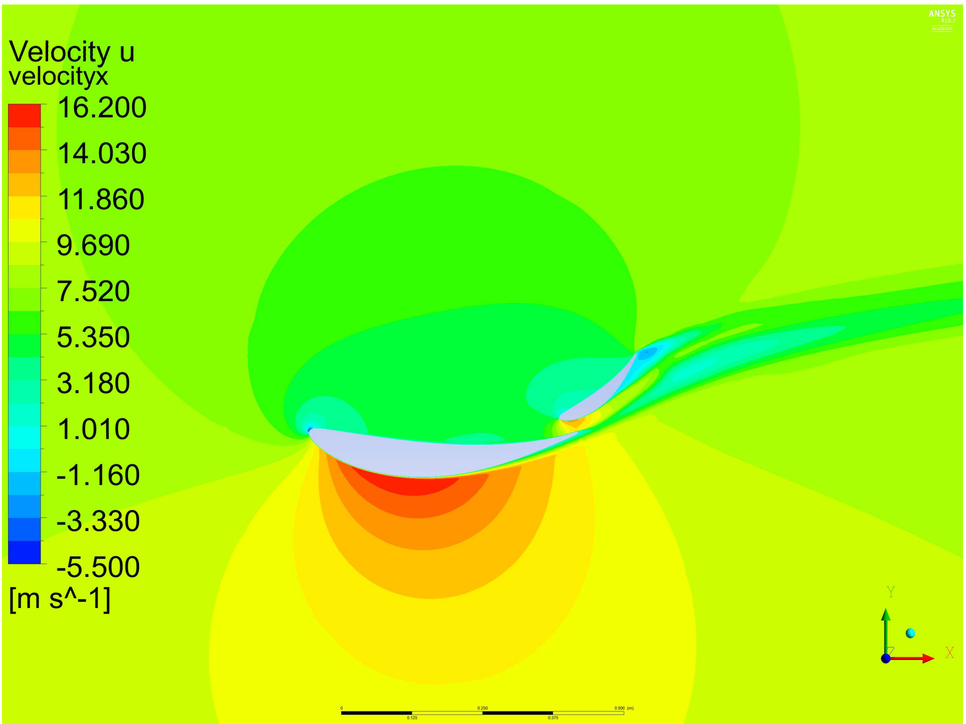
[17] WORDLEY, Scott a SAUNDERS. Aerodynamics for Formula SAE: A Numerical, Wind Tunnel and On-Track Study. *SAE Paper*. 2005, **2006**(2006-01-0808), 13 stran.

[18] PRASANTH, Aravind, Sadjyot BISWAL, Aman GUPTA a Azan BARODAWALA. Complete Design and Optimization of the Aerodynamics of a FSAE Car using Solid works ANSYS & XFLR5. *Proceedings of the World Congress on Engineering 2016*. London, U.K.: WCE, 2016, **2016**(Vol II). ISSN 2078-0966.

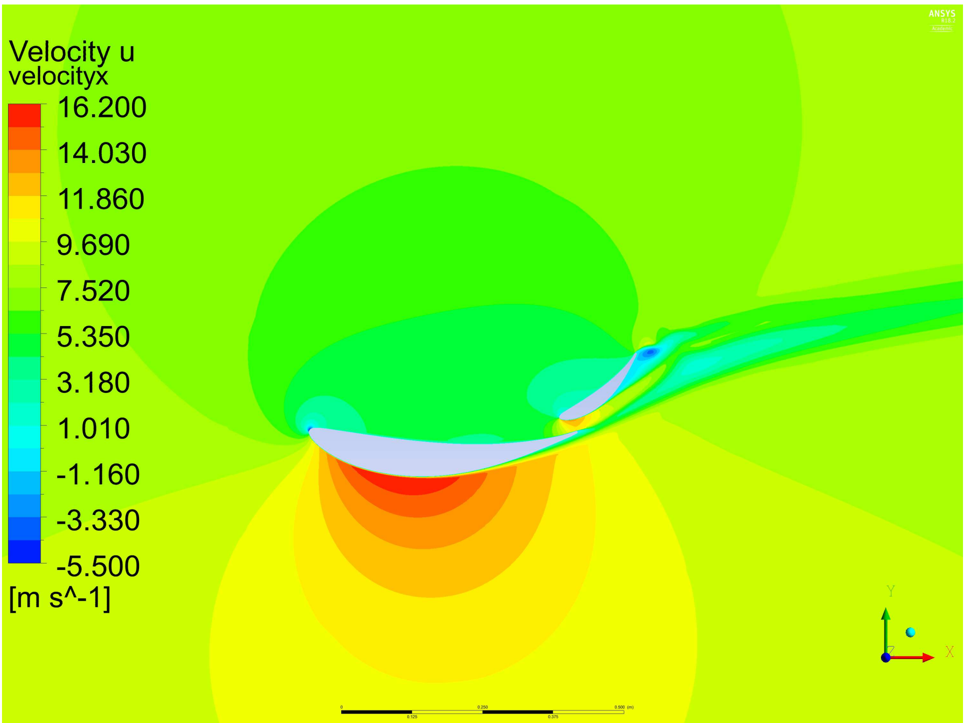
[19] ŠVÍGLER, Jaromír. *Mechanika vozidel: Doprovodný učební text*. Plzeň, 2013. Dostupné také z: https://www.kme.zcu.cz/download/predmety/468-mechanika-vozidel.pdf

[20] SELIG, Michael S. a James J. GUGLIELMO. High-Lift Low Reynolds Number Airfoil Design. *Journal of Aircraft*. 1997, **1997**(Vol. 34, No. 1), 8 stran. DOI: https://doi.org/10.2514/2.2137. ISSN 0021-8669.

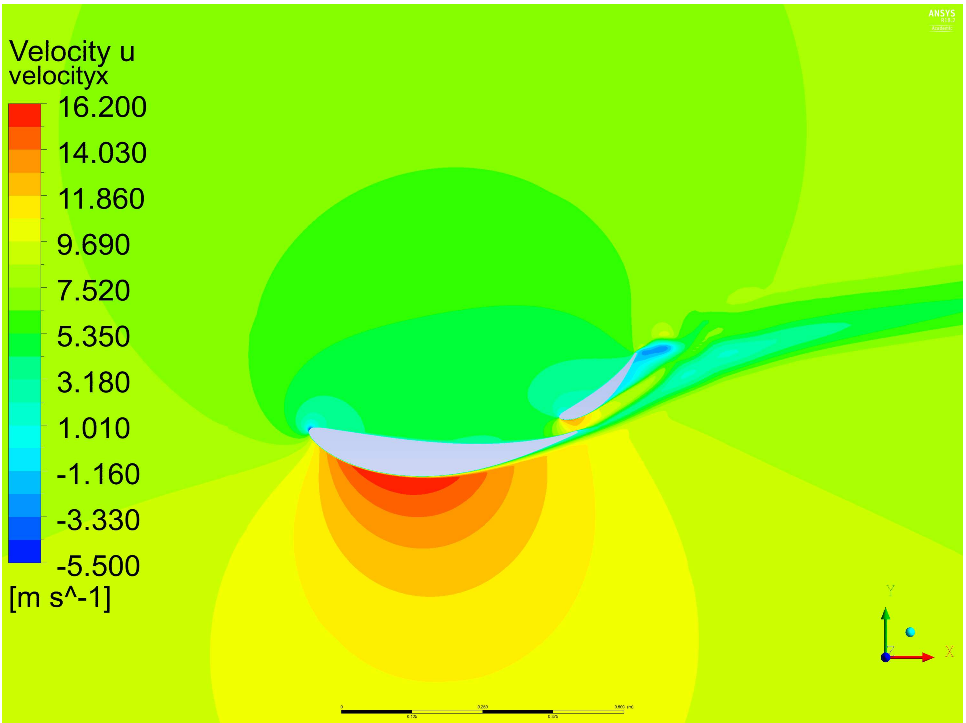
A Kontury rychlosti v ose x



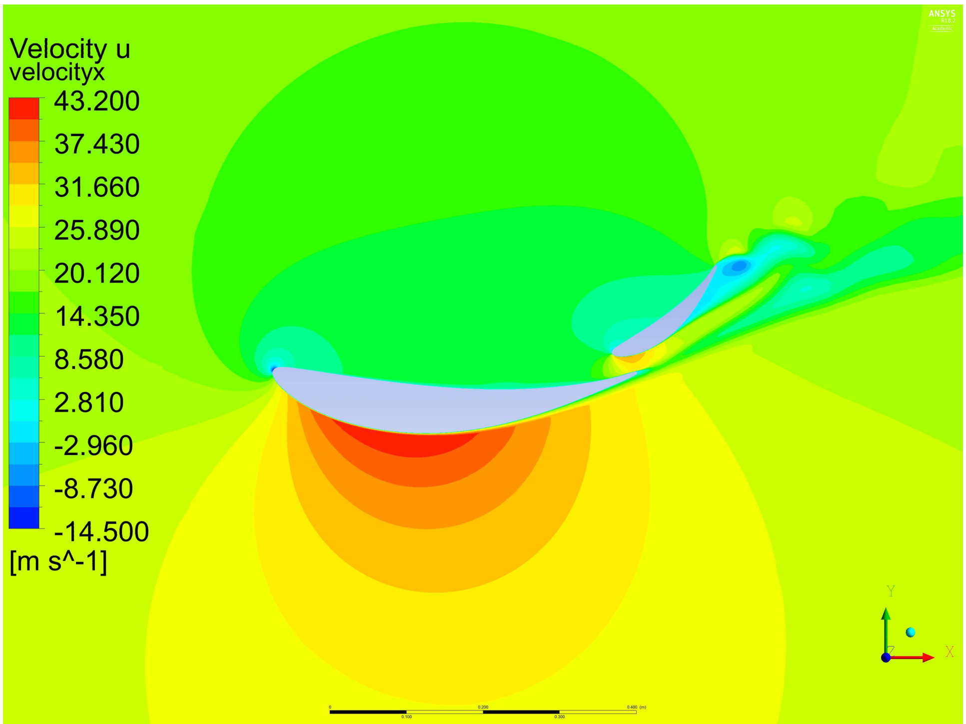
Obrázek A.0.1: Rychlost v ose x při $v_\infty = 30\ \mathrm{km \cdot h^{-1}}$, $\alpha = 13{,}5°$ a $t = 0{,}020\ \mathrm{s}$



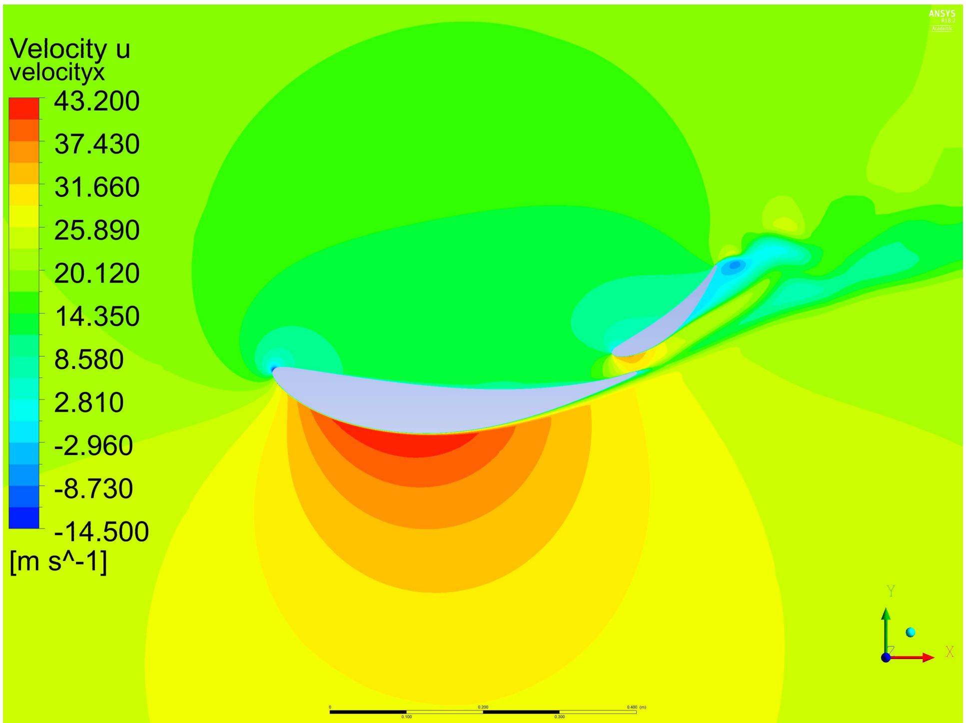
Obrázek A.0.2: Rychlost v ose x při $v_\infty = 30\ \mathrm{km \cdot h^{-1}}$, $\alpha = 13{,}5°$ a $t = 0{,}028\ \mathrm{s}$



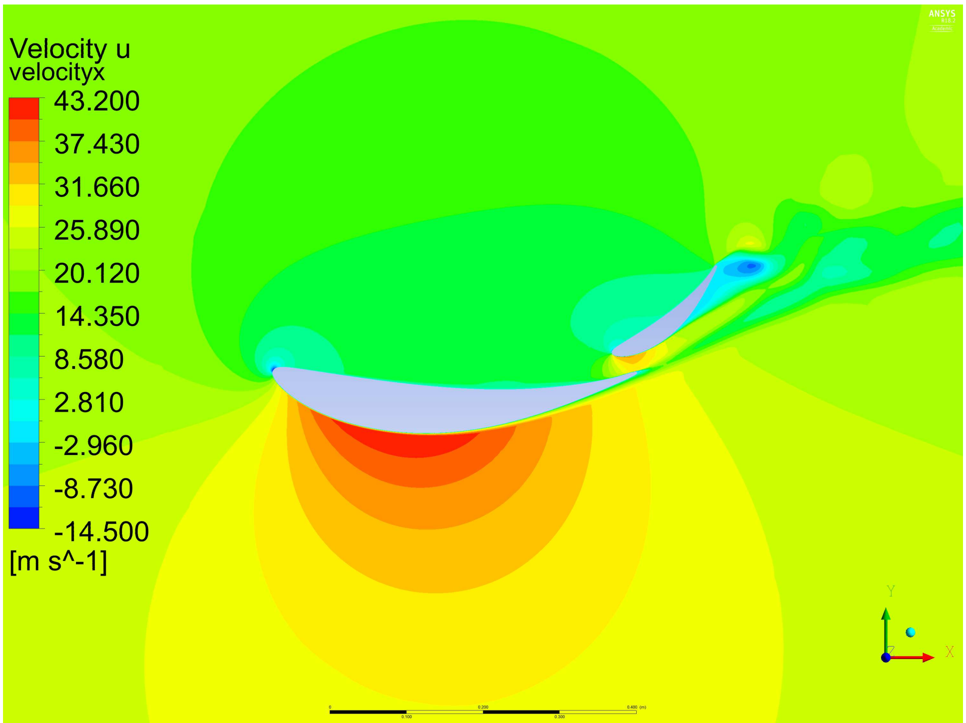
Obrázek A.0.3: Rychlost v ose x při $v_\infty = 30\ \mathrm{km \cdot h^{-1}}$, $\alpha = 13{,}5°$ a $t = 0{,}042\ \mathrm{s}$



Obrázek A.0.4: Rychlost v ose x při $v_\infty = 80\ \mathrm{km \cdot h^{-1}}$, $\alpha = 13{,}5°$ a $t = 0{,}020\ \mathrm{s}$



Obrázek A.0.5: Rychlost v ose x při $v_\infty = 80\ \mathrm{km \cdot h^{-1}}$, $\alpha = 13{,}5°$ a $t = 0{,}028\ \mathrm{s}$



Obrázek A.0.6: Rychlost v ose x při $v_\infty = 80\ \mathrm{km \cdot h^{-1}}$, $\alpha = 13{,}5^\circ$ a $t = 0{,}042\ \mathrm{s}$